



TRITHOR
unlimited power



PROJECT TITLE:

ROSINE

Date:

22577-2

2007-08-31

Details of Project:

PROJECT NAME:	ROSINE Phase 2
CONTRACT No.:	22577-2
Title of Document:	Abschlussbericht
Project Title:	ROSINE
Number of Document:	
Revision of Document:	1.0
Filename:	C:\Temp_CB\Untwegs\2008-04-29 Öffentlich Abschlussbericht ROSINE Phase 2_final.doc
Date:	2007-08-31

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

ROSINE

INHALT

1	PROJEKTZIEL	1
2	EINFÜHRUNG	1
2.1	INDUKTIONSTECHNIK – STAND DER TECHNIK	1
2.2	HTS TECHNOLOGIE – STAND DER TECHNIK	2
3	ÜBERSICHT UND ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG	3
4	ERGEBNISSE IM DETAIL	5
4.1	WP 1: ENDNUTZERANFORDERUNGEN UND SYSTEMDESIGN	5
4.2	WP 2: BILLET HANDLING UND ROTATIONSSYSTEM	6
4.2.1	MEILENSTEINE	6
4.2.2	TASK 2.3 HERSTELLUNG UND BEZUG DER EINZELKOMPONENTEN.....	6
4.2.3	TASK 2.4 TEMPERATURMESSSYSTEM	6
4.2.4	TASK 2.5 SCHNITTSTELLEDEFINITION ROTATIONS- ZU MAGNETSYSTEM UND GESAMTSTEUERUNG.....	7
4.2.5	TASK 2.6 ZUSAMMENBAU UND TEST DES ROTATIONSSYSTEMS.....	7
4.3	WP 3: MAGNETSYSTEM	8
4.3.1	MEILENSTEINE	8
4.3.2	TASK 3.4 HERSTELLUNG UND TEST DER HTS-SPULEN	8
4.3.3	TASK 3.5 HERSTELLUNG/BEZUG UND LECKTEST DES CRYOSTATEN.....	8
4.3.4	TASK 3.6 ZUSAMMENBAU UND FUNKTIONSTEST DES MAGNETSYSTEMS.....	9
4.3.5	TASK 3.7 LIEFERUNG DES GESAMTSYSTEMS AN TRITHOR (ALT: BÜLTMANN)	10
4.4	WP 4: SYSTEMZUSAMMENBAU UND EXTRUSIONSTEST	10
4.4.1	MEILENSTEINE	10
4.4.2	TASK 4.1 AUFBAU DER VERSUCHSSTRECKE BEI TRITHOR (ALT: BÜLTMANN).....	10
4.4.3	TASK 4.2 ZUSAMMENBAU DER EINZELANLAGEN ROTATIONSSYSTEM UND MAGNETSYSTEM.....	10
4.4.4	TASK 4.3 DEFINITION DER TESTPROZEDUREN UND TESTEXTRUSIONEN.....	10
4.4.5	TASK 4.4 EXTRUSIONSTEST MIT BILLETS, BEWERTUNG DES ANLAGENVERHALTENS	11
4.4.6	TASK 4.5 TRANSPORT DER ANLAGE ZU INDUSTRIETESTER, AUFBAU, INBETRIEBNAHME UND TEST 11	
4.4.7	TASK 4.6 ABGLEICH UND ÜBERARBEITUNG DES ANLAGEN- UND WARTUNGSKONZEPTE FÜR DIE ZUKUNFT.....	11
4.5	ERGEBNISSE DER TESTS	11
4.5.1	DREHMOMENTMESSUNG AN CU	12
4.5.2	KALIBRIERUNG DER PYROMETERMESSUNG	12
4.5.3	KRÜMMUNG UND SCHRÄGSCHNITT	13
4.5.4	ERREICHEN DER ZIELTEMPERATUR.....	13
4.5.5	DEFORMATION	13

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 3 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

4.5.6 ENERGIEBILANZ 14

4.5.7 DAUERTEST 14

5 WETTBEWERBSSITUATION, SCHUTZRECHTE UND PUBLIKATION 15

5.1 WETTBEWERB 15

5.2 SCHUTZRECHTE 15

5.3 VERÖFFENTLICHUNGEN 16

6 PROJEKTADMINISTRATION 16

7 DISKUSSION UND AUSBLICK 16

8 LITERATUR 18

9 ANHANG - MESSDURCHFÜHRUNG 19

9.1 VERSUCHSAUFBAU 19

9.1.1 HTS DC INDUKTIONSHEIZER..... 19

9.1.2 MESSTECHNIK & DATENAUFNAHME 19

9.2 VERLUSTQUELLEN 20

9.3 FEM MODELL 20

9.4 LABVIEW 21

9.5 MATERIALDATEN 21

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 4 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

1 Projektziel

Dieses Projekt schließt an eine erste Design Phase an unter AKZ 22577-1, abgeschlossen im März 2006. Gesamtprojektziel war die Entwicklung einer neuartigen Induktionsheizer-Technologie für die Erwärmung von Nicht-Eisenmetallen (Kupfer, Aluminium oder Messing). Es wird ein Wirkungsgrad oberhalb von 90% erwartet, im Vergleich zu <60% bei konventionellen Anlagen ein gewaltiger Sprung.

Das zugrunde liegende 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).

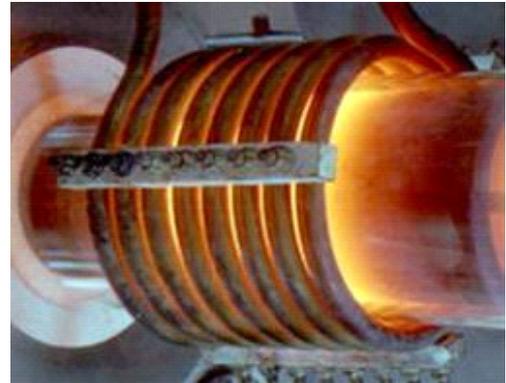
Das Projekt ROSINE wurde in zwei Phasen aufgeteilt. Diese stellen inhaltlich dar (1) den Design- und konstruktiven Teil und anschließend (2) die Umsetzung in einen Demonstrator und Tests daran. Die in diesem Bericht behandelte Projektphase stellt den zweiten Teil dar.

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 einem Prototypen und der Vergleich Simulation – Praxis.

Ziel dieser Projektphase war, das in der ersten Phase geplante System in einem funktionalen Prototypen umzusetzen, um hieran die erwarteten Einsparungspotentiale und die praktische Umsetzbarkeit zu untersuchen und zu zeigen.

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 1100°C.

