

## MDS12

# Magnetisch gelagerter Schwungradspeicher

### Abschlussbericht 2008

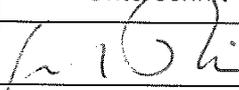
**ZE:** Magnet-Motor GmbH

**Vorhaben:** Magnetgelagerter Rotationsenergiespeicher  
 Verbundprojekt Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ) -  
 Magnet-Motor GmbH (MM)

**Förderkennzeichen:** 13N8738

**Laufzeit:** 1.1.2005 – 30.06.2007

**Berichtszeitraum:** 1.1.2005 – 30.06.2008

Dokument geprüft und freigegeben			
Name	Firma, Funktion	Datum	Unterschrift
Dr. G. Reiner	MM, Projektleitung	24.06.2008	
N. Wehlau	Mm, technische Leitung	24.06.2008	

**Verteiler:** VDI, ATZ, MM intern.....

**Autor:** Wehlau.....

**Version / Stand:** 01 / ..24.06.2008.....

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Wissenschaftlich – technische Ergebnisse .....</b>	<b>3</b>
1.1	Konzeption des supraleitend (SL) magnetisch gelagerten Energiespeichers .....	3
1.2	Ausführung des supraleitend gelagerten Energiespeichers .....	4
1.3	Auslegung der Motor/Generator-Einheit.....	5
1.4	Rotordynamik.....	6
1.4.1	Berechnung der Resonanzauslenkungen und notwendigen Lagersteifigkeiten .....	6
1.4.2	Auslegung der Lagersteifigkeiten für den Rotor .....	9
1.4.3	Ergebnisse der Rotordynamik-Berechnung.....	9
1.5	Neue technische Herausforderungen.....	12
1.6	Auswirkungen auf den Arbeitsplan und die Arbeitspakete im Jahre 2006 .....	13
1.7	Umsetzung der notwendigen Änderungen .....	14
1.7.1	Dynamische Notlager .....	14
1.7.2	Rotor mit MDS-Gehäuse .....	15
1.7.3	Neukonzeption Anbindung HTS- und PM-Lager an die Welle .....	18
1.7.4	Neuberechnung Rotordynamik.....	18
1.7.5	Sensorsystem zur Rotorlageerkennung .....	19
1.7.6	Neuerstellung Betriebs- und Überwachungskonzept.....	19
1.7.7	Schaltschrank .....	19
1.8	Fertigstellung der Hauptkomponenten des Speichers im Frühjahr 2008.....	24
<b>2</b>	<b>Arbeits- und Zeitplanung.....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Aussichten für die Zielerreichung .....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>Relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>Zielsetzung für das laufende Projekt.....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Verwertungsstrategien .....</b>	<b>26</b>

## 1 Wissenschaftlich – technische Ergebnisse

### 1.1 Konzeption des supraleitend (SL) magnetisch gelagerten Energiespeichers

Das Konzept des magnetisch gelagerten Schwungradspeichers basiert auf der Zusammenführung der Technologie von ATZ, kompakte HTS-Lager für hohe Lasten zu bauen, mit der Technologie von L3-Magnet-Motor (MM), kompakte, schnell drehende Schwungradspeicher zu bauen. Das Prinzipbild des supraleitend magnetisch gelagerten Schwungradspeichers ist in Bild 1 zu sehen.

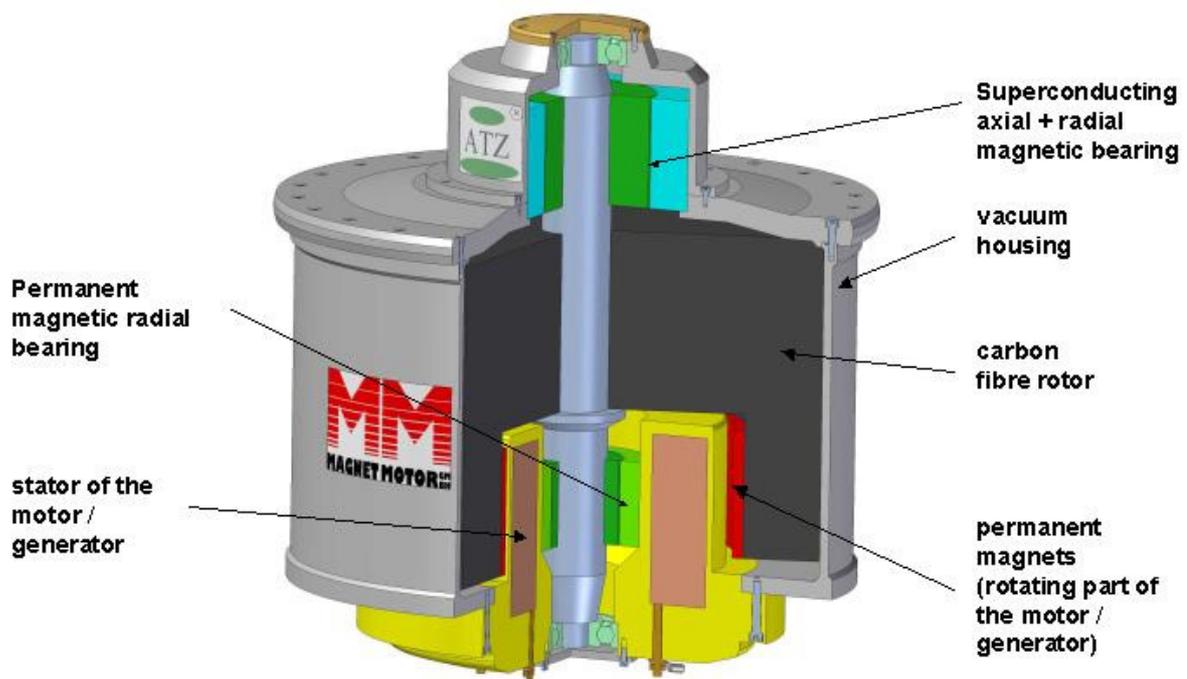


Bild 1, Prinzipbild des magnetisch gelagerten Schwungradspeichers MDS12

Das Gerät ist in seinen Schwunghmassenspeicher-spezifischen Teilen ähnlich aufgebaut wie die mechanisch gelagerten Speicher (siehe Bild 2)

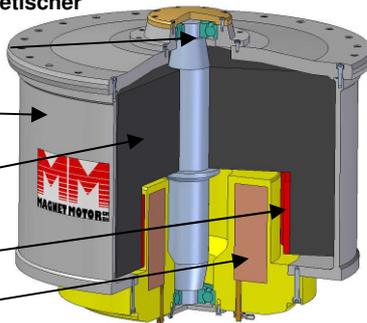
Oberes mechanisches  
Lager mit magnetischer  
Lagerentlastung

Vakuum-

Kohlefaser-

Permanent-  
magnete

Stator der



**Bild 2, Prinzipdarstellung eines ausgeführten, kompakten Schwungradspeichers.**

**Bild 3, Schwungradspeicher der Fa. L3-Communications Magnet-Motor GmbH in einem kardanischen Gestell.**

## 1.2 Ausführung des supraleitend gelagerten Energiespeichers

Der Schwunghmassenspeicher MDS12 hat eine Speicherkapazität von 10 kWh bei einer Drehzahl von  $10.000 \text{ min}^{-1}$ . Die maximale Leistung der Motor-/Generatoreinheit ist 250 kW und ist sowohl beim Laden als auch beim Entladen verfügbar. Der Durchmesser des Vakuumgehäuses ist etwa 1 m, ebenso dessen Höhe. Das Gewicht des Schwunghmassenspeichers ist etwa 1200 kg. Der Kohlefaserrotor zusammen mit Welle, Nabe und den Permanentmagneten für die Motor-Generatoreinheit und die Magnetlager wiegt etwa 600 kg. Der Speicher ist in Bild 4, MDS12 in Gestell abgebildet, der Kohlefaserrotor in Bild 5.

Der Rotor ist im Filament Wickelverfahren aus Glas und Kohlefaser sowie aus Epoxydharz gefertigt. Er besteht aus mehreren Zylindern, die konzentrisch ineinander gefügt wurden. Die Elastizitätsmodule (E) und Spannungsfestigkeiten ( $\sigma$ ) jeweils verwendeten Fasern sind so gestaffelt, dass ein günstiges Dehnungs- und Spannungsverhalten im Rotor unter Fliehkraftbelastung erreicht wird.



**Bild 4, MDS12 in Gestell**



**Bild 5, Rotor MDS12 vor der Montage**

Der Außendurchmesser des Rotors ist knapp 1 m, die axiale Höhe knapp 0,5 m. Das Gewicht der Faserkunststoffzylinder zusammen beträgt etwa 450 kg. Im unteren Teil des Faserkunststoffrotors sind die Permanentmagnete für die Erregung der Motor-/Generatoreinheit untergebracht. Der Faserkunststoffrotor insgesamt sitzt auf einer speziellen Nabe, mit der die Anbindung an die Welle erfolgt.

