



**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**

**[www.modan.org](http://www.modan.org)**

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Entwicklung netzwerkfähiger Entwurfsmodule für  
Mini- und Mikroaktoren“  
der Technischen Universität Ilmenau**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projektträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

## Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellungen .....	3
1.1 Aufgabenstellung .....	3
1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	6
1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte .....	7
1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
2 Eingehende Darstellungen.....	9
2.1 Projektziel .....	9
2.2 Projektdurchführung.....	10
2.3 Erzielte Ergebnisse .....	12
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen .....	15
2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen .....	16
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	16
2.7 Literaturangaben .....	17

Anlagen: CD mit ...

  Installationsdateien Programmsystem SESAM

  Veröffentlichungen als PDF-Datei

  Poster als PDF-Datei

  Handbücher als PDF-Datei

  Abschlussbericht als PDF-Datei

  Erfolgskontrollbericht als PDF-Datei

  Berichtsblatt als PDF-Datei

  Document Control Sheet als PDF-Datei

## 1. Kurzdarstellungen

### 1.1 Aufgabenstellung

Der zunehmende Einsatz von Rechentechnik bei der Entwicklung und Optimierung magnetischer Antriebssysteme hat dazu geführt, dass die Möglichkeiten virtueller Untersuchungsmethoden stark erweitert werden konnten. Gleichzeitig ist der weitgehend analyseorientierte Entwurf antriebstechnischer Komponenten trotz Einsatz moderner CAD- und Feldberechnungssysteme durch lange Entwicklungszeiten und hohe Kosten gekennzeichnet. Obwohl in den letzten Jahren eine große Anzahl von CAD- und Feldberechnungsprogrammen mit wesentlich verbesserten Leistungsmerkmalen verfügbar sind und der Entwurf in einigen Punkten effektiviert werden konnte, fehlt es an Programmen, die einen weitgehend syntheseorientierten Entwurf von Antriebssystemen gestatten. Der Trend, moderne Produkte in immer kürzeren Zeiträumen auf den Markt zu bringen, erfordert auch von KMU den Einsatz moderner Entwurfsmethoden und –werkzeuge. Das hat auch eine Studie im Rahmen des Projektes „Vorbereitung eines Verbundprojektes zur Entwicklung offener Systeme für heterogene Antriebskomponenten und –systeme“ (OFFSYS) gezeigt.

Das Fachgebiet Mechatronik der Technischen Universität Ilmenau arbeitet seit vielen Jahren mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik in Ilmenau auf dem Gebiet der Entwicklung magnetischer Antriebssysteme zusammen. Die Erfahrungen aus dieser Zusammenarbeit sind in die Entwicklung einer Software zum Entwurf magnetischer Antriebssysteme eingeflossen. Dabei sollten speziell die Anforderungen von KMU berücksichtigt werden (Hard- und Softwareausstattung). Dabei standen alle Arbeiten unter dem Thema „Konzeption netzwerkfähiger Entwurfsmodule für Mini- und Mikroaktuatoren“. Die Technische Universität Ilmenau hat sich auf Grund dieser Erkenntnisse und in Absprache mit Projektpartnern innerhalb des Projektes mit folgenden Aufgabenschwerpunkten befasst:

- **Konzeption von Entwurfsmodulen und Erarbeitung der Programmstruktur**
  - Erarbeitung einer einheitlichen Vorgehensweise zum Entwurf
  - Aufgabenstellung für Programmmodule ausgewählter Aktoren
  - Erarbeitung eines Kataloges verschiedener Systemkomponenten
  - Aufnahme und Anpassung von Baukastenmodulen in den Katalog
  
- **Entwicklung des Programmmoduls Resonanzaktor für das STZ Mechatronik**
  - Erarbeitung der Auswahlkriterien für geeignete Komponenten
  - Entwicklung des ersten Moduls „Magnetischer Resonanzaktor“
  
- **Validierung des Programmmoduls Resonanzaktor und der Programmstruktur**
  - Versuchsphase Modul Resonanzaktor (von Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik)
  - Entwicklungsarbeiten zur Modellierung
  - Umsetzung von weiteren Problemstellungen der Projektpartner

- **Dokumentation der Ergebnisse**

Erprobung und Demonstration des Entwurfssystems

Dokumentation der Ergebnisse

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Software zum Entwurf magnetischer Antriebssysteme. Das Innovative an diesem Produkt ist der Einsatz der Netzwerkmethodene als „Rechenkern“. Im Vergleich zu etablierten FEM-Systemen ergeben sich daraus einige entscheidende Vorteile:

- Sehr kurze Rechenzeiten (speziell bei Dynamik- und Optimierungsrechnungen)
- Durchführung effizienter Energie- und Kraftberechnungen
- Vergleichbarer Rechenaufwand bei 2D- und 3D-Modellen
- Einfach anpassbar an unterschiedliche Aufgaben durch parametrische Modelle
- Anwendung auf andere physikalische Gebiete (Fluidtechnik, Thermik, Akustik u.a.)
- Ausreichende Genauigkeiten in der Phase der Grobdimensionierung

Die zu entwickelnde Software (Projektname SESAM) erhebt auf keinem Fall den Anspruch leistungsfähige FEM-Systeme zu ersetzen. Es gibt aber für diese Software eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten, bei der die implementierten Gleichungslöser (Netzwerkmethodene) die Vorteile der Methodik nutzen können. Das sind die Berechnung dynamischer Vorgänge, Optimierungsrechnungen und Untersuchungen zur Hysterese magnetischer Materialien und deren Einfluss auf Ergebnisparameter. Toleranzanalysen und Empfindlichkeitsuntersuchungen sind ebenfalls durchführbar.

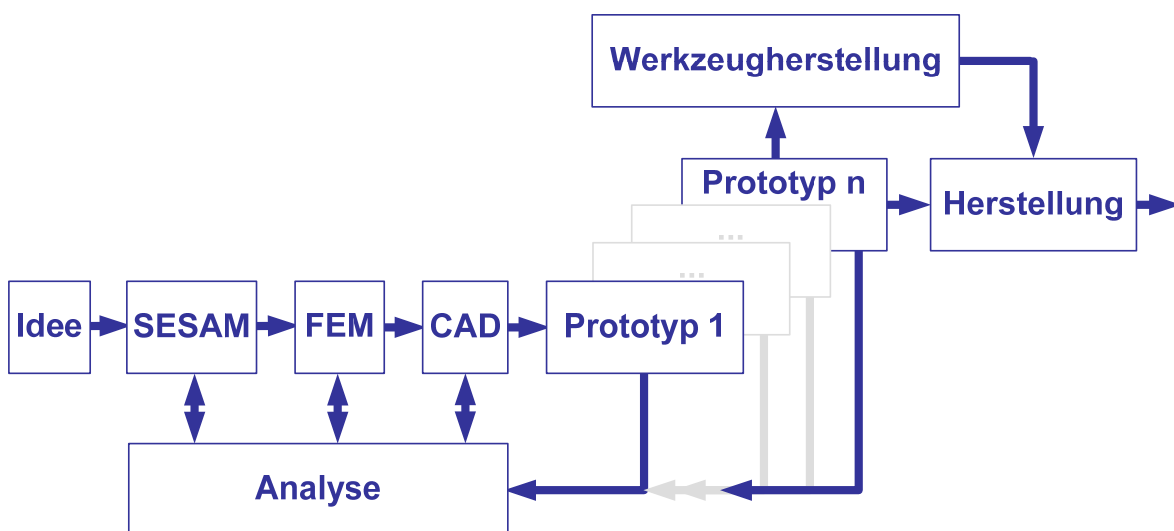


Abbildung 1: Einordnung von SESAM in den konstruktiven Entwicklungsprozess

Wie in oben gezeigter Abbildung war die zu entwickelnde Software gleichberechtigter Bestandteil im Prozess der Grobdimensionierung (siehe auch VDI 2221). Das Programm SESAM ist in der Lage, eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten (Grundprinzipien, Materialien,

