

Jahresbericht 2002, 27. Februar 2003

Projekt

Hocheffiziente getriebelose Antriebe

Autor und Koautoren	Ralph Niederer
beauftragte Institution	Konsortium Technocon / Bartholdi
Adresse	C/o Technocon AG, Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01/ 445 18 30; niederer@technocon.ch ; www.technocon.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	45815 / 85874
Dauer des Projekts (von – bis)	Von 1.05.02 bis 30.04.03

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Projekt werden hocheffiziente getriebelose Antriebe für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Dieses System besteht aus einem IGBT-Umrichter und einer hochpoligen permanenterregten Synchronmaschine. Dieses System kann mit beiden Drehrichtungen und beiden Energierichtungen arbeiten, so dass es auch als Generatorsystem bei der Stromerzeugung verwendet werden kann.

Die hohe Effizienz hinsichtlich Wirkungsgrad und Materialeinsatz wird erreicht, weil einerseits auf ein mechanisches Getriebe verzichtet werden kann und andererseits Maschine und Umrichter in vielen Schritten auf einander abgestimmt und in vielen Details verbessert wurden.

Dieses Antriebssystem wird für 2 Leistungsklassen entwickelt und überprüft: 1.2 MW und 3 kW.

In diesem Jahr wurden alle konzeptionellen Arbeiten ausgeführt. Umrichter und Maschine wurden berechnet, simuliert und konstruiert. Die Fertigung der Prototypen ist teilweise bereits abgeschlossen, so dass ab Anfang des nächsten Jahres mit den ersten Tests begonnen werden kann.

Die detailliert ausgeführten Verlustberechnungen lassen erwarten, dass die Verluste im Vergleich zu einem konventionellen Antriebssystem mit Getriebe um mehr als 40% reduziert werden können.

Der Materialeinsatz kann im Vergleich zu konventionellen Maschinen und Umrichtern um ca. 30% reduziert werden.

Projektziele

Es wird die Technologie für ein drehzahlvariables Antriebssystem, bestehend aus IGBT-Umrichter und einer hochpoligen permanenterregten Synchronmaschine für eine Leistung bis 1.5 MW entwickelt. Gleichzeitig wird eine Studie an der *Hochschule Wallis* durchgeführt, welche die Umsetzung dieses Konzepts auf kleinere Leistungen (1 .. 100 kW) untersucht.

Dieses Antriebssystem ist geeignet für getriebelose Antriebe mit tiefen Drehzahlen. Da dieses System für beide Drehrichtungen und beide Energierichtungen ausgelegt ist, kann es auch als Generatorsystem bei der Stromerzeugung verwendet werden.

Neu an diesem Projekt ist die sehr enge Zusammenarbeit von Maschinenhersteller und Umrichterhersteller in allen Phasen der Entwicklung. Dies erlaubt eine Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich Verfügbarkeit, Wirkungsgrad und Materialeinsatz.

Die Firmen *Technocon* und *Bartholdi* entwickeln, produzieren und prüfen einen Umrichter bzw. eine Maschine mit einer Bauleistung von 1.2 MW.

Die *Hochschule Wallis* entwickelt, produziert und prüft das gleiche Antriebskonzept an einem Prototyp mit ca. 3 kW Bauleistung.

Bedeutung und Vorteile dieses Antriebssystems

Das getriebelose Antriebssystem hat folgende Vorteile:

- Keine Getriebe-Verluste
- Keine Getriebe-Geräusche
- Platz-, Gewicht- und Materialreduktion
- Erhöhte Zuverlässigkeit, da keine Getriebeausfälle
- Geringerer Wartungsaufwand

Einsatzgebiete dieses Antriebssystems

Getriebelose Antriebs- bzw. Generatorsysteme sind insbesondere für folgende Anwendungen geeignet:

- Förderanlagen
- Mühlen (Zement, Zucker, ...)
- Walzwerke
- Schiffsantriebe
- Evtl. Traktion
- Windgeneratoren
- Evtl. Wassergeneratoren

Energiesparpotential dieses Antriebssystems

Heutige drehzahlvariable Antriebs- oder Generatorsysteme für niedrige Drehzahlen weisen üblicherweise folgende Anlagenteile auf:

- Getriebe (ca. 3% Verluste)
- Asynchronmaschine (ca. 5% Verluste)
- Frequenzumrichter (ca. 3% Verluste)

Das getriebelose System besteht aus folgenden Anlageteilen:

- Permanenterregte Synchronmaschine (ca. 5% Verluste)
- Frequenzumrichter (ca. 3% Verluste)

Das Einsparpotential im Nennbetrieb beträgt somit ca. 3% (Einsparung der Getriebeverluste), bei Teillast ist das Potential sogar noch grösser, da die permanenterregte Synchronmaschine einen besseren Teillastwirkungsgrad aufweist als alle anderen Maschinentypen.

