



**TRITHOR**  
unlimited power



PROJECT TITLE:

ROSINE

Date:

22577

2006-05-04

## Details of Project:


PROJECT NAME:	ROSINE Phase 1
CONTRACT No.:	22577
Title of Document:	Abschlussbericht
Project Title:	ROSINE
Number of Document:	
Revision of Document:	1.1
Date:	2006-05-04

Author:	Carsten Bühner
Controll:	Ingolf Hahn
Approval:	Werner Witte

ROSINE

# INHALT

<b>1</b>	<b>PROJEKTZIEL</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>EINFÜHRUNG</b>	<b>4</b>
2.1	INDUKTIONSTECHNIK – STAND DER TECHNIK	4
2.2	HTS TECHNOLOGIE – STAND DER TECHNIK	6
<b>3</b>	<b>ÜBERSICHT UND ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE IM DETAIL</b>	<b>7</b>
4.1	WP 1: ENDNUTZERANFORDERUNGEN UND SYSTEMDESIGN	8
4.1.1	MEILENSTEINE	8
4.1.2	TASK 1.1 DEFINITION DER ENDNUTZERANFORDERUNGEN	8
4.1.3	TASK 1.2 BIS 1.4 GESAMTKONZEPT / BASICDESIGN, ANFORDERUNGEN AN DAS MAGNETSYSTEM, ANFORDERUNGEN AN DAS ROTATIONSSYSTEM	11
4.1.4	FAZIT UND VERBRAUCHSABSCHÄTZUNG	14
4.2	WP 2: BILLET HANDLING UND ROTATIONSSYSTEM	14
4.2.1	MEILENSTEINE	14
4.2.2	TASK 2.1 ANFORDERUNGEN DER EINZELKOMPONENTEN (MOTOR, KONVERTER, LEISTUNGSELEKTRONIK)	14
4.2.3	TASK 2.2 DESIGN DES ROTATIONSSYSTEMS	14
	WP 3: MAGNETSYSTEM	14
4.2.4	MEILENSTEINE	14
4.2.5	TASK 3.1 ANFORDERUNGEN AN DIE EINZELKOMPONENTEN DES MAGNETSYSTEMS	14
4.2.6	TASK 3.2 TECHNISCHE AUSLEGUNG DES MAGNETSYSTEMS	14
4.2.7	TASK 3.3 TECHNISCHE AUSLEGUNG DES CRYOSYSTEMS	14
4.2.8	TASK 3.4 HERSTELLUNG UND TEST DER HTS-SPULEN	14
<b>5</b>	<b>WETTBEWERBSSITUATION, SCHUTZRECHTE UND PUBLIKATION</b>	<b>14</b>
5.1	WETTBEWERB	14
5.2	SCHUTZRECHTE	14
5.3	VERÖFFENTLICHUNGEN	14
<b>6</b>	<b>PROJEKTADMINISTRATION</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG</b>	<b>14</b>
9.1	FRAGEBOGEN	14
9.2	ABSCHÄTZUNG KRÄFTE DURCH UNWUCHT	14

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 3 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

# 1 Projektziel

Ein neuartiger Induktionsheizer für die Erwärmung oder das Aufschmelzen von Kupfer, Aluminium oder Messing, aber auch Stahl wird unter Ausnutzung von Hochtemperatur-Supraleitungstechnologie entwickelt. Es wird ein Wirkungsgrad oberhalb von 90% erwartet, im Vergleich zu <60% bei konventionellen Anlagen ein gewaltiger Sprung.

Das zugrundeliegende Prinzip basiert nicht auf einem 50Hz-Induktionsheizer, der ein Wechselfeld (AC) in dem zu erwärmenden Metallstück generiert, sondern auf einer durch einen Motor erzeugten Relativbewegung des Metallstücks in einem durch Supraleiter erzeugten magnetischen Gleichfeld (DC).

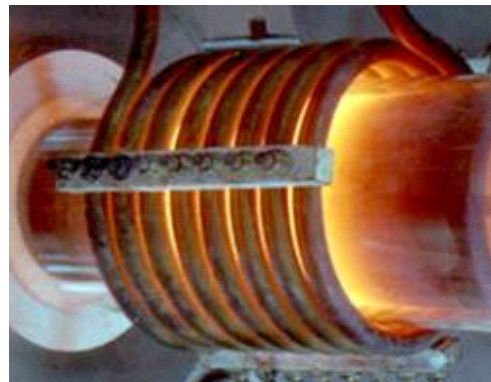
Das Projekt ROSINE wurde in zwei Phasen aufgeteilt. Diese stellen inhaltlich dar (1) den Design- und konstruktiven Teil und anschließend (2) die Umsetzung in einen Demonstrator und Test daran. Die in diesem Bericht behandelte Projektphase stellt den ersten Teil dar.

Ziel des Gesamtprojektes ist die Erforschung der grundsätzlichen Möglichkeiten dieser neuen, innovativen Technologie und der Nachweis anhand eines Prototypen. Dies umfasst FEM-Simulationsrechnungen, Tests zur Warmfestigkeit zur Kraftübertragung, die Umsetzung in einen Prototypen und der Vergleich Simulation – Praxis.

Ziel dieser Projektphase war, die Energieeinsparungspotentiale sowie die prinzipielle Machbarkeit des geplanten Systems zu untersuchen sowie die Konstruktionsunterlagen für die Umsetzung in einen Prototypen zu erstellen. Zur Verifikation wurde auch ein HTS Spule für das Magnetsystem ausgelegt, gebaut und getestet.

Die Arbeiten wurden von den Firmen Bültmann GmbH, Neuenrade und Trithor GmbH, Rheinbach gemeinsam durchgeführt.

**Mit Umwelttechnologie sparen**




Energieintensive Metallerwärmung mittels Induktion

## 2 Einführung

### 2.1 Induktionstechnik – Stand der Technik

Für die mechanische Umformung großer Metallstücke in der Nicht-Eisen (NE) Industrie müssen diese zunächst vorgewärmt werden. Ohne diese Vorwärmung wären die benötigten Kräfte zu hoch, das Material wird „weich gemacht“. Die Metallstücke, typischerweise als „Bolzen“ oder Blöckchen bezeichnet, werden dabei durch Gasöfen oder induktiv erwärmt. Solche Bolzen aus Aluminium, Kupfer oder Messing sind meist rund mit einem Durchmesser von 100-400mm und zwischen 250 und 1500mm lang. Die gewünschten Endtemperaturen variieren zwischen ca. 400 und 950°C.

Ofenanlagen dieser Art finden sich z.B. vor Strangpressen, mit deren Hilfe Aluminiumprofile für Fensterrahmen, den Flugzeug- oder Maschinenbau gefertigt werden. Messingprodukte aus Anla-

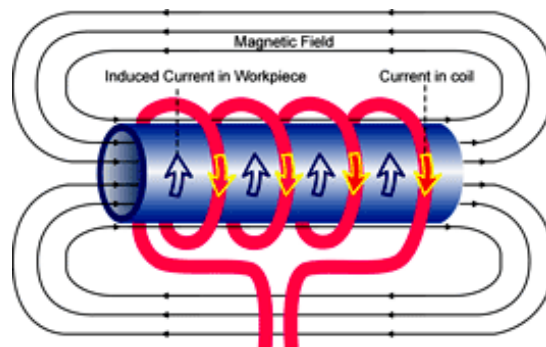
	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 4 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

gen dieser Art finden Anwendung bei der Meeressalzung, in Kraftwerken und Automobilbau, während Produkte aus Kupfer z.B. in Wärmetauschern eingesetzt werden. In der EU werden jährlich allein 600.000t Cu mit solchen Maschinen umgeformt.

In der Praxis der Aluminium- und Messingverarbeitung ist es dabei wichtig, dass die Temperatur über den Querschnitt vergleichsweise gleichverteilt ist, über die Länge allerdings der Bolzen auf der maschinenzugewandten Seite wärmer ist. Dies hat seinen Grund in der beim Umformungsbeginn benötigten höheren Kraft. An dieser Stelle werden auch gleichzeitig die Unterschiede beider Techniken deutlich.

