



## **Abschlussbericht**

## **SlabHeat**

September 2009



**ZENERGY POWER**

Status		Vertraulichkeit		Veröffentlichung	
Freigegeben	<input type="checkbox"/>	öffentlich	<input type="checkbox"/>	Internet	<input type="checkbox"/>
Geprüft	<input type="checkbox"/>	Nur für Projektmitglieder	<input type="checkbox"/>	Intranet	<input type="checkbox"/>
In Korrektur	<input type="checkbox"/>	Nur für Personenkreis eintragen	<input type="checkbox"/>	Papierdokument	<input type="checkbox"/>
Entwurf	<input type="checkbox"/>			E-Mail-Versand	<input type="checkbox"/>
In Bearbeitung	<input type="checkbox"/>			Sonstiges	<input type="checkbox"/>

Abschlussbericht

## SlabHeat

Firma:	Zenergy Power GmbH Heisenbergstr. 16, 53359 Rheinbach, Germany		
Verantwortlicher:	Jens Krasue		
Projektname:	SlabHeat		
Titel:	Entwicklung eines HTS-Induktionsheizers für die Erwärmung von magnetischen Werkstücken oder ungleichförmigen Metallblöcken - Machbarkeitsuntersuchungen		
Dokumenten-Nr.:	ZP/XY-YYYY-MM-DD		
Datum:	DD/MM/YYYY		
Auftraggeber:	DBU		
Autor(en):	jkr	Geprüft von:	
Verteilung:	CB, CF, DBU		
<b>Zusammenfassung</b>			
<p>Das Projekt SlabHeat hat neue Möglichkeiten des Magnetheizers auf HTS-Basis untersucht. Dabei soll nicht wie bisher das Werkstück im magnetischen Gleichfeld bewegt werden, sondern Teile des magnetischen Kreises. Es sind mehrere Optionen mit Hilfe der FE-Methode untersucht worden. Dabei wurde nach anfänglicher Basisevaluation die Ausführung nach dem HTS-Plate-Prinzip favorisiert. Dabei werden mehrere HTS-Spulen auf einen Teller aufgebracht und in der Nähe eines flachen Werkstücks rotiert. Eine solche Anlage erreicht eine ausreichende Heizleistung, wenn sich auf jeder Seite des flachen Werkstücks ein solcher Teller befindet und beide synchron drehen. Aufgrund heutiger hoher Kosten einzelner Komponenten ist aber erst mit einer breiten Markteinführung zu rechnen, wenn diese Anlagen günstiger sind. Der Wirkungsgrad einer solchen Maschine liegt erwartungsgemäß deutlich über den häufig eingesetzten Wechselstrominduktionsöfen und lässt eine erhebliche Energieeinsparung erwarten.</p>			

### Bearbeitungen

lfd. Nr.	Datum	Aktion	modifizierte Seiten
1	23/07/09	veröffentlicht	
2	2009-08-15	Ergänzungen	verschiedene

Zenergy Power GmbH

**Entwicklung eines HTS-Induktionsheizers für die Erwärmung  
von magnetischen Werkstücken oder ungleichförmigen Metall-  
blöcken - Machbarkeitsuntersuchungen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 26815 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Jens Krause

September 2009



# 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	3
2	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	4
3	Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen	5
4	Zusammenfassung	6
5	Einleitung	6
6	Hauptteil	9
6.1	Elektromagnetische Simulation bewegter Körper	9
6.2	Simulation – ROTH (WP 1.1)	13
6.3	Simulation – WOBBLER (WP 1.3)	15
6.4	Simulation – HTS-PLATE (WP 1.2)	17
6.5	Konstruktion – HTS-PLATE (WP 1.2)	20
6.6	Wirkungsgradbetrachtung – HTS-Plate (WP 1.2)	23
6.7	Kostenabschätzung – HTS-PLATE	24
7	Schutzrechtssituation	25
8	Nebeneffekte	26
9	Fazit	26
10	Anhang	28
10.1	Aufwärmung bei HTS-PLATE	28
10.2	Stromfluss bei ROTH	28

## 2 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Prinzip-Skizzen der Optionen ROTH (links), HTS-PLATE (mitte) und WOBBLER (rechts)	7
Abbildung 2: Strukturiertes Netz an der Grenzfläche zwischen Rotor und Stator.	10
Abbildung 3: Volumennetz	11
Abbildung 4: Flussdiagramm der transienten Simulation	12
Abbildung 5: Rotierendes Joch.	13
Abbildung 6: Rotierendes Joch: Heizleistung in den ersten drei Umdrehungen	13
Abbildung 7: Rotierendes Joch: Erwärmung der Werkstücke.	14
Abbildung 8: Aufbau des Doppel-Wobblers.	15
Abbildung 9: Magnetische Vorzugsrichtung im rotierenden Zylinder	15
Abbildung 10: Doppel-Wobbler, Heizleistung für drei Umdrehungen bei 20 Hz.	15
Abbildung 11: Doppel-Wobbler; Erwärmung eines Werkstücks bei 20 Hz nach 300 s. Abgebildet hier ein Werkstück von zweien.	16
Abbildung 12: Doppel-Wobbler; Amplitude der Kraftflussdichte an vier Punkten.	16
Abbildung 13: HTS-PLATE Übersicht.	17
Abbildung 14: HTS-PLATE; Stromfluss in den Spule auf dem Rotor.	17
Abbildung 15: HTS-PLATE: ein Layout ist geeignet falls $L > d$	18
Abbildung 16: HTS-PLATE Ausführung zwei Rotoren.	18
Abbildung 17: HTS-PLATE; Aufheizung der Platte, wenn der Rotor über die Platte fährt.	19
Abbildung 18: HTS-PLATE; Form der Wirbelstromfeldes.	19
Abbildung 19: HTS-PLATE; Erwärmung nach 100 s.	19
Abbildung 20: HTSPLATE; Leistung bei 10 Hz in den ersten vier Umdrehungen.	19
Abbildung 21: Kühlsysteme für Drehverbindungen der Fa. Cryozone.	20
Abbildung 22: Schema des Wärmefflusses mit Neon-Kühlung.	20
Abbildung 23: Schalenkonstruktion der Welle.	21
Abbildung 24: Antriebsnabe mit zentraler Verdampfungseinheit.	21
Abbildung 25: HTS-PLATE Konstruktionsvorschlag.	22
Abbildung 26: HTS-PLATE, Schnitt durch Rotor.	22
Abbildung 27: Joch mit Verstärkungsplatte.	23
Abbildung 28: Wirkungsgradvergleich HTS-Anlage und AC-Induktion.	24
Abbildung 29: Kostenaufstellung für einen Rotor nach Bauart HTS-PLATE	25
Abbildung 30: Zeitlicher Ablauf der Aufheizung bei HTS-PLATE.	28
Abbildung 31: Zeitlicher Ablauf der Wirbelströme bei ROTH.	29

### 3 Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen

- **FEM (Finite-Element-Methode):** Verfahren, um physikalische oder technische Phänomene am Computer zu simulieren. Die Geometrie wird vereinfacht und in kleine Elemente (Tetraeder, Würfel,..) aufgeteilt. Je feiner diese Diskretisierung ist desto näher ist das Ergebnis an der Wirklichkeit. In der industriellen Produktentwicklung einsetzbar.
- **HTS:** Hochtemperatur-Supraleiter. Supraleiter mit einer Sprungtemperatur oberhalb der des flüssigen Stickstoffs (-196°C entsprechend 77 K), also technisch einfach einzusetzen.
- **Hertz (Hz):** Einheit für Frequenz oder Drehzahl.
- **Induktion:** Physikalisches Prinzip nach dem bei veränderlichen Magnetfeld ein elektrisches Feld erzeugt wird.
- **Induktionsheizung:** Auf dem Induktionsprinzip beruhender Ofen. Gewöhnlich mit Wechselstrom gespeiste Kupferspulen.
- **Kelvin (K):** Temperaturskala, die am absoluten Nullpunkt (-273°C) beginnt. 0°C entspricht 273 K.
- **Supraleiter:** Einige elektrische Leiter verlieren bei sehr tiefen Temperatur (nahe dem abs. Nullpunkt) ihren elektrischen Widerstand vollkommen. Unterhalb der Sprungtemperatur ist der Widerstand Null, in der Praxis sehr gering, weil normaleitende Teile im Stromkreis bleiben.
- **Tesla (T):** Einheit der magnetischen Kraftflussdichte. Das Erdmagnetfeld beträgt am Äquator 30  $\mu\text{T}$ , durch Supraleiter können mehrere Tesla in großen Volumina erzeugt werden.
- **TTS:** Tieftemperatur-Supraleiter. Supraleiter mit einer Sprungtemperatur deutlich unterhalb der des flüssigen Stickstoffs (-196°C), also nicht technisch einfach einzusetzen.
- **Wirbelstrom:** In Metallen führt Induktion zu einem elektrischen Strom, der geschlossenen Strompfaden folgt. Führt zur Erwärmung des Metalls.
- **Wirkungsgrad, Effizienz:** Verhältnis aus Nutzenergie zu eingesetzter Energie, gewöhnlich in Prozent. 100 % bedeutet verlustfrei.

## 4 Zusammenfassung

Das Projekt SlabHeat hat neue Möglichkeiten des Magnetheizers auf HTS-Basis untersucht. Dabei soll nicht wie bisher das Werkstück im magnetischen Gleichfeld bewegt werden, sondern Teile des magnetischen Kreises. Es sind mehrere Optionen mit Hilfe der FE-Methode untersucht worden. Nach anfänglicher Basisevaluation wurde die Ausführung nach dem HTS-Plate-Prinzip favorisiert. Dabei werden mehrere HTS-Spulen auf einen Teller aufgebracht und in der Nähe eines flachen Werkstücks rotiert. Eine solche Anlage erreicht eine ausreichende Heizleistung, wenn sich auf jeder Seite des flachen Werkstücks ein solcher Teller befindet und beide synchron drehen. Aufgrund heutiger hoher Kosten einzelner Komponenten ist aber erst mit einer breiten Markteinführung zu rechnen, wenn diese Anlagen günstiger sind. Der Wirkungsgrad einer solchen Maschine liegt erwartungsgemäß deutlich über den häufig eingesetzten Wechselstrominduktionsöfen und lässt eine erhebliche Energieeinsparung erwarten.

## 5 Einleitung

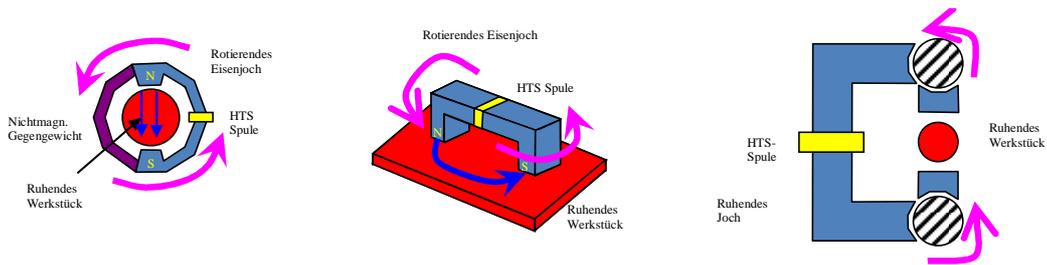
Das Projekt hatte sich zum Ziel gesetzt einen neuartigen Induktionsheizer für die Erwärmung von magnetischen Werkstücken (z. B. Stahl oder Gusseisen) oder unförmigen Metallblöcken (z. B. Stangen, flache Blöcke, Platten) unter Ausnutzung der Hochtemperatur-Supraleitungstechnik zu entwickeln. Die Erwartung ist, dass der Wirkungsgrad eines Gesamtsystems 80-85% erreicht, im Vergleich zu ca. 40-70% bei konventionellen Heizmethoden (z. B. Lichtbogenofen, Induktionsofen oder Gasofen), die in der entsprechenden verarbeitenden Industrie eingesetzt werden.

Für viele Verarbeitungsschritte in der metallverarbeitenden Industrie müssen die Werkstücke erhitzt werden. Für Umformungsprozesse (z. B. Schmieden, Pressen, Walzen) muss das gesamte Werkstück erwärmt werden, um bearbeitbar zu werden. Andere Prozesse, wie z. B. Härten und Anlassen verlangen nur eine Erhitzung der Oberfläche. Für alle diese Prozesse ist ein hoher Energieeintrag nötig, aber diese sind in der Regel nicht vermeidbar, um den Schritt überhaupt durchführen zu können. Eine bessere Effizienz des Heizers bedeutet also eine große Kostenersparnis. Es werden verschiedene Heiztechniken eingesetzt: Gas, Lichtbogen, Induktion. Die induktive Erwärmung ist dabei vielseitig einsetzbar für die Prozesse: Härten, Schmelzen, Anlassen, Löten, Glühen, Schweißen, Beschichtungen usw.