Aufgrund dieser Daten kann folgendes Energiesparpotential für die verschiedenen Einsatzgebiete berechnet werden:

Industrieantriebe in der Schweiz > 100 kW:	total 400 GWh/a
Davon drehzahlvariabel mit tiefer Drehzahl (geschätzt)	20%
Einsparpotential	3% entspricht 2.4 GWh/a
Industrieantriebe in der Schweiz < 100 kW:	total 1920 GWh/a
Davon drehzahlvariabel mit tiefer Drehzahl (geschätzt)	20%
Einsparpotential	3% entspricht 57.6 GWh/a
Seilbahnen in der Schweiz:	total 100 GWh/a
Einsparpotential	3% entspricht 3 GWh/a
Traktion in der Schweiz (technische Machbarkeit muss allerdings noch geklärt werden!)	Total 2400 GWh/a
Einsparpotential	3% entspricht 72 GWh/a
Windkraftanlagen in Europa (Stand Ende 2001)	total 40'000 GWh/a
Einsparpotential	3% entspricht 1'200 GWh/a

Zielsetzungen

Die Zielsetzungen dieses Projektes sind:

- Verbesserung des Wirkungsgrads des gesamten Antriebssystems
- Reduktion der Baugrösse
- Verkleinerung des Gewichts

Ziele für 2002

Für den 1.2 MW Prototyp wurden folgende Ziele für 2002 gesetzt:

Konzept, Berechnung, Konstruktion und Produktion des Prototyps.

Für den 3kW Prototyp wurden folgende Ziele für 2002 gesetzt:
Konzept, Berechnung und Konstruktion des Prototyps.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1.2 MW Gesamtsystem

Die Auslegungsdaten von Umrichter und Maschine wurden in vielen Iterationsschritten auf einander abgestimmt und optimiert.

Der Gesamtwirkungsgrad konnte optimiert werden und die notwendigen Schutzeinrichtungen zur Beherrschung aller möglicher Störfälle wurden auf einander abgestimmt.

Gleichzeitig mit den verschiedenen Maschinenberechnungen wurde auch die Abstimmung der Daten mit dem Umrichter durchgeführt. Massgebend sind dabei insbesondere die Leerlaufspannung innerhalb des im Einsatz auftretenden Drehzahlbereichs sowie die Streuinduktivität. Für beide Parameter konnten Werte gefunden werden, welche sowohl für Maschine wie auch Umrichter gut passen.

1.2 MW Umrichter

Der vorhandene Umrichter kleinerer Bauleistung (750 kW) verfügt bereits über die kleinsten Abmessungen für einen Umrichter dieser Leistungsklasse. Er wurde so weiter entwickelt, dass die doppelte Leistung (d.h. mindestens 1500 kVA) in den fast unveränderten Abmessungen installiert werden kann. Damit wird eine sehr gute Ausnutzung des eingesetzten Materials erreicht.

Der Materialeinsatz konnte minimiert werden dank

- Hohe Leistungsdichte, dadurch kleiner Schrank, d.h. wenig Montagematerial
- Möglichst geringe Anzahl Bauteile
- Möglichst wenige Messwandler
- Intelligentes konstruktives Konzept: z.B. kurze Kabel, wenig zusätzliches Montagematerial

Die Konstruktion wurde komplett mittels eines 3D-CAD-Programmes durchgeführt (siehe Fig. 1). Damit hatte man die Möglichkeit, bereits in der Konstruktionsphase Abmessungen und Montagefreundlichkeit zu optimieren.