Ofenanlagen dieser Art finden sich z.B. vor Strangpressen, mit deren Hilfe Aluminiumprofile für Fensterrahmen, den Flugzeug- oder Maschinenbau gefertigt werden. Messingprodukte aus Anlagen dieser Art finden Anwendung bei der Meeresentsalzung, im Hausbau oder in Kraftwerken und Automo-

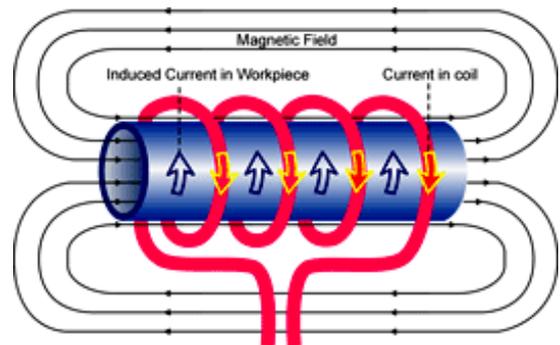
	Öffentlich	Revision 1.0	Page 1 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

bilbau, während Produkte aus Kupfer z.B. in Wärmetauschern oder als Heizungsrohre 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 über den Querschnitt die Erwärmung homogen ist. Über die Länge der Bolzen kann allerdings auf der Maschinen zugewandten Seite eine höhere Erwärmung gefordert sein. Dies hat z.B. 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 Ausgleichszeit zur thermischen Homogenisierung, in der der Bolzen auf Temperatur gehalten wird – dies kann bis zu 100 Minuten umfassen. Gelingt keine Homogenisierung oder ist die Zeit zu kurz, bleibt der Kern zu kalt und kann zu Schäden oder zum Maschinenstillstand durch Blockade führen. Solch lange Erwärmungszeiten führen gleichzeitig zu einer erhöhten Oxidation auf der Außenseite, einer weiteren Fehlerquelle im Produktionsprozess.

Bessere Homogenität bietet die induktive Erwärmung, lokale Überhitzung direkt an der Oberfläche tritt hierbei vermindert 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. Dabei wird also die Wärme im Bolzen erzeugt. Da diese Ströme gleichzeitig abschirmend wirken, dringt diese Art der Erwärmung auch nur begrenzt ein (typ. 1-2 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. Überhitzung kann jedoch insbesondere an den Kopfenden erfolgen, da hier prinzipbedingt mehr Heizleistung eingetragen werden muss, um die zusätzlich zur Mantelfläche kühlend wirkende Stirnfläche zu kompensieren.



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. Diskussionen mit Anwendern ergaben für Gas jedoch Effizienzen im Bereich von 25-35% bei der Al Erwärmung, 45-65% bei Cu und Cu Legierungen. Induktionsanlagen lagen in der Praxis immer deutlich unter 50%.

Unten stehende 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 ggf. neu eingeschmolzen werden.

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 2 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

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, so auch bei der Trithor GmbH. Die HTS-Spulenbautechnologie wurde in verschiedenen Forschungsprojekten mit renommierten Forschungspartnern entwickelt und in eine industrielle Kleinserienfertigung ausgebaut.

Supraleiter sind extrem gut leitende Materialien, die verschwindende Verluste mit hoher Leistungsdichte verbinden. Leider weisen sie im Falle von Wechselstromanwendungen (AC) auch Verluste auf. Da diese dann bei sehr niedrigen Temperaturen abgeführt werden müssen, ein energetisch aufwendiger Weg. 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)

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 3 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

- **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**

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** **Ableich und Überarbeitung des Anlagen- und Wartungskonzeptes für die Zukunft**

Im Rahmen der zweiten Projektphase wurden dabei nur die **fett** hervorgehobenen Aspekte untersucht. Bei Task 2.2 und 3.4 gab es dabei überschneidende Aufgaben zur ersten Phase. Die weiteren Punkte waren Thema der ersten Phase, auf deren Ergebnisse hier aufgebaut wird.

Das Projekt wurde schneller als geplant abgeschlossen (31.8.2007). Dabei konnten die Tasks 4.4 bis 4.6 nur in Teilen im Rahmen der Projektlaufzeit erfüllt werden. Da die Anlage im Rahmen des Projektes keinen produktionsfähigen Zustand erreichen konnte, sondern ein Testprototyp war, musste dies auf nach Projektabschluss verschoben werden. Es ist geplant, die Anlage außerhalb des Projektes soweit umzurüsten, dass der Test und Einsatz im produktiven Umfeld möglich wird. Soweit möglich, wurden allerdings im Projekt bereits Tests durchgeführt, die die gewünschten Erwartungen theoretisch bestätigen konnten. Dies wird näher in den einzelnen Abschnitten erläutert.

Abweichend von Ursprünglichen Plan wurde die Anlage unter Task 3.7 vollständig bei der Trithor GmbH aufgebaut und für alle Tests betrieben. Entsprechende Infrastruktur wurde bereitgestellt. Für Tests wurden seitens potentieller Interessenten verschiedene Blöcke aus Al, Cu und Messing bereitgestellt.

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 4 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

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 zur Umsetzung verwendeten Ergebnisse basieren auf umfangreichen 3D FEM Simulationen, die mit Ansys durchgeführt wurden. Nach Aufbau der Anlage wurden die FEM Berechnungsmodelle weiter verfeinert, basierend auf Messergebnissen an der Anlage. Diese Modelle dienen der weiteren Auslegung von Anlagen.

Die stirnseitig offene Konstruktion erlaubt den einfachen Zugriff und die Kraftübertragung. Der Kraft-eintrag erfolgt durch hydraulische Klemmung einer Antriebswelle gegen das Werkstück. Die Rotation wird durch Elektromotoren erzeugt. Dabei wird mit steigender Temperatur die Kraft zurückgenom-men, um dem weicher werdenden Werkstück Rechnung zur tragen. Durch eine Verkipfung des Sys-tems gegen die Antriebsachse kann ein axialer Gradient erzeugt werden, wobei die gewünschte radi-ale Homogenität erhalten bleibt.

Der Erwärmungsvorgang wurde schließlich umfangreich charakterisiert. Da in dieser Anlage eine Mo-tor-Getriebekombination zum Einsatz kam, wurden nur eine gemessene Effizienz von 75% (Al) bzw. 82% (Cu) erreicht. Gleichzeitig verlangte die verhältnismäßig schwache Motorausstattung des Sys-tems praxisferne, lange Aufheizzzeiten, die zu nicht notwendigen Verlusten durch Abstrahlung und Konvektion führen. Beide Punkte werden in industriellen Systemen eliminiert, so dass die Effizienz durch die Hochskalierung gesteigert wird. Intensive Tests mit ausführlichen Messungen an Cu-Blöcken haben bereits gezeigt, dass das grundsätzliche Konzept bestätigt werden konnte, die durch die Antriebsmotoren bereitgestellte Energie trägt in vollem Umfang zur Blockerwärmung bei. Periphe-re Anlagen bzw. die Magnetfelderzeugung sind im Verhältnis zur Wärmeerzeugung vernachlässigbar und das System kann die anfänglich vorgestellte Energieeffizienz darstellen.

Die Temperaturkontrolle muss materialabhängig erfolgen, da unterschiedliche Verhaltensweisen und Ansprüche der Anwender erfüllt werden müssen. Für Kupfer und Messing können pyrometrische Me-thoden verwendet werden, bei Aluminium konventionelle Kontaktmessung.

4 Ergebnisse im Detail

Die Arbeiten der Phase 2 wurden auf drei Arbeitspakete (WP) aufgeteilt und hatten die Themen

- WP 2: Billet Handling und Rotationssystem
- WP 3: Magnetsystem
- WP 4: Systemzusammenbau und Extrusionstest

zum Inhalt. Dabei musste der Extrusionstest auf nach Projektabschluss verschoben werden und wur-de durch intensive Tests ersetzt, die einen möglichst guten Ausblick auf Erfolge geben konnten. Der Einsatz an einer Pressanlage ist für 2008 geplant.