Bauformen) in sehr kurzer Zeit zu untersuchen, um mit einer quasi-optimalen Lösung genauere Untersuchungen (zum Beispiel mit FEM) durchführen zu können. Hauptziel war eine Minimierung von Prototypen und damit die Einsparung von Entwicklungskosten sowie eine Verringerung von Entwicklungszeiten. Weiterhin standen eine einfache Handhabung (grafische Nutzeroberfläche) des Programms und eine Verbesserung der Akzeptanz virtueller Untersuchungsmethoden im Focus der Arbeiten der Technischen Universität Ilmenau.

## 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Das Fachgebiet Mechatronik beschäftigte sich seit vielen Jahren mit der Entwicklung magnetischer Antriebssysteme. Der Grundstein wurde durch Prof. Kallenbach und sein Buch „Der Gleichstrommagnet“ gelegt. In den 70-er und 80-er Jahren wurden durch die Mitarbeiter kleine Fortran- und Basic-Programme geschrieben, um sich die Arbeit bei der Entwicklung von Antriebskomponenten im eigenen Hause zu erleichtern. In großem Rahmen wurden wir 1991 mit der Erstellung domänenspezifischer Software (magnetische Antriebe) konfrontiert, als die Firma Robert Bosch GmbH die Entwicklung einer umfangreichen Software für Gleichstromtopfmagnete (Projekt Sturgeon) in Auftrag gab. Bereits zu diesem Zeitpunkt sollte für die frühen Phasen der Entwicklung die Netzwerkmethod eingesetzt werden. Die Netzwerke wurden fest im Quellcode hinterlegt, die Software konnte nur die 13 implementierten Grundbauformen untersuchen. Das gesamte Programmsystem beinhaltete eine umfangreiche Projektverwaltung und Projektsteuerung. AutoCAD, eine Oracle Datenbank und das FDM-Werkzeug Profi wurden als Bestandteile in das Programmsystem implementiert. Als 1997 auch die ersten KMU Interesse an der Software zeigten, war keine Windows Version verfügbar, da die Entwicklung für die Robert Bosch GmbH unter UNIX auf DEC-Workstations gefordert war. Ab Mitte 1998, nach Ende der Entwicklungsarbeiten für die Robert Bosch GmbH, starteten wir mit der Entwicklung eines Windows-Programms zur Untersuchung magnetischer Antriebssysteme. Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten und der danach verfügbaren ersten Version konnten wir Erfahrungen beim Einsatz des Programms in KMU und Universitäten sammeln. Es hat sich gezeigt, dass die prinzipielle Vorgehensweise richtig, aber der Umgang mit der Software zu schwierig war und die geforderte Flexibilität bei der Erzeugung der Netzwerke nicht in vollem Umfang realisiert werden konnte. Im Umfeld der Arbeiten an diesen zwei großen Softwareprojekten entstand eine Vielzahl kleiner Anwendungen, die vorwiegend im Auftrag von KMU entwickelt wurden. Eine vollständige Liste mit Informationen zu Projekten finden Sie im Internet unter folgender Adresse:

<http://mechatronik.tu-ilmenau.de/MTRWeb/ForschungUebersicht.asp?s=ger&a=2003>

Im folgenden eine Auswahl an Projekten mit direkten Bezug zum Forschungsvorhaben:

- Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen - Mikroaktuatoren (1992-1994)
- Optimierter Außenläufermotor (1994-1996)
- STURGEON - Entwurfssystem für Gleichstromtopfmagnete (1991-1998)
- Verbesserung der dynamischen Eigenschaften von piezoelektrischen Aktoren (1996)
- Verhaltensoptimierte magnetische Antriebe (1996-1998)
- Piezokeramische Ultraschall-Motoren (1997-1999)
- SESAM - Werkzeuge für magnetische Sensor- und Aktorelemente (1997-2001)
- Miniaturisierte Wegsensoren für Proportionalmagnete (1998-2002)

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Technische Universität Ilmenau plante im Vorhaben die Entwicklung spezifischer netzwerkfähiger Entwurfsmodule für Mini- und Mikroaktoren als Bestandteile von komplexen Simulationssystemen für den durchgängig rechnergestützten Entwurf. Die Arbeiten standen in engem Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Mikroantriebslösungen des Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik. Die Berücksichtigung der Anforderungen zur Modularisierung der Antriebssysteme stellte eine Anpassung an die vom VDMA geplante Umsetzung des Baukastens für Mikrosysteme dar. Das Programmsystem SESAM sollte die Entwicklung des magnetischen Resonanzaktors unterstützen. Eine Evaluierung der Software durch das Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik wurde angestrebt. Das Entwicklungsvorhaben wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- **Erarbeitung einer Konzeption für die neu zu entwickelnde Software**
- Definition der Aufgabenspezifikation (für Entwurf magnetischer Antriebssysteme)
- Erarbeitung der Aufgabenstellung für die notwendigen Programmmodule
- Festlegung des Programmablaufs und Definition der Programmsteuerung
- Erarbeitung des Katalogs mit Komponenten und Integration in den Modulbaukasten
  
- **Exemplarische Realisierung des Moduls für magnetische Resonanzaktoren**
- Ermittlung der Anforderungen des magnetischen Resonanzaktors an die Module
- Umsetzung der Berechnungsalgorithmen in C++ Programme
- Realisierung der grafischen Nutzeroberfläche zur Eingabe der Netzwerke
- Aufbereitung der Rechenergebnisse und Realisierung der Ergebnisausgaben
- Realisierung der Projektsteuerung, Materialdatenbank und Verknüpfung aller Module
  
- **Validierung des Moduls für magnetische Resonanzaktoren**
- Spezifikation der Schnittstellen zur Parameterübergabe an externe Programme
- Realisierung notwendiger Schnittstellen zu andere Programmen (FEM, Simplorer)
- Programmtest, Fehlerbeseitigung und Einarbeitung von Wünschen der Anwender
  
- **Dokumentation der Ergebnisse**
- Erprobung und Demonstration des Entwurfssystems (Veröffentlichungen usw.)
- Dokumentation der Ergebnisse (u.a. im Handbuch zum Programmsystem)