Induktionserwärmung basiert dabei auf der Änderung eines Magnetfeldes relativ zu einem Werkstück. Aus Sicht des Werkstückes wird das Magnetfeld dabei moduliert. Nach dem physikalischen Induktionsprinzip wird dann ein Wirbelstrom erzeugt der über die Ohmschen Verluste zu einer Erwärmung führt.

Die konventionelle Induktionstechnik mit Hilfe eines Wechselfeldes hat als entscheidenden Nachteil, dass ein beträchtlicher Teil der eingesetzten Energie als Abwärme in den Spulen auftritt. Diese müssen mit großem Aufwand gekühlt werden und bedeuten somit einen schlechten Wirkungsgrad.

Das zugrunde liegende Prinzip dieses Vorhabens basiert aber nicht, wie bei einem herkömmlichen Induktionsheizer auf einem durch Wechselstrom (AC) moduliertem Magnetfeld, das in dem zu erwärmenden Werkstück generiert wird, sondern auf der Verwendung eines Gleichfeldes (DC), das durch Hochtemperatursupraleiter erzeugt wird. Die Modulation des Magnetfeldes wird hierbei durch Bewegung des Werkstückes mit einem Elektromotor effizient erreicht. Dieses Prinzip wurde bereits für Anwendungen in der Nicht-Eisen-Industrie erfolgreich in einem von der DBU geförderten Projekt (ROSINE, AZ 22557) entwickelt und gebaut.



**Abbildung 1: Prinzip-Skizzen der Optionen ROTH (links), HTS-PLATE (mitte) und WOBLER (rechts)**

Im Unterschied zu ROSINE wird in SlabHeat vorgeschlagen, dass Werkstück ruhen zu lassen und Teile des Magneten zu bewegen. Das kann Vorteile haben, wenn das Werkstück ferromagnetisch oder nicht zylindrisch ist. In solchen Fällen ist die Halterung des Werkstücks, wegen der Stärke der wirkenden Kräfte besonders schwierig. Drei Optionen sind von Beginn an definiert worden und wurden näher untersucht.

- A) ROTH: Eine Möglichkeit ist es, nicht das Werkstück sondern den ganzen Magneten oder Teile des Magneten rotieren zu lassen. Das stellt hohe Anforderungen an die Konstruktion des Kühlsystems für die HTS-Spule, da es u. U. mitrotieren muss oder eine nichtzentrische Zuführung der Kälte gewährleistet werden muss (siehe Abbildung 1 (links)).
- B) HTS-PLATE: Ein Satz von mehreren HTS- Magneten wird tellerförmig an einer Platte befestigt. Diese Platte rotiert in der Nähe einer zu erwärmenden Platte, so dass die magnetischen Feldlinien das Werkstück durchdringen. Eine zusätzliche lineare Bewegung über die Fläche hinweg würde auch die Erwärmung größerer Werkstücke erlauben. Hier wird zwar der Magnet rotiert aber die Wärme kann zentrisch abgeführt werden und bekannte Techniken aus dem HTS-Generatorenbau verwendet werden (siehe Abbildung 1 (Mitte)).
- C) WOBLER: Als dritte Option besteht die Möglichkeit den magnetischen Kreislauf zeitlich zu variieren und so das Magnetfeld zu modulieren. Dazu werden verschiedene Methoden untersucht, z. B. wird ein Teil des Eisenjochs durch einen Verbundwerkstoff gefertigt und dieses Teil wird rotiert. Dieser Verbund macht eine richtungsabhängige Magnetisierung möglich. Das zu erwärmende Werkstück wird damit einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld ausgesetzt und es werden Wirbelströme induziert (siehe Abbildung 1 (rechts)).

Die Wärmeenergie stammt beim DC-Induktionsheizer aus einer Drehbewegung, die gebremst wird (nach dem Prinzip der Wirbelstrombremse). Die Energie wird also durch die Antriebsmotoren bereitgestellt, die in der Praxis sehr hohe Wirkungsgrade (98%) haben. Die erreichbare Drehzahl wird durch die Motoren und Lagerung begrenzt, dabei sind bis zu 50 Hz in der Praxis möglich, das gilt aber bereits als technisch ehrgeizig. Niedrigere Drehfrequenzen dürften leichter und kostengünstiger umsetzbar sein. Nach dem Skin-Effekt tritt eine Abschirmung auf, die von der (linearen) Geschwindigkeit an der Oberfläche abhängt. Die Skin-Tiefe ist aber bei den möglichen Drehzahlen viel größer als bei konventionellen Induktionsöfen, die mit höheren Wechselstromfrequenzen (50 Hz bis zu mehreren kHz) arbeiten. Dadurch ist eine bessere Erwärmung auch im Inneren des Werkstücks erreichbar und im Endergebnis eine homogene Temperaturverteilung.

Die hier zum Einsatz kommenden Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) bedeuten einen großen Effizienzsprung, weil der elektrische Strom in solchen Materialien absolut widerstandsfrei fließt. Damit sind Supraleiter entscheidend für die erwartete Energieeinsparung der hier betrachteten Anlage. In praktischen Ausführungen bleibt jedoch ein kleiner normalleitender Teil im Stromkreis.

Die Spule muss auf eine Temperatur von 20-40 Kelvin (also (-253)-(-233)°C) gekühlt werden, damit Supraleitung auftritt und hohe Stromstärken möglich sind. Trotz dieser tiefen Temperaturen ist der für die Kühlleistung erforderliche Energieeinsatz (ca. 6-15 kW bei Umgebungstemperatur) aber kleiner als bei konventionellen Induktionsöfen, bei denen die Kupferspule gekühlt wird.

Mit Supraleitern kann Strom ohne elektrische Verluste – und somit rohstoffsparender – übertragen werden. Im Gegensatz zu den etablierten Tieftemperatur-Supraleitern (TTS), die mit flüssigem Helium auf -269°C (4 K) gekühlt werden müssen, erreichen Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) bereits bei -196°C (77 K), der Temperatur des flüssigen Stickstoffs, ihre hohe Leitfähigkeit. Dies bedeutet einen erheblich geringeren Kühlaufwand und geringere Kosten beim Betrieb von HTS-Drähten, die gegenüber konventionellen Kupferdrähten eine mehr als 50-100-fach höhere Stromtragfähigkeit aufweisen. Leider weisen im Falle von Wechselstromanwendungen (AC) auch Supraleiter Verluste auf, die dann bei sehr niedrigen Temperaturen abgeführt werden müssen. Im Idealfall werden Supraleiter also im Gleichstrombetrieb (DC) verwendet.

Das von der DBU geförderte Projekt „Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung“ (EnergieEffizienz, AZ 29966-24/0) hat das Ziel bei der Erwärmung von Stahl-Werkstücken zum Schmieden Energie einzusparen. Eine Möglichkeit ist es höher effiziente HTS-Anlagen statt der gebräuchlichen AC-Induktionsheizer zu benutzen; deshalb ist Zenergy Power Teilnehmer im Projekt. Dieses Projekt ist gegenüber dem SlabHeat-Projekt deutlich abgegrenzt: Bei SlabHeat soll das Werkstück ruhen und Teile des magnetische Kreise werden bewegt. Dagegen soll bei EnergieEffizienz die erprobte Variante mit bewegtem Werkstück zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse des Vorhabens, insbesondere verbesserte FEM Modelle, erlauben dabei eine Erstreckung auf Probleme aus diesem Projekt, das somit hiervon ebenfalls profitiert.

Die Ziele des Projektes ist die ökonomische und ökologische Beurteilung der Ansätze. Die ökonomische Komponente beantwortet die Frage, ob eine Maschine eine ausreichende Erwärmungsleistung aufbringt, um für den industriellen Einsatz interessant zu sein, und ob die Herstellungskosten einer solchen Maschine mit den bisher eingesetzten Öfen konkurrieren können. Die ökologische Sicht vergleicht die eingesetzte elektrische Energie mit der Erwärmungsenergie im Werkstück, d. h. den Wirkungsgrad. Bei den eingesetzten Methoden sind Wirkungsgrade zwischen 80-85 % zu erwarten. Die Erwärmungsenergie wird in allen betrachteten Fällen vollkommen aus der Bewegung der Motoren bereitgestellt, die einen sehr hohen Wirkungsgrad besitzen. Der Energieaufwand zur Kühlung der Spule ist gegenüber der Erwärmungsenergie bei den industriellen Erfordernissen gering.

## 6 Hauptteil

Für die drei Optionen des Projektplans wurden ausgiebige FEM-Simulationen mit der professionellen Software Ansys durchgeführt. Das Ziel ist es Aussagen über die zu erwartende Heizleistung zu erhalten und so zunächst die Ideen zu bewerten und das Design zu optimieren. Dazu sind elektromagnetische und thermodynamische Rechnungen durchzuführen.

Zu den drei Optionen wurden jeweils mehrere Varianten gerechnet, von denen hier nur die jeweils vielversprechendste vorgestellt wird.

Allen Optionen gemein ist das Problem Wirbelströme bei sich bewegenden Körpern zu simulieren. Dafür ist eine besondere Simulationstechnik nötig, die zunächst vorgestellt wird.

### 6.1 Elektromagnetische Simulation bewegter Körper

Das physikalische Modell, was den elektromagnetischen Effekten zugrunde liegt, ist in den Maxwell'schen Gleichungen formuliert. Dabei werden elektrische und magnetische Felder in ein Gleichungssystem kombiniert. Man kann die Gleichungen verstehen als Aussagen über Quellen von Feldlinien (Gleichungen mit  $\nabla \cdot$ ) und über Wirbel (Gleichungen mit  $\nabla \times$ ) in den Feldlinien. Für den Fall kleiner Frequenzen (AC) haben die Gleichungen die Form<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E} &= \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \frac{1}{\mu \mu_0} \mathbf{B} &= \mathbf{j} \end{aligned}$$

Die verwendeten Symbole haben die folgenden Bedeutungen:

elektrische Feldstärke (in V/m)	$\mathbf{E}$
magnetische Kraftflussdichte (in T)	$\mathbf{B}$
elektrische Ladungsdichte (As/m <sup>3</sup> )	$\rho$
Stromdichte (in A/m <sup>2</sup> )	$\mathbf{j}$
Dielektrizitätskonstante (materialabhängig)	$\epsilon$
Permeabilität (materialabhängig)	$\mu$
Konstanten	$\epsilon_0, \mu_0$

Die materialabhängigen Werte müssen bekannt sein und ergeben zusammen mit der Geometrie ein Modell für die Anwendung.

Die Stromdichte nimmt je nach Material unterschiedliche Werte an:

- in der Erregerspule entsprechend der äußeren Bestromung,
- im Nichtleiter Null, und

<sup>1</sup> Vektoren werden hier durch aufrechte fettedruckte Symbole gekennzeichnet.

- im elektrischen Leiter (insbesondere dem Werkstück) gilt

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

wobei  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit des Materials bezeichnet.

Damit ist ein kontinuierliches Modell mit unendlich vielen Unbekannten aufgestellt. Eine FE- (Finite-Element)-Software wie z. B. Ansys hat die Aufgabe dieses Gleichungssystem zu modellieren und approximative Lösungen zu berechnen. Die Näherung besteht im Wesentlichen darin, dass die Geometrie in kleine Elemente mit endlich vielen Knoten aufgeteilt wird, für die dann einfache algebraischen Gleichungen aufgestellt werden. Wird die Geometrie durch kleinere Elemente feiner aufgelöst erhöht sich die Anzahl der Unbekannten im diskreten System und damit die Genauigkeit der Lösung, aber auch der Rechenaufwand, was Ressourcen an Arbeitsspeicher und CPU-Zeit betrifft. Hier muss ein Kompromiss gefunden werden, der aussagekräftige Antworten in akzeptabler Zeit liefert.

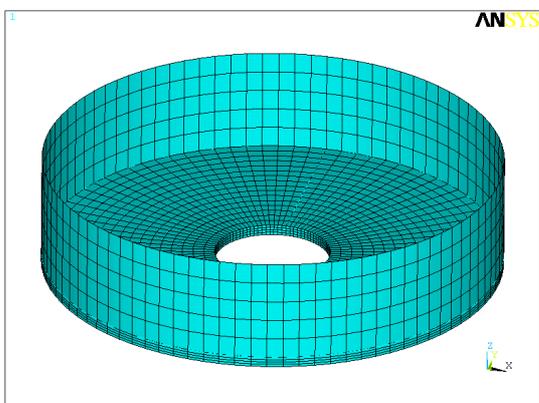
Ist eine solche genäherte Lösung des elektromagnetischen Problems gefunden, kann daraus ein Aufheizrate in der Form  $\mathbf{j}^2 / \sigma$  berechnet werden. Diese Heizrate ist dann Eingabe in eine weitere thermodynamische Simulation. Das Integral dieser Heizrate über dem gesamten Werkstück berechnet die Heizleistung.