4.1 WP 1: Endnutzeranforderungen und Systemdesign

WP1 wurde in Phase 1 vollständig abgeschlossen.

Als Ergebnis der Designphase wurde eine Anlage ausgeführt, die zwar nicht für eine Produktivumge-bung geeignet ist, aber realitätsnahe Tests an den kritischen Punkten erlaubt. Hierzu wurden z.B. An-forderungen an den Antrieb etc. nochmals überarbeitet gegenüber Phase 1.

	TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 5 of 25
		Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

Dementsprechend wurde eine Anlage ausgelegt für Billets mit max. 178 x 690mm. Der erwartete Bedarf für die Kälteerzeugung liegt bei ca. 10,5kW, die Antriebsleistung liegt bei 90kW, kurzfristig 110kW. Hiermit kann ein Billet unter Berücksichtigung der Ausgleichszeiten in etwa 4-5 Min. erwärmt werden. Ein Produktionssystem müsste etwa alle 60s ein Billet liefern. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde die Anlage schließlich mit einem zweiten 90kW Motor ausgestattet, der z.B. die Erwärmung von Al in ca. 3 Min. erlaubte, die von Cu in 11 Min.

4.2 WP 2: Billet Handling und Rotationssystem

4.2.1 Meilensteine

Nr.	Ziel	Status	Kurzerggebnis / Kommentar
M4b	Der Bolzen kann mit der gewünschten Umdrehungsgeschwindigkeit bewegt werden.	erfüllt	Der Bolzenantrieb wurde entsprechend der FEM Berechnungen ausgelegt.
M4c	Die mechanische Aufnahme übersteht den Dauertest.	erfüllt	Es wurden zahlreiche Blockerwärmungen (bis zu 1100°C) sowie 6h Dauertests auch mit heißen Blöcken (490°C bzw. 800°C) durchgeführt.

4.2.2 Task 2.3 Herstellung und Bezug der Einzelkomponenten

Die Konstruktion wurde detailliert und Stücklisten für die Bestellung wurden erstellt.

Da die Hauptenergiequelle des Gesamtsystems aus der Bewegung der zu erwärmenden Pressbolzen kommt, soll ein System entwickelt werden, das einen entsprechenden Energieeintrag zulässt bzw. gewährleistet. Dabei ist zu beachten, dass die Antriebs- und Maschinenbauteile möglichst nicht im Bereich des Magneten oder an wenig beeinflussten Stellen angeordnet werden, weil diese zu einer zusätzlichen Erwärmung durch die Magnetfelder führen würde.

Der Antriebsstrang besteht aus regelbarem Motor und Antriebswelle. Angetrieben wird die Welle durch einen Antriebsmotor, der drehzahl geregelt wird. Die Übertragung erfolgt kraftschlüssig durch ein Anpresselement. Die entsprechende Klemmkraft wird mit Hydraulikzylindern aufgebracht, die den entkoppelten Schlitten mit Antriebsstrang bewegen.

Die Motorleistung wurde mit 90kW (später ein weiterer identischer Motor) vorgesehen. Ein entsprechender Umrichter wird hierfür vorgesehen und für die Steuerung durch eine SPS eingerichtet.

Die gesamte Mechanik verwendet einen verwindungssteifen Rahmen, der sowohl die Anpressdrücke als auch ggf. auftretende Vibrationen abfangen kann. Hierbei haben sich die erhöhten Stahlpreise sowie schwierige Verfügbarkeit deutliche bemerkbar gemacht.

Bei den einzelnen Komponenten wurde auf die Verwendung industriell üblicher Teile geachtet.

4.2.3 Task 2.4 Temperaturmesssystem

Für die Prototypanlage wurde zur Verwendung mit Messing und Cu ein Pyrometer eingesetzt. Für Al wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches sich derzeit in der Anmeldephase zum Patent befindet.

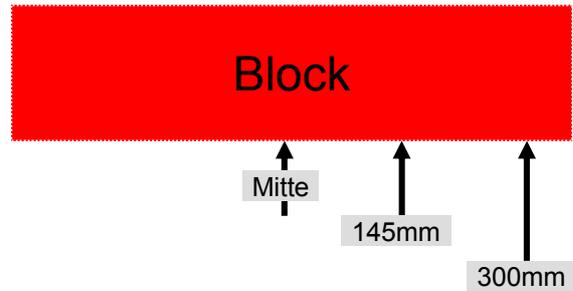
	Öffentlich	Revision 1.0	Page 6 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

Für genauere Experimente wurde die Temperaturmessung durch Kontaktmessung realisiert (Thermoelemente), da für die Forschungsanlage die Messgenauigkeit im Vordergrund steht.

Hierbei erfolgte entweder eine manuelle Messung nach Ausschleusung des Blocks aus der Anlage oder Messungen an präparierten Blöcken.

Für die Temperaturmessung direkt am Block wurden verschiedene Pyrometer eingesetzt:

1. Ein Impaq ISQ LO Zweifarbenpyrometer¹ mit einem Temperaturmessbereich von 750°C bis 1500°C, Analogsignal 0..20mA, Optik getrennt vom Sensor durch 2m Lichtleitfaser.
2. Zwei Einfarbenpyrometer² (Raytec Miniatur IR Sensor MIC, Breitbandsensor 8-14µm), Messbereich 200°C bis >1000°C.



Alle Messköpfe wurden während des Betriebes durch einen Pressluftstrom gekühlt.

Das Impac Pyrometer wurde entlang der Achse in der Mitte des Blocks angebracht, eines der Einfarbenpyrometer bei 145mm, das andere bei 300mm (s. Skizze).

In der Nähe des heißen Blocks wurden drei Thermoelemente angebracht, oben, jeweils eines innen bzw. außen und eines nahe am Impac Pyrometers.

Zur genauen Messwerterfassung und Kalibrierung der Pyrometer wurden instrumentierte Blöcke vorbereitet. Thermoelemente wurden in Bohrungen 10mm tief und bis zur Blockmitte vorbereitet.

4.2.4 Task 2.5 Schnittstellendefinition Rotations- zu Magnetsystem und Gesamtsteuerung

Die Schnittstellen zwischen Magnet- und Rotationssystem wurden gemeinsam definiert. Dabei wurde im Prototyp der Testcharakter der Gesamtanlage Rechnung getragen.

Auf eine vollständige Automatisierung wurde weitgehend verzichtet, um in der Experimentierphase eine höhere Flexibilität zu erlauben. Um eine möglichst gute Überwachung zu gewährleisten, wurden stattdessen alle relevanten Betriebsdaten für die Messaufnahme eines externen PCs bereitgestellt. Dies waren u.a. Leistung und Drehmoment. Auch die Temperaturdaten wurden zur Aufnahme mittels Mess-PC bereitgestellt.

Die SPS wird zukünftig die Gesamtsteuerung übernehmen, insofern ist dann die Ankopplung einer Temperaturerfassung für Billet und Kühlsystem, des Netzteiles für den Magneten, den Cryocooler und evtl. Vakuumsensoren vorzusehen.