Oben an der Welle befinden sich permanentmagnetische Ringe als dem drehenden Teil des HTS-Lagers, die konzentrisch innerhalb der supraleitenden, stationären HTS-Ringe liegen. Das supraleitende HTS-Lager ist als Axial/Radial-Lager ausgeführt. Am unteren Teil der Welle sind ebenfalls Permanentmagnetringe montiert, die zusammen mit den ihnen stationär konzentrisch außen gegenüber liegenden PM-Ringen das untere PM-Lager bilden. Das passive PM-Lager dient als Radial-Lager. An den Wellenenden befinden sich die dynamischen Notlager.

Mit dem Bau des HTS-Lagers durch ATZ, das eine maximale, axiale Tragkraft von 10.600 N aufweist, konnte ein wesentlicher Meilenstein erreicht werden. Dieses HTS-Lager kann im statischen Fall (Stillstand) den 600 kg Schwungradrotor alleine tragen.

### **1.3 Auslegung der Motor/Generator-Einheit**

Die Motor/Generator-Einheit ist ein Herzstück des Schwungradspeichers. Sie setzt die Leistung zum Laden und Entladen des Speichers um. Die M-/G-Einheit ist prinzipiell wie beim mechanisch gelagerten Schwungradspeichern ausgeführt. Für den magnetisch gelagerten Schwungradspeicher wurde die **neue Motor/Generator-Einheit auf eine Leistung von 250 kW ausgelegt**.

Unter anderem wurden die Durchmesser des Stators und des Rotors der Motor/Generator-Einheit erweitert, damit innen das PM-Lager, das von ATZ beigestellt wird, aufgenommen werden kann. Das PM-Lager sitzt am unteren Wellenende und wird von dem Stator der Motor/Generator-Einheit umschlossen. Die Magnete der Motor/Generator-Einheit wurden in den Rotor aus Faserverbundwerkstoff eingepasst und verklebt. Sie umlaufen den Stator der M/G-Einheit als Außenläufer.

 <p>an  communications company</p>	<p><b>MDS12</b>  <b>Magnetisch gelagerter</b>  <b>Schwungradspeicher</b></p>	<p>Seite 6 von 26</p> <p>08.06.24 MDS12  ABSCHLUSSBERICHT 2008.DOC /  24.06.2008 / Weh</p>
--	--	--

Auch wurde die induzierte Leerlaufspannung des Stators über den internen Aufbau an die Betriebsdrehzahl des MDS12 angepasst. Der MDS12 wird für den Einsatz bei der E.ON Energie AG direkt an eine 220 V DC Schiene angekoppelt.

Mit einer Motor/Generator-Einheit eines anderen Typs mit ähnlichem, internen Aufbau und kleineren Abmessungen, die für einen konventionellen Schwungradspeicher mit mechanischen Lagern gebaut worden ist, konnten sogar Kurzzeit-Leistungen von 640 kW erreicht werden.

## 1.4 Rotordynamik

Verglichen mit mechanischen Lagerungen ist ein HTS-Lager um Zehnerpotenzen weicher. Es entwickelt seine Trage- und Zentrierkräfte, indem es kleine Auslenkungen macht. Die Luftspalte im MDS12 sind deshalb im Bereich von Millimetern dimensioniert, so dass das Lager seine Rückstellkräfte entwickeln kann, ohne dass Berührungen zwischen Rotor und Stator stattfinden.

Die Unsymmetriekräfte der M-/G-Einheit sind deutlich schwächer als die radialen Rückstellkräfte der Magnetlagerung und deshalb problemlos zu beherrschen.

### 1.4.1 Berechnung der Resonanzauslenkungen und notwendigen Lagersteifigkeiten

Die Beherrschung der Rotordynamik ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass der Rotor bei der Resonanzdurchfahrt nicht am Gehäuse touchiert und ein magnetisch gelagerter Schwungradspeicher grundsätzlich betrieben werden kann. Ausgehend von den von ATZ gemessenen axialen und radialen Steifigkeiten des HTS- und PM-Lagers hat MM mittels der Rotordynamik-Berechnung die Anforderungen an die Steifigkeiten und Dämpfungen der Lager beziffert.

Als Ziel wurde ein **stabiler Lauf des Rotors** und eine **Resonanzauslenkung der Rotorwelle kleiner als 0,5 mm** vorgegeben.

Da das HTS-Lager je nach Stator-Temperatur auch unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweist, wurden die gemessenen Steifigkeiten bei einer nicht optimierten Kühlertemperatur von 72 K als Ausgangspunkte der Berechnungen verwendet. Sollte die Kühlung des HTS-Lagers im Betrieb ausfallen, muss der Rotor auch bei einer nicht optimalen Kühlung stabil laufen.

### Ausgangspunkte der Rotordynamikberechnungen:

Steifigkeiten des HTSL-Lagers:

$$C_{\text{rad HTS}} = 1 \text{ kN/mm}$$

$$C_{\text{ax HTS}} = 2 \text{ kN/mm}$$

Steifigkeiten des PM-Lagers:

$$C_{\text{rad PM}} = 0,1 \text{ kN/mm}$$

$$C_{\text{ax PM}} = -1,2 \text{ kN/mm}$$

Das HTS-Lager am oberen Wellenende weist eine um den Faktor 10 höhere radiale Steifigkeit auf als das PM-Lager am unteren Wellenende. Deshalb wird der Rotor eher dazu neigen, sich im unteren Lager zu bewegen, weil er oben steif geführt wird. Eine Dämpfung wird am effektivsten dort wirken, wo auch die größten Auslenkungen und Geschwindigkeiten auftreten. Dieser Punkt wird das untere Wellenende sein.

In Bild 6 ist dargestellt, wie sich die Auslenkungen  $s_0$  der Welle am HTS-Lager (oben) und PM-Lager (unten) in der Resonanz verhalten, wenn die Dämpfung nur im HTS-Lager stattfindet und der Dämpfungsfaktor  $k$  variiert wird. Erst bei einer Dämpfung größer als 1.000 N/(m/s) ist eine nennenswerte Verringerung der Auslenkungen der Welle zu erkennen. Bei 10.000 N/(m/s) erreicht die Auslenkung am oberen Wellenende gerade den vorgegebenen Grenzwert von 0,5 mm. Das untere Wellenende verzeichnet dort noch Auslenkungen von 7 mm. Mit diesen Auslenkungen wird der Rotor an das Gehäuse touchieren.

Eine Dämpfung nur im HTS-Lager lässt den Rotor nicht betriebs sicher laufen.