Allen Berechnungen in diesem Projekt gemeinsam ist die Schwierigkeit, dass entscheidende Bauteile bewegt werden müssen und durch diese Bewegung erst ein Wirbelstrom induziert wird und damit eine Erwärmung des Werkstücks möglich ist.

Für bisherige Simulationen des bestehenden Bolzenofenkonzepts mit Ansys waren die Werkstücke immer zylindrisch und aus nichtmagnetischem Material. In diesem Fall kann man die "harmonische" Methode von Ansys anwenden.

Allerdings sind beliebig geformte Körper nicht mit dieser Standardmethode zu berechnen. Daher hat Zenergy Power die externe Hilfe der Fa. Cadfem (Berlin) einbezogen. Das Simulationsverfahren "Clicking-Mesh" wurde in diese Zusammenarbeit an die hier diskutierten Probleme angepasst.

Dabei wird die zu simulierende Maschine vereinfacht und in 3-D modelliert. Das Simulationsgebiet wird in zwei Teile geteilt, den *Stator* und den *Rotor*. Die Grenzfläche muss in Bezug auf die Rotationsachse der Bewegung zylindersymmetrisch sein und darf nur aus Flächen bestehen, die Mantelflächen eines Zylinders oder Kreisringe sind. Insbesondere sind wegen Limitationen von



**Abbildung 2: Strukturiertes Netz an der Grenzfläche zwischen Rotor und Stator.**

Ansys Kreise verboten, wenn der Mittelpunkt enthalten ist. Die Grenzfläche wird nun strukturiert mit Rechtecken so vernetzt, dass ten entweder axial oder radial oder Umkreisen folgen. Abbildung 2 zeigt als Beispiel, wie das in der Umsetzung aussehen kann.

Nachdem das Netz auf der Grenzfläche auf diese spezielle Weise vernetzt wurde, müssen noch Volumenelemente erzeugt werden. Dies kann nun strukturiert (d. h. mit Hexaedern) oder unstrukturiert mit Tetraedern geschehen. Dabei ist darauf zu achten das der Übergang zwischen verschiedenen Elementgrößen nicht abrupt sein darf, damit

keine Rechenfehler eingeführt werden. Ob das Volumennetz strukturiert oder unstrukturiert ausgeführt wird hängt von der Geometrie ab: eine strukturierte Vernetzung ist im Allgemeinen nicht möglich. Abbildung 3 gibt Einblick in das Volumennetz für ein Beispiel aus dem WP 1.1.

Die Netze für Rotor und Stator sind an der Grenzfläche zwar geometrisch identisch aber nicht verbunden, d. h. es gibt jeweils zwei Knoten mit gleichen Koordinaten. Die beiden Teile werden nun über Zwangsbedingungen künstlich verbunden: Beim Start ist das so, dass Knoten am gleichen Ort korrelieren. Die Drehbewegung wird dann so simuliert, dass man gedanklich den Rotor solange dreht bis die Netze von Rotor und Stator an der Grenzfläche wieder übereinander liegen ("einrasten"). Die nun übereinander liegenden Knoten bilden nun die neuen Zwangsbedingungen für den nächsten Zeitschritt.

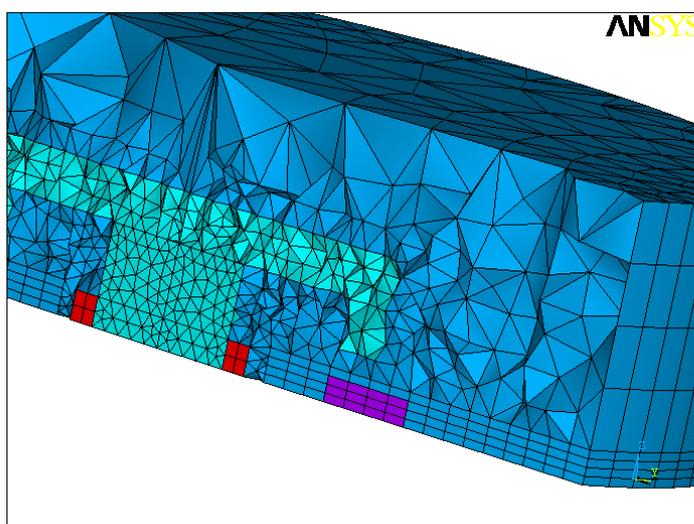
Bei einer Rechnung bleiben die Knoten des Rotors aber geometrisch am Ort, nur die Zwangsbedingungen werden wie beschrieben bestimmt; die Drehung ist also nur virtuell. Durch diese virtuelle Drehung wird im Rotor und/oder im Stator (je nach Konfiguration) ein zeitlich veränderliches Magnetfeld dargestellt, welches dann Wirbelströme induziert. Abbildung 4 zeigt ein Flussdiagramm mit den Hauptalgorithmen für die transiente Simulation.

Die eigentliche Berechnung wird dann als transiente (d. h. zeitabhängige) Simulation durchgeführt. Es müssen unter Umständen mehrere Umdrehungen einbezogen werden, damit sich ein quasistationärer Zustand einstellt. Es werden mehrere Umdrehungen benötigt, und zwar so viele wie die frequenzabhängige elektromagnetische Eindringtiefe (Skin-Tiefe) in die halbe Dicke des Werkstücks passt.

Die berechneten Modelle sind groß (bezüglich der Anzahl der Elemente zur Diskretisierung) und es müssen wie beschrieben u. U. mehrere Umdrehungen berücksichtigt werden. Für jede Umdrehung sind ~36 Zeitschritte nötig. Daher sind die Berechnungen speicher- und zeitintensiv. Die Berechnungen einiger Modelle dauerten über 24 Stunden.

Aus den elektromagnetischen Ergebnissen müssen nun Heizraten für die Erwärmung des Werkstücks extrahiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Zeitskalen der beiden Phänomene unterschiedlich sind: es stehen mehrere Umdrehungen pro Sekunde viele Hundert Sekunden an Erwärmung gegenüber.

Bei der Simulation geht man so vor, dass wenige Umdrehungen elektro-magnetisch simuliert



**Abbildung 3: Volumennetz**

werden. Dann werden die Heizraten in jeder Zelle des Rechenetzes im Werkstück über die letzte Umdrehung gemittelt. Diese Heizraten gehen nun in eine thermische Rechnung ein, die über mehrere Hundert Sekunden gehen kann und die Umdrehungen nicht mehr im Detail berücksichtigt. Mit anderen Worten: Das Rechenproblem wird nicht vollgekoppelt gelöst sondern die beiden Rechenschritte werden sequenziell bearbeitet. Wir verweisen auf den Anhang, wo zeitliche Abfolgen der Wirbelströme und der Aufheizung

des Werkstückes an Beispielen gezeigt werden.

Das in SlabHeat gewonnene Know-How in der Simulation kann auch für bisherige Anwendungen (ähnlich ROSINE) mit zylindrischem Werkstück eingesetzt werden. Z. B. wird das Werkstück in der Praxis nicht exakt zentrisch gelagert sein und so entsteht eine Unwucht. Diese Unwucht kann mit dem Clicking-Mesh-Verfahren auf den Einfluss auf den Spulenkreislauf, auf die Heizrate und auf die Kräfte (auf den rotierenden Bolzen) untersucht werden.

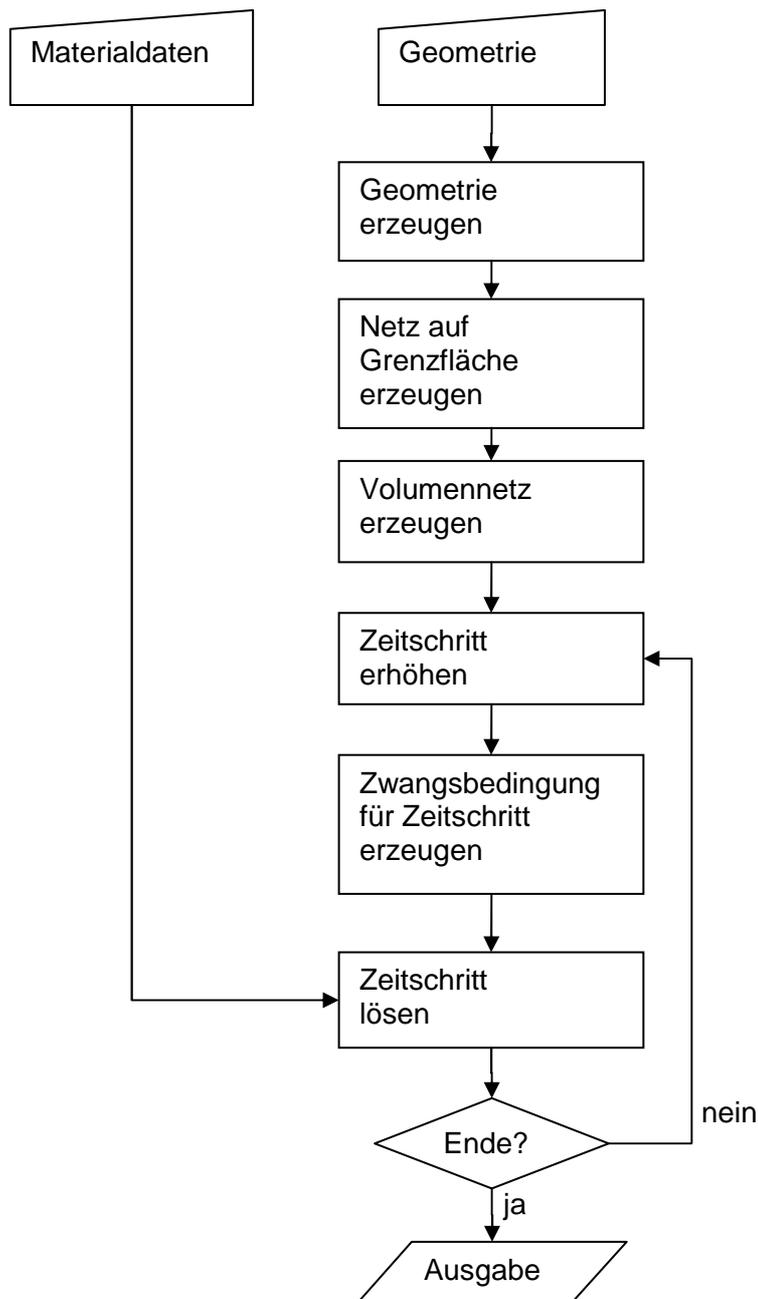


Abbildung 4: Flussdiagramm der transienten Simulation

## 6.2 Simulation – ROTH (WP 1.1)

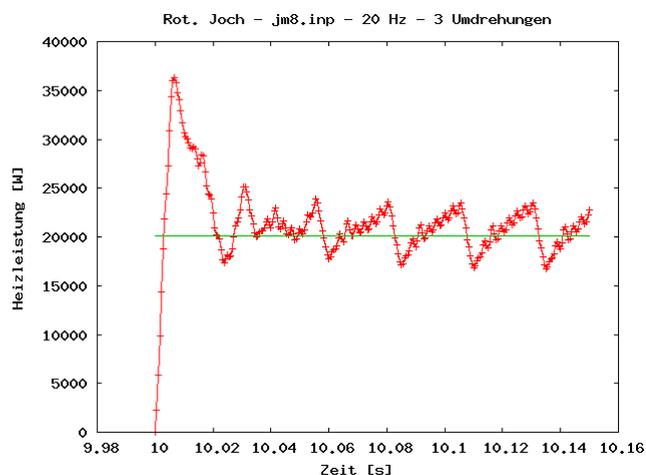
In der Option ROTH soll der magnetische Kreis um das Werkstück rotieren und so Wirbelströme im Werkstück generieren. In Grunde ist die Maschine damit umgekehrt aufgebaut wie der etablierte Magnetheizer. Weil damit auch eine Bewegung des Magneten aus Spule und Kryostat verbunden ist, wurde eine Möglichkeit gesucht, dies zu vermeiden.