Im Falle von Gasöfen wird der Bolzen von außen durch eine Flamme direkt oder durch Strahlung indirekt erwärmt. Der Ausgleich innerhalb des Bolzens erfolgt dabei durch metallische Wärmeleitung. Da also die Wärme vollständig von Außen nach Innen durch Wärmeleitung transportiert werden muss, erfolgt bei dieser Technik typischerweise eine Wartezeit zum thermischen Ausgleich, in der der Bolzen auf Temperatur gehalten wird. Gelingt kein Ausgleich oder ist die Zeit zu kurz, bleibt der Kern zu kalt und kann zu Schäden oder zum Maschinenstillstand durch Blockade führen.


Eine bessere Temperaturverteilung bietet die induktive Erwärmung, auch lokale Überhitzung tritt hierbei nicht auf. Bei Systemen dieser Art wird eine Spule um den Bolzen angebracht. Diese Spule wird mit hohen Wechselströmen (typ. 50Hz oder höher) beaufschlagt, die ein magnetisches Wechselfeld im Bolzen erzeugen. Hierdurch werden wiederum Ströme im Bolzen induziert, die ihrerseits zur Erwärmung führen. Hierbei wird also die Wärme im Bolzen erzeugt. Da diese Ströme gleichzeitig abschirmend wirken, dringt diese Art der Erwärmung auch nur begrenzt ein (typ. mehrere cm). Nebenstehende Abbildung zeigt ein Prinzipbild. Auch hier findet der Ausgleich letztendlich durch Wärmeleitung statt. Allerdings ist die Wärmeverteilung schon wesentlich günstiger als bei der Gaserwärmung, so dass auch geringere Ausgleichszeiten notwendig sind.



Fertigungstechnisch vorgezogen wird daher die induktive Erwärmung. In beiden Fällen ist die Effizienz vergleichsweise niedrig (ca. 50-65%), wegen der niedrigen Energiepreise für Gas werden diese von manchen Firmen jedoch bevorzugt.

Nebenstehende Abbildung zeigt Messingbolzen in der Zuführung zu einem Induktionsofen mit einer Presse dahinter. Auf der relativ langen Strecke im Ofen werden die Bolzen kontinuierlich aufgewärmt, bis sie ihre Zieltemperatur aufweisen. Je nach Anlage, können bis zu ein Bolzen pro Minute abverlangt werden. In konventioneller Bauweise wird diese hohe Taktrate durch lange Verweilzeiten ausgeglichen. Stoppt die Presse kann es zu Überhitzungen kommen und einige oder alle Bolzen müssen zunächst wieder entladen und neu eingeschmolzen werden.



	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 5 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

## 2.2 HTS Technologie – Stand der Technik

Mit Supraleitern kann Strom ohne elektrische Verluste – und somit ressourcenschonender – übertragen werden. Im Gegensatz zu den etablierten Tieftemperatur-Supraleitern (TTS), die mit flüssigem Helium auf -269°C gekühlt werden müssen, erreichen Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) bereits bei -196°C, 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-fach höhere Stromtragfähigkeit aufweisen. Supraleitung wird deshalb von Experten als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts eingestuft.


Nach Ihrer Entdeckung Ende 1988 hat es annähernd 15 Jahre gedauert, bis mit erheblichem finanziellen Aufwand aus Industrie und öffentlicher Hand ein Fertigungsprozess entwickelt worden ist, der eine verlässliche Bereitstellung im industriellen Maßstab erlaubt. Inzwischen wird auf Basis von Dünnschichtleitern bereits die nächste Generation an Leitermaterialien entwickelt. Die Trithor GmbH stellt HTS-Drähte industriell her und entwickelt gleichzeitig die neue und kostengünstigere Variante. Die HTS-Spulenttechnologie wurde in verschiedenen Forschungsprojekten mit renommierten Forschungspartnern entwickelt und ausgebaut.

Supraleiter sind extrem gut leitende Materialien, die verschwindende Verluste mit hoher Leistungsdichte verbinden. Leider weisen im Falle von Wechselstromanwendungen (AC) auch Supraleiter Verluste auf, da diese dann bei sehr niedrigen Temperaturen abgeführt werden müssen. Im Idealfall werden Supraleiter also im Gleichstrombetrieb (DC) verwendet.

## 3 Übersicht und Ergebniszusammenfassung

Das Gesamtprojekt sieht folgende inhaltlichen Aufgaben vor:

- **WP 1: Endnutzeranforderungen und Systemdesign**
  - **Task 1.1**     **Definition der Endnutzeranforderungen**
  - **Task 1.2**     **Gesamtkonzept / Basicdesign**
  - **Task 1.3**     **Anforderungen an das Magnetsystem**
  - **Task 1.4**     **Anforderungen an das Rotationssystem**
- **WP 2: Billet Handling und Rotationssystem**
  - **Task 2.1**     **Anforderungen der Einzelkomponenten (Motor, Konverter, Leistungselektronik)**
  - **Task 2.2**     **Design des Rotationssystems**
  - Task 2.3     Herstellung und Bezug der Einzelkomponenten
  - Task 2.4     Temperaturmesssystem
  - Task 2.5     Schnittstellendefinition Rotations- zu Magnetsystem und Gesamtsteuerung
  - Task 2.6     Zusammenbau und Test des Rotationssystems

 <b>TRITHOR</b>		<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 6 of 25
		Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

- **WP 3: Magnetsystem**
  - **Task 3.1 Anforderungen an die Einzelkomponenten des Magnetsystems**
  - **Task 3.2 Technische Auslegung des Magnetsystems**
  - **Task 3.3 Technische Auslegung des Cryosystems**
  - **Task 3.4 Herstellung und Test der HTS-Spulen**
  - Task 3.5 Herstellung/Bezug und Lecktest des Cryostaten
  - Task 3.6 Zusammenbau und Funktionstest des Magnetsystems
  - Task 3.7 Lieferung des Gesamtsystems an Bültmann
- WP 4: Systemzusammenbau und Extrusionstest
  - Task 4.1 Aufbau der Versuchsstrecke bei Bültmann
  - Task 4.2 Zusammenbau der Einzelanlagen Rotationssystem und Magnetsystem
  - Task 4.3 Definition der Testprozeduren und Testextrusionen
  - Task 4.4 Extrusionstest mit Billets, Bewertung des Anlagenverhaltens
  - Task 4.5 Transport der Anlage zu Industrietester, Aufbau, Inbetriebnahme und Test
  - Task 4.6 Abgleich und Überarbeitung des Anlagen- und Wartungskonzeptes für die Zukunft

Im Rahmen der ersten Projektphase wurden dabei nur die **fett** hervorgehobenen Aspekte untersucht. Bei Task 2.2 und 3.4 gab es dabei überschneidende Aufgaben. Die weiteren Punkte sind Thema der zweiten Phase und bauen auf den hier dargestellten Ergebnissen auf.

Die Entwicklungsarbeiten im Rahmen der ersten Projektphase führten zu einer im industriellen Umfeld umsetzbaren Lösung, die sowohl die technischen als auch wirtschaftlichen Rahmenparametern erfüllen. Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf umfangreichen 3D FEM Simulationen, die mit Ansys durchgeführt wurden.


Im Gesamtsystem werden Effizienzen >90% erreicht. Die Temperaturkontrolle muss materialabhängig erfolgen, da unterschiedliche Verhaltensweisen und Ansprüche der Anwender erfüllt werden müssen. Während pyrometrische Verfahren bei Kupfer und Messing möglich sind, wird für Aluminium eine Kontaktmessung vorgesehen.

## 4 Ergebnisse im Detail

Die Arbeiten wurden auf drei Arbeitspakete (WP) aufgeteilt und hatten die Themen

- WP 1: Endnutzeranforderungen und Systemdesign
- WP 2: Billet Handling und Rotationssystem
- WP 3: Magnetsystem

zum Inhalt. Hierbei handelte es sich ausschließlich um Machbarkeits- und Designfragen sowie den Bau einer Testspule.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>		Revision 1.1	Page 7 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1		Date: 2006-05-04	

Den größten Aufwand stellten dabei die Zusammenstellung der verschiedenen Anforderungen, der Materialdaten sowie die FEM Berechnungen dar.

