

CAE-Tool für den optimierten Entwurf von Schweißstromquellen

Dietmar Hahm, Harald Mundinger, Peter Wallmeier, Dr. N. Fröhleke

Universität-Gesamthochschule Paderborn

FB 14 / 250 Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Warburger Straße 100

33098 Paderborn

Tel. 05251 603157, Fax 05251 603157

hahm@lea.uni-paderborn.de

I. Zusammenfassung

Es wird ein rechnergestütztes Werkzeug für den Entwurf von Schweißstromquellen (CAE-WPS¹) beschrieben, dessen wesentliche Module SIMPLORER-Sheets als benutzerfreundliche Schnittstelle benutzen.

Den Kern des Tools bildet das Expertensystem CLIPS. Die Fakten und Regeln der damit realisierten Wissensbasis decken die wichtigsten Aspekte des Entwurfs ab. Das Expertensystem unterstützt neben der Auswahl geeigneter Schaltungstopologien den Reglerentwurf, die Optimierung magnetischer Komponenten, sowie die thermische Auslegung.

II. Einleitung

Der Entwurf von Schweißstromquellen erfordert vom Schaltungsentwickler die Berücksichtigung vielfältiger Aspekte (Abb. 1).

Den Anfang bildet die Auswahl einer für die gegebene elektrische Spezifikation geeigneten leistungselektronischen Schaltung. Neben verschiedenen Varianten des primärseitigen Wechselrichters, wie z. B. Flußwandlern, Halbbrücken- oder Vollbrückenschaltungen stehen auch diverse

Gleichrichterschaltungen (M1, M2, B2, Stromverdoppler) zur Auswahl.

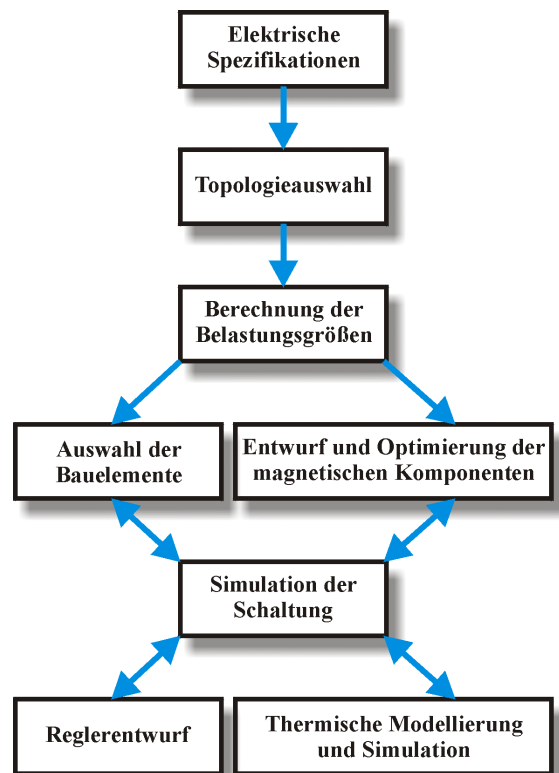


Abb. 1: Entwicklung von Schweißstromquellen

Einige der Schaltungsvarianten erlauben neben hartschaltendem Betrieb der Halbleiter auch Nullstrom- (ZCS) bzw. Nullspannungsschalten (ZVS) und bewirken dadurch eine deutliche Reduktion der Schaltverluste.

Hat der Entwickler sich für eine Topologie entschieden, so werden die Belastungsgrößen der einzelnen Bauelemente bestimmt. Mit diesen ist es dann möglich, aus der

¹ Gefördert durch Contract N° BRST-CT98-5310 der Europäischen Gemeinschaft. Siehe auch: dbs.cordis.lu/EN_GLOBALsearch.html

Vielzahl der zur Verfügung stehenden Komponenten die geeigneten auszuwählen.

Während Halbleiter und Kondensatoren fertig von verschiedenen Herstellern bezogen werden können, werden magnetische Komponenten, wie Spulen und Transformatoren meist individuell für die gegebene Anwendung entworfen und gebaut.