### 1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Mit Beginn des Projektes war eine Vielzahl von Softwaresystemen verfügbar, die den Entwurf magnetischer Antriebssysteme unterstützen konnten. Fast alle Systeme hatten ihren Ursprung in der Untersuchung mechanischer Objekte. Im Laufe der Zeit wurden aber zusätzliche Programmmodule veröffentlicht, die auch die Berechnung magnetischer Eigenschaften erlaubten. Oftmals sind derartige Module aber nur für einfache Arten magnetischer Grund-

baufORMen anwendbar und wurden vorwiegend für statische AnalyseZwecke eingesetzt. Zur Untersuchung dynamischer Vorgänge und bei der Optimierung kam es zu extrem hohen Rechenzeiten (bedingt durch die Verfahren der FEM). Programme, die zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften die NetzwerkmethodE anwenden, gab es zum damaligen Zeitpunkt nur im universitären Bereich. Kommerzielle Anbieter waren nicht verfügbar. Diese Situation war für das Fachgebiet Mechatronik die Möglichkeit, die aus früheren Arbeiten gewonnen Erfahrungen auf dem Gebiet der Magnetkreisentwicklung und Programmierung domänenspezifischer Software zu verbinden und eine Software zu entwickeln, die auch dynamische Untersuchungen und Optimierungsrechnungen auf Basis der schnell rechnenden NetzwerkmethodE ermöglicht. Dabei sollte die auf Formeln beruhende Beschreibung der „Netzwerke“ weitestgehend durch interaktive, grafische Oberflächen vereinfacht werden.

#### **1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Aus der Literatur sind zu Projektbeginn keine Ergebnisse Dritter mit Relevanz für das Vorhaben bekannt. In dieser Art und Weise (NetzwerkmethodE) gibt es nach unseren Recherchen keine Software, die statische, dynamische und Optimierungsrechnungen magnetischer Antriebssysteme erlaubt. Die ebenfalls implementierten Module zur Toleranz- und Empfindlichkeitsuntersuchung waren in dieser Art und Weise kommerziell noch nicht verfügbar.

Innerhalb der Projektlaufzeit ist aber aufgefallen, dass auch andere Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen immer mehr die NetzwerkmethodE bei der Untersuchung technischer Sachverhalte einsetzen. Dabei beschränkt sich das nicht nur auf die Magnetik, auch andere physikalische Effekte werden mit Programmen, die die NetzwerkmethodE als Basis haben, untersucht. Das hängt sicherlich mit den kurzen Rechenzeiten zusammen und erlaubt damit die Untersuchung einer Vielzahl von Lösungsvarianten. Weitere Informationen finden Sie im Abschnitt 2.5 dieser Zusammenfassung.

#### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

Das innerhalb dieses Projektes geplante Vorhaben ist weitestgehend ein Softwareprojekt. Entsprechend der Schnelllebigkeit auf diesem Gebiet diente an vielen Stellen das Internet als Informationsquelle. Bei Fragen oder Problemem der Programmierung wurden diverse Internetforen kontaktiert. Als gute Quellen für die C++ Programmierung (einschl. ActiveX-Controls) dienten die Entwicklerwebsites und Foren der Hersteller von ActiveX-Controls:

- The Code Project (<http://www.codeproject.com>)
- CodeGuru (<http://www.codeguru.com>)
- BCGSoft Co Ltd. (<http://www.bcgsoft.com>)
- Lassalle Technologies (<http://www.lassalle.com>)
- Microsoft Developer Network (<http://msdn.microsoft.com>)

Auf dem Gebiet der magnetischen Antriebe und deren Entwicklung bzw. der Entwurfmethodik wurde unter anderem auf folgende Literatur und Informationsquellen zugegriffen:

- VDI Richtlinie VDI 2221
- Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (V-Modell)
- GMM Workshops "Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen"
- Fachtagung „Mechatronik“
- Actuator

Eine vollständige Liste mit Veröffentlichungen bei Konferenzen, in Zeitschriften und Büchern finden Sie unter <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/MTRWeb/PublikationenHome.asp>.

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb dieses Projektes gab und gibt es eine enge Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik Ilmenau. Zur Evaluierung der zu erstellenden Software sollte der vom Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik zu entwickelnde Resonanzaktor dienen. Dieses hochdynamische Antriebssystem wird in Zusammenarbeit mit der MAHLE Filtersysteme GmbH Stuttgart innerhalb des Projektes entwickelt und stellt auf Grund der Antriebspezifikation hohe Anforderungen an die Entwurfsoftware. Durch die Kooperation mit zwei Industriepartnern erhofften wir uns den notwendigen Input zu erhalten, um eine flexible, industriennahe und nutzerfreundliche Anwendung entwickeln zu können.



## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Der Trend zu kleineren, verteilten und schnell wirkenden Antrieben mit kleiner Leistungsaufnahme in der Automobilindustrie, der Automatisierung technischer Prozesse und der Haustechnik nimmt ständig zu. Dazu müssen gerade in der Massenproduktion die Antriebe einfach und preiswert herzustellen sein. Auf der anderen Seite kann man die Grenzen magnetischer Antriebsprinzipien auf Grund neuer Materialien (z.B. Piezokeramiken, Selten-Erd-Dauermagnete) und von neuen Technologien (Kaltumformprozesse, Glasspulen ...) immer besser ausreizen. Um bei der Entwicklung neuer Antriebssysteme diese Vielzahl von Einflussgrößen berücksichtigen zu können, sind leistungsfähige Werkzeuge notwendig. Gerade in den Phasen der Grobdimensionierung, wo eine große Anzahl von Lösungsvarianten gegeneinander abgewogen werden müssen, sind schnell rechnende und flexible Programme notwendig.