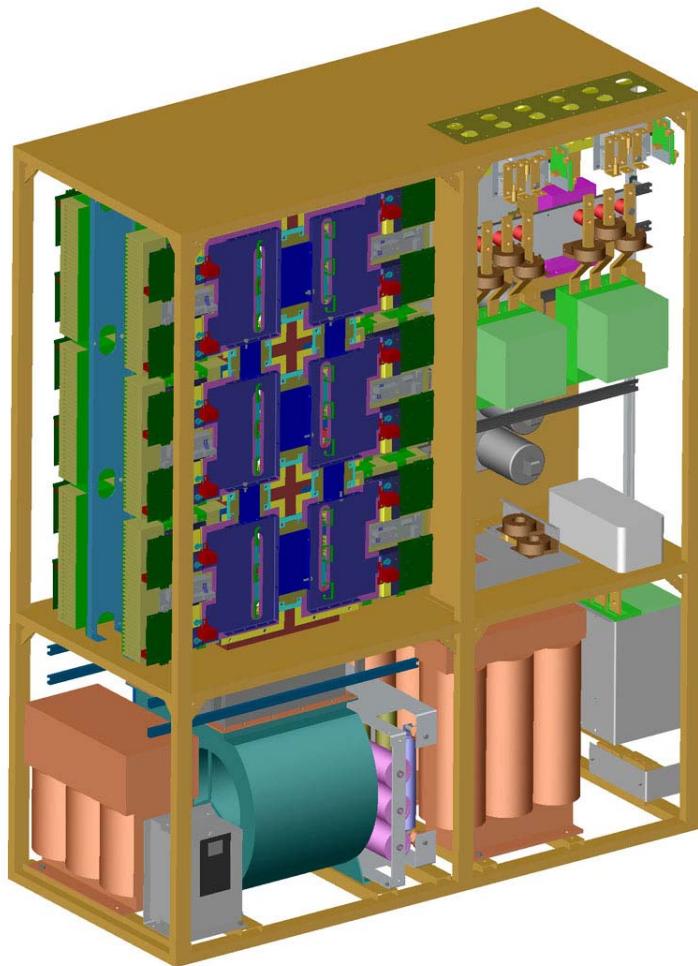


Fig. 1: Konstruktionszeichnung in 3D-CAD des 1.2 MW Umrichters (Quelle: *Rauscher & Stoecklin AG*)

Mithilfe eines Computer-Simulationsprogramms (Simplorer) wurde der Wirkungsgrad für alle Arbeitspunkte berechnet und optimiert. In dieser Simulation werden die Regelung und der Leistungsteil komplett abgebildet und direkt die Verluste anhand der vorliegenden Datenblattwerte der massgebenden Komponenten berechnet.

Ein hoher Wirkungsgrad wurde erreicht durch:

- Intelligente Steuerung des Kühl-Ventilators
- Optimierte Auslegung des Netzfilters
- Moderate Schaltfrequenz der IGBTs

Um eine möglichst hohe Verfügbarkeit des Umrichters zu erreichen, wurde eine Auslegung mit einer möglichst geringen Anzahl Bauteilen gewählt und ein konsequentes, auf die Daten der Maschine abgestimmtes Schutzkonzept erarbeitet.

Der Prototyp-Umrichter wurde gemäss Terminplan fertiggestellt (siehe Fig. 2), so dass ab Januar die Testläufe mit einem Generator beginnen können.

Die Luftführung im Umrichter wurde bereits überprüft. Die für eine zuverlässige Kühlung in jedem Kühlkörper erforderliche Luftmenge wird erreicht.