Bei all diesen Entscheidungen muß der Entwickler sowohl technische Gesichtspunkte wie Wirkungsgrad, Volumen oder thermisches Verhalten, als auch ökonomische Aspekte berücksichtigen.

Eine Auswahl stützt sich bisher weitestgehend auf die Erfahrung des Entwicklers, da eine Kalkulation möglicher Schaltungen und ihrer Varianten zu zeitaufwendig ist. Individuelle Vorlieben fließen hier genau-

auch für den Magnetikentwurf gibt es leistungsfähige Software-Pakete [9, 10]. Nicht zuletzt kann das elektrische System effizient mit Schaltungssimulatoren simuliert werden.

Die Besonderheit des vorgestellten Werkzeugs liegt darin, dass alle Aspekte der Entwicklung von Schweißstromquellen, angefangen bei der Schaltungsauswahl über die Auswahl der Bauelemente bis hin zur thermischen Modellierung und Optimierung, unterstützt werden.

III. Aufbau des Werkzeugs

Als Bedienoberfläche des Werkzeugs dient das Programm „TSelect“ („Topology-Selection“) (Abb. 2). Es zeigt als Ergebnis der letzten Berechnung die relativen und

Typ	total	volume	costs	losses	volume	costs	losses	MTBF	Project
Fb_Hs_Rt_M2_Acm	99	0	0	1	0.002695	128.19	271.1	12	Fb_Hs_R...
Fc_2t_Rt_M1_Acm	95	35	2	0	0.003655	131.67	267.4	8	Fc_2t_Rt...
Hb_Hs_Rt_M2_Acm	81	2	79	2	0.002765	230.36	274.4	10	Hb_Hs_R...
2Fc_2t_Rt_M1_Acm	68	36	43	26	0.003689	183.83	339.5	14	2Fc_2t_R...
Fb_Hs_Rt_B2_Acm	64	44	35	34	0.003894	173.11	358.4	14	Fb_Hs_R...
Hb_Hs_Rt_B2_Acm	47	47	114	35	0.003964	275.29	361.7	12	Hb_Hs_R...
Fb_Prcp_Rt_Cd_Acm	0	38	528	8	0.003733	805.79	290.4	25	Fb_Prcp_...
Fb_Prcp_Rt_B2_Acm	0	74	511	34	0.004714	783.63	360.5	26	Fb_Prcp_...
Fb_Prcp_Rt_M2_Acm	0	31	476	4	0.003555	739.55	279.6	24	Fb_Prcp_...

Abb. 2: Bedienoberfläche von TSelect mit typischem Ergebnis

so ein wie persönliche Erfahrung oder in Firmen verfügbare Produkte, die an die neue Spezifikation zu adaptieren sind.

Es liegt nahe, ein Werkzeug zu entwickeln, welches den Entwickler bei diesen Aufgaben unterstützt. Die Erfahrung und das Wissen mehrerer Entwickler kann hier gesammelt und nutzbar gemacht werden. Ein objektiver Vergleich einzelner Schaltungsvarianten wird ermöglicht. Die Entwicklungszeit wird durch die Kopplung zu SIMPLORER wesentlich verkürzt.

Für die Teilprobleme des Entwurfs ist am Markt bereits geeignete Software verfügbar. So decken z. B. MatLab/Simulink-Toolboxen den Reglerentwurf ab, Simulationen des thermischen Systems können mit FlowTherm durchgeführt werden und

absoluten Werte für Volumen, Kosten und Verluste sowie eine Gesamtbewertung an.

Der Topologienamen enthält u.a. Kurzbezeichnungen für den primärseitigen Wechselrichter (Fb: Vollbrücke, Hb: Halbbrücke, Fc: Flußwandler), den Gleichrichter (M1, M2, B2, Cd: Stromverdoppler) und den Regler (Acm: Average-Current-Mode).

Es erlaubt außerdem den Zugriff zu den weiteren Funktionen. Dies sind:

- Eingabe der elektrischen Spezifikation und der Entwurfsziele
- Starten der Wissensbasis zur Berechnung der Belastungsgrößen und Auswahl der einzelnen Bauelemente und Topologien

- Übersicht über die Komponenten einer ausgewählten Topologie
- Vorschau auf das Simulations-Sheet
- Starten des Simulationsprogramms mit Parametrierung der Komponenten
- Im Simulations-Sheet: Entwerfen und Optimieren der magnetischen Komponenten
- In Vorbereitung: Simulation des thermischen Verhaltens der Bauelemente unter Einbezug von Kühlkörpern etc.