Bringt man die Spule um den mittleren Schenkel des Eisenjochs kreisrund an, dann kann das Joch, wie in der Abbildung 5 dargestellt, rotieren und der Magnet bleibt in Ruhe. Das Joch hat, um eine Un-

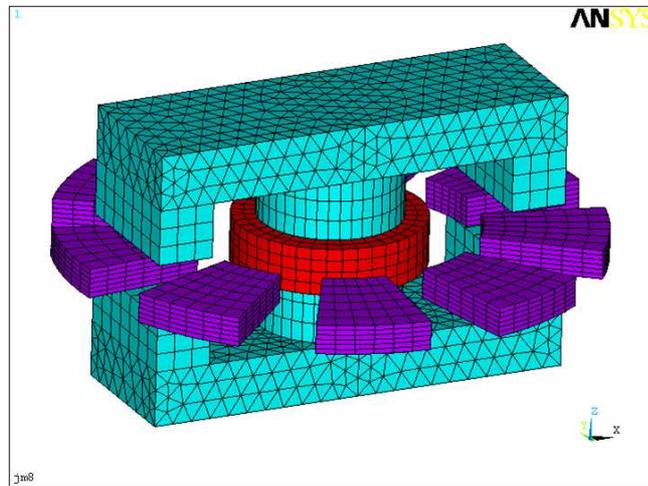
wucht der Drehbewegung zu vermeiden, vier Schenkel. Die Werkstücke werden auf einer Kreislinie angeordnet und das darüber streichende Magnetfeld ändert sich dann für jedes einzelne Werkstück mit der Zeit. Nach dem Induktionsgesetz werden Ströme generiert, deren Joulesche Wärme die Werkstücke aufheizt.

Dargestellt sind acht Werkstücke auf einem Kreisring mit neun Stellen. Im Prozess werden dann die Stücke sukzessiv entnommen und durch kalte Stücke ersetzt. Die Leerstelle simuliert einen solchen Werkstückwechsel oder eine dauerhafte Fehlstelle, durch die der Magnet gehalten wird sowie die Versorgungsleitungen des Magnets laufen. Dieser Ansatz würde noch eine relativ einfache Konstruktion erlauben, da das tiefkalte System nicht bewegt werden müsste.

Für das Joch ist ein ferromagnetischer Werkstoff vorgesehen, um das Magnetfeld wie gewünscht zu führen. Dabei ist zumindest an den Polschuhen eine geblechte Ausführung in Betracht zu ziehen um die Wirbelströme im Joch zu unterdrücken. Diese Wirbelströme würden zu unerwünschten Effekten wie der Erwärmung des Jochs oder der Abschirmung des Feldes führen.



**Abbildung 6: Rotierendes Joch: Heizleistung in den ersten drei Umdrehungen**



**Abbildung 5: Rotierendes Joch.**

In dem simulierten Aufbau sind Aluminium-Werkstücke à 7,5 kg auf einem Kreis mit neun Plätzen angebracht. Das Joch hat einen Durchmesser von 90 cm. Die Darstellung in Abbildung 5 zeigt das ganze Modell mit Joch (grün), Spule (rot) und den Werkstücken (violett). Aus Symmetriegründen und somit Rechenzeitminimierung wird aber nur eine Hälfte modelliert. Die konkrete Form der Werkstücke ist zurzeit noch nicht festgelegt, zu Studienzwecken ist

daher eine Form gewählt worden die effiziente Berechnung ermöglicht.

Die Wirbelstromcharakteristik ist in der zeitlichen Abfolge für diese Ausführung exemplarisch im Anhang in Abbildung 31 gezeigt.

Die Berechnungen kamen zu den folgenden Ergebnissen. Die zeitliche Entwicklung der Heizleistung in den ersten drei Umdrehungen bei 20 Hz wird in Abbildung 6 dargestellt. Nach einer Einschwingzeit von einer Umdrehung oszilliert die Leistung um einen Mittelwert von 20 kW. Die kleinen Oszillationen kommen dadurch zustande, dass die Wirbelströme am schwächsten sind, wenn sich beide Polschuhe über Werk-

stücken befinden. Die große Oszillation mit der doppelten Drehfrequenz entsteht wenn ein Polschuh durch die Leerstelle fährt und dann keine Leistung abgegeben werden kann. Die Aufheizung der einzelnen Werkstücke in einer thermischen Simulation wird in Abbildung 7 dargestellt. Nach einer Zeit von 5 min wird eine Temperatur von im Mittel 120°C erreicht.

Für eine industrielle Anwendung ist die Ausbeute zu gering. Es gibt dafür zwei Gründe:

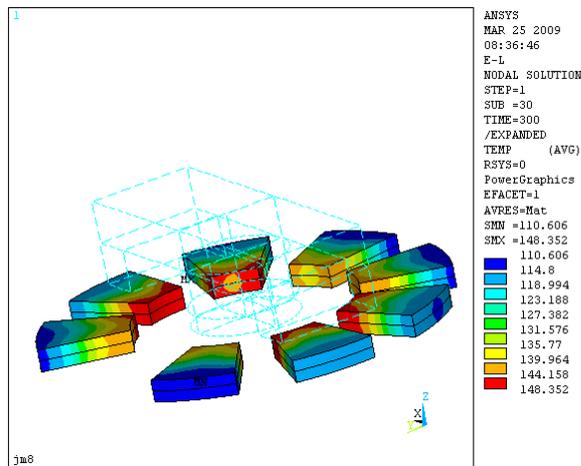
1. Das Magnetfeld wird vom Werkstück aus betrachtet nur an- und ausgeschaltet, aber niemals invertiert.
2. Zwischen den Schenkel ist das Magnetfeld zu gering und die Totzeit (Zeit ohne Feldänderung, d. h. ohne effektive Aufheizung) zu groß.

Man könnte nun die Anzahl der Pole vergrößern und so effektive Frequenz der Wirbelstromerzeugung erhöhen, dann wird aber durch Streufelder das Feld zwischen den Polen nicht mehr zu Null. Damit wäre die Amplitude der Magnetfeldänderung wieder zu gering.

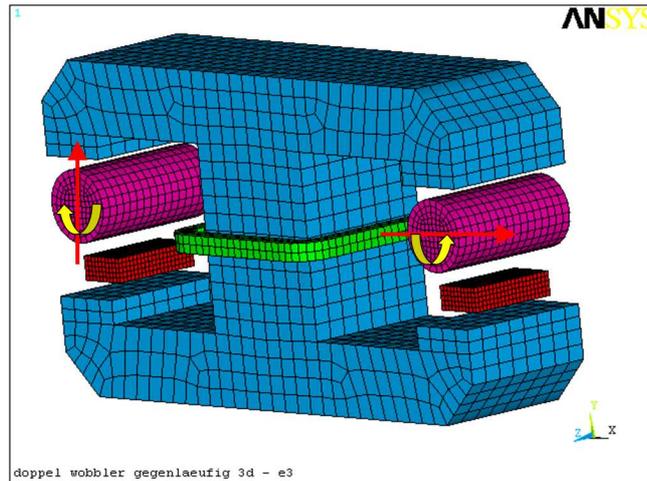
Mit dem beschriebenen Vorgehen ist der Meilenstein

M1.1: Gesamtkonzept einer durch FEM-Rechnungen optimierten Anlage vom Typ ROTH aus dem Projektplan erfüllt.

Im Ergebnis wurde gezeigt, dass diese Technik leider nicht die gewünschten Ergebnisse liefert. Von einer weiteren Betrachtung wird daher abgesehen.



**Abbildung 7: Rotierendes Joch: Erwärmung der Werkstücke.**



**Abbildung 8: Aufbau des Doppel-Wobblers.**

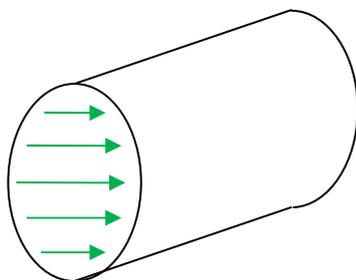
### 6.3 Simulation – WOBLER (WP 1.3)

Die Kernidee des Wobblers genannten Prinzips ist es, einen zylindrischen Teil des magnetischen Kreises aus einem magnetisch anisotropen Material zu fertigen und diesen zu rotieren. Dies kann z. B. durch Aufeinanderschichten von Transformator-Bleichen realisiert werden.

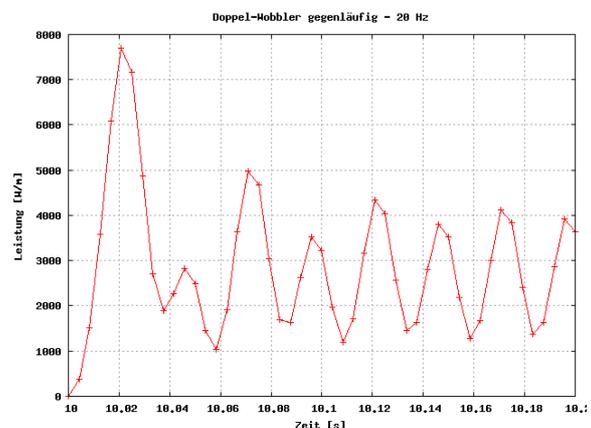
Ein solcher Aufbau hat in der Ebene der Schichtung eine große Permeabilität aber senkrecht nahezu ein magnetisches Verhalten wie im Vakuum. Dieser Zylinder („Wobler“) wirkt als Schalter für das magnetische Feld und kann dieses bei Rotation modulieren. Dadurch wirkt im Werkstück ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, welches Wirbelströme induziert und zur Erwärmung führt. Die bevorzugte magnetische Ausrichtung ist dabei senkrecht zur Drehachse vorgesehen, wie in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

Eine Ausführung mit einem Wobler in einem magnetischen Kreis führt im Betrieb zu einer periodischen Änderung des magnetischen Flusses in der HTS-Spule. Daher wird in der Spule ein Wechselstrom induziert (Rückinduktion), der auch bei Supraleitern vom üblicherweise verwendeten Typ zu Verlusten führt. Diese thermischen Verluste in der Spule gilt es zu minimieren.

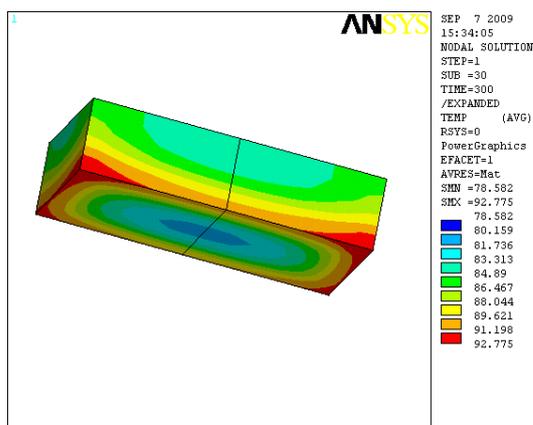
Die Ausführung des Doppel-Wobblers verkleinert die Rückinduktion und ist in Abbildung 8 skizziert. Es werden zwei magnetische Kreise mit je einem Wobler (violett) und einem Werkstück



**Abbildung 9: Magnetische Vorzugsrichtung im rotierenden Zylinder**



**Abbildung 10: Doppel-Wobler, Heizleistung für drei Umdrehungen bei 20 Hz.**



**Abbildung 11: Doppel-Wobbler; Erwärmung eines Werkstücks bei 20 Hz nach 300 s. Abgebildet hier ein Werkstück von zweien.**

angenommenen Werkstücke sind im simulierten Beispiel quaderförmig, aus Aluminium und wiegen 22 kg.

Die FEM-Berechnungen ergaben die Leistungskurve in Abbildung 10 in den ersten drei Umdrehungen bei 20 Hz. Die mittlere Leistung liegt bei 2,5 kW – eine deutlich zu geringe Heizrate für den praktischen Gebrauch. Aus den Heizraten ergibt sich eine Temperaturverteilung nach 5 min wie in Abbildung 11 dargestellt: es werden im Mittel 95°C erreicht.

Die Erwärmungsleistung ist allerdings zu gering für industrielle Anwendungen. Technisch resultiert dies aus folgenden Gründen: Zwar ist die Kraftflussdichte am Ort der Werkstücke ausreichend groß, jedoch ist die Modulation durch den Wobbler gering. Die Amplitude dieser Modulation ist aber entscheidend für die Leistungsausbeute. Zu Illustration sei auf Abbildung 12 verwiesen: dort ist die Modulation des magnetischen Kraftflussdichte an vier Punkten im Werkstück dargestellt. Trotz ausreichend hohen Mittelwerts ist die Amplitude gering. Für die Aufheizung ist in der Tat nur die Amplitude verantwortlich.

Der Meilenstein des Projektplanes

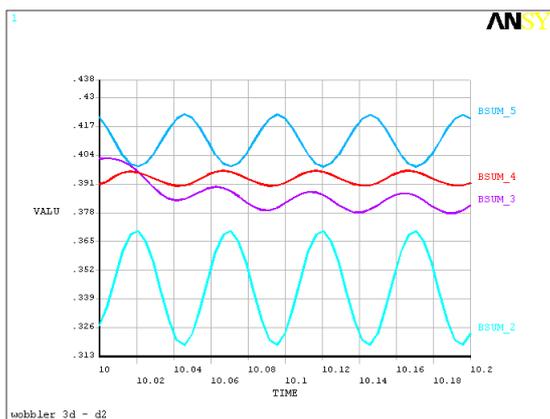
M1.3: Entwurf einer durch FEM-Rechnungen optimierten Anlage vom Typ WOBLER

ist somit erfüllt.