¹ Freundliche Leihgabe der Universität Bonn, Helmholtzinstitut für Strahlen- und Kernphysik

² Freundliche Leihgabe aus der Industrie

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 7 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

4.2.5 Task 2.6 Zusammenbau und Test des Rotationssystems

Die Anlieferung der mechanischen Komponenten zu Trithor erfolgte im Februar 2007 und wurde vor Ort erstmalig in Betrieb genommen.

Softwareverbesserungen konnten bei Bedarf online via Modem vorgenommen werden, so dass auf Verbesserungen oder experimentelle Erfordernisse schnell und unkompliziert reagiert werden konnte.

4.3 WP 3: Magnetsystem

Das Magnetsystem besteht im Wesentlichen aus der Magnetspule, dem Netzteil, dem Cryostaten, dem Cryocooler und Vakuumeinrichtungen.

Um das gewünschte Feld zu erhalten, wurden Strom und Windungszahl entsprechend dimensioniert und eine Betriebstempertur >30K gewählt. Um die Spulen mit Strom zu versorgen, wurden Stromzuführungen auf Basis von optimierten Cu-Leitern vorgesehen, die einen geringen Wärmeeintrag erlauben. Diese wurden bei Trithor ausgelegt und gefertigt.

Während die Radialkräfte vollständig innerhalb des Cryostaten abgefangen werden können, müssen die Gewichtskraft und die Momente gegen die Außenwand abgestützt werden. Dabei sollte die Abstützung einerseits nur geringfügig Wärme übertragen und andererseits eine möglichst geringe Verformung erlauben.

Aufgrund der verhältnismäßig hohen Betriebstemperatur im Vergleich zu Tieftemperatur-Supraleitern von 30K ist auch nicht mit einem unerwünschten Quenchverhalten zu rechnen, die Zeitskalen liegen hier im Bereich von einigen Sekunden, so dass eine einfache Spannungsüberwachung genügt. Dies wurde bereits von Trithor im Rahmen eines EU Projektes bei der Ausführung eines HTS – SMES erfolgreich praktiziert und im Netzteil integriert.

Für die Kühlung wurden insgesamt etwa 100W Leistung erwartet. Um einen einfachen Aufbau zu erlauben, wurde ein einwandiger Cryostat verwendet. Die Spulen werden dabei durch unmittelbaren Kontakt mit einem Kaltkopf gekühlt.

4.3.1 Meilensteine

Nr.	Ziel	Status	Kurzergebnis / Kommentar
M5b	Das Magnetsystem besteht den Funktionstest.	erfüllt	Das Magnetsystem konnte erfolgreich evakuiert und bestromt werden.

4.3.2 Task 3.4 Herstellung und Test der HTS-Spulen

Es wurden Spulensegmente, bestehend aus Double-pancake-racetrack-coils, die auf einem Wickelkörper (Former) gewickelt wurden, hergestellt. Pro Spulensegment wurden je 4 Lagen Supraleiterdraht aufgebracht. Die Einzelsegmente wurden in einer Einfassung zusammengefügt, mit Epoxydharz vergossen und verschaltet. Um sicher zu gehen, dass der Wickelprozess und die anschließende Imprägnierung funktionieren, wurden vorab zwei Testspulen mit Cu Draht gefertigt und geprüft.

Die HTS Spulen wurden jeweils einzeln im N2Liq Bad auf Funktion geprüft.

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 8 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

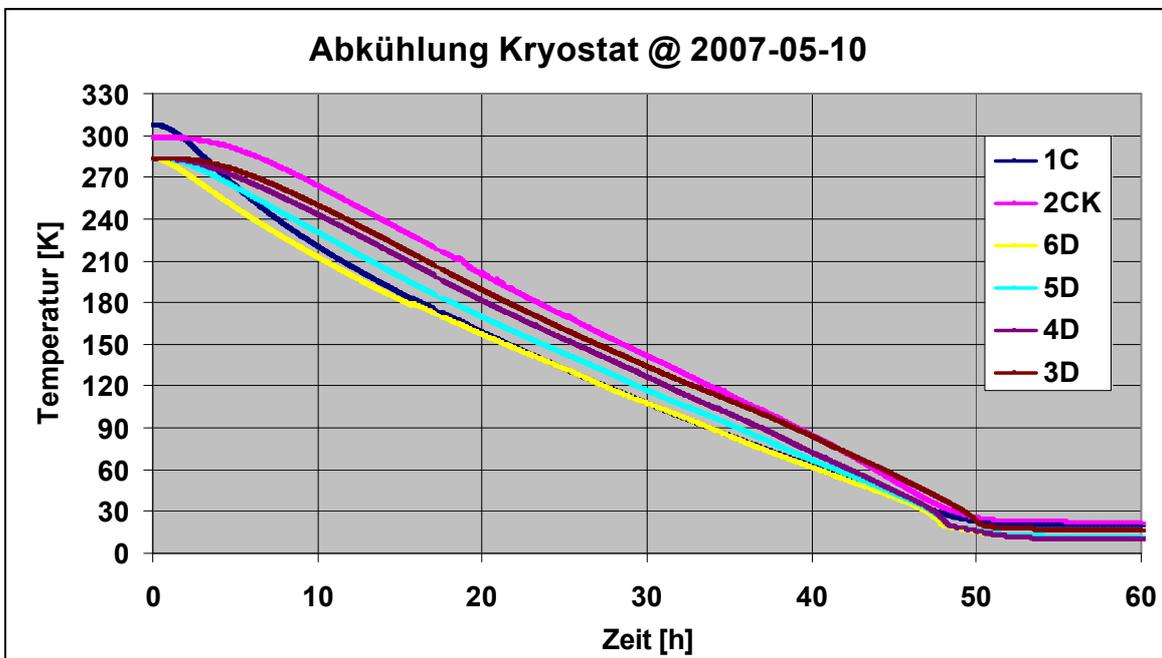
4.3.3 Task 3.5 Herstellung/Bezug und Lecktest des Cryostaten

Der Cryostat wurde bei Trithor konstruiert. Es handelt sich hierbei um ein Trockenkühlungsprinzip, mit dem in dieser Anwendung einige Vorteile verbunden sind. Zum einen gibt es kein Kühlmedium (Gas oder Flüssigkeit) im Cryostat selbst, sondern ein innerhalb der Kältemaschinen geschlossenes Kühlsystem mit Kaltkopf, von dem aus Wärme aus dem System entzogen wird. Der Cryostat kann deshalb einwandig ausgeführt werden, das Isolationsvakuum ist dann direkt mit der zu kühlenden Spule verbunden. Restgase frieren sofort aus - ein hohes Isolationsvakuum ist also ohne zusätzliche Vakuumpumpe stets gewährleistet. Eine Leckrate von kleiner 10^{-8} mbar l / s war einzuhalten. Dazu wird ein sog. Lecktest mit Helium durchgeführt. Das Helium wird dabei in kleinen Dosierungen an Schweißnähten und anderen Verbindungsstellen versprüht. Gibt es ein Leck, dringt Helium in den Cryostat ein und wird von einer Vakuumpumpe in ein Massenspektrometer gepumpt, wo man es quantitativ nachweisen kann. Daraus wird die Leckrate bestimmt. Ein absolut dichtes Gefäß gibt es nicht, deshalb sollte die Leckrate möglichst klein ausfallen.