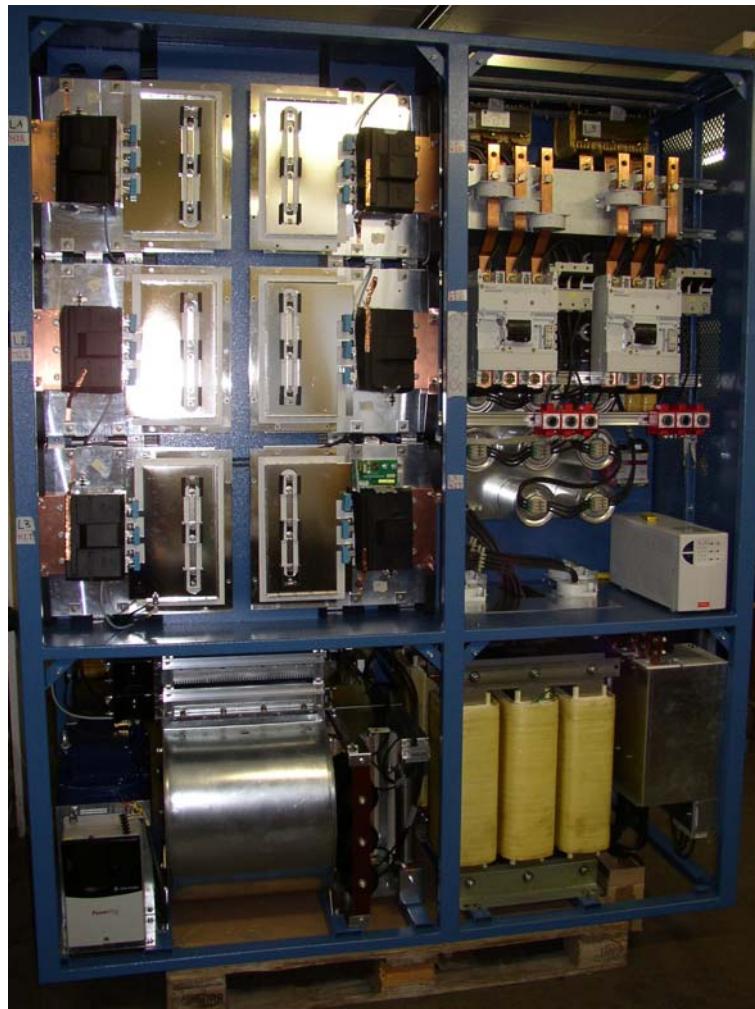


Fig. 2: Prototyp des 1200 kW Umrichters kurz vor der Fertigstellung (Quelle: Technocon AG)

1.2 MW Maschine

Bei der Entwicklung der Maschine wurden 3 Konstruktionskonzepte verfolgt und mit einander verglichen.

Dabei wurden insbesondere folgende Verbesserungen vorgenommen:

- Verbesserter Magnetkreis
- Vereinfachter Wicklungsaufbau
- Erhöhung der Kraftdichte im Luftspalt (ca. 60 kN/m² statt wie bisher 30 – 40 kN/m²)

- Verbesserung des Wirkungsgrads auf ca. 96% (statt 83 .. 91% beim konventionellen Synchronmotor)
- Reduktion des Gewichtes (um ca. 30% gegenüber dem konventionellen Synchronmotor)

Da im weiteren auch fertigungstechnische Optimierungen vorgenommen werden mussten um die Kostenziele zu erreichen, hat sich die Produktion der Prototyp-Maschine verzögert.

3 kW Gesamtsystem

Analyse bestehender Lösungen:

Die Daten von Antriebssystemen mit Getrieben für tiefe Drehzahlen bis in den Bereich von 100kW wurden zusammengetragen und analysiert, insbesondere hinsichtlich Wirkungsgrad und Preise.

Dimensionierung:

Auf Grund der Topologie der 1.2MW Lösung wurde eine erste Dimensionierung der Komponenten im Leistungsbereich von 1kW bis 100kW durchgeführt und simuliert. Die Dimensionierung wurde für eine Drehzahl von einer Umdrehung pro Sekunde durchgeführt. Insbesondere wurde auch untersucht, welche minimalen Drehzahlen realisierbar sind.

Es wurden Feldberechnungen für die 1.2 MW Maschine und die 3 kW Maschine durchgeführt und optimiert. Um diese Feldberechnungen effizient vornehmen zu können, wurde eine Bedienoberfläche in *Visual Basic* programmiert. Für die eigentlichen Feldberechnungen wurde das Programm *flux2d* verwendet.

3 kW Prototyp:

Auf Grund der Abklärungen und der ersten Dimensionierung wird in Zusammenarbeit mit der Firma *Bartholdi* ein Laborprototyp mit circa 3 kW Leistung und 1 Umdrehung pro Sekunde aufgebaut werden, um die gewählte Lösung zu überprüfen. Als Umrichter werden die an der Hochschule Wallis optimierten kostengünstigen Leistungsmodule und Regler verwendet.