Im Ergebnis wurde gezeigt, dass diese Technik leider nicht die gewünschten Ergebnisse liefert. Von einer weiteren Betrachtung wird daher abgesehen.

(rot) zusammen an einen Mittelschenkel (blau) mit einer Spule (grün) zusammengefügt.

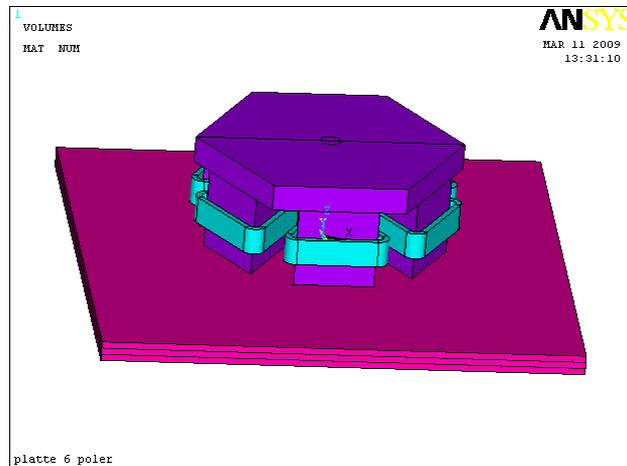
Die Wobbler sind als magnetische Schalter so geschaltet, dass in einem Kreis der magnetische Fluss eingeschaltet ist während der andere Arm ausgeschaltet ist. Die beiden Wobbler sind identisch und haben eine durchgehend konstante magnetische Vorzugsrichtung, sind aber in der Startposition um 90° versetzt (siehe Pfeile in Abbildung 5). Im Betrieb laufen die beiden Wobbler gegensinnig mit gleicher Drehzahl. Dadurch ist der Fluss in dem zentralen Schenkel des Eisenjochs, den beide Kreise teilen, nahezu konstant. Der magnetische Fluss wird also nur zwischen den beiden Magnetkreisen hin- und hergelenkt. Daher ist die Rückinduktion in der HTS-Spule klein. Die hier



**Abbildung 12: Doppel-Wobbler; Amplitude der Kraftflussdichte an vier Punkten.**

## 6.4 Simulation – HTS-PLATE (WP 1.2)

In dieser Bauart werden zur Platten-erwärmung Spulen auf eine Scheibe aufgebracht, die sich in der Nähe der zu erwärmenden Platte dreht. Abbildung 13 zeigt das Prinzip mit sechs Spulen, die auf einem Eisenjoch angebracht werden. Dieser Eisenkern ist gleichzeitig der vom Motor angetriebene Rotor. Die einzelnen Spule werden je um ein Element des Kerns gelegt. Die Kerne werden auf einen Rückschluss in Form einer Platte angebracht, der gleichzeitig als Träger dient. Die Bestromung der Spulen ist so, dass benachbarte Spulen gegenläufige Stromrichtung haben (siehe Abbildung 14). Mit anderen Worten



**Abbildung 13: HTS-PLATE Übersicht.**

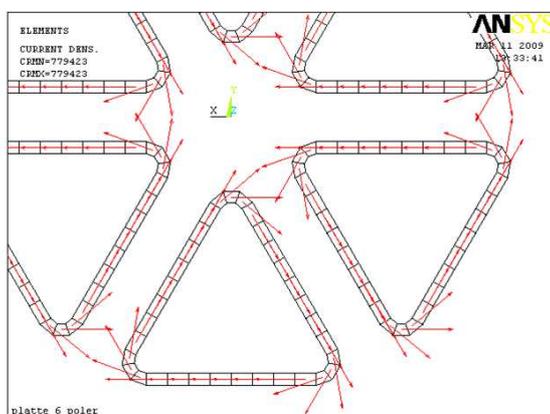
werden drei magnetische Nord- und drei Südpole nach außen sichtbar. Die Anzahl der Pole ist mit sechs optimal: eine höhere Polzahl würde eine Frequenzvervielfachung bedeuten, ist jedoch mit einer geringeren effektiven magnetischen Kraftflussdichte im Werkstück verbunden.

Zur gleichmäßigen Erwärmung der Platte wird der Rotor langsam über der Platte bewegt (alternativ könnte auch die Platte bewegt werden). Der Außendurchmesser des Rotors beträgt in dieser Simulation 200 cm und die Plattendicke des zu erwärmenden Werkstücks ist in der Berechnung 20 mm. Die optimale Bauweise ergibt sich, wenn sich zwei Rotoren auf jeder Seite der zu erwärmenden Platte synchron drehen (Abbildung 16), und zwar so, dass jeweils ein Nordpol des einen Rotors einem Südpol des anderen gegenübersteht. Dies ist auch kräftemäßig die bevorzugte Konfiguration und es wird zur Synchronisierung beider Rotoren kein großer Aufwand nötig sein. Eine etwas einfachere Konstruktion mit einem passiven Rückschluss auf der Gegenseite ergibt eine geringere Leistung, wäre technisch aber auch umsetzbar.

Das Ziel dieses Designs ist es, das Magnetfeld im Werkstück zu maximieren. Dafür muss der

Fluss zum anderen Rotor gegenüber dem benachbarten Polschuh bevorzugt werden. Daher muss der Abstand der Rotoren kleiner sein als der Abstand der Polschuhe innerhalb eines Rotors (siehe dazu Abbildung 15). In der Tat ist die Kraftflussdichte im Werkstück mit über 0,6 T nach bisherigen Erfahrungen recht groß ist.

Die Simulation ergibt ein Wirbelstrommuster wie es in Abbildung 18 gezeigt wird. Man erkennt den Abdruck der Polschuhe auch in der Stromdichte. Die stärksten Ströme fließen zwischen den Polschuhen, wo sich die Richtung des Magnetfeldes umdreht.

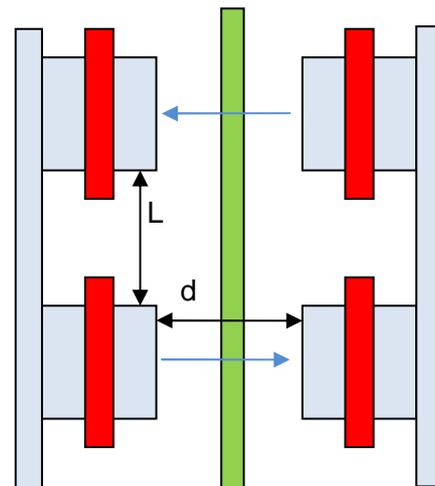


**Abbildung 14: HTS-PLATE; Stromfluss in den Spule auf dem Rotor.**

Die Aufheizleistung der Maschine wurde simuliert und die Kurve in Abbildung 20 zeigt das Ergebnis der ersten vier Umdrehungen bei 10 Hz. Nach dem Einschwingen wird eine mittlere Leistung von ~520 kW eingebracht. Diese Leistungsabgabe ist deutlich höher als bei den vorher untersuchten Methoden und dürfte einer praktischen Anwendung genügen.

Der Einschwingvorgang ist aber nach diesen vier Umdrehungen noch nicht abgeschlossen. Es bleiben Schwankungen in der Leistung auch im quasistationären Zustand. Das kann man mit Randeffekten in der Simulation erklären, denn das Rechengebiet muss eingeschränkt werden, damit eine Berechnung mit den vorhandenen Ressourcen durchgeführt werden können. Diese Oszillationen sind aber auch in der realen Maschine vorhanden, wenn sich der Rotor einer Plattenkante nähert. Konstruktiv muss diesem Sachverhalt durch entsprechende mechanische Stabilität Rechnung getragen werden, da diese Leistungsschwankungen als Drehmomentschwankungen, also Kraftänderungen, niederschlagen.

Betrachtet man die Aufheizung der Aluminium-Platte in demjenigen Fall bei dem der Rotor nicht noch zusätzlich linear bewegt wird, ergibt sich das Bild, das in Abbildung 19 gezeigte Profil. Die zeitliche Abfolge der Aufheizung ist für diesen Fall beispielhaft im Anhang in Abbildung 30 aufgeführt. Am Maximum wird, ausgehend von Raumtemperatur (20°C), nach 100 s eine Temperatur von 177°C erreicht. Bewegt man nun den Rotor linear über das Werkstück, kommt man zu dem in Abbildung 17 gezeigten Muster. Weil die Wärme nun auf ein größeres Volumen verteilt wird, ist die höchste Temperatur 92°C. Um eine homogene Erwärmung des Werkstücks zu erreichen, müsste in der Praxis der Rotor auf der ganzen Fläche bewegt werden. Alternativ kann auch die

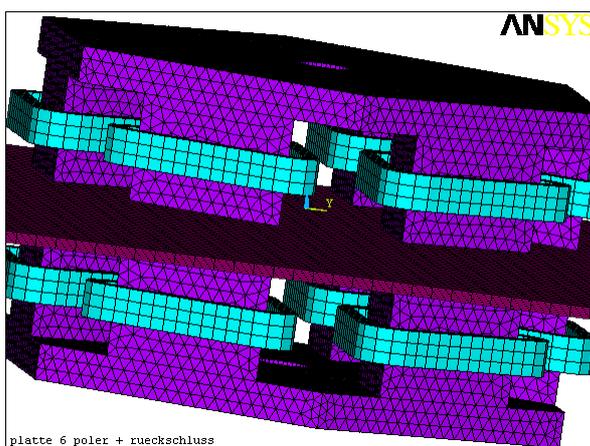


**Abbildung 15: HTS-PLATE: ein Layout ist geeignet falls  $L > d$**

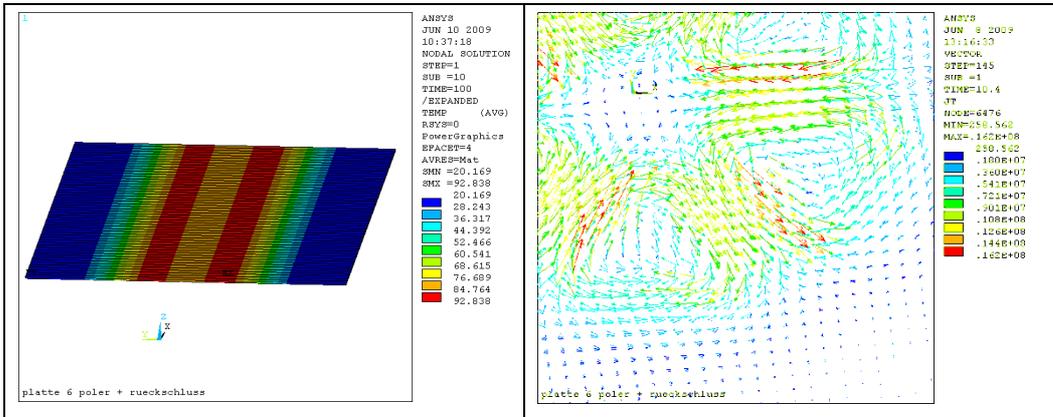
Werkstück-Platte bewegt werden. Für den Fall, dass die Breite der Platte dem Durchmesser des Rotors entspricht entfällt natürlich die Querbewegung.

Zusammenfassend kann für diese Option gesagt werden, dass die in der Simulation errechnete Leistung von ~520 kW für eine industrielle Anwendung ausreichend ist.

Im Ergebnis wurde gezeigt, dass diese Technik potentiell die gewünschten Ergebnisse liefert. Sie wird daher zunächst von der konstruktiven, dann von der ökonomischen Seite betrachtet.