Die Berechnungen und Abschätzungen werden von einem Expertensystem vorgenommen. Als Basis dient CLIPS, ein von der NASA entworfenes und nun frei verfügbares Expertensystem [3].

Der Entwurf von magnetischen Bauelementen erfolgt in zwei Schritten. Eine *Voroptimierung* errechnet mit dem Ansatz des Flächenprodukts einen Grobentwurf der Bauelemente. Dabei werden sowohl unterschiedliche Kernbauformen als auch verschiedene Kernmaterialien für nichtlineare Spulen berücksichtigt. Die Ergebnisse des Grobentwurfs werden in der Wissensbasis für die Beurteilung der einzelnen Topologien und für die Vorparametrierung des Simulations-Sheets genutzt.

Nach Auswahl einer Topologie ist die rechnergestützte Optimierung des Entwurfs der magnetischen Komponenten möglich. Das hierfür verwendete Werkzeug, in dem Skin- und Proximity-Effekt so wie Feldaufweitung bei Luftspalten berücksichtigt werden, ist gesondert beschrieben [1].

IV. CLIPS

CLIPS ist eine Plattform zur Erstellung von Expertensystemen. Es basiert primär auf der Darstellung von Wissen durch Regeln und Fakten.

In den Fakten wird das derzeit bekannte „statische“ Wissen gespeichert. Hierzu gehören beispielsweise die Spezifikationen der Schaltung. Mit Hilfe von Regeln werden diese Fakten miteinander verknüpft, um neue Fakten zu generieren, beispiels-

weise die Belastungsgrößen der einzelnen Bauelemente.

Des Weiteren erlaubt CLIPS die Kodierung von prozeduralem Wissen. Dadurch lassen sich Vorschriften für die Berechnung der Belastungsgrößen integrieren. Prozeduren, wie sie auch aus anderen Programmiersprachen bekannt sind, lassen sich einerseits in der CLIPS-eigenen Syntax schreiben. Andererseits ist es möglich, durch C-Funktionen den CLIPS-Befehlssatz zu erweitern und an die eigenen Bedürfnisse anzupassen.

Ein weiterer Vorteil von CLIPS ist die freie Verfügbarkeit des Programms und des gesamten Source-Codes. Damit ist einerseits die Übersetzung des Programms auf verschiedenen Hardware-Umgebungen möglich, andererseits erlaubt dies auch die vollständige Integration von CLIPS in SIMPLORER.

V. Das Auswahlverfahren

Die Hauptaufgabe des beschriebenen Werkzeugs besteht in der Auswahl der Bauelemente verschiedener Schaltungen und deren anschließender Vergleich.

Für die Auswahl der Topologie wurde ein dreistufiges Verfahren entworfen (Abb. 3). Es unterteilt sich in die Schritte:

- Entscheidung über die grundsätzliche Brauchbarkeit
- Auswahl der geeigneten Komponenten
- Bewertung der gesamten Schaltung

Entwurfsvorgaben

Der Anwender hat vielfältige Möglichkeiten, seine Entwurfsziele zu spezifizieren. Dies umfaßt einerseits die elektrische Spezifikation als auch Gewichtungen der Entwurfsziele wie geringes Volumen oder niedrige Kosten. Im Einzelnen können folgende Entwurfsvorgaben spezifiziert werden:

- Die *Art der Schaltung*. Es werden DC-DC-Wandler und netzfreundliche (PFC) Gleichrichter unterstützt.
- *Elektrische Spezifikation*. Diese umfaßt u.a. Angaben über die Ein- und Ausgangsspannungen und -ströme, die Schaltfrequenz, die Lastkennlinie bei Schweißstromquellen, usw.
- *Gewichtungen der Entwurfsziele*. Die Wichtigkeit der Entwurfsziele „geringe Verluste“, „kleines Volumen“ und „niedrige Kosten“ können spezifiziert werden.
- *Begrenzungen*. Obergrenzen für Volumen und Kosten, sowie eine Untergrenze für den Wirkungsgrad können angegeben werden.