Der Kaltkopf der Kältemaschinen ist über eine metallische Verbindung mit der HTS-Spule gekoppelt. Die HTS-Spule ist mittels schlecht wärmeleitender GFK-Lager zur Warmseite (Cryostatwandung) abgestützt. Die zu kühlenden Komponenten sind mit reflektierenden Kunststofffolien eingewickelt (sog. Superisolation), um die Wärmestrahlung von der Warmseite her zu minimieren.

4.3.4 Task 3.6 Zusammenbau und Funktionstest des Magnetsystems

Der Magnet wurde in der dafür vorgesehenen Aufhängung in der Mechanik montiert. Nach Anschluss aller Versorgungs- und Messleitungen wurde der Magnet erstmalig abgekühlt. Als Temperaturüberwachung dienten hierbei sechs kalibrierte Tieftemperatursensoren, welche an verschiedenen Positionen um die Spule herum angebracht sind. Die Zieltemperatur (<30K) wurde im erwarteten Zeitintervall von 48h erreicht. Der Abkühlvorgang ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



Zur Bestromung der HTS-Spule wird ein Netzgerät eingesetzt, welches in der Lage ist, eine supraleitende Spule bei einer Treiberspannung von $U=4VDC$ zu laden bzw. zu entladen. Das Netzgerät ist

geregelt und befindet sich im Normalbetrieb in Stromregelung. Ebenfalls eingebaut ist ein einstellbarer Quenchdetektor, welcher die Spannung an der Spule erfasst. Zur Schnellentladung wurde eine entsprechende Schaltung vorgesehen. Die Schnellentladung wird automatisch bei Netzausfall, Ansprechen des Quenchdetektors, Inhibit-Signal (Abschalten) oder im Fehlerfall (Übertemperatur, Reglerausfall) aktiviert. Über eine Schnittstelle lässt sich das Netzgerät programmieren und auslesen (Strom, Gesamtspannung).

Die Erstbestromung des Magneten erfolgte in Intervallen bis zur Endstromstärke.

Zur Überwachung der Kräfte auf die Spule und die Lagerungen, wurden an ausgesuchten Lagerungen Dehnmessstreifen angebracht und kontrolliert.

4.3.5 Task 3.7 Lieferung des Gesamtsystems an Trithor (alt: Bültmann)

Abweichend von der ursprünglichen Planung wurde die Mechanik zu Trithor geliefert und dort aufgebaut. Nach erster Inbetriebnahme des Motors und der Anpresshydraulik sowie ersten Tests wurde das Magnetsystem angeschlossen und in Betrieb genommen. Mit zunächst nur 50% Strom wurde der erste Al Block im Mai erfolgreich auf Zieltemperatur erwärmt.

4.4 WP 4: Systemzusammenbau und Extrusionstest

4.4.1 Meilensteine

Nr.	Ziel	Status	Kurzergebnis / Kommentar
M6	Das Gesamtsystem erlaubt die Erwärmung eines Bolzens auf die errechnete Zieltemperatur (ca. 500°C, abhängig vom Material).	erfüllt	Bereits die erste Erwärmung nach Inbetriebnahme war erfolgreich. In weiteren Tests konnten auch Cu und Messing bis auf 950°C bzw. 800°C erwärmt werden,
M7	Das Gesamtsystem weicht von der errechneten Effizienz weniger als 20% ab.	erfüllt	Aufgrund der Einschränkungen des Testsystems waren 60-70% Effizienz angenommen worden. Diese konnten nachgewiesen werden.

4.4.2 Task 4.1 Aufbau der Versuchsstrecke bei Trithor (alt: Bültmann)

Wie bereits ausgeführt, können Extrusionstests nur in einem realen Werk durchgeführt werden. Hierfür ist die Testanlage nicht geeignet. Dieser Schritt wird nach Projektabschluss (voraussichtlich Anfang 2008) nach einer Umrüstung der Anlage außerhalb des Projektes durchgeführt.

Die Anlage wurde bei der Trithor GmbH umfangreichen Tests unterzogen, um dennoch möglichst viele Informationen erhalten zu können und das Anlagenverhalten ausführlich zu studieren.

4.4.3 Task 4.2 Zusammenbau der Einzelanlagen Rotationssystem und Magnetsystem

Das Gesamtsystem wurde bei Trithor montiert und in Betrieb genommen. Dabei wurde der Magnet nach Einbau zunächst abgekühlt und anschließend bestromt (siehe Abschnitt 4.3.4).

4.4.4 Task 4.3 Definition der Testprozeduren und Testextrusionen

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Tests an der Anlage durchgeführt.

Untersucht wurde die Erwärmung verschiedener Materialien.

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 10 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

Dabei wurden Al, Cu und Cu Legierungen auf durch Kunden vorgegebene Zieltemperaturen erwärmt. Bei der genauen Temperaturmessung zeigte sich, dass wie erwartet die Erwärmung radial homogener erfolgt als mittels konventioneller Technologien. So werden bei Einsatz der Anlage nicht nur energetische Vorteile erwartet, sondern auch Verbesserungen in der Prozessführung.

4.4.5 Task 4.4 Extrusionstest mit Billets, Bewertung des Anlagenverhaltens

Nicht ausgeführt und auf 2008 verschoben, siehe auch Task 4.1

4.4.6 Task 4.5 Transport der Anlage zu Industrietester, Aufbau, Inbetriebnahme und Test

Nicht ausgeführt und auf 2008 verschoben, siehe auch Task 4.1

4.4.7 Task 4.6 Abgleich und Überarbeitung des Anlagen- und Wartungskonzeptes für die Zukunft

Ein Abgleich mit den FEM Modellen und experimentellen Ergebnissen hat umfangreich stattgefunden.

Aus der Anlagenerfahrung hat sich gezeigt, dass für die mechanischen Komponenten keine besonderen Wartungsprozeduren über die industriell üblichen hinaus erforderlich sind. Am HTS-Magnetsystem sind lediglich Filter- und Dichtungssatzwechsel etwa alle 24 Monate fällig. Dies kann in den üblichen Wartungszyklen wahrgenommen werden.

Weitere Erfahrungen müssen im realen Einsatz gesammelt werden.

4.5 Ergebnisse der Tests

Im Rahmen der Tests der Anlage wurden zahlreiche Experimente durchgeführt, exemplarisch werden hier die Details für Messungen an Kupfer dargestellt. Für Al wurden ähnliche Experimente mit vergleichbaren Ergebnissen auf einem niedrigeren Temperaturniveau erzielt.

Besonderes Augenmerk wurde auf folgende Punkte gelegt:

- Das Material kann reproduzierbar auf die gewünschte Zieltemperatur erhitzt werden
- Deformationen am Block und die mechanische Belastbarkeit
- Die radiale Temperaturverteilung
- Plausibilität der Temperaturmessung
- Verhalten der Anlage unter Dauereinsatz
- Betrachtung des Energieeinsatzes und –verbrauchs

Instrumentierte Blöcke dienen zur Temperaturkalibration und Kontrolle.