## 4.1 WP 1: Endnutzeranforderungen und Systemdesign

### 4.1.1 Meilensteine

Nr.	Ziel	Status
M1	Die Warmfestigkeiten erlauben die Kraftübertragung.	erfüllt
M2	Es kann ein ausreichendes Magnetfeld erzeugt werden, um die Erwärmung zu gewährleisten und die AC-Rückkopplung ist vertretbar.	erfüllt
M3	Die Gesamteffizienz eines großen Systems errechnet sich zu >85% und die erwartete Effizienz des Prototypen wird bestimmt	erfüllt

### 4.1.2 Task 1.1 Definition der Endnutzeranforderungen


Da es sich bei dem hier untersuchten Konzept um eine Kombination von mechanischen und elektrischen Effekten handelt, müssen mehr Informationen zur Verfügung gestellt werden als bei der konventionellen Induktions- oder Gasheizung. Für die Ausführung dieses Tasks waren daher zwei Aufgaben zu lösen.

Einerseits mussten die beim Anwender typischen geometrischen Abmessungen und die Materialien bestimmt werden. Weiterhin waren für diese Materialien die verschiedenen physikalischen Daten notwendig. Diese umfassten Festigkeiten, Wärme- und elektrische Leitfähigkeiten, jeweils in Abhängigkeit von der Temperatur.

Zunächst wurden bei Besuchen möglicher Anwender im persönlichen Gespräch die geometrischen Anforderungen bestimmt<sup>1</sup>. Die Daten wurden mittels Fragebogen bei Firmen erhoben. Falls die Materialdaten nicht in der gewünschten Ausführlichkeit zur Verfügung standen, wurden sie mit Hilfe von Verbandsinformationszentren oder Literatursuche beschafft.

Die Auswertung der gesammelten Informationen führte zu nachfolgenden Ergebnissen:

<sup>1</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass diese Daten in der Regel als vertraulich erachtet werden und daher nur ungern mitgeteilt werden.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 8 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	



**Geometrie**

Die Größen der zu erwärmenden Billets lassen sich grob einteilen in folgende Klassen:

		Durchmesser	Länge
Klasse 1	Groß	200 – 400 mm	500 – 1500 mm
Klasse 2	Mittel	150 – 200 mm	300 – 600 mm
Klasse 3	Klein	100 – 180 mm	150 – 400 mm

Dabei entspricht die Klasse 2 der am häufigsten auftretenden Anforderung. Die Billetgröße hängt typischerweise von den Einrichtungen eines Werkes und den Endprodukten ab, weniger vom Hersteller.

**Temperatur**

Die Zieltemperaturen sind zumeist abhängig vom Material, für Kupfer bzw. Kupferlegierungen liegen die Zieltemperaturen bei 500 – 950°C, für Messing bei 500 – 650°C und Aluminium bei 450 – 550°C.

**Temperaturverteilung**

Die Anforderungen hinsichtlich der Temperaturverteilung sind sehr unterschiedlich je nach Material und Endanwendung. Die höchsten Anforderungen herrschen im Bereich der Flugzeugzulieferung von Aluminium Bauteilen. Bei Kupfer ist ein axialer Temperaturgradient nicht notwendig, bei Messing gelten die gleichen Anforderungen wie bei Aluminium.

Am Rande sei dabei bemerkt, dass bei konventionellen Anlagen der Transport von Erwärmungsanlage zur Presse i.d.R. durch die Luft erfolgt. Hierbei wird allein durch Strahlung auf der Außenhülle bereits soviel Wärme abgegeben, dass die geforderte präzise radiale Temperaturverteilung in der Praxis nicht erreicht werden.

Eine Temperaturmessung erfolgt dabei im praktischen Betrieb ausschließlich von Außen. Während bei Messing und Kupfer pyrometrische Verfahren akzeptiert werden, verlässt man sich bei Aluminium wegen der verfälschenden Oxidhaut nur auf Kontaktmessungen – zumeist die Messung der Leitfähigkeit.


**Taktrate und Erwärmungsgeschwindigkeit**

Die der Erwärmung nachfolgende Presse wird zumeist mit einer Taktrate von 60-120s bedient.

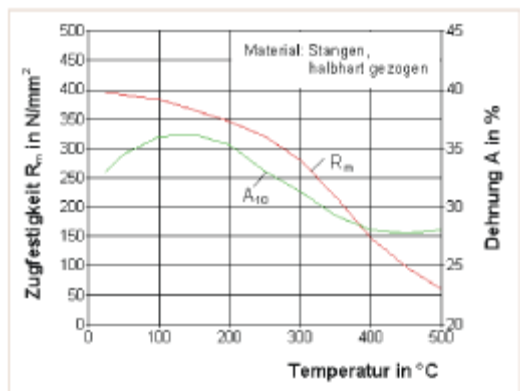
Dies gibt die gewünschten Aufwärmgeschwindigkeiten wieder. Im Gegensatz dazu stehen auch bereits bei etablierter Technik die Anforderungen an die Temperaturverteilung. Gelöst wird dies durch eine längere Aufwärmzeit des einzelnen Billets und Bevorratung in einem Ofen.

**Mechanische Materialdaten**

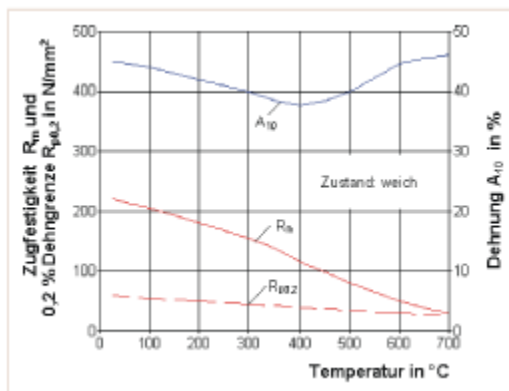
Die Zugfestigkeit eines exemplarischen Materiales ist in nachstehender Abbildung zu sehen.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>		Revision 1.1	Page 9 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1		Date: 2006-05-04	

## Warmfestigkeiten



Messing



Cu


Quelle: Deutsches Kupferinstitut

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Temperatur die Festigkeit erheblich abnimmt.

An einem weiteren, noch extremeren Beispiel für die Al Legierung 6063 seien die Anforderungen in Zahlen gefasst:

Temperatur	Streckgrenze	Zugfestigkeit
°C	MPa	MPa
25	215	220
100	180	200
205	150	160
315	59	66
425	12	14
540	3	5

Die hier angegebenen Werte entstammen Warmfestigkeitsmessungen. Bei höheren Temperaturen hat das Werkstück nur 5N/mm<sup>2</sup> Zugfestigkeit, bei tieferer 220N/mm<sup>2</sup>. Diese Angaben liefern ebenfalls Indikatoren für eine Druckbelastung (vergleichbare Größenordnung). Eine Krafteintragung durch einem mechanisch kraftschlüssigen Antrieb muss diesen Grenzen Rechnung tragen. Gleichzeitig muss das Gesamtsystem die Materialausdehnung bei Temperaturerhöhung berücksichtigen. Dies liegt für alle Materialien allerdings in vergleichbaren Größenordnung hinsichtlich der praktischen Relevanz (einige mm).

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 10 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

Die Dichte der Materialien unterscheiden sich nur wesentlich für Al mit etwa 2,7g/cm<sup>3</sup> zu sonst etwa 8g/cm<sup>3</sup>, dafür ist die Wärmekapazität mit fast 900 J/(kg K) etwa doppelt so hoch. Für Cu und Messing werden so absolut gesehen etwa 1,5fach höhere Wärmemengen benötigt. Entsprechendes gilt somit auch für die Antriebsleistungen.