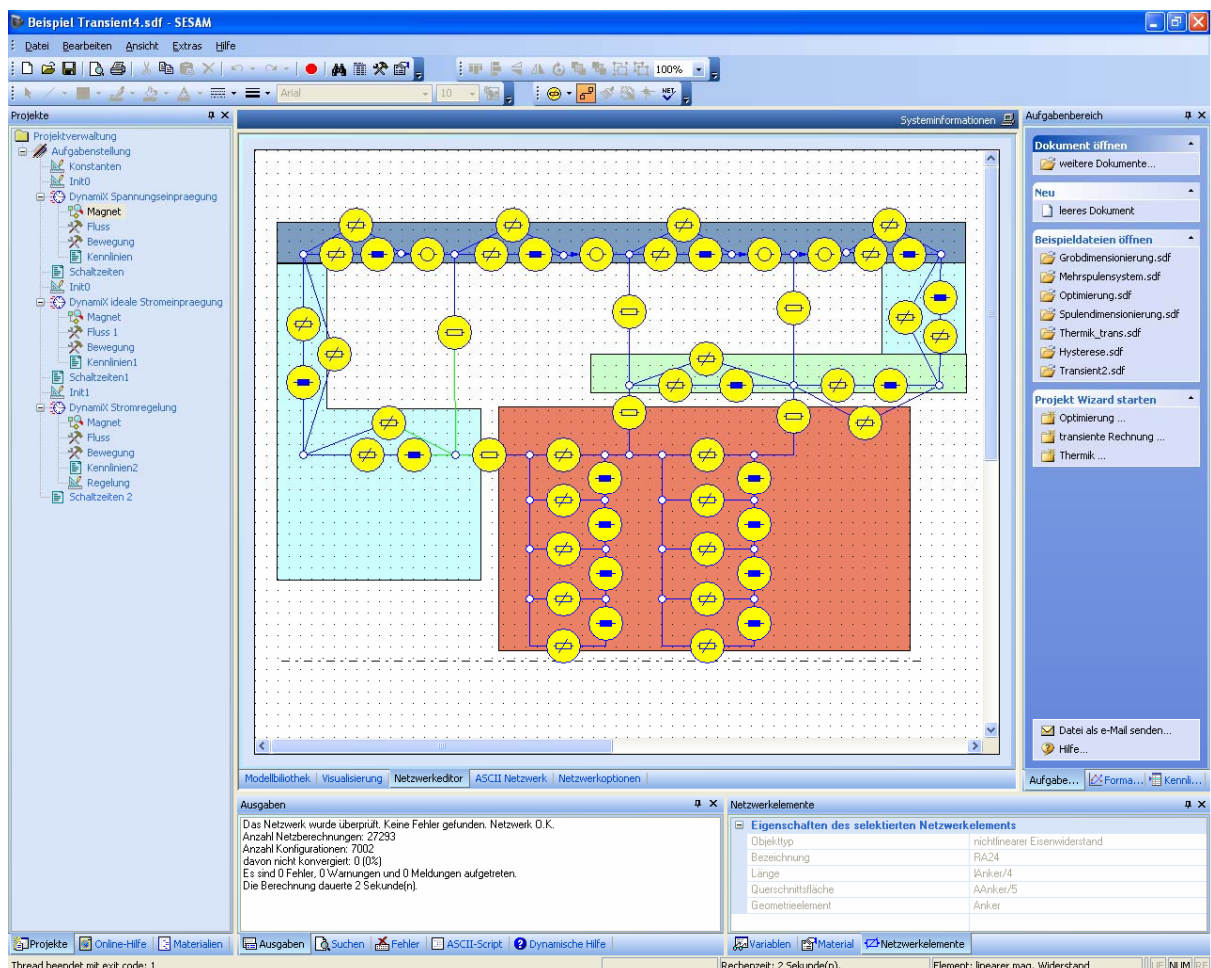


Abbildung 2: Grafische Benutzeroberfläche am Beispiel des Netzwerkeditors

Innerhalb des Projektes soll für die Domäne der magnetischen Antriebe ein Werkzeug entwickelt werden, was genau diese Aufgaben erfüllen soll. Mit der Netzwerkmethod sollen die technischen Sachverhalte abgebildet und berechnet werden. Das relativ komplizierte Formelwerk soll weitestgehend über eine grafische Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 2) ge-

handhabt werden. Die Ergebnisse werden in Form von Diagrammen zur Anzeige gebracht. Module für Dynamikberechnungen, Optimierungen, Toleranzanalysen, Empfindlichkeitsanalysen, Parameterstudien und Thermikberechnungen sind im Programmsystem SESAM integriert. Alle Module können flexible innerhalb der zu implementierenden Projektverwaltung angeordnet werden. Eine integrierte Materialdatenbank, Werkzeuge zur Fehlersuche (bei Modellierungsfehlern) und ein umfangreiches Hilfesystem sind ebenfalls Bestandteil des Programmsystems.

## 2.2 Projektdurchführung

Aus den Erfahrungen der Softwareentwicklung in den Projekten STURGEON und SESAM wurden die notwendigen Arbeiten innerhalb dieses Projektes in vier Blöcke untergliedert. Zum ersten Mal bestand die Möglichkeit, eine umfangreiche Software innerhalb eines Projektes zu entwickeln. Die anderen Werkzeuge aus früheren Projekten waren nur eine „Sammlung“ eigenständiger Tools (die im Rahmen unterschiedlicher Projekte entstanden) unter einer einheitlichen Oberfläche. Gleichzeitig sollten die in STURGEON vergebenen Restriktionen, der Einsatz kommerzieller Software zur Realisation von Hauptfunktionen, durch eigene Module realisiert werden.

Das Projekt wurde von einem Mitarbeiter bearbeitet. Unterstützung erhielt dieser durch die parallel laufende Promotion von Jun.-Prof. Dr.-Ing. Tom Ströhla zum Thema „Ein Beitrag zur Simulation und zum Entwurf von elektromagnetischen Systemen mit Hilfe der Netzwerkmethode“. Als Ergebnis dieser Promotion konnten alle theoretischen Erkenntnisse zur Berechnung magnetischer Antriebssysteme in Form eines ANSI C Programms (Gleichungslöser) innerhalb des zu entwickelnden Softwaresystems eingesetzt werden. Lediglich eine Schnittstelle zur Kopplung von Gleichungslöser und grafischer Nutzeroberfläche sowie ein Formelinterpreter mussten realisiert werden. Diese Schnittstelle, in Form eines ASCII-Scripts, wurde auch als Script-Sprache in den Pre- und Postprozessoren zur Eingabe verwendet.

Die Projektdurchführung entsprach weitestgehend der im Antrag dargestellten Vorgehensweise. Die Arbeiten begannen mit der Konzeption der Entwurfsmodule. Es sollte eine Vielzahl unterschiedlicher Antriebssysteme mit dem Programmsystem berechenbar sein. In Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik und Herrn Ströhla wurde eine einheitliche Vorgehensweise zum Entwurf elektromagnetischer Antriebe erarbeitet. Daraus wurden die dann notwendigen Programmmodule extrahiert, die man für eine Berechnung statischer, dynamischer und thermischer Eigenschaften benötigt (alles unter dem Gesichtspunkt magnetischer Antriebe). In einer zweiten Runde wurden die Anforderungen an Module zur Optimierung und Untersuchung von Hystereseigenschaften festgelegt. Die Module zur Empfindlichkeits- und Toleranzanalyse wurden erst Ende 2004 auf Wunsch eines Anwenders, aus einer konkreten Aufgabenstellung heraus, spezifiziert und implementiert.

In den Gesprächen zur Konzeption der Entwurfmodule hat sich gezeigt, dass es wenig sinnvoll ist, für bestimmte magnetische Grundbauformen (Topfmagnete, E-Magnete, polarisierte Magnete usw.) separate Berechnungsmodule zu entwickeln und diese in einen Katalog mit Systemkomponenten zu packen (siehe Aufgabenstellung). Aus diesem Grund wurde ein interaktiver, grafischer Netzwerkeditor entwickelt.

Am Ende der Konzeptionsphase wurde anhand des magnetischen Resonanzaktors überprüft, ob die an diesen magnetischen Antrieb gestellten Anforderungen mit dem zu entwickelnden Programmsystem erfüllt bzw. berechnet werden können.