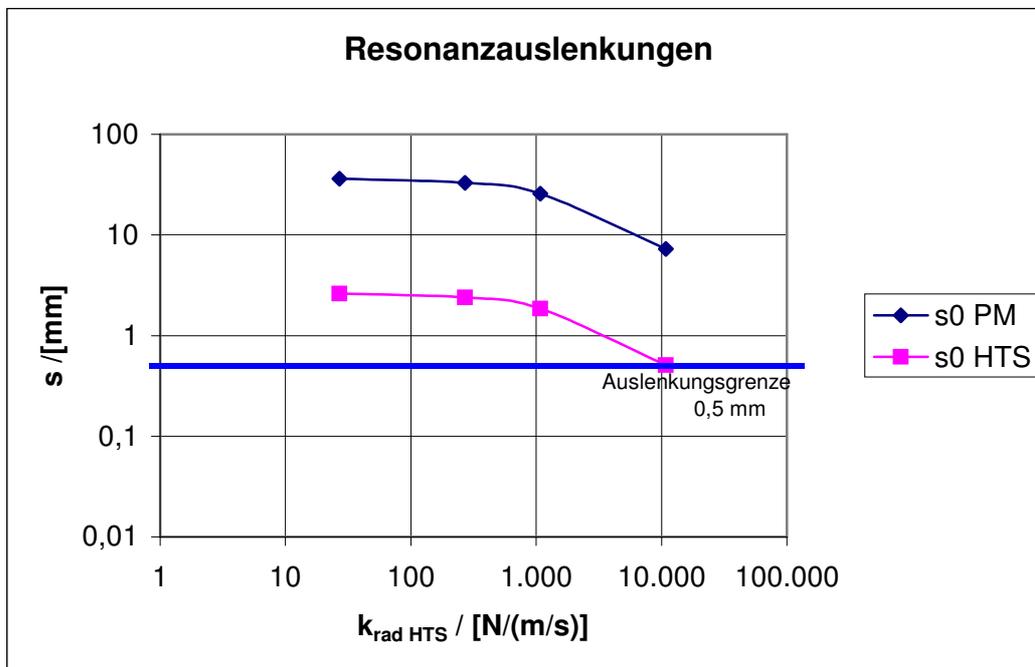
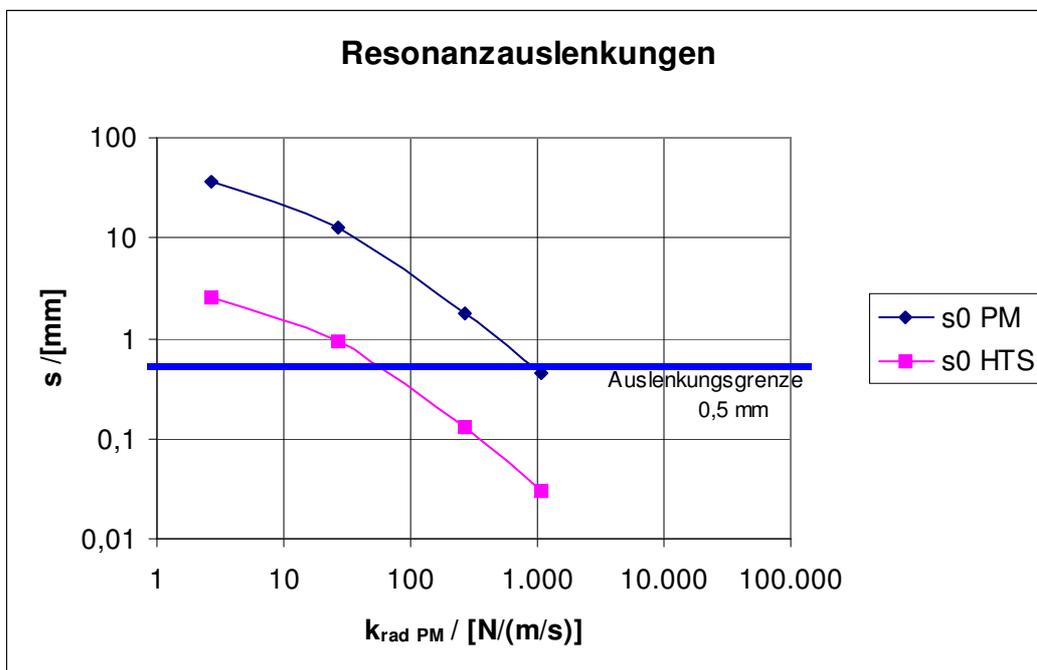


Bild 6, Variation der Dämpfung des HTS-Lagers. Die Dämpfung des PM-Lagers liegt konstant bei 2,7 N/(m/s).

In Bild 7 ist zu erkennen, dass eine Dämpfung des unteren PM-Lagers weitaus effektiver ist. Die Dämpfung  $k$  im PM-Lager wird in den Berechnungen variiert, die Dämpfung im HTS-Lager wird konstant bei 27 N/(m/s) gelassen. Mit steigender Dämpfung fallen die Auslenkungen an beiden Wellenenden stärker als in Bild 6. Bei einer Dämpfung größer als 1.000 N/(m/s) sind die Auslenkungen der Welle am oberen und unteren Ende sogar schon kleiner als 0,5 mm.

Mit einer **starken Dämpfung des PM-Lagers ( $k > 1.000$  N/(m/s))** kann der Rotor als **betriebssicher** betrachtet werden.



**Bild 7, Variation der Dämpfung des PM-Lagers. Die Dämpfung des HTS-Lagers liegt konstant bei 27 N/(m/s).**

#### 1.4.2 Auslegung der Lagersteifigkeiten für den Rotor

Die sich aus der Berechnung der Rotordynamik ergebenden notwendigen Lagersteifigkeiten und Dämpfungen der Magnetlager sind wie folgt:

##### Notwendige Steifigkeiten und Dämpfungen des HTSL-Lagers:

$$C_{\text{rad HTS}} = 1 \text{ kN/mm}$$

$$C_{\text{ax HTS}} = 2 \text{ kN/mm}$$

$$k_{\text{HTS}} = 27 \text{ N/(m/s)}$$

##### Notwendige Steifigkeiten und Dämpfungen des PM-Lagers:

$$C_{\text{rad PM}} = 0,1 \text{ kN/mm}$$

$$C_{\text{ax PM}} = -1,2 \text{ kN/mm}$$

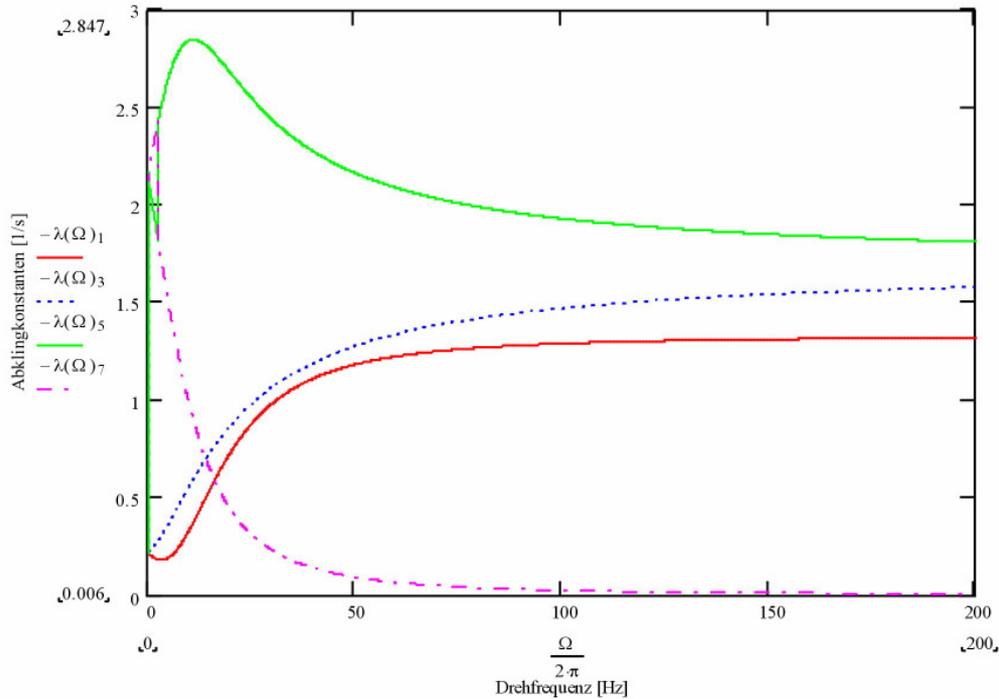
$$k_{\text{PM}} = 1000 \text{ N/(m/s)}$$

#### 1.4.3 Ergebnisse der Rotordynamik-Berechnung

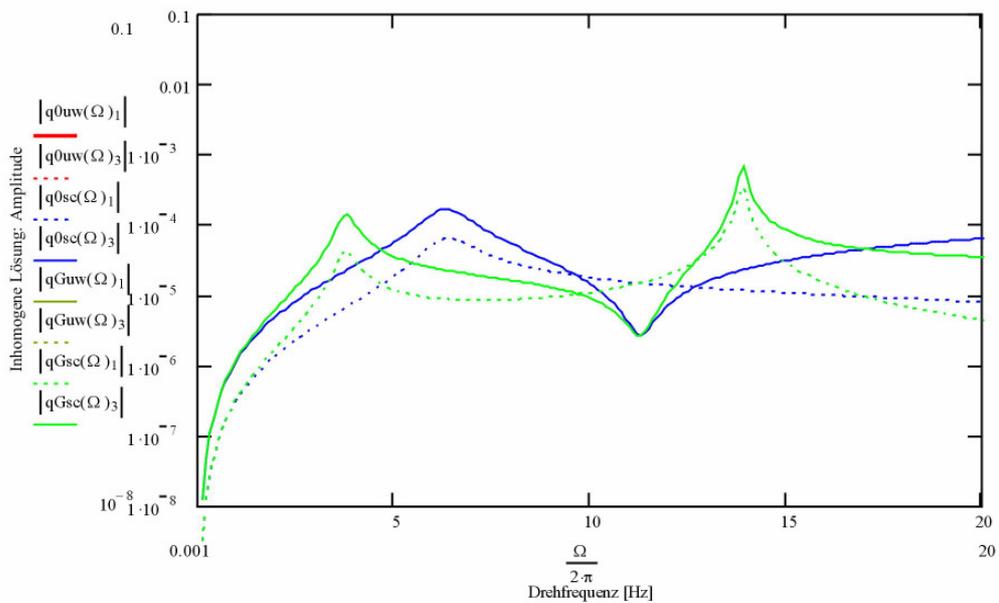
Aus den vorhandenen Steifigkeiten und Massenverteilungen wurden die Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der jeweiligen Drehzahl berechnet.