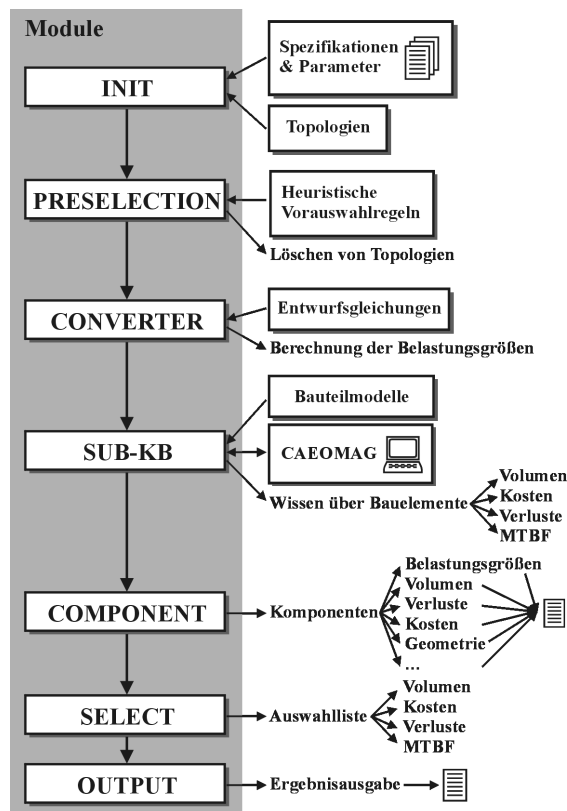


Abb. 3: Struktur des Auswahlverfahrens

Vorauswahl

Im ersten Schritt wird eine Vorauswahl unter den zur Verfügung stehenden Schaltungen getroffen. Auf der einen Seite ist dies notwendig, um sicherzustellen, daß die betrachteten Schaltungen überhaupt für den geplanten Verwendungszweck in Frage kommen. Auf der anderen Seite erhöht

dies die Verarbeitungsgeschwindigkeit erheblich, da unnötige Berechnungen schon zu Beginn vermieden werden.

Folgende Aspekte gehen in die Vorauswahl ein:

- *Art der angestrebten Schaltung*: Auswahl zwischen DC-DC-Wandlern und netzfreundlichen Gleichrichtern.
- *Höhe der Ausgangsspannung*: Bei DC-DC-Wandlern wird zwischen Hoch- und Tiefsetzbetrieb unterschieden. Die Topologie muß für die angestrebte Betriebsart geeignet sein.
- *Potentialtrennung*: Die Möglichkeit einer Stufe potentialtrennend ausgeführt zu werden, ist ein Entwurfskriterium.
- *Ausgangsleistung*: Erfahrungsgemäß sind bestimmte Topologien bei gegebenen Ausgangsleistungen schlechter geeignet als andere. Dieses Erfahrungswissen wird ausgewertet um Schaltungen, bei denen mit einem schlechten Abschneiden gerechnet wird, im Vorfeld auszusortieren.

Auswahl der Komponenten

In den betrachteten leistungselektronischen Schaltungen kommen fünf verschiedene Bauelementklassen zum Einsatz. Es sind dies Transistoren, Dioden, Kondensatoren, Spulen und Transformatoren.

Während die magnetischen Bauelemente Spule und Transformator in der Regel für den jeweiligen Einsatzfall individuell konstruiert werden, ist es Aufgabe des Schaltungsentwicklers, für die Halbleiter und Kondensatoren die geeigneten Typen aus der Fülle des Angebots verschiedener Hersteller auszuwählen.

Die folgenden Kriterien spielen bei der Auswahl dieser Bauelemente eine Rolle:

- *Grundsätzliche Eignung*, d.h. die Fähigkeit, die auftretenden Ströme und Spannungen fehlerfrei führen und schalten zu können.