**Elektrothermische Materialdaten**

Die Elektrothermischen Daten (Leitfähigkeiten für Strom und Wärme) unterscheiden sich bei den betrachteten Materialien merklich; technisches Cu liegt mit 45 m/(Ohm \* mm<sup>2</sup>) im oberen Bereich, Aluminium bzw. Al-Legierungen mit 25-34 m/(Ohm \* mm<sup>2</sup>) im mittleren und Messing eher niedrig (<14 m/(Ohm \* mm<sup>2</sup>))<sup>2</sup>. Im jeweils zu betrachtenden Temperaturbereich konnte allerdings eine lineare Abhängigkeit von der Temperatur angenommen werden. Die verfügbaren Daten wurden bei der FEM Simulation berücksichtigt,

**Oberflächenqualitäten & Unwuchten**

Die zu erwärmenden Bolzen kommen meist aus einem Stranggussverfahren und werden gesägt geliefert. Aus diesem Grunde können die Stirnflächen um bis zu 2° schräg sein. Dies muss durch eine entsprechende Ausgestaltung der Haltevorrichtung berücksichtigt werden. Die erwartete Exzentrizität wird mit 5mm angenommen. Daraus ergibt sich eine Seitwärtskraft von 200-500N, die es bei Rotation abzufangen gilt.


Die Bolzen können mit einer Oxidhaut bzw. Zunder bedeckt sein, Oberflächenbeschädigung durch die Erwärmungseinrichtung werden i.A. bis zu einer Tiefe von 1-2mm toleriert. Bei Aluminium sind sie durch die Widerstandstemperaturmessung z.T. auch schon heute üblich.

**4.1.3 Task 1.2 bis 1.4 Gesamtkonzept / Basicdesign, Anforderungen an das Magnet-system, Anforderungen an das Rotationssystem**

Im Prinzip gilt es „nur“ ein rundes Werkstück aus Metall durch Bewegung in einem mittels Hochtemperatur-Supraleitern erzeugten DC Magnetfeld zu erwärmen. In der Praxis unterliegt diese Aufgabe jedoch den in Task 1.1 festgestellten Randparametern. Zusätzlich hierzu müssen ökonomische Faktoren, Betriebssicherheit und technische Durchführbarkeit berücksichtigt werden.

Bereits im Vorfeld zu diesem Projekt hatten die Projektpartner Voruntersuchungen durchgeführt. Zum einen sind FEM Voruntersuchungen durchgeführt worden für Rotations- und Linearbewegungen. Eine Linearbewegung wäre mechanisch einfach zu lösen, allerdings zeigen die FEM Berechnungen, dass die ständig wechselnde Bewegungsrichtung auch im Supraleiter Spannungen induziert, die zu höheren Verlusten führt. Dies wurde im Rahmen des Projektes nochmals untersucht und verifiziert. Die Ströme liegen dabei in vergleichbarer Größenordnung zu den Verursachenden Strömen und sind damit zu hoch für einen effizienten Betrieb. Dieser Weg wurde daher ausgeschlossen für die weitere Betrachtung und nur ein rotierendes System berücksichtigt.

<sup>2</sup> Zum Vergleich: Stahl liegt bei 6 m/(Ohm \* mm<sup>2</sup>)

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 11 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

Zum anderen wurde ein kleiner Funktionsdemonstrator (Tischdemo) gebaut. Mittels einer Stahlwelle wurde ein kleines Billet ( $\varnothing 80 \times 250\text{mm}$ ) in einem schwachen Magnetfeld (100mT) gedreht. Dabei lag das Billet parallel zu einer Antriebswelle und wurde durch Lager gegenfixiert. Hiermit konnte ein Messingbillet in 10-15 Minuten auf ca.  $100^\circ\text{C}$  erwärmt werden.

**Mechanischer Antrieb**

Dem folgend, wurden im Projekt verschiedene Varianten des mechanischen Antriebs überprüft. Eine Möglichkeit ist die Rotation durch Antriebswelle und Gegenlager.

Für die Beurteilung waren folgende Aspekte wichtig:

- Ausdehnung des Billets bei Erwärmung (bis zu ca. 5mm)
- Temperaturtoleranz der verwendeten Bauteile bis  $1000^\circ\text{C}$
- Keine wesentlichen Oberflächenbeschädigungen
- Kosten und Betriebssicherheit

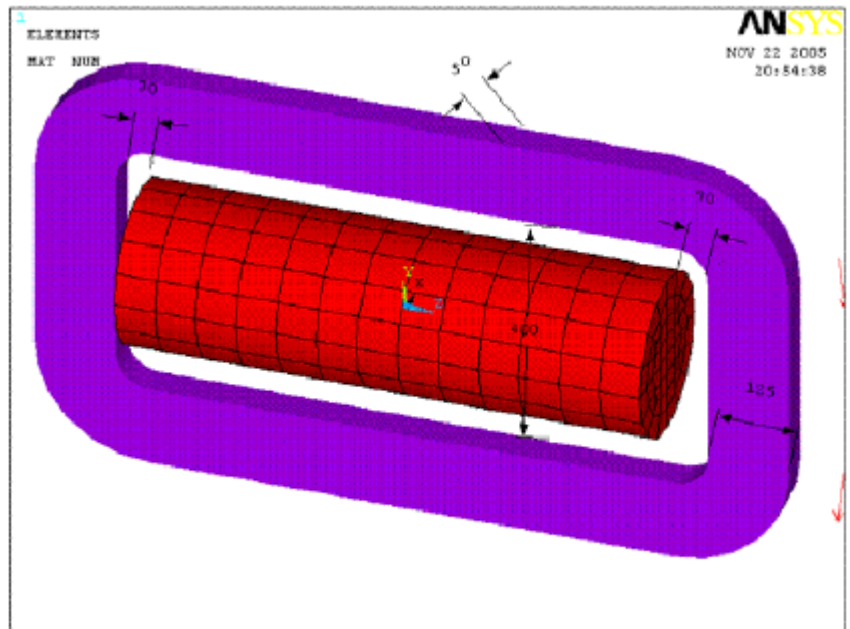
Gegenlager und Antriebswelle in Verbindung mit einer entsprechenden Regelung zum Ausgleich der Ausdehnung und passender Materialwahl stellen einen guten Lösungsweg dar.


**Ausführung des Magnetsystems**

Das Magnetfeld kann durch eine Luftspule zu erzeugt werden. Da der Supraleiter als Flachleiter nicht seitlich gebogen werden kann, wäre eine solche Luftspule immer als Racetrackspule auszuführen, wie nebenstehende Abbildung zeigt. Dieses Modell wurde für die Modellierung verwendet.

Auf Basis der gesammelten elektrischen und Wärmeparameter wurde ein gekoppeltes 3D-FEM Modell entworfen. Hierfür wurde die Firma CADFEM engagiert, da sie bereits Erfahrungen im Bereich Wirbelstrombremse hatte. Als FEM System kam Ansys zur Verwendung, da hier gekoppelte Probleme, insbes. auch mechanische, verlässlich berechnet werden können. Dies war im Hinblick auf die Kräftebetrachtung in der Spule sehr wichtig.

Das entworfene Modell wurde im Weiteren dann bei Trithor



	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 12 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

verwendet, um verschiedenste Varianten zu berechnen.

Folgende Fragestellungen wurden hierbei betrachtet:

- Welche Kräfte und Momente treten im Spulensystem auf
- Tritt eine Rückkopplung auf das Spulensystem auf
- Ist die Erwärmung in einem tolerierbaren Zeitraum möglich
- Welche Feldstärken werden erreicht und welche Ströme sind erforderlich
- Welche Drehmomente werden benötigt
- Wie tief erfolgt die Erwärmung und welche Ausgleichszeiten werden benötigt
- Werden gewollte oder ungewollte Temperaturinhomogenitäten erzeugt.

Die Spulenlänge und –durchmesser wie auch die Dimensionen können in dem Modell variiert werden. Weiterhin können Position, Ebene und Verkippung der Spule angepasst werden. Die 2D Betrachtung erlaubt die Analyse der Feldstärke im Stillstand und Bewegung.


Im Stillstand verlaufen die Felder wie erwartet symmetrisch, der Gesamtstrom wurde so gewählt, dass im Volumen des Billets eine Feldstärke von 400mT nicht unterschritten wird. Zum Vergleich, bei konventionellen Anlagen werden im Randbereich um die Spulenwindungen etwa 400-500mT erreicht. Damit lässt sich ein Billet in etwa 180-240s inkl. Ausgleichszeit erwärmen. Die geforderten radialen Temperaturverteilungen sind nach den Simulationsergebnissen damit ebenfalls möglich, müssten jedoch im Experiment überprüft werden. Extrem hohe Anforderungen der Flugzeugindustrie mittels dieser Simulationen zu überprüfen erscheint vor dem Hintergrund der Fehlergrenzen und der Modellvereinfachungen unrealistisch und bleibt dem Experiment überlassen.