Zur Verifizierung der Rotordynamik ist ein verfeinertes, an den optimierten Rotor angepasstes Modell entwickelt worden. Alle Totmassen auf der Welle wie die Magnetringe sind ebenfalls enthalten.

Die Ergebnisse der Rotordynamikberechnungen zeigen, dass für die verschiedene Resonanzfrequenzen keine kritischen Zustände bestehen. Die Abklingkonstanten zeigen rechnerisch eine gedämpfte Schwingungsform. Die Auslenkungen der Welle bei Unwuchterregungen oder Schiefstellung der Hauptträgheitsachse bleiben unter der geforderten Grenze von 0,5 mm.



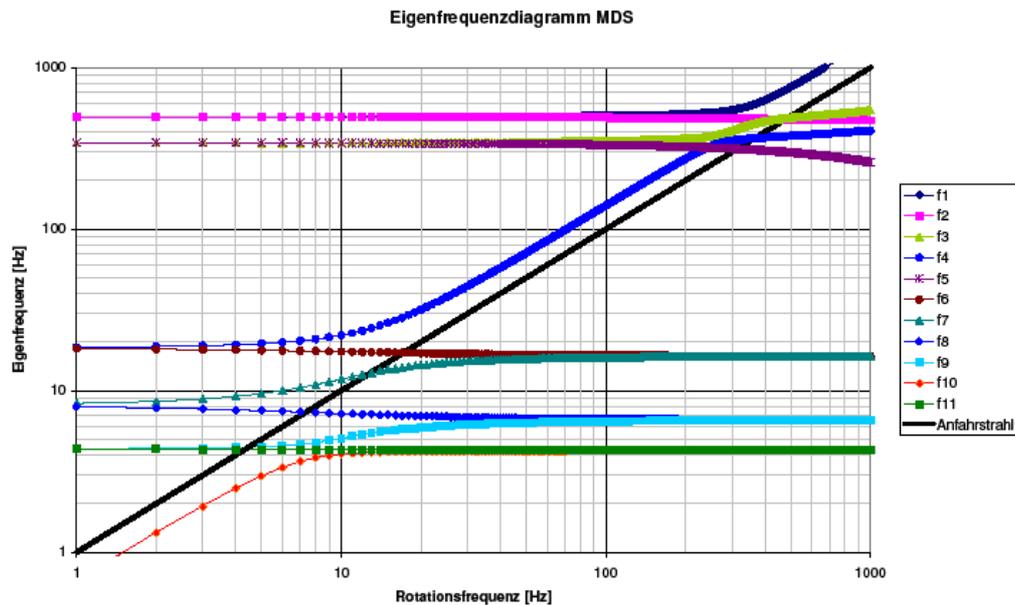
**Bild 8, Abklingkonstanten von gedämpften Schwingungen**



**Bild 9, Schwingungsamplituden in mm bei Anregung durch Unwucht oder Schiefstellung der Hauptträgheitsachse**

Alle Rechte vorbehalten.

Vervielfältigung, Weitergabe, Gebrauch oder Änderung dieses Dokuments ohne schriftliche Genehmigung ist untersagt.



**Bild 10, Berechnete Eigenfrequenzen des MDS12**

Das Ergebnis ist in Bild 10 dargestellt. Für die Konfiguration des MDS12 ergeben sich Resonanzfrequenzen bei niedrigen Frequenzen, deutlich unterhalb der Betriebsdrehzahlen, sowie bei vergleichsweise hohen Frequenzen, deutlich oberhalb der maximalen Betriebsdrehzahl. Die unteren Resonanzen hängen mit der magnetischen Lagerung sowie mit der Aufhängung des Speichers im Gestell zusammen. Bezüglich dieser Frequenzen wird der MDS12 überkritisch gefahren. Bezüglich der Resonanzen bei hoher Frequenz, die mit dem inneren Aufbau des Rotors zusammenhängen, wird der MDS unterkritisch betrieben.

Zur Erhöhung der Dämpfung des PM-Lagers wurden konstruktive Maßnahmen getroffen. Für den Betriebsdrehzahlbereich, der typisch zwischen der maximalen Betriebsdrehzahl und einem Viertel oder der Hälfte davon liegt – abhängig vom Einsatzfall und der Betriebsstrategie – reicht die Dämpfung vollkommen aus; der Betriebsdrehzahlbereich ist resonanzfrei. Für die Resonanzdurchfahrt der tiefen Frequenzen - unterhalb von 20 Hz bzw. etwa  $1000 \text{ min}^{-1}$  - wurde eine spezielle Vorgehensweise entwickelt.

## 1.5 Neue technische Herausforderungen

Da die oben genannten Anforderungen von den Magnetlagern nur bezüglich der Steifigkeiten, nicht aber bezüglich der Dämpfungen erfüllt werden können und gleichzeitig die Rotoreigenfrequenzen sehr nahe an den Drehfrequenzen liegen, hat sich im Frühjahr 2006 abgezeichnet, dass zusätzliche technische Anforderungen für einen sicheren Betrieb des Schwungradspeichers bestehen.

Die Schlussfolgerungen für die Neuauslegung des Speichers konnten nach internen Diskussionen mit dem Projektpartner ATZ schnell herausgearbeitet werden und sind in dem 2. offiziellen Verbundtreffen am 4.04.06 in Starnberg (siehe Bericht) dargelegt worden. Daraus haben sich neue technische Herausforderungen ergeben, die sich auch auf den Zeitplan ausgewirkt haben.

1. Rechnungen und Experimente zeigten im Rahmen der Arbeiten zum Meilenstein 4 die Notwendigkeit den Rotorkörper aus Kohlefaser – Verbundmaterial als zentrales Element des Speichers für die magnetische Aufhängung zu überarbeiten. Kernpunkt dabei ist die Verschiebung von Rotoreigenfrequenzen (Starrkörperfrequenz). Das Gewicht des Rotors ist damit nochmals um fast 100 kg größer geworden. Diese Gewichtszunahme wirkt sich positiv auf den speicherbaren Energieinhalt aus.
2. Mit dem neu ausgelegten Rotor ist die Beherrschung der Rotordynamik, im Besonderen der Rotoramplituden im Bereich der kritischen Drehzahlen, **die zentrale Aufgabe** für Auslegung der Rotorlagerung geworden.
3. In der technischen Konsequenz (sowie auch in der Analyse von Vorgängerprojekten) haben die Projektpartner mehrere technische Lösungen von Dämpfersystemen diskutiert und bewertet. Als neue und zusätzliche Elemente werden in den Rotationsspeicher zwei **dynamische Notlager integriert**, die in einem frequenzselektiven Drehzahlbereich zugeschaltet werden können.
4. Die Gewichtszunahme des Rotors ist mit einer höheren als der geplanten Belastung des HTS - Magnetlagers verbunden. Die diametralen Anforderungen von mechanisch stabiler Aufhängung und Kälteisolation des HTS Stators sind damit weiter gestiegen. Die bisherige Abstützung musste verstärkt werden und die Ankopplung des GM-Kaltkopfes wird überarbeitet.

Die oben genannten Punkte waren auch die Grundlage für unseren Antrag zur kostenneutralen Verlängerung des Fördervorhabens (Förderkennzeichen: 13N8737, 13N8738).

## **1.6 Auswirkungen auf den Arbeitsplan und die Arbeitspakete im Jahre 2006**

Die Auswirkungen auf die Arbeitspakete in dem Terminplan waren derart komplex, dass mit der Konstruktion in vielen Teilen wieder neu angesetzt werden musste. Dies hatte zur Auswirkung, dass ATZ und L3 MM im Okt. 2006 eine kostenneutrale Verlängerung beantragt und ihre Terminplanung erneuert haben.