- *Auftretende Verlustleistung.* Die Schalt- und Durchlaßverluste unterscheiden sich zwischen einzelnen Halbleitertypen erheblich. Auch haben diese Eigenschaften mitunter einen nicht zu vernachlässigen Einfluß auf die jeweiligen Kosten.
- Die *Kosten* eines Bauelements.

Aus den am Markt verfügbaren Komponenten wurden Typen ausgewählt, die zur Zeit für den Bau von Schweißstromquellen zum Einsatz kommen. Diese wurden zu Gruppen mit ähnlichen Merkmalen zusammengefaßt und Modellbibliotheken erstellt, die es erlauben, Bauteilparameter aufgrund der gegebenen Belastungsgrößen zu bestimmen.

Neben den elektrischen Parametern, die eine Abschätzung der auftretenden Verluste erlauben und die für die spätere Parametrierung der Simulations-Sheets notwendig sind, werden auch noch Informationen über die Kosten und die Gehäusebauformen in den Komponentenbibliotheken abgelegt. Die Gehäusetypen lassen wiederum Rückschlüsse auf die Größe des Bauelements zu.

Genau wie das Auswahlverfahren für die Topologien unterteilt sich die Auswahl der einzelnen Komponenten in drei Schritte:

- Bestimmung der grundsätzlich geeigneten Typen
- Ermittlung der Größe, Kosten und Verluste aller in Frage kommenden Typen
- Auswahl des optimalen Bauelements entsprechend der Entwurfsvorgaben.

Nach Abschluss dieses Schritts ist für jeden Halbleiter und jeden Kondensator ein Element mit den zugehörigen elektrischen Parametern und den zu erwartenden Kosten, Verlusten und Volumen bekannt. (Abb. 4)

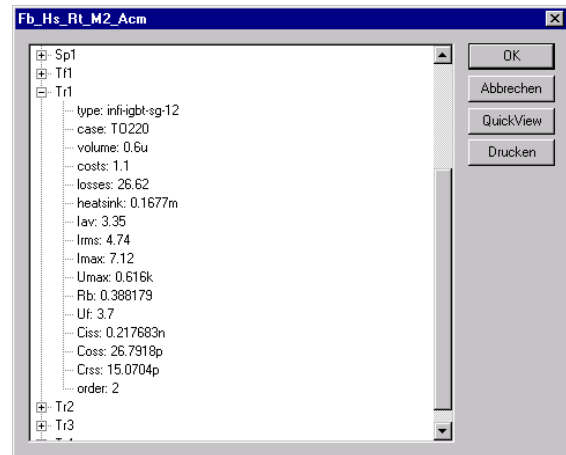


Abb. 4: Ausgabe der Bauteildaten

Voroptimierung magnetischer Bauelemente

Der Entwurf der Transformatoren und Spulen für Stromrichterschaltungen erfordert in der Regel eine hohe Anzahl von Iterationsschritten, sollen diese Stromrichterschaltungen hohe Anforderungen bezüglich Größen wie Leistungsdichte, Verlustleistung oder Kosten erfüllen. Jede Änderung eines Bauelementparameters zur Verbesserung einer Bauelementeigenschaft kann andere Merkmale wiederum negativ beeinflussen.

Ein im oben genannten Fachgebiet der Universität Paderborn entwickeltes Werkzeug zur rechnergestützten Optimierung von magnetischen Bauteilen (CAEOMAG) [1] ermöglicht einen optimierten Entwurf. Dieses Werkzeug ist Bestandteil des hier beschriebenen Programmpakets.

Aufgrund der großen Anzahl von durchzuführenden Entwürfen während der Topologieauswahl ist eine geringe Programmlaufzeit für den Einzelentwurf gefordert. Ein guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit stellt der Flächenproduktansatz dar. In ihm werden die geometrischen Abmaße und die charakteristischen Kenngrößen durch das Flächenprodukt beschrieben, so daß eine semi-analytische Optimierung des Bauvolumens möglich wird. Dabei wird eine vereinfachte Verlustleistungsberechnung sowie ein einheitliches thermisches Modell für Kern und

Wicklung des zu optimierenden magnetischen Bauelements angenommen.