Die erforderlichen Drehmomente werden durch einen entsprechenden Anpressdruck der Welle übertragen.

Durch den induzierten Stromfluss im Billet tritt eine Feldverzerrung auf, die sich auch auf die Spulen auswirkt. Jede Änderung der Drehzahl (oder auch Materialinhomogenitäten oder Asymmetrien, die hier beide zu vernachlässigen sind) führen zu einer Rückinduzierung von Spannung in die Spule. Diese kann bis zu 150V in der betrachteten Konfiguration betragen, wenn die Beschleunigung von 0 auf Solldrehzahl innerhalb einer Sekunde erfolgt. Diese Spannung müsste kurzfristig vom Netzgerät geliefert werden. Sie ließe sich durch die Anwendung entsprechender Anfahr- und Bremsprofile reduzieren.

Für die Spulenauslegung müssen die Feldbelastung, Betriebsstrom und Betriebstemperatur passend gewählt werden. Es wurde eine Betriebstemperatur von 30K bei 100A Betriebsstrom gewählt. Hierbei wurden die Eigenschaften der verfügbaren HTS-Leiter berücksichtigt. Mit höherer Feldbelastung muss die Betriebstemperatur gesenkt werden, um den Strom aufrecht zu halten.

Die Bestimmung der Parameter war ein iterativer Prozess, die ebenfalls verfügbare Cryocooler und Kosten für den HTS-Draht mit berücksichtigten.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 13 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

Als schwierig haben sich schließlich die Kraftwirkungen auf das Spulensystem dargestellt, es wirken zwei maßgebliche Kräfte:

- Die Lorenzkraft, die allein durch das Magnetfeld selbst erzeugt wird. Sie ist bestrebt, die Spule in eine runde Form zu drücken.
- Rückwirkende Drehmomente.

Beide Komponenten haben sich bei den Berechnungen als sehr hoch herausgestellt und müssen entsprechend konstruktiv kompensiert werden. Die Lorenzkräfte erreichen 200kN/m und mehr und erzeugen entsprechende Spannungen in der Spule, die durch das HTS-Drahtmaterial selbst nicht abgefangen werden können.

Das Gegen-Moment der Billetdrehung muss dabei durch die Cryostatenkonstruktion abgefangen werden, und es sind hier erhebliche Wärmebrücken und somit Verluste zu erwarten. Hinzu kommt eine Stützkonstruktion zur Kompensation der Lorenzkräfte, die die Spule auch im Stillstand des Billets belasten.

Die Kühlung sollte einfach gestaltet sein und aus verlässlichen Komponenten bestehen. Da man sich im industriellen Umfeld befindet, kommt eine Badkühlung nicht in Frage und es muss eine Trockenkühlung vorgesehen werden. Auch wenn es Rahmen des Forschungsprojektes genügt, einen Kühler einzusetzen, sollte eine industrielle Anlage hier redundant sein.


Der Cryostat muss dabei thermisch vom Bereich der Billeterwärmung geschützt werden. Im Falle einer Loslösung des Billets (Unfall) soll der Magnet nicht beschädigt werden.

Das Gesamtsystem muss schließlich durch eine gewerbliche Kraft bedienbar sein und unter rauen Umgebungsbedingungen bestehen.

Wegen der sehr tiefen Betriebstemperaturen, den großen Massen im kalten Bereich und den damit verbundenen verhältnismäßig langen Abkühlzeiten ist allerdings davon auszugehen, dass der Magnet und die Kühlung auch bei Stillstand nicht ausgeschaltet werden. Im Falle des Stromausfalles muss der Cryostat daher auch eine Minimalstandzeit von 2h bieten.

Die Stromversorgung muss die erforderlichen Ströme erbringen und durch eine Maschinensteuerung ansteuerbar sein. Besondere Anforderungen an Stabilität und Genauigkeit bestehen allerdings nicht.

Bei konventionellen Anlagen erfolgt die Erwärmung sukzessive durch eine längere Durchlaufstrecke. Dabei werden mehrere Billets hintereinander in einer Röhre induktiv oder durch Gas erwärmt. Nachfolgende Abbildung zeigt Beispiele aus der Al-Industrie. Bei Induktionssystemen werden die Billets dabei häufig direkt auf der Isolation der Induktionsspulen vorgetrieben, so dass es hier auf Dauer zur Abnutzung oder Beschädigung kommt.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>		Revision 1.1	Page 14 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1		Date: 2006-05-04	

## Erwärmungsmethoden

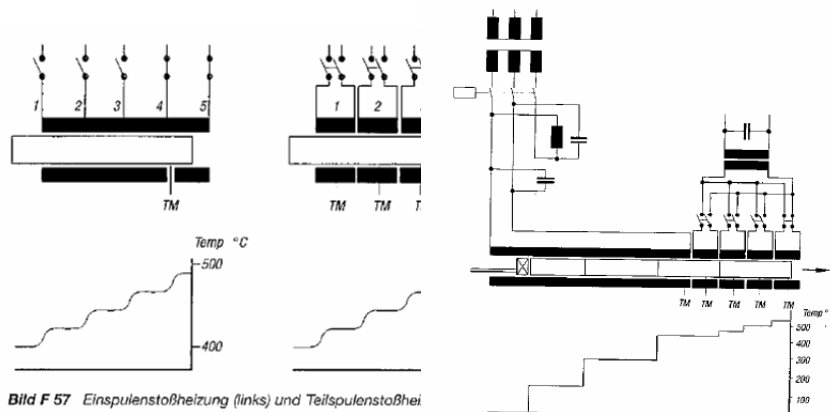


Bild F 57 Einspulenstoßheizung (links) und Teilspulenstoßhei

Bild F 58 Induktionsanwärmofen mit angebaute Teilspulen-Stoßheizofen

Quelle: Aluminium Fachbuchreihe, Strangpressen  
ISBN 3-87017-249-5, 2001



CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY

Kommt es zum Ausfall der Heizanlage, so muss zügig ein Austausch oder Ersatz erfolgen, da nachfolgende Prozesse hiervon abhängen. Fällt die der Heizung nachgeschaltete Presse aus, so kann es zu einer Überhitzung kommen und einige der bereits erwärmten Billets müssen ggf. eingeschmolzen werden.

Im hier untersuchten Verfahren kommt eine Individualerwärmung zum Einsatz. Zur Erfüllung der geforderten Taktzeiten muss eine Gesamtanlage in produktiver Umgebung ebenfalls mehrere Billets parallel erwärmen. Billetgröße, Material, Feldstärke und erlaubte Kräfte limitieren dabei die Schnelligkeit des Aufheizens. Gleichzeitig besteht die Forderung nach Redundanz für den Anlagenausfall.

Dies wird gelöst durch den Aufbau mehrerer Einheiten zur Erwärmung, die individuell gesteuert werden, können. Diese Ausführung erlaubt sowohl die gewünschten Taktzeiten und bringt gleichzeitig Redundanz mit sich, die bei Ausfällen einer Heizungsanlage den weiteren Produktionsbetrieb gewährleistet.

### Ausführung der Temperaturmessung

Eine präzise Temperaturmessung ist ein schwieriges Unterfangen. Die Anforderungen an die Präzision unterscheiden sich erheblich von Anwender zu Anwender und möglichen Lösungen von Material zu Material.

Da ein bewegtes Werkstück vorliegt wäre eine Art berührungslose Messung die praktikabelste, ist aber auch mit erheblichen Fehlerquellen behaftet.

Werden bei Cu und Messing keine zu hohen Anforderungen gestellt, so kann auf pyrometrische Verfahren zurückgegriffen werden. Bei Aluminium verhindert die entstehende Oxidhaut eine ausreichend präzises Messung. Üblich sind hier Prüfspitzen mit Thermoelementen oder zur Wider-

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 15 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

standsmessungen. Dieses Verfahren könnte durch kurzes Anhalten, das auch dem thermischen Ausgleich dient, angewendet werden.

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht in einer Thermospitze auf der Antriebswelle und einer Funkübertragung der Messergebnisse.