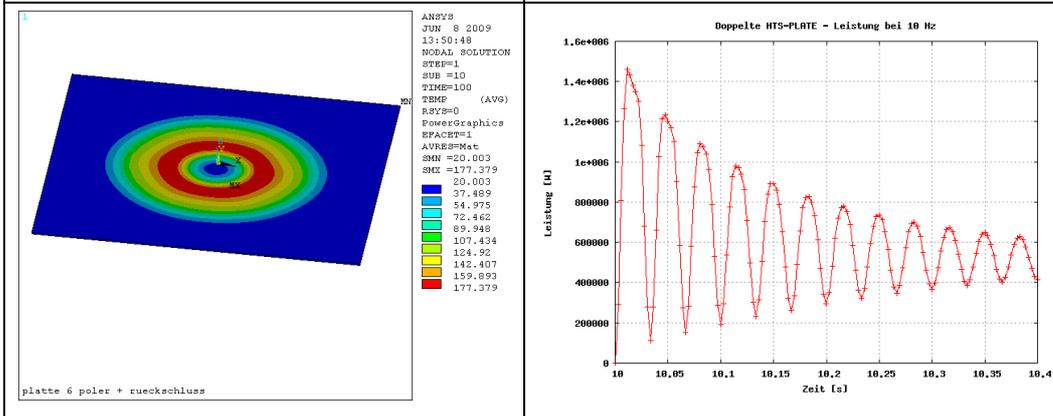


**Abbildung 16: HTS-PLATE Ausführung zwei Rotoren.**



**Abbildung 17: HTS-PLATE; Aufheizung der Platte, wenn der Rotor über die Platte fährt.**

**Abbildung 18: HTS-PLATE; Form der Wirbelstromfeldes.**



**Abbildung 19: HTS-PLATE; Erwärmung nach 100 s.**

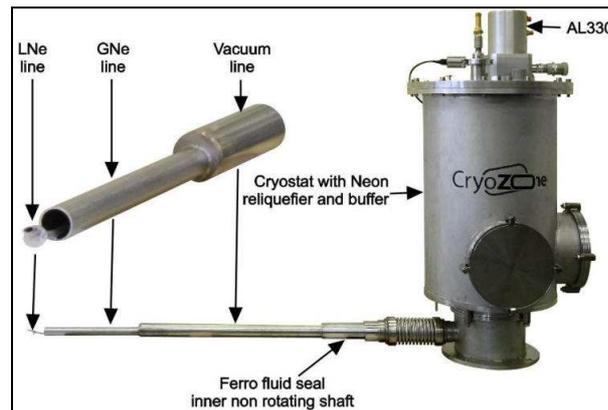
**Abbildung 20: HTSPLATE; Leistung bei 10 Hz in den ersten vier Umdrehungen.**

## 6.5 Konstruktion – HTS-PLATE (WP 1.2)

Im Folgenden soll eine mögliche Konstruktion eine Erwärmungsanlage nach der Option HTS-PLATE, wie sie oben mit der FE-Methode analysiert wurde. Ziel ist es, die Machbarkeit und die Herstellungskosten beurteilen zu können. Für eine solche Anlage muss der HTS-Magnet und passende Eisenjoch in Rotation versetzt, die Kühlung für den HTS-Teil bereitgestellt und die erforderliche Antriebsleistung eingetragen werden.

Es müssen die Komponenten

- Maschinenrahmen
- Antrieb
- Joch
- Magnet
- Kühlsystem
- Stromversorgung Magnet
- Messsystem
- Maschinensteuerung.

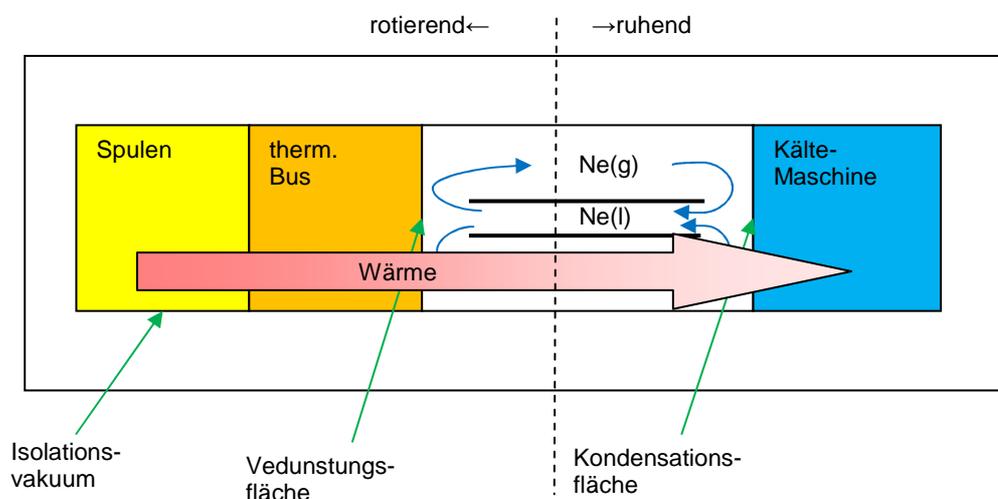


**Abbildung 21: Kühlsysteme für Drehverbindungen der Fa. Cryozone.**

vorgesehen werden.

Im Vergleich zu dem in ROSINE umgesetzten Konzept wird der HTS-Magnet bewegt. Die Hauptschwierigkeit liegt daher darin, dass die HTS-Spule rotiert und über eine Drehverbindung mit Kühlmittel versorgt werden muss.

Eine Lösung dieses Problems ist z. B. von der niederländischen Firma Cryozone (Eindhoven) entwickelt worden, siehe Abbildung 21, wird aber auch bei anderen Fällen rotierender Motoren und Generatoren in Prototypen eingesetzt. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 22 dargestellt: es wird flüssiges Neon als Kühlmittel verwendet, das in einem ruhenden Kryostaten verflüssigt wird und durch eine Hohlwelle zu der rotierenden HTS-Spule transportiert wird. Dort verdunstet das Neon und wird in einer äußeren Schicht der Hohlwelle zurückgeleitet.



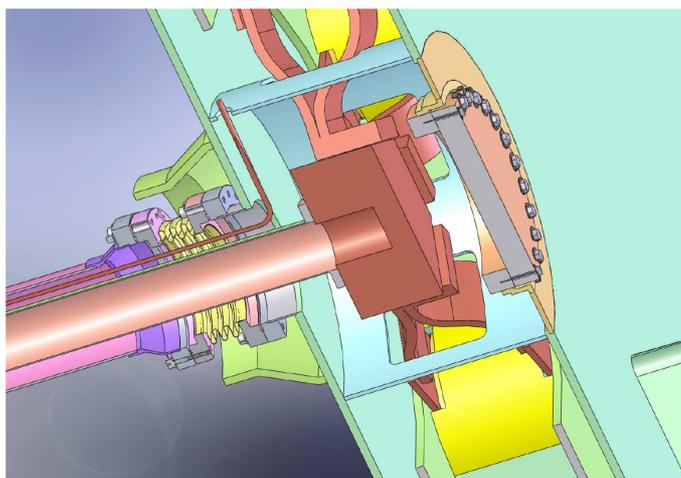
**Abbildung 22: Schema des Wärmeflusses mit Neon-Kühlung.**

Abbildung 23 zeigt ein Konstruktion der Welle mit den verschiedenen Schalen. Im Innersten befinden sich die Neon-Zu- und Rückleitungen. Darum liegt zur Kälteisolalierung ein evakuierter Behälter, in dem auch die Stromleitungen für die HTS-Spule angebracht sind. Eine weitere Schale dient zum Antrieb also der Drehmomentübertragung. Ganz zu äußerste ist eine Schutzhülle vorgesehen.

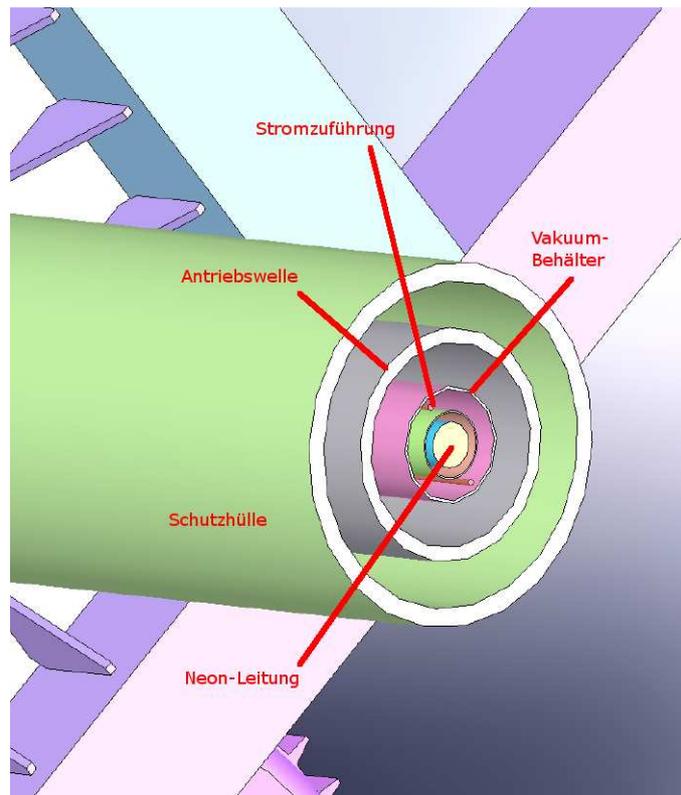
Das Neon entzieht zunächst die Wärme einem thermischen Bus, der wiederum die HTS-Spulen kühlt. Die Übergänge zwischen ruhenden und bewegten Teilen werden mit Hilfe eines Ferrofluids abgedichtet. Die Antriebswelle muss also aus mehreren konzentrischen Rohren bestehen, deren Zwischenräume die Leitung für flüssiges Neon, die Rückführung für gasförmiges Neon und Isolationsvakuum enthalten. Die Kraftübertragung der Antriebswelle und deren Lagerung finden in einem weiteren äußeren Rohr statt.

Eine alternative Lösung bestünde in der Verwendung von He-Gas, welches in einem Wärmetauscher außerhalb des Kryostaten gekühlt wird und durch einen Ventilator in entsprechende Einrichtungen im Kryostaten gepumpt wird und dort Wärme von den HTS Spulen aufnimmt.

Beide Lösungen haben ihre Vor- und Nachteile. Während im Falle von Neon die Verflüssigungstemperatur bei 27 K liegt und so eine Betriebstemperatur im Kryostaten von maximal 30 K aufrecht erhalten werden kann, liegt dies typischerweise bei He im Bereich von 35 K. In beiden Fällen treten durch den Einsatz von zusätzlichen Wärmetauschern Verluste im Kalten auf. Aus der Erfahrung kann hier mit einer Reduktion von 30-50% gerechnet werden.

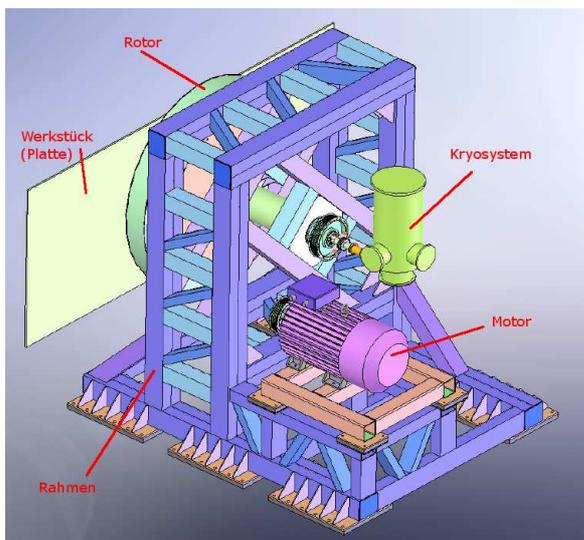


**Abbildung 24: Antriebsnabe mit zentraler Verdampfungseinheit.**



**Abbildung 23: Schalenkonstruktion der Welle.**

Das Neon-System kann durch entsprechende geometrische Anordnung so ausgelegt werden, dass der Mediumtransport, Flüssigkeit in den Kryostaten und Gas heraus durch die Gravitation erfolgt. Bei einer He-Gaskühlung wird in jedem Fall eine aktive Umwälzung benötigt. Bei der Neon-Kühlung ist dafür eine Temperaturüberwachung und Steuerung



**Abbildung 25: HTS-PLATE Konstruktionsvorschlag.**

Die „Kälteverteilung“ von hier aus erfolgt über bewährte und wohlbekannte Leitung in Material (ein thermischer Bus aus Kupfer). Im Falle von Ausfällen oder Defekten muss auf diese Weise nur an einer Stelle durch Wartungsmaßnahmen eingegriffen werden. Des Weiteren wird die zirkulierende Menge des Neons minimiert.

Einen Überblick über die Konstruktion ist in Abbildung 25 dargestellt.

Eine genaue Ausführung des Rotors ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Kühlflüssigkeit wird an der zentralen Stelle vergast und entzieht den sechs Spulen über einen thermischen Bus die Wärme. Die Spulen sind in einem gemeinsamen Kryostaten untergebracht, der sechs Warmbohrungen enthält, durch die die Eisenkerne geführt werden. Die Verdampfungszone ist in Abbildung 24 genauer dargestellt. Bei der Energiebilanz der Kühlung ist auch die Verdampfungsenthalpie mit zu berücksichtigen: Diese Verdunstungskälte führt zu einer zusätzlichen Kühlung.