Die Leistung des Prototyps wurde so gewählt, dass die Tests mit den bestehenden Möglichkeiten an der *Hochschule Wallis* durchgeführt werden können.

Der Umrichter für 3 kW wurde bereits realisiert und geprüft (siehe Fig. 3). Zur Zeit werden die z.T. noch analog ausgeführten Regelkreise auf ein komplett digitales und sehr leistungsfähiges Reglersystem, basierend auf einem DSP, übergeführt.

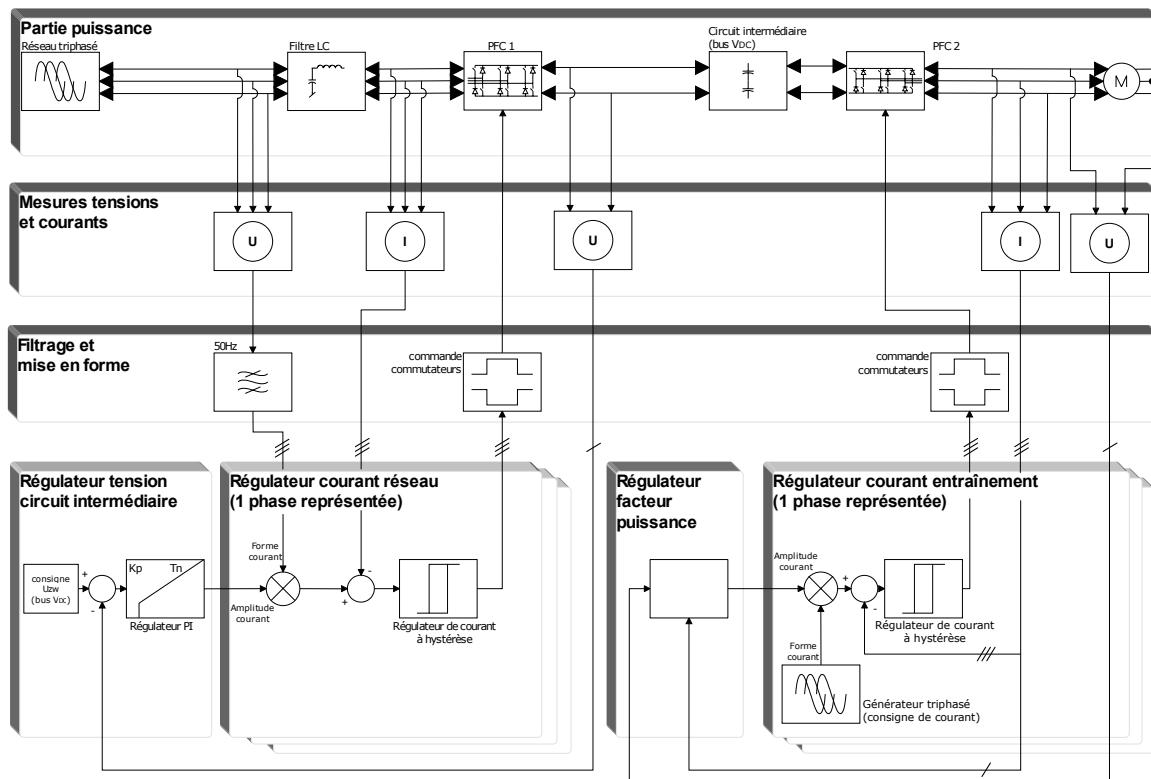


Fig. 3: Übersichtsdiagramm des 3 kW Umrichters inklusive Regelung (Quelle: Hochschule Wallis)

Nationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt wird in Zusammenarbeit mit der *Hochschule Wallis* durchgeführt. Das Konsortium *Technocon / Bartholdi* entwickelt dabei den Prototyp grosser Bauleistung (1.2 MW), die *Hochschule Wallis* den Prototyp kleiner Bauleistung (3 kW). Das hat den Vorteil, dass sich die Firmen auf den hohen Leistungsbereich konzentrieren können, in welchem sie sehr viel Erfahrung haben, ohne den kleinen Leistungsbereich, welcher über ein bedeutendes Energiesparpotential verfügt, vernachlässigen zu müssen.