Auch Aluminium könnte durch die stirnseitigen Kontaktflächen pyrometrisch erfasst werden. Hierzu würde in die Stirnplatte ein teilkreisförmiger Schlitz eingebracht, der eine sehr dünne Materialwand zum Material hat. Dies müsste am Rand geschehen, wo ein sicherer Flächenkontakt herrscht. Dieser Schlitz könnte als (fast) schwarzer Strahler mittels Pyrometer gemessen werden. Es wäre allerdings eine vorherige Kalibrierung notwendig. Die Qualität einer Berührungsmessung wird allerdings nicht erreicht.

Dieses Thema ist in der nachfolgenden Projektphase weiterhin zu behandeln, da es auch experimentelle Erfahrungswerte und Tests verlangt. In der experimentellen Phase sind auch Tiefenmessungen durch vorher im Billet angebrachte Bohrungen notwendig, um den Vergleich mit der Simulation zu ermöglichen. Letzteres ist im praktischen Betrieb natürlich nicht relevant.

**4.1.4 Fazit und Verbrauchsabschätzung**

Die Simulationen haben gezeigt, dass mittels Rotation im Gleichfeld die gewünschten Erwärmungen erzielbar sind. Dabei sind die Anforderungen an Magnetsystem und Antriebssystem technisch lösbar.

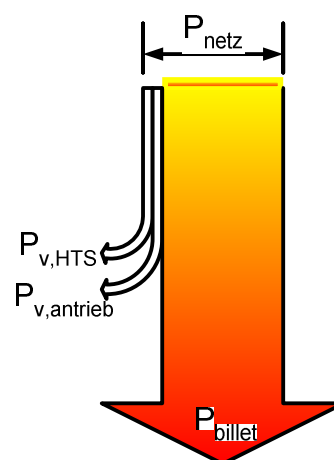
Für ein exemplarisches Gesamtsysteme dieser Art wurden auf Basis der ersten Auslegung Abschätzungen hinsichtlich der Verluste gemacht. Sowohl konventionell als auch mit Supraleitern wird zur Erreichung der Zieltemperatur der gleiche Energieinhalt für das Billet selbst benötigt.


Während konventionell vergleichbar große Energiemengen im Induktionssystem für das Magnetfeld verbraucht werden, kann das Magnetfeld mittels Supraleitung fast ohne Energieaufwand erzeugt werden. Die gesamte Leistung bei Raumtemperatur hierfür liegt bei unter 6kW, bei redundanter Auslegung bei ca. 9-12kW. Für das Cryosystem wurden dabei konservativ angenommene Erfahrungswerte zu Grunde gelegt: 3W/m<sup>2</sup> Flächenverlust, 30W für die Stromzuführungen bei 100A, Betriebstemperatur 30K.

Im Vergleich zu einer Wärmeleistung von 300-500kW ist dies vergleichsweise gering. Im Rahmen des Projektes wurden Auslegungstools erstellt, mit deren Hilfe der Energieverbrauch abgeschätzt werden kann. Diese berücksichtigen Zeiten für die Erwärmung, Temperaturengleich, Verluste durch Strahlung, Elektronik, Antrieb und Magnetfelderzeugung.

Der Einfachheit halber werden die Strahlungsverluste als vollständig verloren betrachtet. In der praktischen Ausführung befindet sich das Billet in einem wärmeisolierten Raum, so dass die Berechnung hier konservativ ist. Beispielhaft seien hier die Ergebnisse für eine Produktivanlage für kleine Al Billets angegeben:

Erwärmung von Aluminiumbolzen, Ø 145 x 600mm, Endtemperatur 500°C, 351 Tage, Nutzungsdauer: 5500 h (330.000 Billets; 8800 t)



	<p><b>Zur Veröffentlichung</b></p>	<p>Revision 1.1</p>	<p>Page 16 of 25</p>
	<p>Project Name: ROSINE Phase 1</p>	<p>Date: 2006-05-04</p>	




- PNetz Gesamtverbrauch: 1232000 kWh/Jahr
- **Pbillet Nutzleistung (86%): 1060000 kWh/Jahr**
- Pv,HTS Verluste Magnetsysteme: 100000 kWh/Jahr
- Pv,antrieb Verluste Antrieb (2): 72000 kWh/Jahr

Konventionell entspricht dies einer Anlage mit ca. 300kW Heizleistung und 600-700kW Anschlussleistung.

Bei diesem Betriebsmodus (ca. 5-22Uhr) werden konventionell die Erwärmungsanlagen morgens angefahren und abends leer gefahren. Im Ofen gespeicherte Wärme geht verloren. In der supraleitenden Fassung werden die Billets nur nach Bedarf erwärmt, allerdings muss die Kälteanlage 24h durchlaufen, da eine Abkühlung des Magnetsystems länger als einen Tag benötigt.

Wird die gleich ausgelegte Anlage für Kupfer verwendet (d.h. Zieltemperatur 900°C, höhere benötigte Energie), so steigt die Effizienz dieser Auslegung auf > 88%, bei nahezu Dauerbetrieb (8000h / Jahr) sogar auf >90%. Dabei wird die Effizienz des Antriebes, bestehend aus Antriebsmotor, Getriebe und Umrichter mit 93% angenommen.

Für die zweite Projektphase wurde auf Basis der gewonnen Erkenntnisse eine Auslegung erstellt, die zwar nicht für eine Produktivumgebung geeignet ist, aber realitätsnahe Tests an den kritischen Punkten erlaubt. Die maximal verwendbare Billetgröße wurde dabei so gewählt, dass auch ein Feldtest bei interessierten Firmen stattfinden kann. Zuvor sind allerdings praktische Machbarkeit und Betriebssicherheit in Tests und Dauertests nachzuweisen. Für die Firmen käme nur eine Parallelinstallation in Frage, bei der diese Anlage zur bestehenden Erwärmungsanlage einzelne Billets zuliefert (z.B. jedes fünfte). Hierfür muss nach Möglichkeit eine unerwünschte Betriebsstörung über die ohnehin stattfindende hinaus ausgeschlossen werden.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>		Revision 1.1	Page 17 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1		Date: 2006-05-04	

## 4.2 WP 2: Billet Handling und Rotationssystem

### 4.2.1 Meilensteine

Nr.	Ziel	Status
M4a	Vorlage der Konstruktionsdaten.	erfüllt

### 4.2.2 Task 2.1 Anforderungen der Einzelkomponenten (Motor, Konverter, Leistungselektronik)

Die einzelnen Komponenten wurden detaillierter spezifiziert und in ein Gesamtkonzept eingebunden. Die Schnittstelle zwischen Mechanik und Magnetbau war insofern einfach, als dass die mechanische Betrachtung nahezu unabhängig von der Magnetfelderzeugung gesehen werden konnte.

Der Antriebsstrang besteht aus regelbarem Motor, Getriebe und Antriebswelle. Der Anpressdruck ist regelbar.

Die Motorleistung wird mit 45kW vorgesehen. Ein entsprechender Umrichter wird hierfür vorgesehen und für die Steuerung durch eine SPS eingerichtet. Die SPS wird die Gesamtsteuerung übernehmen, insofern ist die Ankopplung einer Temperaturerfassung für Billet und Kühlsystem, des Netzteiltes für den Magneten, den Cryocooler und evtl. Vakuumsensoren vorzusehen.

Ein Notabschaltungsprogramm für Fehler (Quench, Billetlösung oder Taster) ist vorzusehen. Der Quench kann dabei dank der Verwendung von HTS-Drähten durch eine einfache Spannungsüberwachung erfolgen, da die Zeitskalen im Bereich von mehreren Sekunden liegen. Dies wurde seitens Trithor bereits in einem selbstentwickelten Magnetsystem erfolgreich durchgeführt.


### 4.2.3 Task 2.2 Design des Rotationssystems

Es wurden entsprechende Konstruktionspläne erstellt, die in einer Umsetzungsphase ausdetailliert und verwertet werden. In einer Umsetzung einer Demoanlage muss ein Dauerbelastungstest der Komponenten vorgesehen werden.