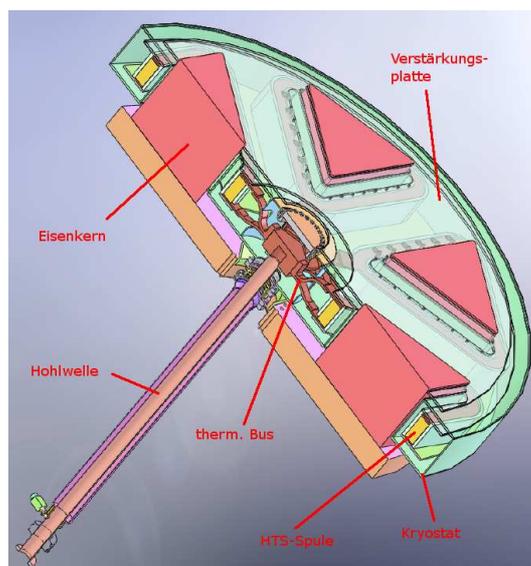
Die Verwendung dieser hybriden Kälteverteilung trägt weiterhin den mechanischen Erfordernissen Rechnung. Bei der Konstruktion ist besonders auf die Fliehkräfte zu achten. Die aktuelle Auslegung sieht 600 Umdrehungen pro Minute vor. Die Fliehkräfte auf die Polschuhe und Spule betragen unter diesen Umständen das 300fache der Erdbeschleunigung. Da jeder Polschuh 5 t wiegt, entsprechen die Kräfte dem Gewicht von 1500 t.

Die Fliehkräfte sind auch bei der Lagerung der Spule zu berücksichtigen: die Stützen müssen die Kräfte aufnehmen aber dürfen nur so wenig Wärme wie möglich leiten, da

am Rekondensierer erforderlich, um durch zu hohe Kälteleistung ein Ausfrieren des Neons zu verhindern.

Im industriellen Umfeld ist Verfügbarkeit eine nicht zu vernachlässigende Forderung. Aus diesem Grunde wird an dieser Stelle auch nur noch eine Neon-Kühlung betrachtet, da die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Temperaturkontrolle niedriger ist als die eines Pumpsystems.

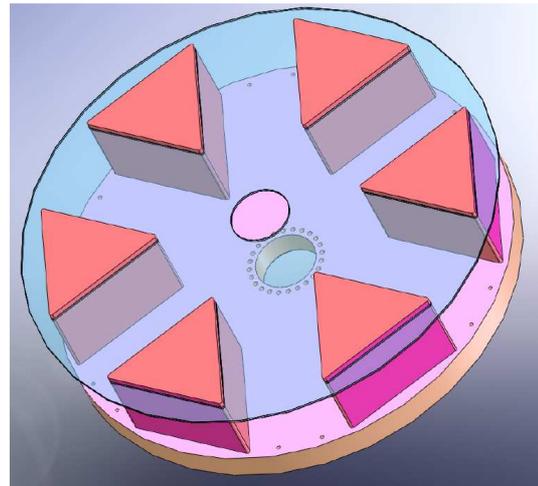
Weiterhin wurde hier eine weitere Lösung entwickelt, die der Verlässlichkeit im Industriebetrieb Rechnung trägt. Bei rotierenden Maschinen wird das flüssige Neon in einen großen Verteilungsraum eingeführt, um so jede einzelne Spule zu kühlen. Hier wurde der Weg über einen zentralen Wärmetauscher im Bereich der Drehachse gewählt.



**Abbildung 26: HTS-PLATE, Schnitt durch Rotor.**

diese die Spule mit der Kryostatwand verbindet, die sich bei Raumtemperatur befindet (siehe Abbildung 26).

Ebenfalls führen die Fliehkräfte zu einer Verformung des Rotors, der von Gewicht betrachtet hauptsächlich aus dem Eisenjoch besteht. Wie man in Abbildung 26 sieht werden die Polschuhe nur durch die hintere Jochplatte gehalten, diese würde sich durch die Fliehkräfte verbiegen. Die Konstruktion sieht eine zusätzliche Verstärkung (Abbildung 27) der Eisenkerne durch eine stirnseitige Platte aus unmagnetischem Edelstahl vor, wie sie in Abbildung 27 dargestellt ist.



**Abbildung 27: Joch mit Verstärkungsplatte.**

Der Antriebsmotor ist seitlich angebracht, weil ja in axialer Richtung das Kühlsystem untergebracht ist. Die Übertragung des Antriebsmomentes wird über Zahnriemen verwirklicht. Für jede Seite der Maschine wird eine Leistung von 260 kW bei 16 kNm benötigt.

Zusammen mit den FEM-Ergebnissen im vorherigen Kapitel kann der Meilenstein

M1.2: Entwurf einer durch FEM-Berechnungen optimierten Anlage vom Typ HTS-PLATE erfolgreich abgeschlossen werden.

## 6.6 Wirkungsgradbetrachtung – HTS-Plate (WP 1.2)

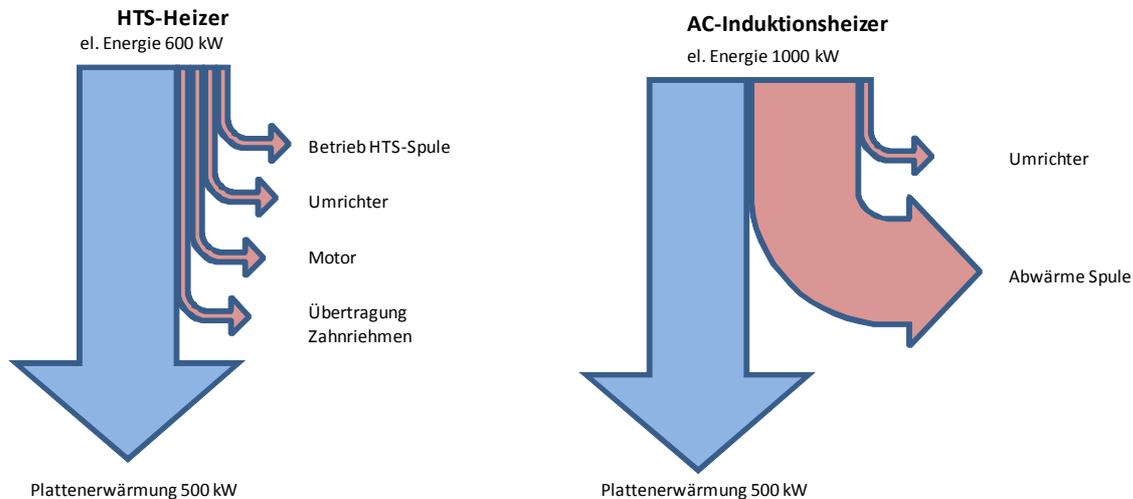
Ein entscheidender Punkt ist der Effizienzsprung einer HTS-Anlage im Vergleich zu herkömmlichen Heizern. Die folgenden Überlegungen versuchen die vorgestellte Konstruktion für HTS-PLATE mit einer AC-Induktionsanlage zu vergleichen.

Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der Nutzenenergie und der aufgewandten elektrischen Energie. Für der Nutzenenergie ist bei der Plattenerwärmung genaugenommen der Wärmeenergieinhalt des Werkstücks am Ende des Heizvorgangs und vor der Umformung (z. B. Walzen) zu betrachten.

Mit dem aktuellen Wissensstand über die Maschine sind jedoch noch viele Parameter unbekannt. Wir können noch nicht abschätzen wieviel Wärme während des Heizens schon an die Umgebung abgegeben wird. Dieses Problem ist aber bei einem AC-Heizer ähnlich und wir möchten als Nutzenergie vorläufig die Energie betrachten, die als Wärme in das Werkstück eingebracht wurde. Die Verluste sind bei beiden Maschinen von ähnlichem Betrag und damit vergleichbar.

Beim HTS-Heizer liegen Verluste des Antriebsaggregats im Frequenzumformer, im Motor und in der Drehmomentübertragung durch den Zahnriemen. Der Wirkungsgrad dieser Komponenten kann mit 95-98% als sehr hoch angesetzt werden. Zusätzlich sind bei zwei Kältemaschinen noch 20 kW für den Betrieb der Spule mit einzubeziehen.

Bei einem AC-Heizen liegen die Hauptverluste in der Abwärme in der Kupferspule, die in einem Wasserkreislauf abtransportiert werden muss. Diese Energie ist ungefähr genauso groß wie die im Werkstück eingebrachte Energie. Die Verlust in der Peripherie (z. B. Frequenzumformer) sind dagegen gering. Ein AC-Anlage hat in der Praxis einen Wirkungsgrad von ca. 50%.



**Abbildung 28: Wirkungsgradvergleich HTS-Anlage und AC-Induktion.**

Abbildung 28 zeigt diesen Vergleich graphisch, dabei repräsentiert die Dicke der Pfeile den Betrag des Energieflusses.

## 6.7 Kostenabschätzung – HTS-PLATE

Die beschriebenen technischen Ergebnisse zeigen, dass die Option HTS-PLATE die erfolgsversprechende Lösung darstellt, in Erfüllung des Meilensteins

M 1.4: Entscheidung über das beste Konzept.

Aus diesem Grunde wird an dieser Stelle ein grobe ökonomische Betrachtung durchgeführt.

Die in Abbildung 29 dargestellte Tabelle listet die erwarteten Materialkosten für den Bau eines Heizers nach der Option HTS-PLATE auf. Die Tabelle detailliert nach den Komponenten, wie sie in der Konstruktion entworfen wurden und enthält die potentiell teuersten Posten, die im Rahmen einer ABC-Analyse in die Klassen A & B fallen würden. Dabei ist zu beachten, dass für einen ganzen Ofen zwei solche Rotoren gebraucht werden, die Tabelle bezieht sich jedoch nur auf einen.

Weiterhin wurde eine Betrachtung zum heutigen Zeitpunkt durchgeführt sowie eine Projektion auf 2015 und später. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die größten Anteile der Kosten für den Magnetbau und das Kühlsystem anfallen. Diese machen heute zusammen fast 60 % der Kosten ausmachen. Aus aktueller Sicht liegt der Materialaufwand für jede Einheit bei ca. 400.000 Euro (und 800.000 Euro für einen Gesamtanlage). Mit im Maschinenbau üblichen Erfahrungswerten von dem 2-3 fachen des Materialaufwandes bis zum fertigen Produkt wäre eine solche Anlage im Verhältnis zur erbrachten Leistung kaum wirtschaftlich.

Auf die Zukunft gesehen, wurden die einzelnen Positionen in der Tabelle mit einem Preissenkungspotenzial versehen. Damit wird berücksichtigt, dass durch technische Weiterentwicklung, höhere Stückzahlen und Erfahrung das Material günstiger wird. Dabei ist die treibende Kraft der technische Fortschritt auf verschiedenen Gebieten unabhängig von den in SlabHeat betrachteten Anlagen. Besonders auffällig ist hierbei auch die Abnahme der Kosten für den HTS Anteil, der sich am stärksten bemerkbar macht.

Bei dem HTS-Draht wird z. B. an neuen Herstellungsverfahren gearbeitet, die den Draht deutlich billiger machen werden als heute. Beim Kryostatbau wird erwartet, weitere Erfahrungen im Bau

Kostenabschätzung HTS-PLATE (SlabHeat)  
 alle Kosten, Preise in EUR

Summe [kEUR] 392

Summe [kEUR] 228

Lfd Nr.	Komponente	Baugruppe	Kommentar	Menge	Einheit	Preis [EUR] je Einheit	Kosten [EUR]	Teilsomme	prozentual	Preiseckungs- potenzial	Teilsomme	prozentual
1	Maschinenrahmen							30000		8%	21000	9%
2		Stahlbau	ST-37 Material, inkl. Bearbeitung,	7500 kg		4	30000					
3	Antrieb							35500	9%	30%	24850	11%
4		Motor	200 kW, 8-polig	1 Stück		10000	10000					
5		Umrichter		1 Stück		15000	15000					
6		Welle		1 Stück		3000	3000					
7		Getriebe	Riemen + Zahnriemenrad	1 Stück		1500	1500					
8		Lager	Pendelrohrlager	2 Stück		3000	6000					
9	Joch							32800	8%	20%	26240	12%
10		Polschuhe	Trafoblech	3000 kg		6	18000					
11		Rückschluss	ST-37	3500 kg		4	14000					
12		Rahmen	Edelstahl	200 kg		4	800					
13	Magnet							169600	43%	55%	76320	33%
14		Kryostat		1 Stück		80000	80000					
15		therm Bus		7 Stück		2000	14000					
16		HTS-Draht	Einkauf &	840 kAm		90	75600					
17	Kühlsystem							56000	14%	50%	28000	12%
18		Kühler	Cryoflow (Cryozone) & Kaltkopf	1 Stück		36000	36000					
19		Anschluss		1 Stück		20000	20000					
20	Stromversorgung Magnet							8000	2%	30%	5600	2%
21		Netzgerät		1 Stück		7000	7000					
22		Schleifenkupplung		2 Stück		500	1000					
23	Messsystem							15000	4%	20%	12000	5%
24		Fühler, Elektronik, Übertragung		1		15000	15000					
25	Kleinteile							10000	3%	5%	9500	4%
26		Schrauben, usw		1		10000	10000					
27	Maschinensteuerung							35000	9%	30%	24500	11%
28		S7, Bedienterminal, Aktoren		1 Stück		35000	35000					

**Abbildung 29: Kostenaufstellung für einen Rotor nach Bauart HTS-PLATE**

von Magnetheizern für zylindrische Aluminium- und Kupfer-Bolzen und für Generatoren zu einer Preisreduktion führen, weil Materialien effektiver eingesetzt werden.