Folgende Themen wurden abgearbeitet:

1. Drehmomentmessung an Cu
2. Kalibrierung der Pyrometermessung mittels instrumentierten Blockes
3. Wiederholtes und reproduzierbares Erreichen der Zieltemperatur und radiale Temperaturverteilung

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 11 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

- 4. Untersuchung der Deformation
- 5. Betrachtung der Energiebilanz und Verlustquellen
- 6. Dauertest

4.5.1 Drehmomentmessung an Cu

Für die Bestimmung des Drehmomentes wurden Blöcke kurz bei verschiedenen Drehfrequenzen gefahren und die Leistung am Umrichter gemessen. Hieraus wurde das Drehmoment errechnet.

4.5.2 Kalibrierung der Pyrometermessung

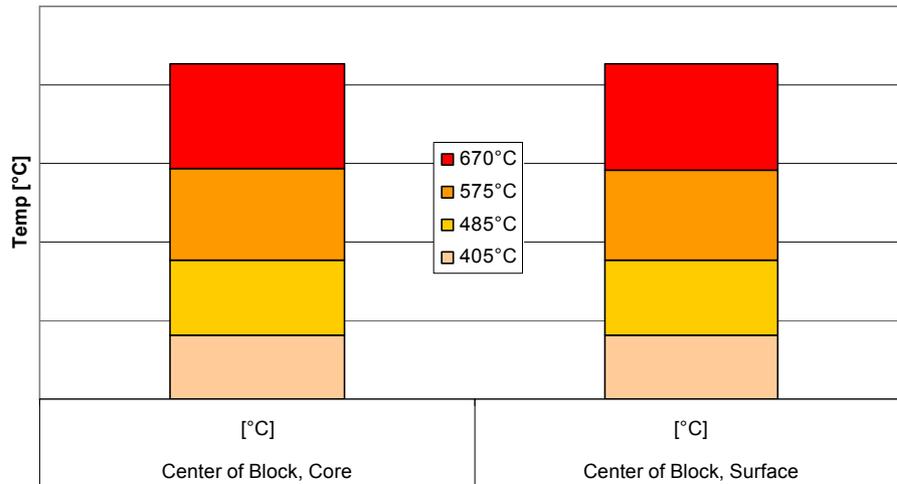
Die Kalibrierung der Pyrometer wurde mittels Vergleich eines instrumentierten Blocks durchgeführt. Dazu wurde ein Block mit Thermoelementen versehen. Thermoelemente wurden positioniert wie auf nachfolgender Zeichnung des Blockquerschnittes zu sehen:



T6 und T9 liegen dabei an der Oberfläche in einer 10 mm tiefen Bohrung, T7 und T8 in Bohrungen bis zur Mitte. Dabei wurden die zentralen Pyrometer mit den mittleren Oberflächenmesswerten, die am Rande mit den randständigen verglichen.

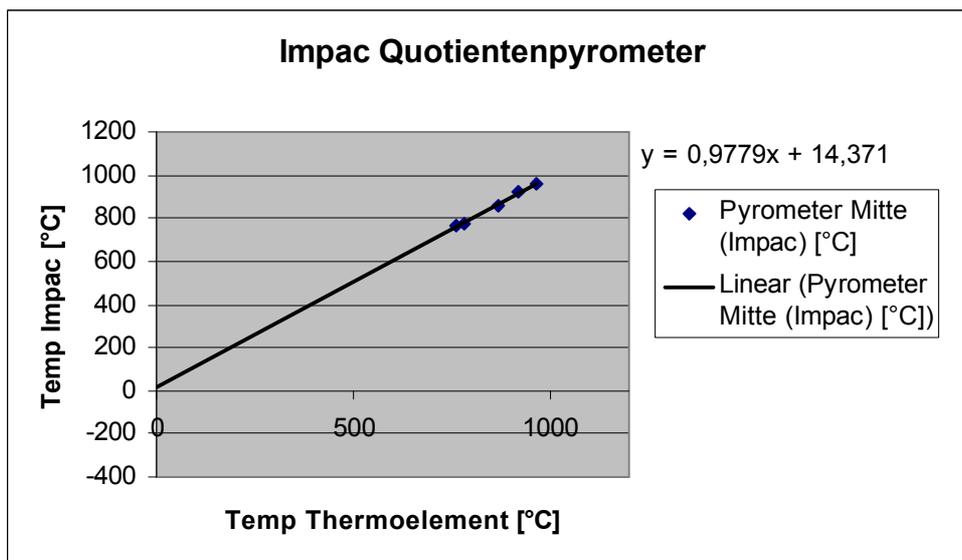
Es ergaben sich nachfolgend gezeigte Verteilung über die Zeit:

Measured Distribution of Heat during Heating



Jeweils paarig wurden Messungen in der Mitte und an der Oberfläche des Blockes durchgeführt. Es ist gut zu erkennen, dass der Block während des Aufheizens radial gut durchwärmt wurde.

Am Impac-Quotientenpyrometer wurde einmalig bei etwa 780°C das Verhältnis der Emmissivitäten auf die wahre Temperatur eingestellt. Die Genauigkeit betrug hier ±20K.



Für Cu wurde $\epsilon_1/\epsilon_2=0,965$ eingestellt.

4.5.3 Krümmung und Schrägschnitt

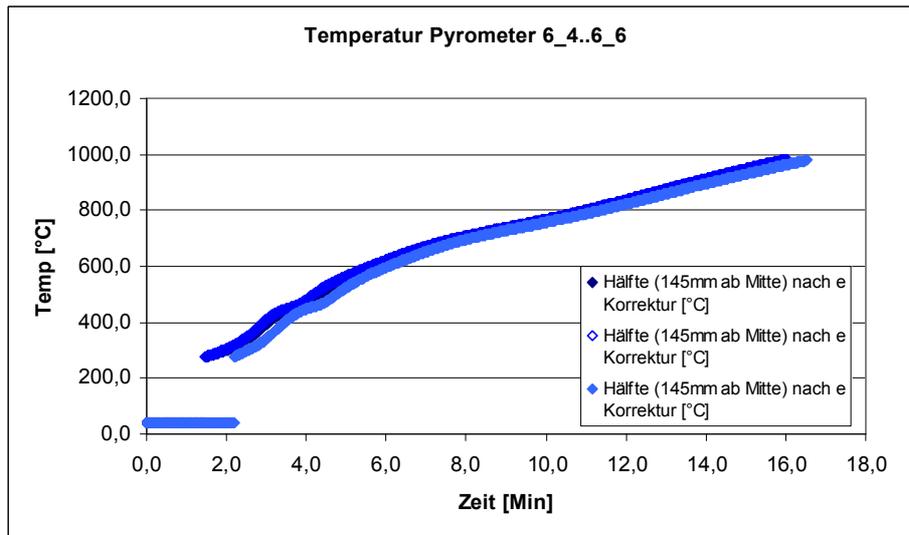
Krümmung und Schrägschnitte hatten keinen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb der Anlage.

4.5.4 Erreichen der Zieltemperatur

Die angestrebten Zieltemperaturen von bis zu 1100°C konnten im Rahmen der Versuche gut erreicht werden.



Auch kann die Aufheizung als reproduzierbar angesehen werden:



4.5.5 Deformation

Als Maß für die Deformation der Blöcke diente der Vergleich von geometrisch vermessenen Blöcken vor und nach der Erwärmung im jeweils kalten Zustand. Verglichen wurde das Verhältnis der Änderung.