## WP 3: Magnetsystem

### 4.2.4 Meilensteine

Nr.	Ziel	Status
M5	Die FEM Berechnung erlaubt die Erwärmung der Materialien auf die gewünschten Zieltemperaturen	erfüllt
M5a	Eine HTS Spule wurde erfolgreich hergestellt und entsprechend den errechneten Erwartungswerten erfolgreich getestet	erfüllt

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 18 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

Die prinzipiellen Erläuterungen zu M5 sind bereits unter WP1 erfolgt.

**4.2.5 Task 3.1 Anforderungen an die Einzelkomponenten des Magnetsystems**

Es wurden entsprechende Konstruktionspläne erstellt, die in einer Umsetzungsphase ausdetailliert und verwertet werden.

**4.2.6 Task 3.2 Technische Auslegung des Magnetsystems**

Es wurden entsprechende Konstruktionspläne erstellt, die in einer Umsetzungsphase ausdetailliert und verwertet werden.

**4.2.7 Task 3.3 Technische Auslegung des Cryosystems**

Es wurden entsprechende Konstruktionspläne erstellt, die in einer Umsetzungsphase ausdetailliert und verwertet werden.

**4.2.8 Task 3.4 Herstellung und Test der HTS-Spulen**

Im Rahmen dieser Projektphase wurde durch Trithor eine Testspule erstellt. Zu diesem Zweck wurde für eine einzelne Racetrackspule eine FEM Berechnung durchgeführt. Die sich hieraus ergebenden Erwartungswerte wurden mit dem Experiment verglichen.

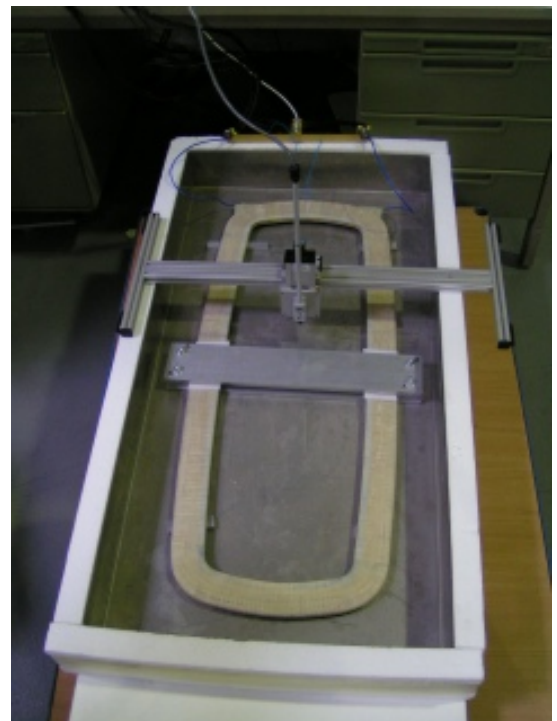
Da als Kältemittel nur flüssig Stickstoff zur Verfügung stand, fanden alle experimentellen Prüfungen bei 77K statt.


Das nebenstehende Bild zeigt die Spule im Stickstoff-Bad zur Strommessung und Charakterisierung:

Die Spule wurde hergestellt aus BSCCO HTS-Draht in Ko-Wicklung mit Kapton. Als Träger kam ein Stahlrahmen zum Einsatz und für den ersten mechanischen Schutz wurde mit Glasseide umwickelt und Vakuum-imprägniert.

In einer Ausführung für das Induktionssystem würde Außen eine Stahleinfassung eingesetzt und oben und unten Platten zur Verringerungen der Spannungen, die in den Ecken auftreten, verwendet. Als Träger würde Cu verwendet, um den thermischen Kontakt zum Kaltkopf zu erlauben.

Die Abkühlung im Kältebad wie nebenstehend gezeigt fand zunächst über dem abdampfenden Stickstoff statt. Dies dient der langsamen und spannungsarmen Abkühlung. Erst bei Erreichen einer Temperatur un-



	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 19 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

terhalb von 150K wurde die Spule in das Bad eingeführt. Allein dieser Prozess dauert mehrere Stunden.

Die FEM Berechnung ergab für diese Spule eine Spulenkonstante für das Zentralfeld von 0,78mT/A. Diese Berechnungen ergaben einen kritischen Strom  $I_c$  bei 77K von 24 A.

Im Stickstoffbad wurden diese Daten überprüft. Nachfolgende Tabelle zeigt die Messergebnisse:

Anzeige Strommessung Quelle	U_Spule	E_Spule	U_Hall, Bz(0,0)	Bz(0,0) aus U_Hall	Bz(0,0) aus Spulenkonst. (2D)	Abweichung Bz aus U_Hall/Spulenkonst.
0,00 A		0,0000 $\mu\text{V/cm}$	0,45 mV	1,40 mT	0,00 mT	100%
5,00 A	1,10 mV	0,0168 $\mu\text{V/cm}$	1,59 mV	4,99 mT	3,90 mT	22%
10,00 A	1,65 mV	0,0251 $\mu\text{V/cm}$	2,94 mV	9,23 mT	7,80 mT	16%
12,00 A	2,20 mV	0,0335 $\mu\text{V/cm}$	3,50 mV	10,99 mT	9,36 mT	15%
14,10 A	2,55 mV	0,0389 $\mu\text{V/cm}$	4,07 mV	12,78 mT	11,00 mT	14%
16,00 A	3,20 mV	0,0488 $\mu\text{V/cm}$	4,58 mV	14,38 mT	12,48 mT	13%
18,10 A	4,75 mV	0,0724 $\mu\text{V/cm}$	5,15 mV	16,17 mT	14,12 mT	13%
20,10 A	7,40 mV	0,1128 $\mu\text{V/cm}$	5,76 mV	18,09 mT	15,68 mT	13%
22,00 A	22,00 mV	0,3353 $\mu\text{V/cm}$	6,26 mV	19,66 mT	17,16 mT	13%
23,00 A	40,00 mV	0,6096 $\mu\text{V/cm}$	6,54 mV	20,52 mT	17,94 mT	13%
24,00 A	74,50 mV	1,1354 $\mu\text{V/cm}$	6,79 mV	21,33 mT	18,72 mT	12%
25,00 A	131,00 mV	1,9964 $\mu\text{V/cm}$	7,06 mV	22,17 mT	19,50 mT	12%
26,00 A	216,00 mV	3,2918 $\mu\text{V/cm}$	7,31 mV	22,96 mT	20,28 mT	12%

Dabei wurden der errechnete Fluss und der mittels Hallsonde gemessene Fluss nebeneinander gestellt ( $B_z$ ). Es zeigt sich im Rahmen der Abschätzungs- und Messgenauigkeit eine gute Übereinstimmung. Der gemessene  $I_c$  ( $1\mu\text{V/cm}$  Kriterium) liegt bei 23,8A. Insofern zeigen Auslegung und Herstellung eine gute Übereinstimmung.

An anderen Spulen wurden seitliche Deformationskräfte aufgebracht, bis zu 22MPa bei einer einfach vergossenen Spule führten zu keiner Verschlechterung der Stromtragfähigkeit (hier war die Grenze der Messeinrichtung erreicht). Sofern die Hebelkräfte durch eine entsprechende Stahleinfassung abgefangen werden, wird nicht mit einer Beschädigung der Spulen zu rechnen sein.

## 5 Wettbewerbssituation, Schutzrechte und Publikation


### 5.1 Wettbewerb

Eine induktive Metallerwärmungsanlage unter Nutzung der Vorteile von Hochtemperatur-Supraleitern wird im Rahmen dieses Projektes erstmals entwickelt, nicht zuletzt auch aufgrund der kurzen Verfügbarkeit der HTS.

Ein EU Projekt mit dem Akronym „ALUHEAT“ (<http://www.aluheatproject.com/>) beschäftigt sich mit der induktiven Erwärmung mittels Supraleitung auf Basis von  $\text{MgB}_2$  als Supraleiter. Mit einer Betriebstemperatur unterhalb von 20K ist dieser den Tieftemperatursupraleitern zuzuordnen. Am Projekt sind in Deutschland die Fraunhofergesellschaft, die Universität Hannover und SMS Elotherm beteiligt, geplant ist eine Anlage mit 200 kW. Das Projekt hat im Juni 2005 begonnen und endet Juni 2008, das Fördervolumen beträgt 1,8 Mio. €. Nach mündlicher Auskunft sieht der Zeitplan vor, dass die Heizanlage in 2007 im Labor laufen wird und Ende 2007 in den Industrieinsatz gehen soll. Erste Aspekte wurden auf der EUCAS 2005 publiziert [2].