Unter diesen Annahmen wird davon ausgegangen, dass sich die Materialkosten im Zeitraum von ungefähr fünf Jahren etwa halbieren. Unter diesen Gesichtspunkten muss als nächstes der potentielle Markt für diese Technik untersucht werden.

Die Aluminium-Industrie hat im Jahr 2006 Aluminiumhalbzeug in der Menge 2,5 Mio t produziert. Der Magnetheizer in der Form wie er in ROSINE entwickelt wurde, ist besonders gut für Strangpressen und die Herstellung von Profilen geeignet. Das macht mit 516.000 t etwa 20% des Marktes aus. Mit der vorgeschlagenen Methode HTS-PLATE können Platte und Bänder erwärmt werden. Damit kann der Markt der Walzfabrikate bedient werden, der mit 1,8 Mio t einen Anteil von 75% ausmacht. Es kann sicher nur ein Teil des Marktes wirklich erreicht werden, weil z. B. die Plattendicke ein einschränkender Faktor ist. Es ergibt sich daraus aber ein großes Potenzial.

## 7 Schutzrechtssituation

Die Grundzüge der Technologie – die Relativbewegung eines leitenden Materials zu einem Magnetfeld – sind bereits lange wohlbekannt. Bereits früh wurden Patentanmeldungen für z. B. Kalenderwalzen und deren Erwärmung durch Rotation in einem DC-Magnetfeld eingereicht. G. Mohr entwickelte diese Technologie weiter und wandte sie auf vorzugsweise Aluminium an (US4761527). Hier wurden bereits auch schon Techniken mit Linearbewegungen vorgestellt, indem Permanentmagnete auf eine Kette geklebt und diese über einem Werkstück fortbewegt wurde.

Die Supraleitung fand in einem Patent von Sintef (EP1582091) Einzug in diese Technik. Für dieses noch gültige Schutzrecht hat Zenergy Power eine Lizenz erworben.

Da hiermit im Grunde bereits alle Prinzipien bereits bekannt sind, wird für das vorliegende Vorhaben nur noch das entsprechende Spezialgebiet untersucht.

Im Bereich flacher Werkstücke findet sich der größte Teil der Entwicklung im Bereich Stahl und Induktionsherd. Für Stahl finden sich zumeist hochfrequente Anlagen. Für Induktionsherde findet sich eine Anmeldung aus dem Jahre 1959 (US2912552), die im Prinzip bereits ein mechanisch

rotierendes flaches Magnetfeld vorstellt. Aufgrund des Alters liegt somit auch kein grundlegender Schutz für die Technologie vor. Darüberhinausgehende Anmeldungen konnten nicht gefunden werden.

Zenergy Power plant die Anmeldung gewerblicher Schutzrechte für die hier entwickelte Technik.

## 8 Nebeneffekte

Die Durchführung dieses Vorhabens hat Zenergy Power nicht nur ermöglicht, weitergehende Konzepte zum erfolgreichen Einsatz der HTS Technologie und der damit verbundenen Ressourcenschonung zu untersuchen, sondern auch bestehende Auslegungstechnologien zu verbessern. Dies gilt für die bestehende Induktionsheizertechnik sowie auch für deren Erweiterung auf andere Geometrien wie auch Werkstoffe. So wird auch das begonnene Projekt „Energieeffizienz“ (Akz. 26966) hiervon profitieren, da mit der Entwicklung „WOBBLER“ auch bereits Bewegungen magnetisch nicht linearer Bauteile im Prinzip erarbeitet wurden. Ohne die Bereitstellung eines Förderprojektes wie des hier durchgeführten wäre es nicht möglich gewesen, die HTS-Technik für die Induktionserwärmung so genau zu evaluieren. Durch das Vorhaben wurde die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens erheblich gestärkt.

## 9 Fazit

Verschiedene Konzepte für Magnetheizer mit einer HTS-Spule als Erzeuger eines magnetischen Gleichfeldes sind durch FEM-Berechnungen und durch Betrachtungen zur Konstruktion untersucht worden. Die Aufheizung des Werkstücks wird dabei durch eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Magneten nach dem Induktionsprinzip erreicht. Bisherige Technik beherrscht die Erwärmung zylindrischer nichtmagnetischer Werkstücke durch Drehung. In diesem Projekt wurden Möglichkeiten untersucht das Werkstück ruhen zu lassen und andere Elemente des magnetischen Kreises zu bewegen, um das Magnetfeld zu modulieren.

Es zeigt sich bei den FEM-Berechnungen, dass es entscheidend ist, wie groß die Amplitude der Schwankung der magnetischen Kraftflussdichte im Werkstück ist. Bei der Option Wobbler zeigt sich das am deutlichsten: Hier ist im statischen Fall die Kraftflussdichte sehr hoch dank der Leistungsfähigkeit der HTS-Spule. Die Amplitude, die beim Betreiben des Wobblers aber dynamisch erreicht werden kann, ist jedoch sehr gering. Man kann überschlagsmäßig davon ausgehen, dass die Heizleistung quadratisch von dieser Amplitude abhängt.

Ähnliches gilt für das rotierende Joch, welches für die Option ROTH untersucht wurde. Hier wechselt das Magnetfeld zwischen Maximum und Null, also ist die Amplitude halb so groß wie das Maximum. Bei der hier nicht näher untersuchten Variante, den Gesamtmagneten rotieren zu lassen, d. h. das bekannte Prinzip einfach umzukehren wird von einer ähnlichen Leistungsfähigkeit ausgegangen: Schaut man sich dagegen den etablierten Magnetheizer mit rotierendem Werkstück nach diesen Gesichtspunkten an, dann sieht man das vom Werkstück aus gesehen das Magnetfeld umgepolt wird, also die Amplitude doppelt so hoch ist wie das statische Feld und man erreicht eine vierfache Leistung.

Die Umkehrung des Magnetfeldes macht sich auch die in HTS-PLATE vorgestellte Variante mit zwei Rotoren zu Nutze. Hier wird das Magnetfeld im Werkstück mehrmals je Umdrehung umgeklappt.

Als Konsequenz zeigt sich, dass in der favorisierten Variante der HTS-PLATE, ein rotierender Magnet mit teilweise bewegtem Kryosystem nicht zu umgehen ist. Es gibt dafür technische Lösungen, die in den Konstruktionsansatz eingeflossen sind. Die Kosten übersteigen jedoch dem

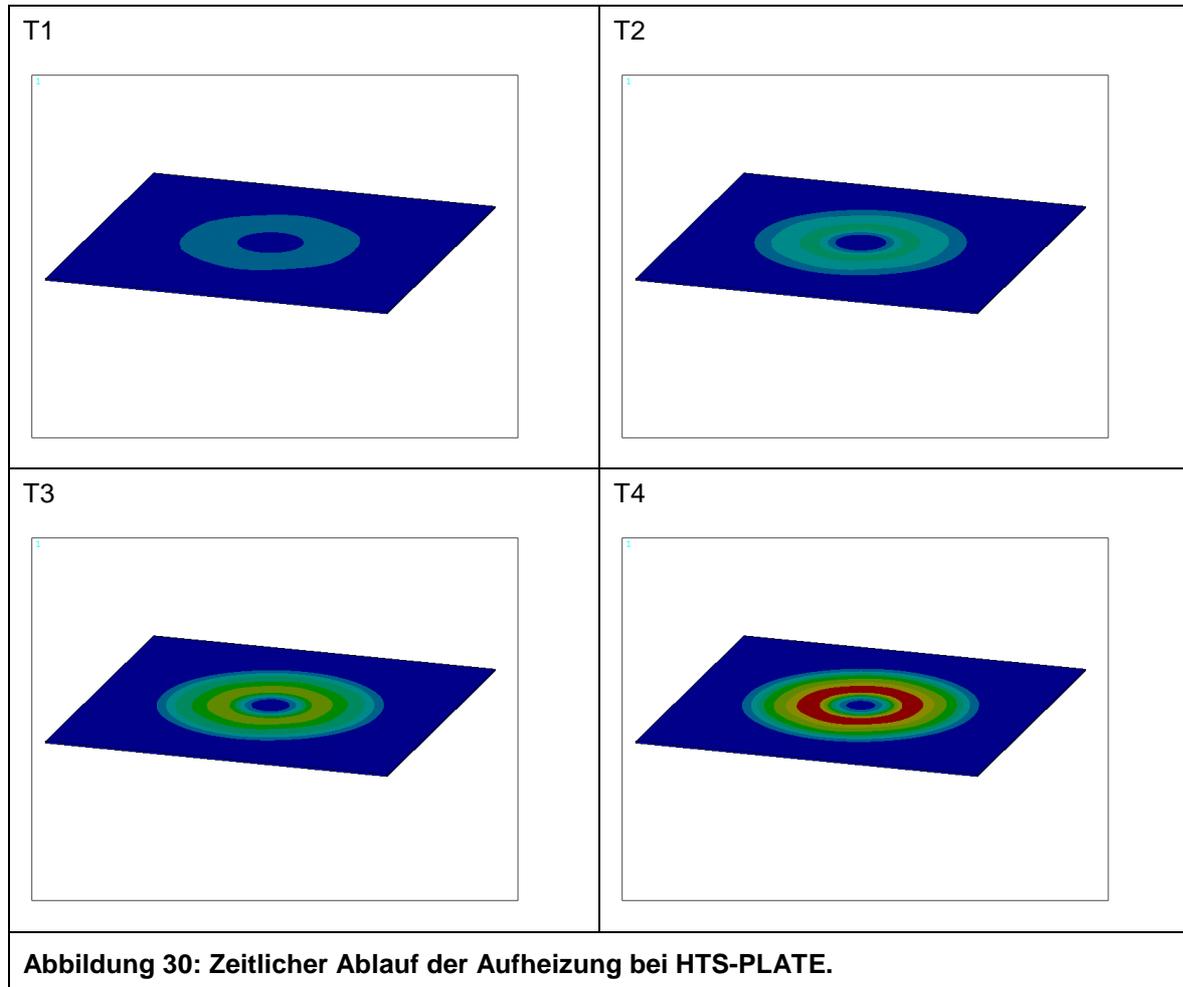
was aus heutiger Sicht am Markt zu vertreten wäre. Erst wenn das bewegte Kryosystem und die HTS-Drähte kostengünstiger werden, kann in der Zukunft eine solche Konstruktion in Betracht gezogen werden.

Die Betrachtung der Konstruktion und der Kosten einer Anlage zeigt, dass eine solche Maschine zur Zeit am Markt nicht zu etablieren sein wird. Mit der projizierten Preisentwicklung und der Lernkurve in anderen Bereichen ist aber mittelfristig (~5 Jahre) ein Preis zu erreichen, der im Markt bestehen kann. Als nächsten Schritt plant Zenergy Power mit potenziellen Kunden in Gespräch zu kommen, um die Anforderungen im Industrieumfeld besser verstehen zu können.

## 10 Anhang

### 10.1 Aufwärmung bei HTS-PLATE

Für die Plattenerwärmung nach der Option HTS-PLATE zeigen die folgenden Bilder die zeitliche Entwicklung in vier Zeitschritten T1 bis T4.



### 10.2 Stromfluss bei ROTH

Die folgende Bilderfolge zeigt exemplarisch für den Fall ROTH wie Wirbelströme im Werkstück verlaufen. Die Folge T1 bis T6 besteht dabei aus aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, bei der ein Polschuh des Jochs (siehe Abbildung 5) über das Werkstück streift. Bei T1 und T2 bewegt sich der Polschuh auf das Werkstück zu und das ansteigende Magnetfeld führt zu dem abgebildeten Kreisstrom. Bei T3 befindet sich das Joch genau über dem Werkstück und das Magnetfeld im Werkstück ändert sich kaum; daher sind die Wirbelströme klein und unstrukturiert. Bei T6 hat das Joch dem Bereich des Werkstücks verlassen und das Magnetfeld wird schwächer. Daher bildet sich eine Wirbelstrom wie zu Beginn, aber in entgegengesetzter Richtung.