Die Hinzunahme der dynamischen Notlager hatte konstruktive Auswirkungen auf alle Bauteile, die um sie herumgruppiert sind. Dazu zählen die Welle, das Gehäuse und die Anbindung der HTS- und PM-Lager and die Welle. Auch wurde ein berührungsloses Sensorsystem zur Rotorlageerkennung hinzugefügt. Im Einzelnen:

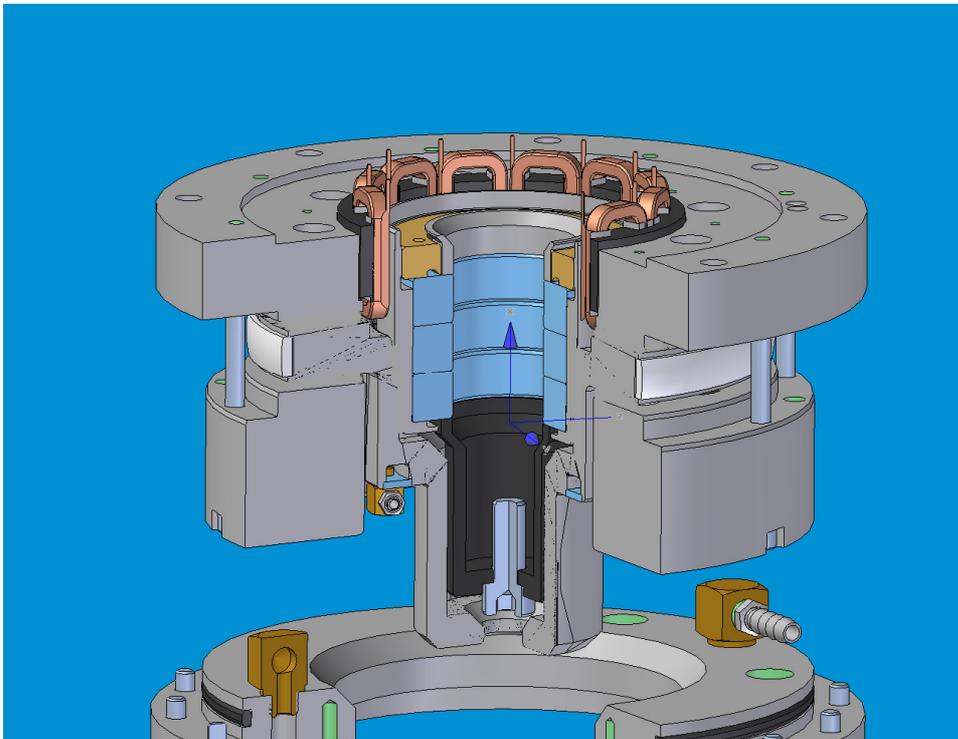
- Design eines dynamischen Notlagers
- Erweiterung der Konstruktion um die neu hinzugekommenen dynamischen Notlager
- Änderungen im Lagerbereich, Welle, Rotor, Gehäuse
- Neukonzeption Anbindung HTS- und PM-Lager an Welle
- Neuberechnung Rotordynamik
- Einfügen Sensorsystem zur Rotorlageerkennung
- Neuerstellung Betriebs-, Überwachungs- und Sicherheitskonzept

## 1.7 Umsetzung der notwendigen Änderungen

### 1.7.1 Dynamische Notlager

Die dynamischen Notlager sind als neue Baugruppen an den oberen und unteren Wellenenden angeordnet worden. Sie dienen dazu, den Rotor beim Durchfahren des Resonanzbereichs zu führen und auch zu dämpfen. In dem überkritischen Drehzahlbereich wird ihre Funktion nicht mehr benötigt.

Zur Aufnahme der dynamischen Notlager war eine vollständige, konstruktive Überarbeitung der Lagerbereiche notwendig.

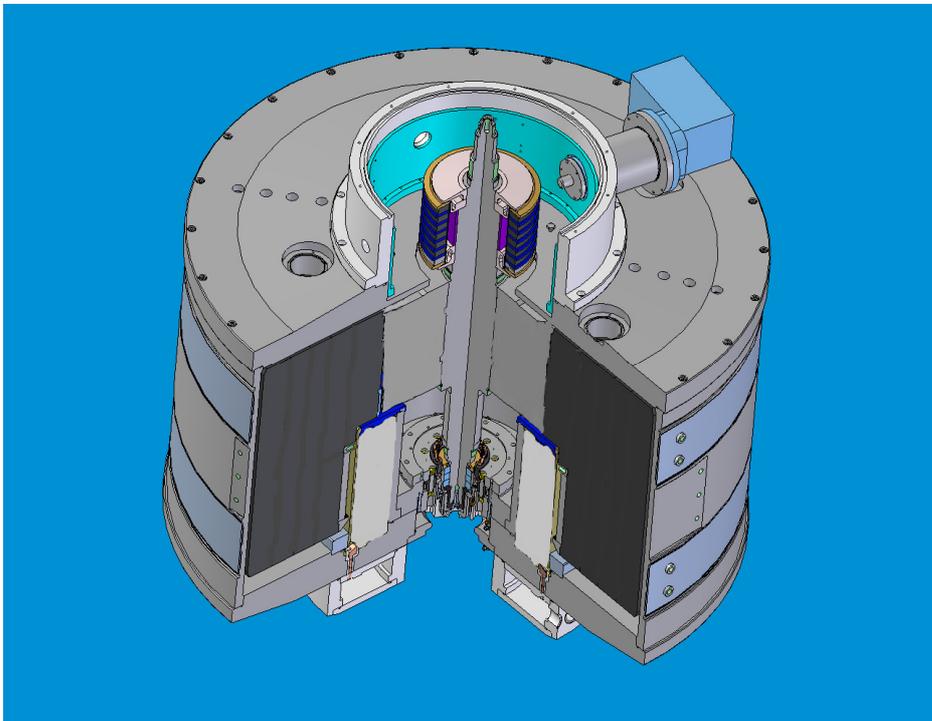


**Bild 11, Unterer Lagerbereich mit dynamischen Notlager**

Bild 11 zeigt das untere dynamische Notlager mit der zugehörigen Aufnahmevorrichtung. Die Ausführung der Welle musste an die Bauform des Lagers angepasst werden. Auch die Aufnahme der Lager in das MDS-Gehäuse musste wegen der erforderlichen größeren Durchmesser ebenso erweitert werden wie das Gehäuse selbst.

### 1.7.2 Rotor mit MDS-Gehäuse

In Bild 12 ist der komplette Rotor mit Welle, dem Gehäuse, dem unteren dynamischen Notlager und dem Rotor des oberen HTS-Lager dargestellt. Im oberen Teil ist der Stator des HTS-Lagers (ATZ) nur als heller Ring, angedeutet zu erkennen. Der Aufbau des Stators des HTS-Lagers und das obere, dynamische Notlager wurden in dem Schnittbild nicht mehr explizit dargestellt. Das dynamische Notlager konnte im Innenraum der M/G-Einheit verstaut werden. Auf Grund der Anforderungen an die Rotorgeometrie wurde der Rotor nochmals im Durchmesser vergrößert, um den erforderlichen Abstand der Resonanzfrequenzen zu gewährleisten. Ein weiterer Rotorring ist außen hinzugekommen und hat den Rotor bei gleicher Höhe breiter gemacht.



**Bild 12, MDS12, Rotor mit Welle und Gehäuse**

Die bisherigen Fertigungszeichnungen sind zurückgezogen und aktualisiert worden. Die Fertigung der Hauptkomponenten wie Rotor und Gehäuse ist ab Nov. 2006 wieder aufgenommen worden. Für die Fertigung der Rotore haben wir aus Qualitäts- und Fertigungsgründen auf unseren Standardlieferanten zurückgegriffen. Die Liefertermine für die insgesamt sechs Teilrotore haben sich auf Grund der knappen Fertigungskapazitäten des Lieferanten bis Mai 2007 erstreckt. Anfang Juni 2007 sind die letzten Rotore geliefert worden. Im Juni und Juli 2007 sind alle sechs Rotore mechanisch fertig bearbeitet worden.

Bei der mechanischen Bearbeitung des Rotors kam es in den Oberflächenendlagen des Rotors zu Ausfransungen und es war eine teilweise Nachbearbeitung der Einzelrotore im Herbst 2007

notwendig. Dafür sind die Durchmesser und die Geometrie der Einzelrotore neu aufeinander angepasst worden.



**Bild 13, Rotor des MDS12, mit angepasster Geometrie, fertig montiert mit Welle**

Die äußeren beiden Rotore sind nachträglich mit einem Absatz versehen worden, um die Stellen mit den schadhafte Oberflächenendlagen zu eliminieren (Bild 13). Die Kontur der Rotoroberfläche wurde mittels FEM (Finite Elemente Methode) neu berechnet, um einen spannungsarmen Übergang zu dem Restrotor zu gewährleisten.

An den Verbindungen zwischen den einzelnen Rotorringen darf es keine stufenförmigen Absätze geben, weil diese Übergänge mit sprunghaften Änderungen der lokalen Schubspannung einhergehen. Diese Schubspannungsspitzen können zu einem lokalen Versagen des Gefüges des CFK-Verbundmaterials führen. Treten solche Schäden auf, kann es zum Abplatzen kleinerer Teile von dem Rotor bis hin zu größeren Ringsegmenten kommen. Die betroffenen Ringe sind vorgedreht worden und nach dem Zusammenfahren des gesamten Rotors ist die berechnete Kontur nachgedreht worden, um die letzten Unebenheiten zu beseitigen.