Das Projekt beinhaltet zwei wesentliche Unterschiede zum dem hier beantragten:

1. Das Projekt ALUHEAT beinhaltet zum einen die Materialentwicklung des Tieftemperatur-Supraleiters  $\text{MgB}_2$ , der auch eine tiefere Betriebstemperatur mit sich bringt.

	Zur Veröffentlichung	Revision 1.1	Page 20 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

2. Das Projekt ALUHEAT verwendet zwei Luftspulen oberhalb und unterhalb des Billets mit einem Betriebsfeld von 0,3-0,4 T und einer geplanten Drehzahl von 3000 U/Min – dies entspricht den üblichen 50 Hz.

Insofern besteht zu der im Projekt Rosine geplanten Lösung ein grundsätzlicher Unterschied, da auf bekannte und etablierte Leitertechnik auf HTS Basis zurückgegriffen wird.

Der Bereich konventioneller Systeme für elektrische Induktionsanlagen ist ansonsten übersichtlich. Es handelt sich um Inductoheat (vereinigtes Königreich), GHH (Spanien), Aichelin (Österreich), Ajax (vereinigte Staaten), ABB (D), Otto Junker (D), SMS Elotherm (D), Marx (D), IAS (D). Unseres Wissens nach verfolgt keines dieser Unternehmen die Möglichkeit des sprunghaften Einsparens von Energie durch den Einsatz von HTS-Technologie.

## 5.2 Schutzrechte

Die Schutzrechtssituation wurde im Rahmen des Projektes kontinuierlich beobachtet. Das Grundprinzip ähnelt einer Wirbelstrombremse, allerdings kommen hier auch Wechselfelder zum Einsatz, wenn sie einfacher verfügbar sind. Eine supraleitende Spule zur Induktionserwärmung wurde bereits früh angemeldet (JP1134892 oder JP1039006). Das Prinzip der DC Magnetfelderzeugung und Rotation eines Metallstückes zur Induktionserwärmung ist 1985 erstmals zum Patent angemeldet und 1988 unter US 4761527 erteilt worden. Inzwischen ist das Schutzrecht abgelaufen. Der Erfinder hatte diese Technologie auch in der Folgezeit mehrfach beschrieben (z.B. [1]).

Die Anwendung von Supraleittechnik auf die Mohr'sche Idee wurde durch die Norwegische Forschungseinrichtung SINTEF unter anderem unter EP1582091 zur Anmeldung gebracht. Im Mai ist die Veröffentlichung der Erteilung in Europa angekündigt, die ein neunmonatige Einspruchsperiode nach sich zieht.

## 5.3 Veröffentlichungen


Der Funktionsdemonstrator wurde auf der Hannovermesse 2005 erstmals vorgestellt. In diesem Jahr wird das Konzept durch Trithor ebenfalls auf der Hannovermesse präsentiert, sowie durch Bültmann auf der parallel stattfindenden Wire & Tube.

Im Mai ist eine erste Teilnahme an einer Vortragsveranstaltung des VDI geplant und im Herbst auf einer Aluminium Fachtagung. Ziel dabei ist die frühzeitige Information von möglichen Interessenten, um bei Verfügbarkeit einen zügigen Markteintritt zu erlauben. In diesem Marktbereich ist mit einer sehr konservativen Haltung zu rechnen, die neben der Prinzipvorführung auch Dauertests verlangt. Die Informationsphase soll hierdurch verkürzt werden.

## 6 Projektadministration

Die Arbeit zwischen den Projektpartnern hat sich als sehr gut und konstruktiv gezeigt. Regelmäßiger Austausch von Informationen fanden sowohl elektronisch als auch im persönlichen Gespräch statt. Die klare Abgrenzung der Tätigkeiten und der fehlende Wettbewerb untereinander machten es beiden Partnern leicht, in jeder Hinsicht offen alle Themen zu diskutieren und Redundanzen zu vermeiden.

Technische Hürden wurden schnell und unkompliziert gemeinsam angegangen und gelöst.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 21 of 25
		Project Name: ROSINE Phase 1	


Über die Projektlaufzeit wurden zwei Zwischenberichte eingereicht sowie ein Kick-Off und ein Abschlusstreffen unter Teilnahme der DBU durchgeführt.

## 7 Ausblick

Im Projekt wurden die Grundlagen für die Umsetzung in eine Prototypenanlage gelegt. Die praktische Umsetzung ist hier nun ein wichtiger Schritt, da sich zahlreiche Punkte nicht allein durch Simulationen und Abschätzungen klären lassen. Im Hinblick auf Anwender sind besonders wichtig die praktische Vorführung einer vollständigen Anlage und Dauertests der kritischen Komponenten. Wert wird dabei auch auf die Bedienbarkeit gelegt. Hier besteht bei dem Partner Bültmann jahrelange Erfahrung in diesem Umfeld.


Im nächsten Schritt soll die untersuchte und geplante Anlage in die Praxis umgesetzt werden. Dabei sind noch verschiedene Schwierigkeiten zu erwarten. Dazu gehören ein gleichbleibender Abkühlprozess, industrietaugliche Bedienprozeduren und die kundenspezifischen Anforderungen an die Temperaturmessung.

Zur Durchführung der Phase zwei wird ein entsprechender Folgeantrag gestellt.

	<b>Zur Veröffentlichung</b>		Revision 1.1	Page 22 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1		Date: 2006-05-04	

## 8 Literatur

- [1] Mohr, G. R., 1990, Industrial Heating, S. 24-25; "New Method of Inducton Heating Using DC"
- [2] Magnusson, M. 2005, EUCAS 2005 – Konferenzbeitrag; "A 200kW MgB<sub>2</sub> Induction Heater Project"

 TRITHOR	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 23 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	

# 9 Anhang

## 9.1 Fragebogen

Folgender Fragebogen wurde abgearbeitet und liegt den gesammelten Daten zugrunde

Datum:		Firma		Name		Tel. / e-Mail	
		Werkstoff 1		Werkstoff 2		Werkstoff 3	
Material / Legierung							
Abmessungen (Geometriedaten)		Ø [mm]	L [mm]	Ø [mm]	L [mm]	Ø [mm]	L [mm]
Presstemperatur		°C		°C		°C	
Taktzeit		sec		sec		sec	
Oberflächenbeschaffenheit							
Warmfestigkeit / elektrischer Widerstand	0°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	100°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	200°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	300°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	400°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	500°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	600°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	700°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	800°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	900°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	1000°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
	1100°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?
1200°C	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	N/mm <sup>2</sup>	?	
Spezifische Wärmekapazität		kJ/(kg*K)		kJ/(kg*K)		kJ/(kg*K)	



## 9.2 Abschätzung Kräfte durch Unwucht

Annahme einer praxisnahen Exzentrizität:  $r_B = 5 \text{ mm}$

Daraus ergibt sich exemplarisch für einen Al Bolzen:

Bolzendurchmesser	$D_B := 200$	mm
Bolzenlänge	$L_B := 600$	mm
Bolzendrehzahl	$n_B := 300$	$\text{min}^{-1}$


$$\gamma_{Al} := 2.6 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

$$m_{Al} := \frac{D_B^2 \cdot \pi}{4 \cdot 10^6} \cdot L_B \cdot \gamma_{Al} \quad m_{Al} = 49.009 \quad \text{kg}$$

$$a(r_B) := \frac{\left( \frac{2 \cdot r_B \cdot \pi \cdot n_B}{1000 \cdot 60} \right)^2}{\frac{r_B}{1000}} \quad a(\cdot) = 4.935 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{ra} := m_{Al} \cdot a(\cdot) \quad F_{ra} = 241.849 \quad \text{N}$$

$F_{ra}$  ist dabei die resultierende Radialkraft

	<b>Zur Veröffentlichung</b>	Revision 1.1	Page 25 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 1	Date: 2006-05-04	