Als Ergebnis der Konzeptionsphase ergaben sich zwei Änderungen bezüglich des Arbeitsplans. Die Gespräche hatten gezeigt, dass der Katalog mit verschiedenen Systemkomponenten nicht realisiert werden muss, da der Netzwerkeditor das Erzeugen beliebiger Netzwerke unterstützen soll. Der ursprüngliche Plan, das Programm als Modul für Simplerer zu entwickeln, wurde dahingehend revidiert, dass ein eigenständiges Programm für Windows entstehen sollte, das später über Schnittstellen mit anderen Programmsystemen gekoppelt werden kann (FEM oder Gesamtsystemsimulation).

Anschließend begann die Umsetzung aller theoretischen Ergebnisse in Software. Die Entwicklung der Programmmodule mit C++ und diversen ActiveX-Controls (FlowControl und Diagramme) sollte einen Großteil der verfügbaren Bearbeitungszeit in Anspruch nehmen. Das Programmgerüst wurde entwickelt, die Projekt- und Materialverwaltung implementiert, anschließend wurden die unterschiedlichen Berechnungsmodule umgesetzt. Im Frühjahr 2003 war eine erste Beta-Version mit allen Grundfunktionalitäten verfügbar und wurde bis Mitte 2003 an der Technischen Universität Ilmenau und im Steinbeis-Tranferzentrum Mechatronik getestet und evaluiert. Es wurden Fehler beseitigt und neue Funktionen, die aus Sicht der Anwender notwendig waren, implementiert.

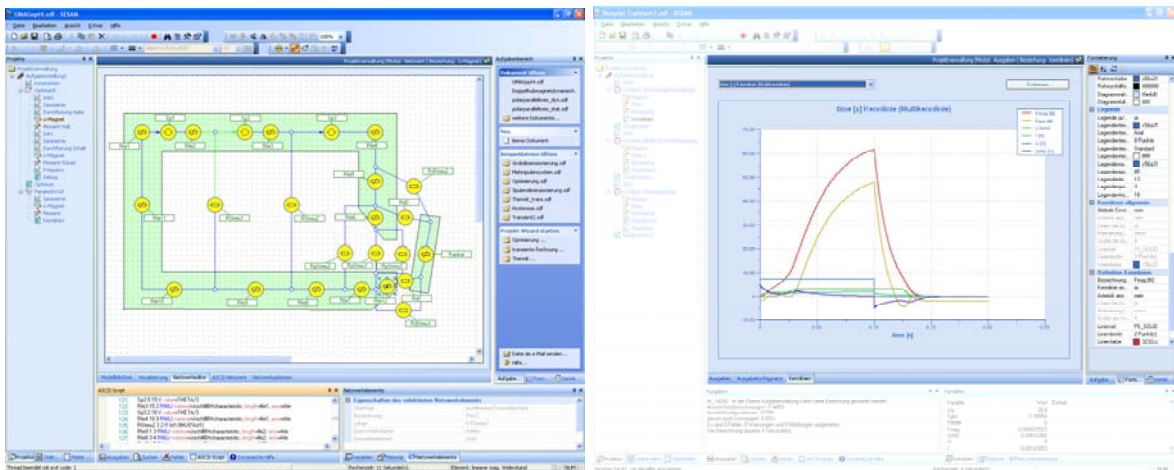


Abbildung 3: Netzwerkmodell und zugehörige Berechnungsergebnisse

Anschließend wurde allen Projektpartnern die Version 1.0 zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig wurde das Programm auch zur Ausbildung von Studenten im Fachgebiet Mechatronik und zur Durchführung von studentischen Projektarbeiten eingesetzt. Ziel war die Einbindung möglichst vieler Anwender in den Test und Evaluierungsprozess. Gleichzeitig wurden im zweiten Halbjahr 2003 Vergleichrechnungen zwischen Sesam und FEM durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit abschätzen zu können. Ausgewählte einfache magnetische Antriebe wurden entworfen, gebaut und anschließend vermessen (siehe Abbildung 3). Bei der Genauigkeit der Ergebnisse zwischen FEM und SESAM hängt es entscheidend von den Kenntnissen (Magnetik) der Anwender ab, welche Ergebnisse erzielt werden. Detaillierte Netzwerkmodelle, die den magnetischen Fluss exakt nachbilden, erreichen durchaus Genauigkeiten von 2-3%. Ist die Abbildung des magnetischen Flusses mit Netzwerken nicht so genau möglich (lokale Sättigungen und veränderliche Streufelder), dann treten unter Umständen auch Abweichungen von 15-20% auf oder in Extremfällen kann das System nicht berechnet werden (siehe auch Veröffentlichungen – Grenzen der Netzwerkmethod).

Ein weiterer Entwicklungsabschnitt startete Anfang 2004. Die Anwender des Programms hatten bei der Arbeit eine Vielzahl von „Unzulänglichkeiten“ in der Bedienung und „fehlende“

Funktionen festgestellt. Aus diesem Grunde wurde die Oberfläche in einigen Punkten komplett überarbeitet (speziell Fensterverwaltung und Netzwerkeditor) und an die Anforderungen der Anwender angepasst. Fehlende Funktionen (z.B. Kopplung mit FEM) wurden, soweit es der Zeitplan erlaubte, implementiert.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden Kongresse und Fachtagungen besucht, um auf aktuelle Trends reagieren zu können. So wurde zum Beispiel auf dem 10. GMM Workshop 2004 unter dem Motto „Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen“ mehrfach deutlich zum Ausdruck gebracht, das in der heutigen Zeit ein Programm nur erfolgreich am Markt bestehen kann, wenn eine englischsprachige Version verfügbar ist. Ähnliche Erfahrungen hatten wir bereits Anfang 2004 gemacht, nachdem mehrfach Anfragen zu Testversionen aus England, Frankreich und den Niederlanden kamen. Aus diesem Grunde wurden noch kurz vor Beendigung des Projektes Programmroutinen implementiert, die andere Sprachversionen des Programms unterstützen. Verfügbar sind momentan deutsch und englisch (ohne Handbuch und Online-Hilfe). Sind weitere Sprachversionen notwendig, müssen nur die Sprachtabellen entsprechend ergänzt werden (französisch ist bereits vorbereitet).

Die abschließenden Arbeiten im Januar 2005 beschäftigten sich mit der Aktualisierung der Installationsroutinen, der Aktualisierung des Internetauftritts zu SESAM Version 2005 und der Fertigstellung der Version 1.2 als Abschluss innerhalb des Projektes.