Die *Hochschule Wallis* verfügt aufgrund früherer Projekte über ein hohes Knowhow, so dass sie ihre Arbeiten mit hoher Kompetenz durchführen kann. Alle Beteiligten erwarten deshalb aus dieser Zusammenarbeit verschiedene Synergie-Effekte.

Es ist zu erwarten, dass diese Zusammenarbeit auch nach Abschluss dieses Projektes in irgend einer Form weiter geführt wird.

Internationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt wird ohne internationale Zusammenarbeit durchgeführt, obwohl ein bedeutender Markt für dieses Antriebssystem ausserhalb der Schweiz liegt.

Dies wird jedoch nicht als Nachteil empfunden, da die beteiligten Projektpartner in der Schweiz über ausreichend Knowhow verfügen. Die geographische Nähe der Projektpartner hat sich als Vorteil erwiesen bei den gemeinsamen Optimierungsarbeiten.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Verbesserung des Wirkungsgrads

Die Maschine wurde in mehreren Schritten optimiert. Es konnte ein sehr guter Kompromiss zwischen Wirkungsgrad, Materialaufwand und Fertigungskosten gefunden werden. Der erreichte Wirkungsgrad liegt mit 95.8% über den Erwartungen. Das war insbesondere dank zusätzlichen Verbesserungen im Magnetkreis möglich.

Die Optimierung des Wirkungsgrads am Umrichter ist noch nicht komplett abgeschlossen, da dieser auch mit der Software noch beeinflusst werden kann. Die endgültigen Ergebnisse werden deshalb erst nach Abschluss der Messungen vorliegen.

Die bis jetzt vorliegenden Berechnungen lassen allerdings auf einen Wirkungsgrad des Umrichters von gegen 98% schliessen, was deutlich über den erwarteten 97% liegt.

Somit werden die Verluste des Gesamtsystems total bei nur ca. 6.2% liegen. Im Vergleich zu den angestrebten 8% ist das eine Reduktion um ca. 22%, im Vergleich zum konventionellen System sogar um ca. 44%.

Reduktion der Baugrösse

Der Umrichter konnte sehr kompakt konstruiert werden bei zusätzlich verbesserter Zugänglichkeit und reduziertem Montageaufwand. Dies wurde insbesondere erreicht durch eine verbesserte Anordnung der Hauptstromschienen und -kabel sowie einer Aufteilung in modulare Baugruppen.

Die Abmessungen des 1.5 MW Umrichters betragen $B \times T \times H = 1800 \times 800 \times 2250 \text{ mm}^3$.

Damit konnte gegenüber dem Vorläufer-Modell bei bloss 3% grösserem Volumen die doppelte Leistung erreicht werden.

Nach neusten Berechnungen ist zu erwarten, dass bei unveränderten Schrankabmessungen bis zu 2 MW Bauleistung erreicht werden könnten.

Reduktion des Gewichts

Das Gewicht der Maschine konnte gegenüber dem konventionellen Synchronmotor um ca. 30% reduziert werden.

Antriebssystem mit 3 kW

Die bisherigen Arbeiten der *Hochschule Wallis* haben gezeigt, dass sich das gewählte Konzept auch auf kleinere Bauleistungen anwenden lässt.

Terminplan

Der Terminplan des Projektes konnte bisher eingehalten werden. Eine Ausnahme bildet die Produktion des 1.2 MW Prototyp-Motors, die aufgrund der notwendigen fertigungstechnischen Optimierungen erst verspätet gestartet werden konnte.

Es liegen zur Zeit noch keine verbindlichen Angaben über die aufgetretene Verzögerung vor.

Viele am Umrichter geplanten Funktionsprüfungen können jedoch vorher an einem anderen Motor mit reduzierten Leistung vorgenommen werden. Dadurch kann der Zeitbedarf für die Prüfungen mit dem Prototyp-Motor zusammen reduziert werden, so dass der Abschluss des Gesamtprojektes nicht oder nur leicht verzögert sein wird.

Ausblick 2003

In diesem Jahr konnten alle Auslegungsarbeiten (Berechnung, Konstruktion usw.) abgeschlossen werden.

Ab Anfang 2003 werden die Tests beginnen können, mit denen einerseits die Funktionsfähigkeit der Anlagenteile geprüft werden kann und andererseits die sehr positiven Ergebnisse der Berechnungen und Simulationen verifiziert werden sollen.