An dem Flansch rechts oben in Bild 12 ist der Kaltkopf zur Kühlung des HTS-Stators als Einbauteil von ATZ eingezeichnet. Mittels dem Austauschen der 3D-CAD Dateien ließen sich in der Entwicklungsphase die Einbausituationen der Bauteile vor der eigentlichen Montage zwischen den Projektpartnern abstimmen und Überschneidungen sofort erkennen und frühzeitig beseitigen.

Der Einbautest des HTS-Stators in das Original MDS12 Gehäuse verlief bei ATZ ohne Probleme. Die dort durchgeführten Kaltmessungen zeigten dass, das Gehäuse dicht war und die erforderlichen Kalttemperaturen erreicht werden konnten (Bild 14). Für weitere Details der Kaltmessungen zu den Eigenschaften des HTS-Lagers verweisen wir auf den Abschlussbericht von ATZ, Förderkennzeichen 13N8737.



**Bild 14, HTS-Stator mit Original-Gehäuse bei ATZ für Kaltmessungen**

### 1.7.3 Neukonzeption Anbindung HTS- und PM-Lager an die Welle

Im Zuge der Überarbeitung der Lager-Bereiche mit der Hinzunahme der dynamischen Notlager ist die Anbindung der Rotorteile des HTS- und des PM-Lagers an die Welle neu konzipiert worden. Die Ergebnisse sind in Form von Fertigungsvorgaben an unseren Verbund-Partner ATZ weitergereicht worden, die daraus die Fertigungszeichnungen abgeleitet haben.

Die Magnetringe des HTS- und PM-Lagers werden zusammen mit den Zwischenringen auf einem Rohr fixiert, um im gesamten Drehzahlbereich vom Stillstand bis zur Nenndrehzahl eine exakte mechanische Führung zu gewährleisten. Da die Magnetringe aus porösem, gesintertem Grundmaterial bestehen, ist aus Sicherheitsgründen wegen der großen Fliehkräfte eine Bandage als Schutz um die Magnetringe herum gelegt worden. Auch im Falle eines Abbröckelns des Magnetmaterials an der Außenseite, wird der Magnetring mit Hilfe der Bandage formstabil gehalten. Es können auch keine Stücke in die Maschine herausgeschleudert werden, die an den engsten Stellen Luftspalte von nur 2-3 mm aufweist. Selbst kleinere magnetische Partikel könnten dort Schaden anrichten.

Der Rotor des HTS-Lagers bestehend aus Magnetringen, Zwischenringen und Führungsrohr wird radial und axial eingespannt und mit einem Luftspalt zur Welle hin fixiert. Da der Rotor sich im Betrieb aufweitet, ist diese elastische Einspannung gewählt worden, um eine auf den Umfang bezogen gleichmäßige Aufweitung zu ermöglichen und keine Unwuchten zu erzeugen. Der Luftspalt zwischen Führungsrohr und Welle dient als Abschirmung der Welle von den auch nach innen austretenden Magnetfeldern der Magnetringe. Ein ferromagnetisches Material direkt hinter den Magnetringen könnte die tangentielle Isotropie des Magnetfeldes stören und zu zusätzlichen Verlusten in dem Stator des HTS- und des PM-Magnetlagers führen.

Die Einspannsituation ist an die neue Einbaulage der Welle auf Grund der Hinzunahme der dynamischen Notlager angepasst worden und erfüllt die Anforderungen an Sicherheit und mechanischer Fixierung im Dauerbetrieb.

### 1.7.4 Neuberechnung Rotordynamik

Die Rotordynamik ist mit dem aktualisierten FEM-Modell des kompletten Rotors neu durchgerechnet worden und hat als Ergebnis den Verlauf der Eigenfrequenzen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ergeben. Die Schnittpunkte der Eigenfrequenzen mit dem Fahrstrahl (Eigenfrequenz = Rotationsfrequenz) stellen Resonanzen dar. Unterhalb von 20Hz schneidet der Fahrstrahl einige Eigenfrequenzen, was zu Resonanzen zwischen 4Hz und 15Hz führen wird. In diesem Resonanz-Bereich sorgt das dynamische Notlager mit seiner zusätzlichen Dämpfung für einen sicheren mechanischen Betrieb.

Oberhalb von 20Hz bis 160Hz (= 10.000 rpm) läuft der Rotor überkritisch und benötigt die zusätzliche Dämpfung nicht mehr. In diesem Geschwindigkeitsbereich kann er allein mit den Magnetlagern stabil fahren.

### 1.7.5 Sensorsystem zur Rotorlageerkennung

Der Rotor wird im Normalfall von den Magnetlagern axial und radial gehalten. Die Magnetlager erzeugen die notwendigen Rückstellkräfte erst bei einer Auslenkung der Welle aus der Ruhelage. Um die Auslenkungen der Welle zu überwachen, wird beim MDS12 ein berührungsloses Sensorsystem eingesetzt, welches die radiale und axiale Auslenkung des Rotors misst und überwacht.

Überschreiten die Unwuchten des Rotors ein definiertes Maß, führt dies zu größeren radialen Auslenkungen im Betrieb. Diese Auslenkungen werden erfasst und führen bei Überschreiten des Grenzwertes zu einem Abbremsen und Stillsetzen des supraleitend gelagerten Schwungradspeichers MDS12.

Auch ein Nachlassen der Tragkraft des HTS-Lagers wird mit Hilfe des Sensorsystems erkannt. Bei einer schwindenden Tragkraft wird sich der Rotor axial immer weiter absenken. Die axiale Lage des Rotors wird ebenso überwacht. Ein Überschreiten des axialen Lagegrenzwertes führt ebenso zu einem Abbremsen und Stillsetzen des Schwungradspeichers.

### 1.7.6 Neuerstellung Betriebs- und Überwachungskonzept

Das Betriebs- und Überwachungskonzept ist mit der Hinzunahme der dynamischen Notlager und des Sensorsystems zur Rotorlageerkennung im Jahre 2006 komplett neu aufgestellt worden.

Die Änderungen in der Steuerung aus dem Betriebs- und Überwachungskonzept sind im Jahre 2007 in die Projektierung des Schaltschranks direkt eingeflossen, nachdem die Projektierungsarbeiten im Winter 2006 wegen der absehbar anstehenden Änderungen unterbrochen worden sind. Der Schaltschrank ist im Sommer 2007 unter Berücksichtigung der letzten Änderungen fertiggestellt worden.

### 1.7.7 Schaltschrank

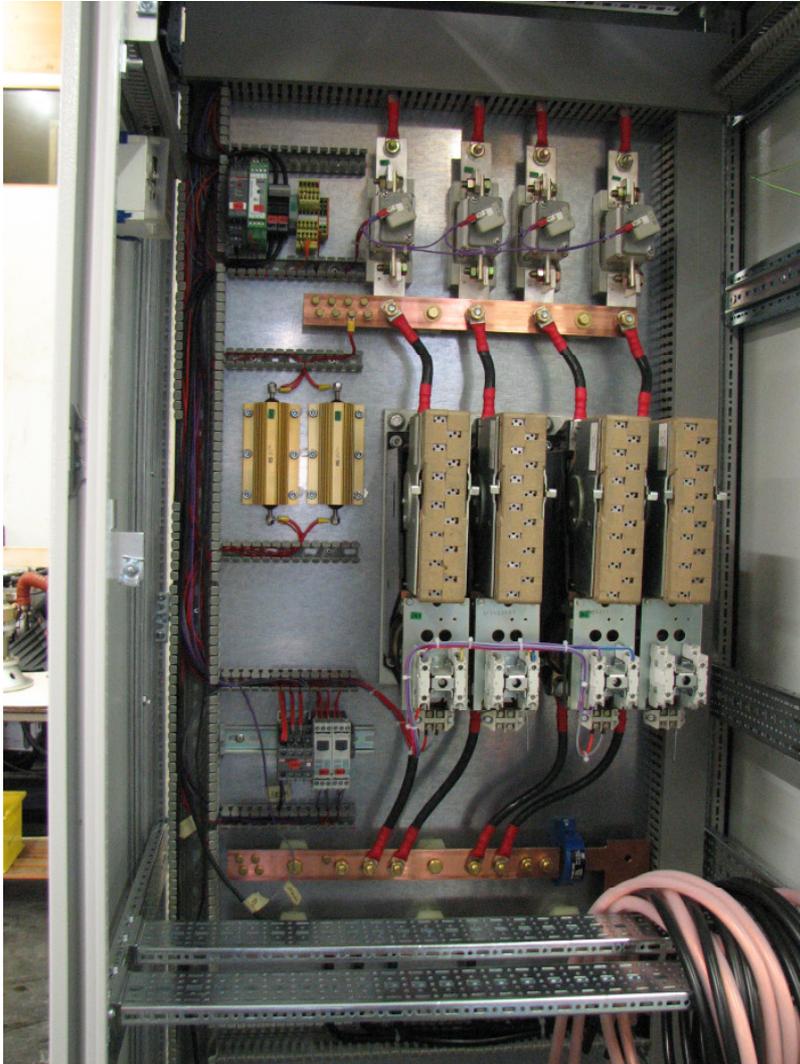
Der Schaltschrank für den supraleitenden Schwungradspeicher ist in Bild 15 dargestellt. Er besteht aus drei Baugruppen von links nach rechts: Einspeisung, Steuerteil und Leistungsteil (doppeltürig).