### 2.3 Erzielte Ergebnisse

Die Entwicklung einer Software zur Unterstützung des Entwurfs magnetischer Antriebssysteme innerhalb des Projekts „Entwicklung netzwerkfähiger Entwurfsmodule für Mini- und Mikroaktoren“ konnte erreicht werden. Es wurde ein Werkzeug entwickelt, das mit Hilfe der Netzwerkmethod die Untersuchung magnetischer, thermischer, dynamischer und anderer relevanten Eigenschaften magnetischer Antriebssysteme erlaubt. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Software wurde anhand der Entwicklung des magnetischen Resonanzaktors durch das Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik nachgewiesen. Dabei wurde mit dem Programm SESAM eine Vielzahl von Bauformen (siehe Abbildung 4) in der Phase der Grobdimensionierung untersucht, es erfolgte eine Optimierung der Geometriedaten, entsprechend vorgegebener Zielfunktionen. Dabei zeigte sich, dass das Programmsystem SESAM für die Grobdimensionierung von Magnetaktoren hervorragend geeignet ist.

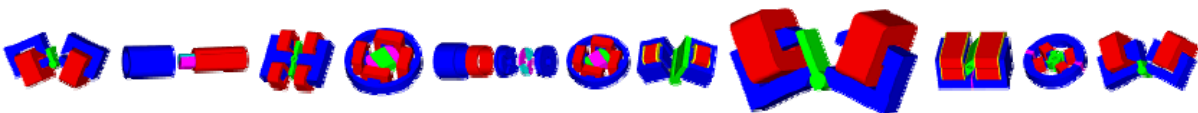


Abbildung 4: Untersuchte Bauformen bei der Entwicklung des mag. Resonanzaktors

Anschließend wurde die erfolgsversprechende Variante mit FEM Werkzeugen weiter untersucht und optimiert. Es wurden Prototypen gebaut und im Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik und der MAHLE Filtersysteme GmbH evaluiert. Die in der Aufgabenstellung definierten Parameter des Resonanzaktors konnten erreicht werden. Der Vorteil der entwickelten Software lag in sehr kurzen Rechenzeiten während der Optimierung und Parametersuche in der Phase der Grobdimensionierung. Dem gegenüber stehen ein erhöhter Aufwand bei der Modellierung und die dafür notwendigen umfangreichen Kenntnisse des Anwenders auf den Gebieten der Netzwerkmodellierung und Magnetik.

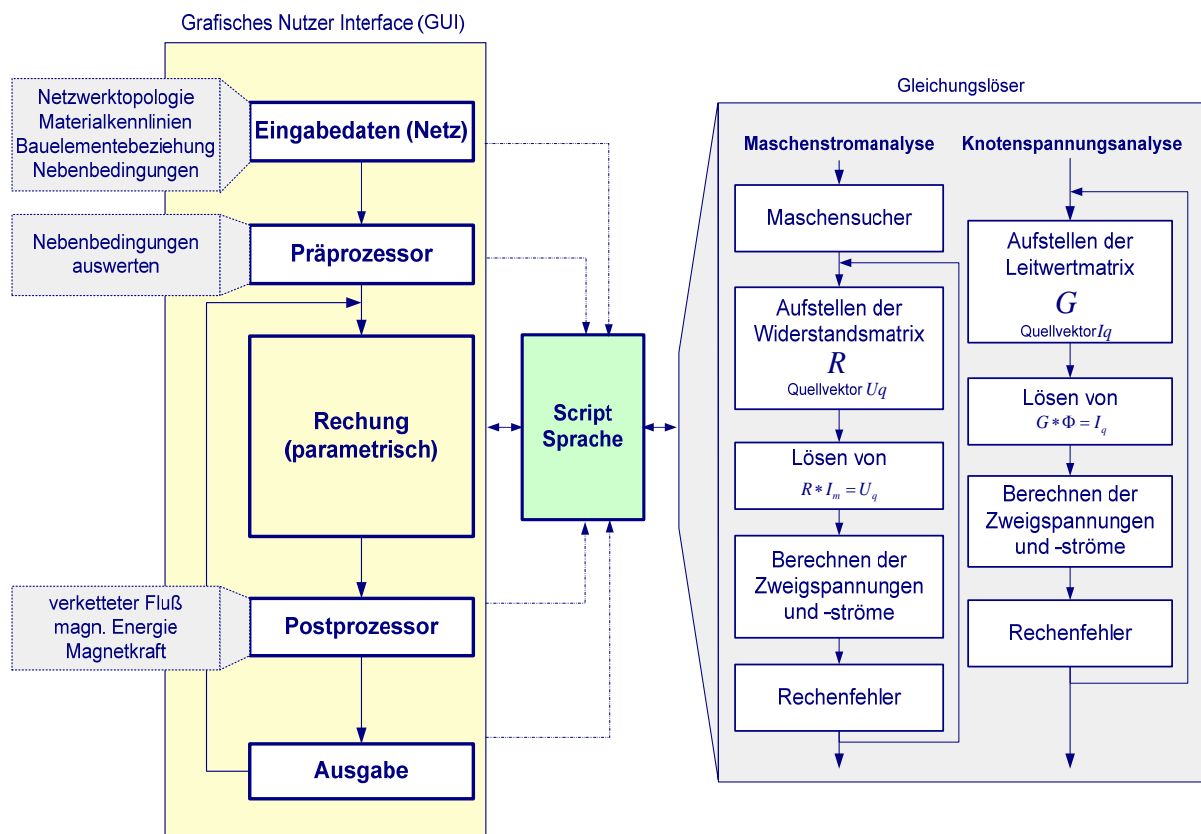


Abbildung 5: Aufbau Programmsystems SESAM (Modul Oberfläche, Script, Rechenkern)

Die im Programmsystem hinterlegte Struktur (siehe Abbildung 5) hat sich bei der Programmierung und bei der Anwendung des Programmsystems bewährt. Über eine Scriptsprache kommunizieren grafische Nutzeroberfläche und Gleichungslöser miteinander. Mit Hilfe der Scriptsprache und dem integrierten Formelinterpreter können alle Netzwerkmodelle parametrisch definiert werden. So können alle technischen Systeme abgebildet werden, deren Struktur und Verhalten mit Netzwerkmodellen beschreibbar sind. In der vorliegenden Version können magnetische, elektrische und thermische Netzwerke (und damit die Eigenschaften magnetischer Antriebssysteme) untersucht werden. Folgende Berechnungsmodule sind implementiert:

- Optimierungen, Dynamiksimulation und Parameterstudien
- Spulendimensionierung
- Toleranz- und Empfindlichkeitsuntersuchungen
- Thermikberechnung mit Konvektion und Strahlung
- Untersuchung von Wirbelströmen und Hystereseverhalten

Ergänzt werden diese Berechnungsmodule durch weitere Module, die die Eingabe des Netzwerkes ermöglichen, die Handhabung von Materialdaten erlauben und den Anwender bei der Fehlersuche bei der Modellierung unterstützen.