Es konnten keine für eine Produktion relevanten Deformationen gefunden werden.

4.5.6 Energiebilanz

Die Betrachtung der Energiebilanz ergibt sich entsprechenden Versuchsserien. Hier waren die Voraussetzungen der Temperaturerfassung und Vergleichbarkeit zu konstanten Prozessparametern gegeben. Nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Ergebnisse.

Dabei wurde deutlich, dass eine warme Anlage eine höhere Effizienz aufweist. Im Mittel konnte eine Effizienz von >75% gemessen werden.

Vergleicht man die Verlustquellen, so zeigen sich die dominanten Faktoren: Wärmeabfluss in die Umgebung, Strahlung und Konvektion. Die Verluste im Antriebsstrang können dabei durch weiterhin optimierte Auslegung verringert werden. Strahlungsverluste steigen erwartungsgemäß mit höherer Temperatur an.

Ebenfalls einen großen Einfluss hat die Wiederholungsrate, die bei der gegebenen Anlage sehr niedrig ist.

4.5.7 Dauertest

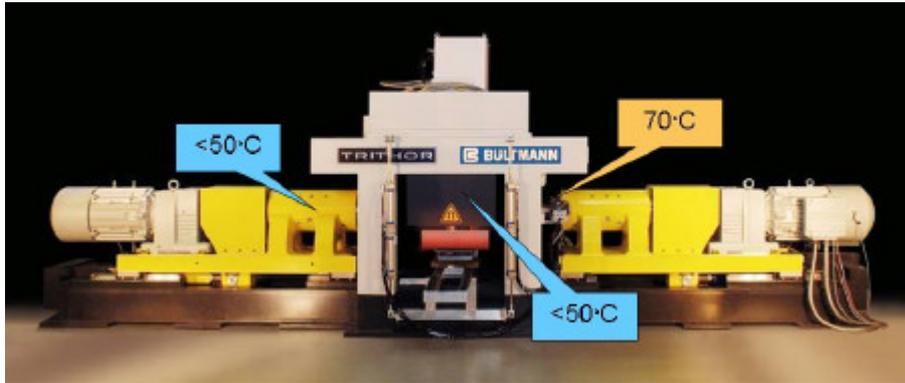
Für einen Dauertest wurde die Anlage konstant mit einem Block Cu bei 800°C für mehrere Stunden betrieben.

Versuchsziele waren:

- Prüfung der Aufwärmung von Maschine, Welle und Lager
- Gesamtaufwärmung der Anlage

- Erreichen eines quasi-statischen Zustandes

Folgende Ergebnisse wurden erreicht:



An keiner Stelle wurde eine kritische Erwärmung festgestellt.

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 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. €. Erste Aspekte wurden auf der EUCAS 2005 publiziert [2]. Nach mündlicher Auskunft musste der ursprüngliche Zeitplan geändert werden und ein erster Test der Anlage ist im Herbst 2008 vorgesehen.

Das Projekt beinhaltet folgende Parameter:

1. Das Projekt ALUHEAT beinhaltet zum einen die Materialentwicklung des Tieftemperatur-Supraleiters MgB_2 , der auch eine tiefere Betriebstemperatur mit sich bringt.
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.
3. Die Ausrüstung der Anlage sieht ein Supraleitersystem für einen zu erwärmenden Block vor.
4. Es wird die Erwärmung von Aluminium mit einer Heizleistung von 200kW angestrebt.

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

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 15 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

verbundene höhere Betriebstemperatur gewählt werden kann. Lösungswege, die im o.g. Projekt nicht verfolgt werden. Insofern war weder eine Wettbewerbssituation noch ein Konflikt mit noch nicht offen gelegten Patentanmeldungen zu dem Projekt zu erwarten. Dies hat sich durch die weitere Zeitverzögerung im Projekt ALUHEAT und seit Abschlussbericht der Phase 1 dieses Projektes bestätigt.

In Italien beschäftigt sich unabhängig davon eine weitere Gruppe mit einem spezifischen Design einer Sattelformspule an der Universität Bologna [3], ebenfalls auf Basis von MgB₂.

Der Bereich konventioneller Systeme für elektrische Induktionsanlagen ist ansonsten übersichtlich. Es handelt sich um Inductoheat (UK), GHH (Spanien), Aichelin (Österreich), Ajax (USA), Inductotherm (Banyard) (USA), 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 und 2006 erteilt. Es wurde eine entsprechende Lizenz erworben.

5.3 Veröffentlichungen

Neben der Präsentation auf der Hannovermesse 2006 und 2007 wurde ein Vortrag zur Technologie auf der Fachtagung Strangpressen der DGM im Oktober 2007 gehalten [4]. Für 2008 sind weitere Messeauftritte in Deutschland und USA geplant (Essen, Düsseldorf, Hannover, Orlando).

Wie erwartet, ist in diesem Marktbereich mit einer sehr konservativen Haltung zu rechnen, die neben der Prinzipvorführung auch Dauertests und Referenzen verlangt. Hierfür ist der Einsatz des Prototyps nach Umrüstung dringend notwendig.

6 Projektadministration

Die Arbeit zwischen den Projektpartnern hat sich auch in der zweiten Phase 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.

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

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 16 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

7 Diskussion und Ausblick

- Erwärmungstemperaturen von 1000°C konnten erfolgreich getestet werden.
- Die Pyrometermessung kann für die Versuche gut verwendet werden.
- Die Durchwärmung des Blocks war sehr gut, besser als erwartet.
- Die Energiebilanz zeigte eine Anfangseffizienz von ca. 70%, die bei warmer Anlage auf über 80% anstieg.
- Die rechnerisch nachvollzogene Energiebilanz identifiziert neben dem Getriebe die Wärmeabgabe in der Wärmekammer als größten Verlust.
- Passive Wärmeisolation ist wichtig.

Im Projekt wurden somit die Grundlagen zur Einführung der Technologie durch die Umsetzung in eine Prototypenanlage gelegt. Schwieriger stellt sich die Markteinführung dar, da Vertrauen an einer kritischen Stelle in einer Fertigungsanlage gefasst werden muss. Das Konsortium schätzt sich glücklich, auch hierfür einen Partner gefunden zu haben. Nach Umrüstung der nicht produktionsstauglichen Anlage außerhalb des Projektes ist der Einsatz an einer Extrusionspresse Anfang 2008 geplant.

Die erwarteten Energieeinsparungen konnten bereits am noch nicht produktionsreifen Prototyp nachgewiesen werden. Gleichzeitig zu dem Vorteil des geringeren Energieverbrauchs konnten Erwärmungsvorteile für den Anwender gezeigt werden.

Bislang unberücksichtigt wurden Vorteile, die aus der Einfachheit der Anlage resultieren, so z.B. geringere Wartung und Ausfallzeiten. Dies muss sich noch im Gebrauch zeigen, würde aber auch zur Ressourcenschonung beitragen, da z.B. keine Harze zur Reparatur der Spulen verwendet werden müssten.