**Bild 15, Schaltschrank des supraleitenden Schwungradspeichers**

Die Einspeisung zum Laden und Entladen des MDS12 erfolgt in dieser Anwendung direkt aus einem 220 VDC Gleichspannungszwischenkreis. In der industriellen Anwendung bei E.On stützt dieser 220 VDC Kreis eine kraftwerkseigene 400 VAC Versorgung. Bisher wird diese 220 VDC-Schiene in dem Kraftwerk aus Batterien gestützt. Für die industrielle Erprobung soll der supra-leitend gelagerte Speicher parallel zu den Batterien den DC-Kreis als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) mitstützen.

Die Schwungradspeicher von MM werden in der Regel an einem DC-Kreis betrieben, der mit einer Spannung zwischen 500 und 750 VDC liegt. Für den supra-leitend gelagerten Speicher MDS12 wurde diese Spannung im Hinblick auf die beabsichtigte Erprobung bei E.On auf 220 VDC abgesenkt. Dies hatte Anpassungsarbeiten bei dem Neuaufbau des Stators zur Folge. Der Windungsaufbau wurde auf die niedrigere Spannung optimiert und mit 12 Phasen ausgelegt.



**Bild 16, Schaltschrank mit Einspeiseteil**

Die Einspeisung in dem Kraftwerk erfolgt von oben über einen Kabelkanal. Zur vollständigen, galvanischen Abtrennung des Schaltschranks von der 220 VDC-Schiene sind Leistungsschalter für den + und – Pol eingebaut, die auch unter Last den Schaltschrank vom Netz trennen können.

Als Hilfsenergieversorgung wird ein 400 VAC Anschluss benötigt. Aus den 400V werden die Kühlwasserpumpen, die Vakuumpumpen und die Kühlerventilatoren versorgt. Diese Antriebe werden zum Betrieb des MDS12 benötigt. Die 24 VDC für die interne Versorgung im Schaltschrank wird ebenfalls aus den 400 VAC bezogen.

In Bild 17 ist der Steuerteil des Schaltschranks mit dem Mikrocontroller PMC (Power Management Controller) als zentrales Steuerelement für den MDS12 enthalten (siehe links oben). Der PMC ist über ein elektrisches Interface mit der programmierbaren Steuerung (siehe rechts

oben) und den Stellgliedern verbunden. Die vier Leistungselektroniken zum Antreiben des MDS12 werden vom PMC direkt über Lichtwellenleiter angesteuert.



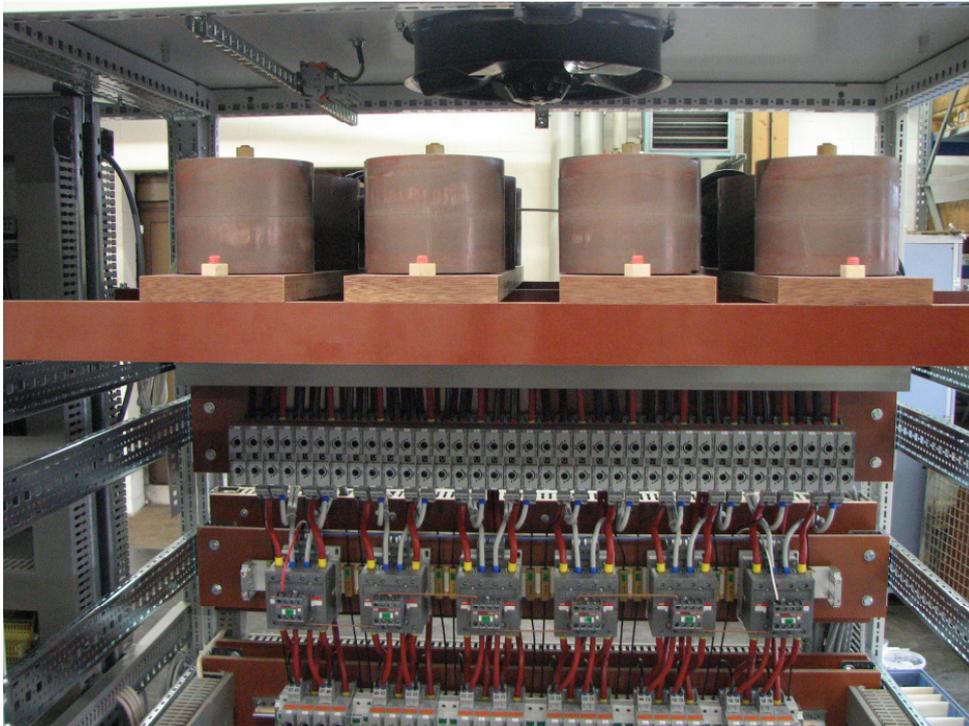
**Bild 17, Schaltschrank mit Steuerteil**

Der PMC steuert den MDS12 direkt an, überwacht den Betriebszustand und kann bei Erkennen von Fehlern im System den Schwungradspeicher abbremsen und bis zum Stillstand herunterfahren. Für das Herunterbremsen bis zum Stillstand wird keine externe Hilfsenergie benötigt. Auch bei Ausfall des DC-Kreises und der 400 V Versorgungsspannung wird der MDS12 sicher abgebremst. Auch bei Ausfall der Kühlung für das supraleitende Lager besitzt der HTS-Stator soviel Wärmekapazität, dass er bis zu einer Stunde den supraleitenden Zustand im Rotor aufrecht halten kann. Für den Abbremsvorgang des Rotors bis zum Stillstand werden ca. 20 min. benötigt. Diese Bremsdauer liegt innerhalb der Restbetriebszeit für das supraleitende Lager.

## Betriebsführung

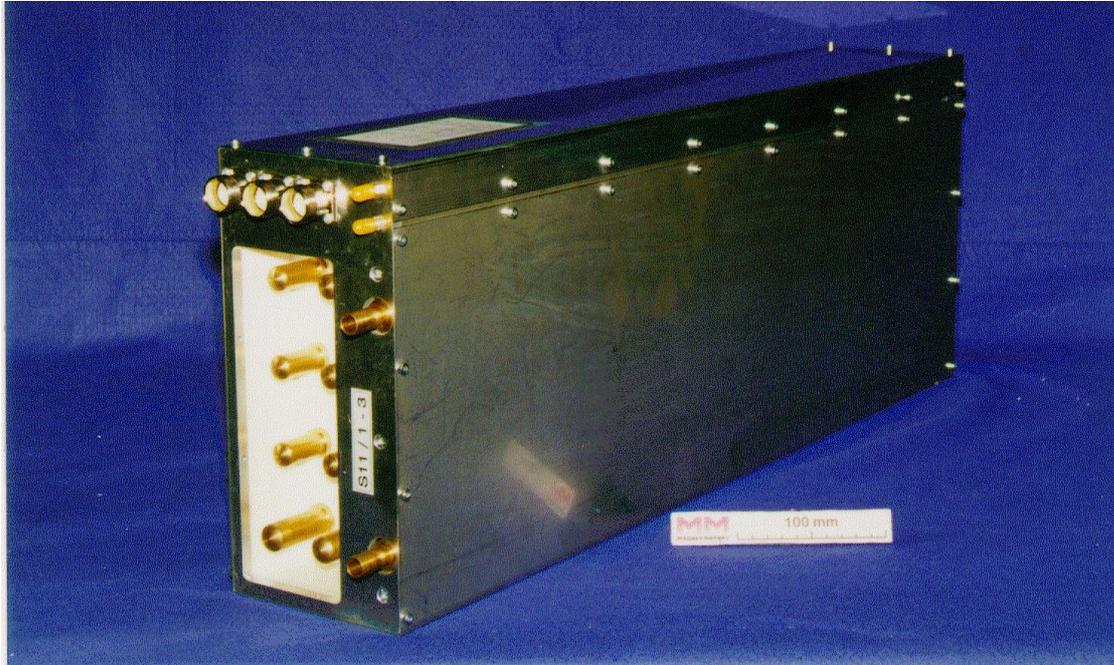
Für den Einsatz im E.On Kraftwerk wird der Schwungradspeicher aus der 220 VDC aufgeladen und läuft danach mit der Nenndrehzahl von 10.000 rpm weiter. Das Schwungradspeicher-System überwacht permanent die Spannung auf der 220 V DC-Schiene. Im Falle eines Netzausfalls, wird die Notstromversorgung aus dieser Schiene gespeist werden. In Folge der Belastung wird die Spannung einbrechen. In einem solchen Fall wird der Schwungradspeicher innerhalb von 1-2 ms auf den Entladebetrieb umschalten und die 220 VDC stützen.