- Integrierter Formelinterpreter (für parametrische Modelle)
- Ergonomische Benutzerschnittstelle (einschließlich eines grafischen Netzwerkeditors)
- Integriertes CAD für Visualisierung (2D)
- Ausführliche Hilfe und Wissensdatenbank (deutsch)
- Integrierte Materialdatenbank (für das Mapping von Materialien auf Geometrien)
- Beispiel- und Modellbibliothek (muss erweitert werden)
- Flexible Formatierung der Ergebnisse (Kennlinien)
- XML Interface (für Import, Export und Erweiterungen)

Das Programmsystem ist sehr gut geeignet für die Untersuchung komplexer Strukturen, die sich auf konzentrierte Elemente reduzieren lassen. Es ist die Untersuchung homogener oder homogenisierter Feldgebiete möglich. Der Rechenaufwand bei 2D- und 3D-Modellen ist nahezu vergleichbar. An seine Grenzen (bedingt durch die Netzwerkmethod) stößt das System, wenn lokale Sättigungen (z.B. bei Kennlinienbeeinflussung) oder veränderliche Streufelder (z.B. bei Schrittmotoren) auftreten. Die kurzen Rechenzeiten, auch bei der Simulationen des dynamischen Verhaltens und bei Toleranzuntersuchungen (Abbildung 6), sind ein entscheidender Vorteil gegenüber FEM, die Erstellung der Netzwerkmodelle ist aber zeitaufwändig und der Anwender benötigt ein fundiertes Wissen.

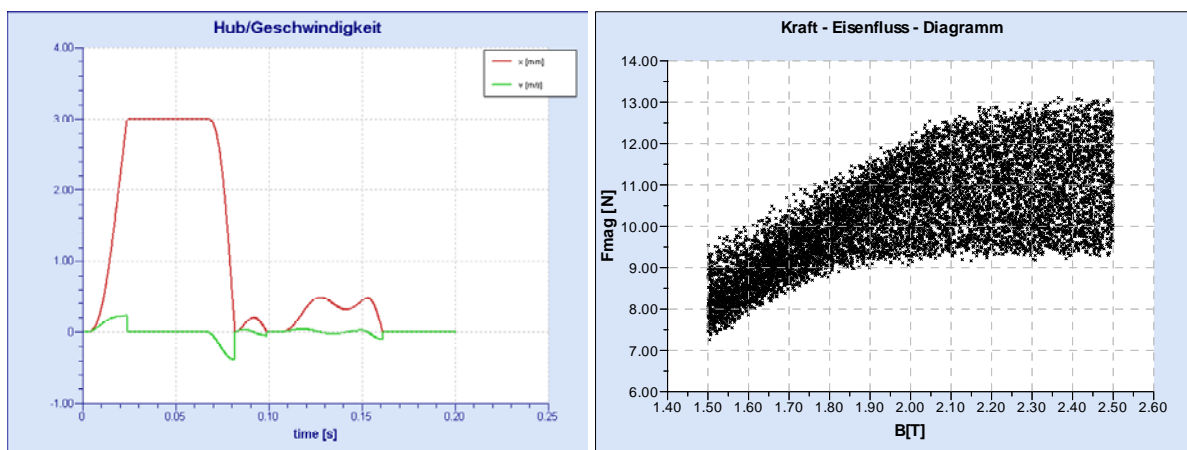


Abbildung 6: Berechnungsergebnisse (links: Dynamik, rechts: Toleranzuntersuchung)

Eine Weiterentwicklung des Programmsystems SESAM wäre wünschenswert, da die Problematik der Erstellung der Netzwerke anwenderfreundlicher gelöst werden muss. Aus jetziger Sicht sind kurzfristig Wizards denkbar, die für einfache Baugruppen eines Antriebs das Netzwerk automatisch erzeugen. Langfristig kann man auch über die automatische Erzeugung von Netzwerken nachdenken, indem die Geometrie eingelesen und interaktiv das Netzwerk erzeugt wird. Eine Überarbeitung der Dokumentation von Version 1.0 nach 1.2 ist ebenfalls notwendig (es gibt einige relevante Änderungen) und konnte aus Zeitmangel leider nicht realisiert werden, da uns die kurzfristige Implementierung der englischen Version wichtiger erschien.

Das Programm SEAM wurde für Windows entwickelt und läuft auf alle Windows Plattformen ab Windows 98SE. Die Umsetzung erfolgte weitestgehend objektorientiert mit C++. Der Rechenkern (Gleichungslöser) wurde in ANSI C realisiert. Weitere Informationen zum Pro-

grammsystem finden Sie unter <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/sesam>. Dort können Sie auch eine voll funktionsfähige Demoversion herunterladen.

#### **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen**

Das Programmsystem ist in einer windows-kompatiblen und auf die Bedürfnisse von klein- und mittelständischen Unternehmen angepassten Version seit Frühjahr 2005 verfügbar. Es werden die Sprachen deutsch und englisch unterstützt.

Die Erkenntnisse und Erfahrungen, die diesem Programmsystem zugrunde liegen, wurden in den letzten Jahren an der Technischen Universität Ilmenau – Fachgebiet Mechatronik entwickelt bzw. geschaffen. Der Projektbearbeiter und auch Jun.-Prof. Ströhla haben das Fachgebiet zwischenzeitlich leider verlassen. Eine Weiterentwicklung und Vermarktung über die innomas GmbH (ehemalige Mitarbeiter des Fachgebiets Mechatronik) während der Projektlaufzeit und darüber hinaus wurde angestrebt, konnte aber auf Grund unterschiedlicher Auffassungen nicht realisiert werden. Hauptproblem waren fehlende Kapazitäten für Werbung, Marketing und die Durchführung von Workshops. Der im Projekt beschäftigte Mitarbeiter war vollständig mit der Entwicklung der Software beschäftigt (einschließlich Handbüchern und Veröffentlichungen). Darüber hinausgehende Marketingaktivitäten waren aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Die im Projekt entwickelten Programme und Berechnungsmodule (SESAM) sollen unmittelbar bei der Ausbildung in den Fächern Mechatronik und Mikrosystemtechnik der Technischen Universität Ilmenau eingesetzt werden. Gleichzeitig können Industriepartner mit Hilfe von SESAM den Entwurf und die Dimensionierung von magnetischen Antriebselementen effizienter gestalten. Gerade im Bereich der Prinzipiellösungssuche oder Optimierung von Antriebssystemen können mit Hilfe der neu entwickelten Module Eigenschaften untersucht werden, die mit Hilfe von FEM nicht oder nur mit hohem Zeitaufwand möglich waren. Allen interessierten Anwendern steht unter <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/sesam> eine kostenlose Vollversion zu Verfügung (kostenlose Registrierung und Freischaltung ist erforderlich).

Momentan ist der deutschsprachige Raum die vorgesehene Region für eine Verbreitung des Programmsystems SESAM (obwohl es 2003 Anfragen aus Frankreich und England gab, das Programm 2004 in Portugal vorgestellt wurde und 2005 Interesse aus den Niederlanden bekundet wurde). Bis zum heutigen Zeitpunkt haben 56 Anwender das Programm herunter geladen, von denen 34 einen Freischaltcode angefordert haben. Die Zahl der aktiven Nutzer bewegt sich allerdings nach unseren Erkenntnissen nur im Bereich von zehn Anwendern.