In dieser Voroptimierung der magnetischen Bauelemente werden verschiedene Kernformen für lineare Spulen und Transformatoren berücksichtigt.

Bewertung der gesamten Schaltung

Nachdem die einzelnen Daten aller Bauelemente bekannt sind, können die Gesamtvolumina, Kosten und Verluste aufsummiert werden.

hält auch die vom Anwender vorgegebenen Gewichtungen der Entwurfsziele.

Als Ergebnis liefert *TSelect* eine Auswahlliste mit den jeweiligen Gesamtergebnissen (Abb. 2), aus der der Entwickler eine Topologie auswählen kann. Innerhalb von *TSelect* ist es möglich, für eine einzelne Topologie eine Liste aller Bauelemente mit ihren jeweiligen Parametern und Belastungsgrößen anzuzeigen (Abb. 4). Außerdem ist eine Vorschau auf das Simulations-Sheet möglich.

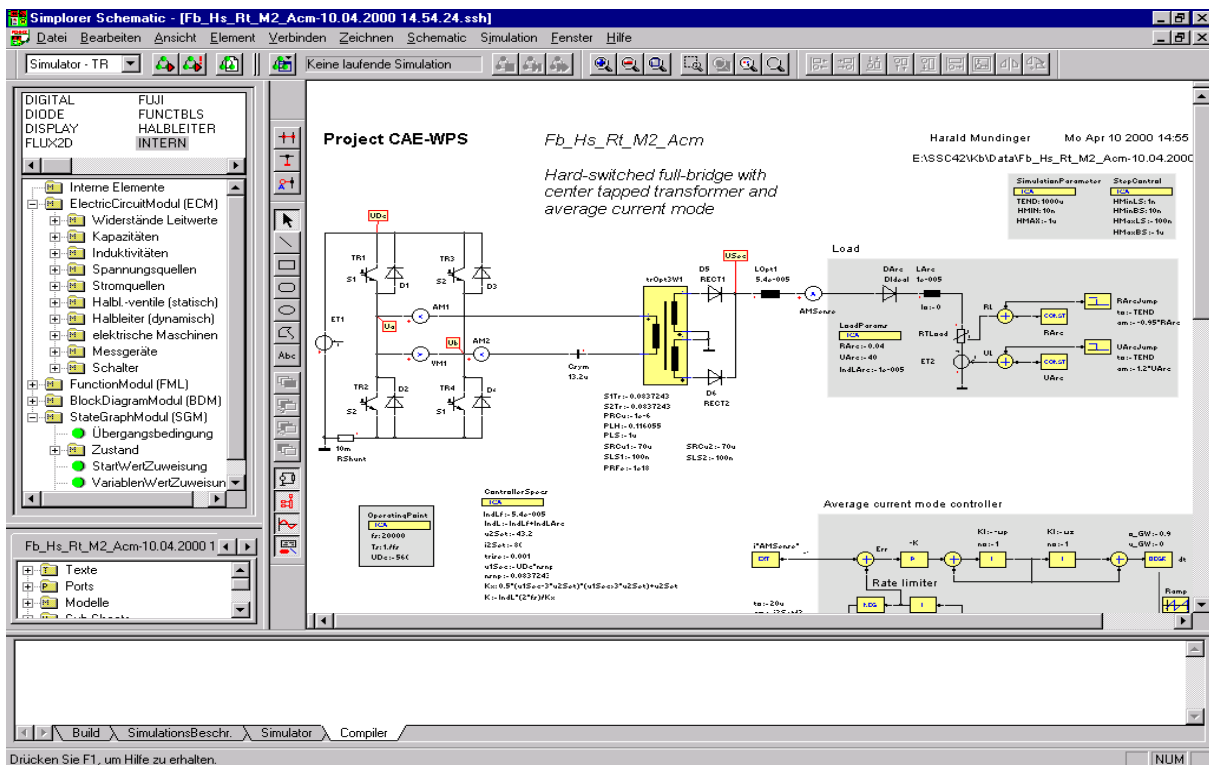


Abb. 5: Automatisch generiertes und parametrisiertes Simulations-Sheet

Hinzu kommen noch die Kosten und das Volumen für den Kühlkörper, die beide als proportional zu den auftretenden Verlusten angesetzt werden.