In Bild 18 ist der Leistungsteil mit den Anschlüssen, den Trennschützen und den Vorschalt-drosseln der 12 Phasen dargestellt. Die Leistungselektroniken sind unterhalb der Schützenleiste in dem Leistungsteil aufgestellt.



**Bild 18, Schaltschrank mit Leistungsteil**

Jede Leistungselektronik enthält jeweils 3 Wechselrichter, die als separate 4-Quadrantenwechselrichter mit 1200 V IGBTs aufgebaut sind. Für den Betrieb der 12 Phasen im MDS sind deshalb vier Leistungselektroniken notwendig (Bild 19).



**Bild 19, Leistungselektronik für den Einsatz beim MDS12**

### **1.8 Fertigstellung der Hauptkomponenten des Speichers im Frühjahr 2008**

Zu dem **dritten Meilenstein im Februar 2006** gehört die Fertigstellung der Fertigungszeichnungen. Diese waren z.T. schon fertig gestellt, als die dynamischen Notlager hinzugefügt worden waren und der Terminplan angepasst worden ist (Stand Okt. 2006).

In dem überarbeiteten Meilensteinplan von Okt. 2006 gibt es den **vierten Meilenstein im Sept. 2006** mit dem 2. Stand der Fertigungszeichnungen der Hauptkomponenten. Die Fertigungszeichnungen für das MDS-Gehäuse mit den Kleinteilen sind peu a peu nachgezogen worden und lagen zu dem Zeitpunkt auch alle vor.

Die Fertigung der Hauptkomponenten wie Rotor, Stator und MDS- Gehäuse ist im November 2006 bei externen Zulieferern gestartet worden. Die Rotore sind auf Grund der zu diesem Zeitpunkt engen Fertigungskapazitäten im Juni 2007 bei MM eingetroffen, das Gehäuserohr erst im September 2007.

Bei der mechanischen Nachbearbeitung der Rotore traten Fertigungsprobleme aus dem Wickeln der Faserverbund-Werkstoffe zu Tage, die eine Neuberechnung der Rotorgeometrie und eine Anpassung der Rotordurchmesser notwendig machten. Die mechanische Bearbeitung der Teil-Rotore ist im Dezember 2007 abgeschlossen worden.

 <p><b>MM</b> <b>MAGNET MOTOR</b> an  communications company</p>	<p><b>MDS12</b> <b>Magnetisch gelagerter</b> <b>Schwungradspeicher</b></p>	<p>Seite 25 von 26 08.06.24 MDS12 ABSCHLUSSBERICHT 2008.DOC / 24.06.2008 / Weh</p>
--	--	--

Der Rotor ist Anfang 2008 mit der Motor/Generator-Einheit bestückt und im März 2008 ohne die PM-Ringe des HTS- und PM-Lagers zusammenmontiert worden.

## 2 Arbeits- und Zeitplanung

Die **Arbeits- und Zeitplanung für das Projekt konnte bis zum vierten Meilenstein im September 2006 (2. Stand der Fertigungszeichnungen der Hauptkomponenten) eingehalten werden** (Stand Okt. 2006).

Der darauffolgende **fünfte Meilenstein (Beschaffung und Fertigung der Komponenten, Bau dynamischer Notlager, sukzessiver Test der Einzelkomponenten, Dez. 2006) konnte nicht eingehalten** werden, weil die damals möglichen Lieferzeiten der externen Zulieferer (speziell für die Rotore und MDS-Gehäuse) eine schnellere Abwicklung nicht zuließen. Die Einzelkomponenten inklusive der notwendigen Nacharbeiten lagen erst im Dezember 2007 zur weiteren Montage bereit.

Der Zusammenbau der Einzelkomponenten für den MDS ist im März 2008 abgeschlossen worden. Für die Endmontage fehlen noch die Rotorteile des PM-Lagers. Der Rotor des HTS-Lagers ist bereits vorhanden. Der **Meilenstein 6, Zusammenbau der Einzelkomponenten, Einbau und Endmontage**, wird im Aug. 2008 vollständig erreicht werden.

Der **Meilenstein 7, (Speicher im Test bei MM, Überführung und Inbetriebnahme bei E.On)** wird im Nov. 2008 nach der jetzt vorliegenden Terminplanung abgeschlossen sein.

## 3 Aussichten für die Zielerreichung

Die Aussichten das Vorhabensziel zu erreichen, sind mit den **bereits vorliegenden Daten des HTS-Lagers und der Rotordynamik gut belegt**. Das HTS-Lager hat genug axiale Tragkraft, um auch das höhere Rotorgewicht im statischen Fall zu halten. Die aus den Anforderungen der Rotordynamik notwendigen Steifigkeiten der Magnetlager sind realisierbar und durch Messwerte belegt. Die notwendigen Dämpfungen im unteren Drehzahlbereich werden mit Hilfe von dynamischen Notlagern erreicht.

Auf Grund der negativen Erfahrungen aus den Energiespeicher-Projekten anderer Institutionen mit der Beherrschung der Rotordynamik ist auf diesen Punkt große Aufmerksamkeit gelegt worden, um schon in der Design- und Konstruktions-Phase Instabilitäten auszuschließen. Diese Herausforderung konnten durch dieses Redesign erfüllt werden.

Die aufgetretenen Fertigungsprobleme bei der Rotorbearbeitung konnten durch zusätzliche Maßnahmen von MM mit einer Neuberechnung der Rotorgeometrie technische einwandfrei gelöst werden. Auch die anspruchsvolle Herstellung des Rotors des HTS-Lagers konnte nach den berechneten Vorgaben problemlos gefertigt werden. Diese Fertigungsprobleme haben für die Verbundpartner MM und ATZ zeitliche Verzögerungen und einen weiteren Mehraufwand

Alle Rechte vorbehalten.

Vervielfältigung, Weitergabe, Gebrauch oder Änderung dieses Dokuments ohne schriftliche Genehmigung ist untersagt.

bedeutet. Sie haben die Durchführung des Projektes aber technisch nicht in Frage stellen können

Über die Ergebnisse der Inbetriebnahme des Speichers bei MM und der anschließenden Erprobung bei E.On wird MM in Zusammenarbeit mit ATZ einen Zusatzbericht liefern.

## 4 Relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite

Keine neuen Ergebnisse zu magnetisch gelagerten Rotationsenergiespeichern.

Die bei Projektbeginn vorliegenden Ergebnisse der vorangegangenen Speicherprojekte wurden ausgewertet. In dem NEDO (Japan) Projekt waren jeweils die radialen Steifigkeiten der Magnetlager und der Luftspalt des Rotors so gering, dass der Rotor bei kleinen Auslenkungen schon touchierte. In dem Boeing/ANL (USA) Projekt war die radiale Steifigkeit bzw. Dämpfung ebenfalls zu gering, so dass der Rotor die erste kritische Drehzahl nicht überfahren konnte und das Gehäuse touchierte. In der Zwischenzeit wurden Änderungen durchgeführt, deren Resultate noch nicht veröffentlicht worden sind.

## 5 Zielsetzung für das laufende Projekt

Es sind keine Änderungen in der Zielsetzung erforderlich.

## 6 Verwertungsstrategien

Es sind bisher keine Erfindungen oder Schutzrechanmeldung erfolgt oder von am Vorhaben Beteiligten in Anspruch genommen worden.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des Projektes sind nach wie vor positiv. Bei Gesprächen mit E.ON als industriellen Anwender ist das **Interesse an dieser Speichertechnologie** zu erkennen. **E.ON** hat diesen Speichertyp auf Vorträgen schon als **potentiellen Anwendungsfall** vorgestellt. Mit diesem Speichertyp könnten ältere Umwandler in einem Kraftwerk ersetzt werden, die derzeit mit hohen internen Verlustleistungen arbeiten.

Aussagen über eine wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit nach Projektende lassen sich fundiert erst nach einer Auswertung des Probebetriebes bei E.ON machen.