	Öffentlich	Revision 1.0	Page 17 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

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 MgB₂ Induction Heater Project"
- [3] Morando, A. 2007, IEEE Transacions, to be published, "Design of a Superconducting Saddle Magnet for DC Induction Heating of Aluminum Billets"
- [4] Bühner, C., 2007, Jahressitzung Fachausschuss "Strangpressen" der DGM, Meinerzagen: 24.-26.10.2007

 TRITHOR		Öffentlich	Revision 1.0		Page 18 of 25
		Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31		

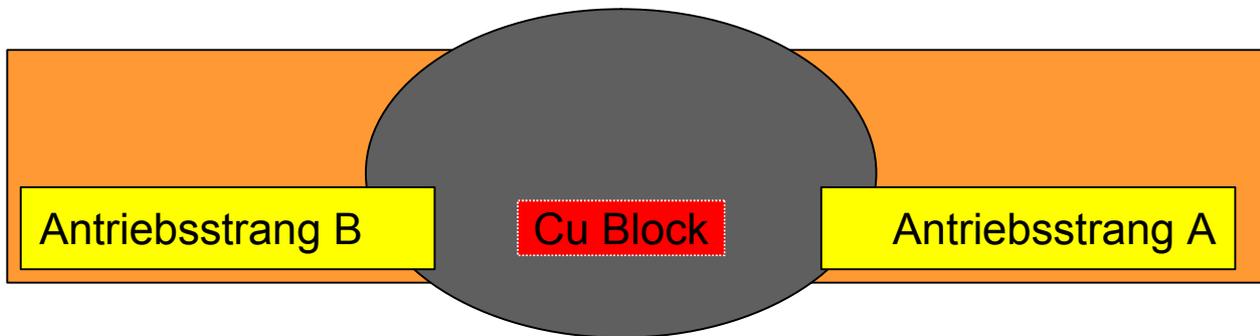
9 Anhang - Messdurchführung

9.1 Versuchsaufbau

9.1.1 HTS DC Induktionsheizer

Die Anlage ist gebaut und ausgelegt worden für die Verwendung als Blockerwärmer für kleine Blöcke und wurde als Prototyp mit verminderter Leistung ausgelegt. Dies hat im Betrieb verschiedene Einschränkungen zur Folge. Insbesondere sind dies:

- Verarbeitbare Geometrie ist maximal Länge $l=690\text{mm}$, Durchmesser $d=178\text{mm}$.
- Eine Erwärmung erfolgt verhältnismäßig langsam und ist nicht auf die jeweilige Legierung optimiert.
- Die Innenisolierung wurde provisorisch für den Betrieb bis 1000°C ausgeführt.



Es ergibt sich nachfolgende schematische Aufstellung (Blick von oben). Dabei befindet sich der Cu-Block im Magnetfeldbereich (hier schwarz gezeichnet). Der Magnet besitzt zwei Erwärmungsschächte von denen durch den Antriebsstrang A und B nur einer ausgenutzt wird. Durch Hinzufügung weiterer Antriebsstränge A' und B' lässt sich so der Anlagendurchsatz verdoppeln.

Der Erwärmungsschacht ist innen mit Wärmeisolation ausgekleidet. Im Bereich der Flansche wird eine Isolation mit angepasster Bohrung für die Welle eingesetzt. Während des Versuchs wird die untere Öffnung durch eine weitere Platte abgeschlossen, die gleichzeitig die Pyrometer-Messeinrichtungen enthält. Da diese mittels Pressluft gekühlt werden, führt dies zu einem leichten, kühlenden Luftstrom.

9.1.2 Messtechnik & Datenaufnahme

Zahlreiche Signale wurden durch entsprechende Sensoren bereitgestellt und aufgezeichnet. Die Datenaufnahme erfolgte mittels Labview und ggf. weiterer Software:

- Labview: Schachttemperatur, Betriebsstrom des Magneten, Pyrometer Impac, Umrichter Wirkstrom & Leistung & Drehzahl
- Pyrometerauslese Software: Temperatur der Raytec-Pyrometer

In den Versuchen wurden Daten teilweise manuell mitgeschrieben, indem sie vom Bedienpanel der SPS abgelesen wurden. Alle Daten wurden mit einer Frequenz von $1/s$ mitgeschrieben.

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 19 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	

Der Versuch der Fehlerbetrachtung bei der Temperaturmessung und die Auswirkung auf die Energiebilanz wurde geprüft. Bei einer Abweichung von 5% der Temperatur gleichen sich gemessener Netto-Energieeintrag und berechneter Energieeintrag an.

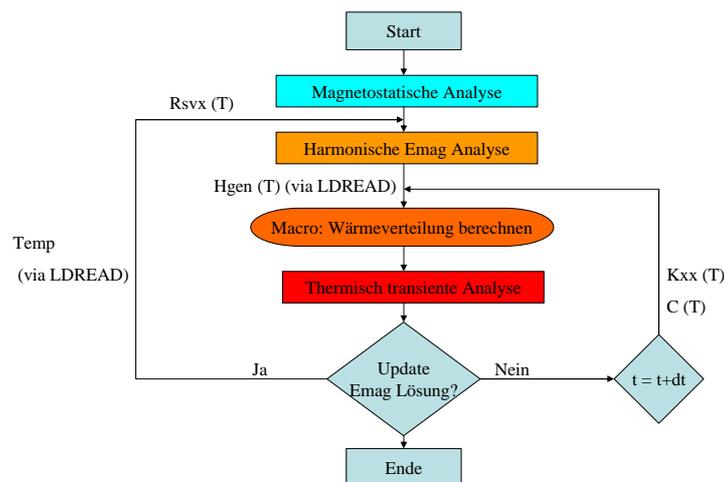
9.2 Verlustquellen

Für die Abschätzung der Energiebilanz wurden nachfolgend beschriebene Annahmen gemacht. Aus der gemessenen Temperatur des Blocks und der temperaturabhängigen Wärmekapazität wurde die im Block verbliebene Nettoenergie aufsummiert. Im Vergleich dazu wurde der unter Berücksichtigung von Verlustquellen die im Block deponierte Energie errechnet.

[Detaillierte Daten sind nicht öffentlich verfügbar]

9.3 FEM Modell

Über das vereinfachte FEM-Luftspulenmodell wurde ein präziseres Modell erstellt, dass die magnetischen Nichtlinearitäten mitberücksichtigt.



Das Flussdiagramm oben zeigt den Berechnungsablauf der Induktionserwärmung. Da sich durch die Änderung der Temperatur auch die el. Leitfähigkeit des zu erwärmenden Materials ändert, ist eine gekoppelte Analyse unumgebar. Nach definierten Zeit- oder Temperaturschritten müssen die Wirbelströme im Billet neu berechnet werden. Eine vorausgehende magnetostatische Analyse stellt die Grundlage für die Eingabe Elementweise linearer magnetischer Eigenschaften dar, wie sie in der dynamischen Analyse verwendet werden müssen.

9.4 Labview

Die Überwachung des Systems erfolgte mittels einer in Labview programmierten Umgebung.

9.5 Materialdaten

Materialdaten wurden der Literatur entnommen oder von interessierten Kunden bereitgestellt.

 TRITHOR	Öffentlich	Revision 1.0	Page 21 of 25
	Project Name: ROSINE Phase 2	Date: 2007-08-31	