Speziell durch die Arbeit von Studenten mit SESAM in Studien- und Projektarbeiten konnte das Fachgebiet einen Know-how Zuwachs erzielen, der sich positiv auf aktuelle und künftige Forschungs- und Entwicklungsaufträge aus der Industrie auswirken wird. Für eine weitere Verbreitung des Programms muss aber innerhalb von Workshops den Anwendern der Umgang mit SESAM vermittelt werden, da trotz Rechnerunterstützung die Arbeit mit Netzwerken ein gewisses Maß an Know-how voraussetzt (Problematik der Netzwerkmethodik allgemein und umfassende Kenntnisse der Magnetik). An der Technischen Universität Ilmenau wird die Juniorprofessur „Entwurf Mechatronischer Antriebe“ unter Jun.-Prof. Ströhla das Programmsystem weiter in Lehre und Forschung einsetzen und auch wenn möglich die Weiterentwicklung vorantreiben.

## 2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Betrachtet man Veröffentlichungen der letzten zwei Jahre, stellt man fest, dass es zunehmend Anwendungen außerhalb der Elektrotechnik und des Schaltkreisentwurfs gibt, die die Netzwerkmethodik zur Berechnung technischer Sachverhalte einsetzen. Kurze Rechenzeiten und die Möglichkeit der Simulation komplexer Systeme haben zu einer stärkeren Verbreitung dieser Berechnungsmethodik beigetragen. Besonders bei der Simulation von komplexen Systemen (mit Matlab – Simulink, Simplorer, SimulationX, PSpice u.a.), wo domänenübergreifende technische Prinzipien nach dem Black-Box-Prinzip behandelt werden, ist die Netzwerkmethodik sehr gut anwendbar.

Das Programmsystem SESAM in der jetzigen Form untersucht detaillierter das Verhalten magnetischer Eigenschaften (also nur einer Domäne). Dabei werden Geometrie- und Materialeigenschaften, sowie die Ausbreitung des magnetischen Flusses, berücksichtigt. Der Einsatz der Netzwerkmethodik erlaubt natürlich auch die Berücksichtigung mechanischer Sachverhalte (z. B. Gegenkräfte durch Federn), elektrischer Randbedingungen (verschiedene Ansteuerregimes) und thermischer Eigenschaften (z.B. für unterschiedliche Betriebsarten). Aus der aktuellen Literatur sind keine Ergebnisse Dritter mit Relevanz für das Vorhaben bekannt. In dieser Art und Weise gibt es unseres Wissens keine Software, die statische, dynamische und Optimierungsrechnungen magnetischer Antriebssysteme mit Hilfe der Netzwerkmethodik unterstützt. Wir sind uns klar darüber, dass es sich bei der hier entwickelten Software um ein Nischenprodukt handelt, da der Markt von Herstellern antriebstechnischer Komponenten (magnetische Antriebe) überschaubar ist.

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden Kongresse und Fachtagungen besucht und das Programmsystem wurde in Vorträgen und Postern vorgestellt. Allerdings war die Resonanz verhalten. Gerade KMU haben immer noch Vorbehalte, was den Einsatz virtueller Entwicklungsmethoden angeht. Einerseits verständlich, bindet der Einsatz spezialisierter Software durch Einarbeitung und Wartung Arbeitskräfte, andererseits muss aber auch das Einsparungspotential berücksichtigt werden. Interesse an dem Programm kam vorwiegend aus dem universitären Bereich. Dort ist derzeit auch das Anwendungsgebiet (Forschung und Lehre).

Im Folgenden finden Sie alle zum Programmsystem SESAM während der Projektlaufzeit getätigten Vorträge und Poster:

- Birli, O.; Ströhla, T. Entwicklung magnetischer Antriebssysteme mit Hilfe der Netzwerkmethodik und dem Programmsystem SESAM. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Mechanical Engineering from Macro to Nano, Technische Universität Ilmenau, 19.09.-23.09.2005, Ilmenau, 2005, S. 105-106. 2005
- Birli, O.; Ströhla, T.: Design of fast acting magnetic actuators with SESAM: FIMEC 2004, 12.-14.10.2004, Guimarães (Portugal) 2004
- Birli, O.; Ströhla, T.: Simulation und Optimierung von magnetischen Antrieben mit Hilfe der Netzwerkmethodik: 10. GMM Workshop "Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen", 20.-22.10.2004, Cottbus, S.89-96. 2004
- Zöppig, V.; Kallenbach, E.; Birli, O.; Schmidt, J.; Ströhla, T. Rapid Development of micromechatronic systems containing magnetic actuators. The Eighteenth International Workshop on High-Performance Magnets and Their Applications. Annecy (France). 29 August 2004 to 2 September 2004, Proceedings 2004
- Birli, O.; Feindt, K.; Kallenbach, E.; Ströhla, T.: SESAM – a network based design tool for developing electromagnetic actuators; International Conference on Mechatronics 2003, Loughborough University, UK, 19-20 June 2003
- Ströhla, T.; Kallenbach, E.; Feindt, K.; Birli, O. Entwurf magnetischer Aktoren für mechatronische Systeme mit SESAM, VDI-Mechatronik Tagung 2003; Innovative Produktentwicklung, 7-8 Mai 2003, Fulda 2003



- Ströhla, T. Ein Beitrag zur Simulation und zum Entwurf von elektromagnetischen Systemen mit Hilfe der Netzwerkmethod. Dissertation TU Ilmenau 2003, Wissenschaftsverlag Ilmenau, ISBN 3-936404-00-3
- Birli, O.; Kallenbach, E.; Feindt, K.; Ströhla, T. SESAM – A Software that Supports the Design Process of Electromagnetic Actuators. Actuator Bremen, Proceedings, 2002
- Ströhla, T.; Birli, O. Einsatz von Hysteresesimulation im Entwurfsprozess von Magnetaktoren. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau IWK 2002, 23.-26. September 2002
- Birli, O.; Kallenbach, E. Conceptual Desig of Magnetic Drives with SESAM. Electromechanika, Jubiläumsausgabe 4/2002, ISSN 0136-3360, S. 7-14

Alle Vorträge finden Sie als PDF-Datei auf der beiliegenden CD. Dort sind auch PDF-Versionen der Handbücher und eine voll funktionsfähige Demoversion von SESAM Version 2005 verfügbar.

## 2.7 Literaturangaben

- Bayer, O., Kamusella, A.: Simulation und Optimierung schnellschaltender Magnete. Proc. Dresdner Tagung Simulation im Maschinenbau, Dresden, 2000, S. 557-574
- Geißler, G.: Modellbildung von Proportionalmagneten mittels konzentrierter Parameter. O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 45 (2001) 1, S. 49-52
- Jonas, Ge.: Berechnen elektrischer Maschinen - über magnetische Abschnitts-leitwerte. VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1997
- Roschke, T.: Entwurf geregelter elektromagnetischer Antriebe für Luftschütze. Fortschrittsbericht VDI Reihe 21 Nr. 293 VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- Schweer, J.-B. Berechnung kleiner Wechselstrom-Ventilmagnete mit massivem Eisenkreis, Diss. Universität Hannover, 1997