Aus den Summen werden durch Normierung der einzelnen Größen auf den jeweiligen Minimalwert relative Werte gebildet. Der Minimalwert erhält die relative Größe 0. Alle anderen erhalten die entsprechende prozentuale Abweichung als ganzzahligen Wert.

Danach werden die relativen Werte über eine Gütefunktion zu einer Gesamtwertung zusammengefasst. Die Gütefunktion ent-

VI. Simulation

Von *TSelect* aus lässt sich eine gewählte Topologie direkt simulieren. Hierfür enthält das Werkzeug zu jeder Schaltung eine Simulationsvorlage („Template“). Diese wird mit den von CLIPS berechneten Bauteilwerten parametrisiert und anschließend SIMPLORER direkt mit dem neu erstellten Sheet geladen. Eine sofortige Simulation ist möglich (Abb. 5).

Die Reglerstruktur (z.B. Average-current-mode, Peak-current-mode) ist durch das Simulations-Sheet festgelegt. Die Bestim-

mung der Reglerparameter erfolgt direkt im Sheet. Dadurch ist eine Anpassung der Parameter auch bei nachträglichen Änderungen in der Simulation gewährleistet.

VII. Entwicklungsstand

Derzeit enthält das Werkzeug die Modelle und Vorlage-Sheets von 14 Topologien für DC-DC-Wandler. Es werden Halbbrücken- und Vollbrückenschaltungen, Flußwandler und Tiefsetzsteller mit verschiedenen Gleichrichterstufen unterstützt. Außerdem sind für einige Topologien verschiedene Regler nutzbar.

Die thermische Modellierung des gesamten Geräts inklusive des Kühlkanals ist in Vorbereitung und steht kurz vor der Implementierung.

VIII. Zusammenfassung

Das vorgestellte Programm ermöglicht dem Schaltungsentwickler eine rechnergestützte Topologieauswahl.

Geeignete Bauelemente werden ausgewählt und eine Voroptimierung für die magnetischen Komponenten wird durchgeführt.

Anschließend kann die gewählte Topologie sofort in SIMPLORER mit einem vorgefertigten und passend parametrisierten Sheet simuliert werden.

Weiter ist eine automatische Optimierung der magnetischen Bauelemente und eine thermische Simulation des Aufbaus möglich.

IX. Danksagung

Die Autoren danken für die von der Europäischen Gemeinschaft erhaltenen Förderung zum Projekt BRST-CT98-5310 und die von den beteiligten Firmen gewährte Kooperation.

X. Referenzen

- [1] P. Wallmeier; N. Fröhleke; D. Hahm; H. Munding: Integrating magnetic component design and optimization into circuit simulator SIMPLORER. PCIM 2000, Juni 2000.
- [2] SIMEC GmbH: Reference Manual to the simulator system SIMPLORER, Chemnitz, Feb. 1999.
- [3] STB Lyndon B. Johnson Space Centre: CLIPS User Manual, Aug. 1998, <http://www.ghgcorp.com/clips/CLIPS.html>
- [4] D. Fezzani, H. Piquet, H. Foch: Expert System for the CAD in Power Electronics – application to UPS. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No.3, May 1997, S. 578 – 586.
- [5] B. Carsten: Selecting Switchmode Topologies for Various Applications. APEC 2000 Seminar Workbook, Volume II, Seminar 8.
- [6] M. Miller: New Technologies on Telecom Power Conversion. IEEE Intelec 95, Den Haag, S. 114-118.
- [7] I. Cohen: Evaluation and Comparison of Power Conversion Topologies. EPE 1993, Brighton, S. 9-16.
- [8] N. Fröhleke: Topologien und Schalterkonzepte für Schaltnetzteile hoher Leistung bei geringer Ausgangsspannung, Dissertation im Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 1991.
- [9] Ansoft Corporation: PEMAG-Magnetics design program. Ansoft Inc. 1999, Information: Eminfo@ansoft.com
- [10] Intusoft: Dokumentation zum Programm „Magnetics Designer“, 1996, Fa. Intusoft, San Pedro, USA.