

Simulations- und Entwurfswerkzeug für den optimierenden Entwurf von Schaltnetzteilen

H. Munding, D. Hahm, N. Fröhleke, P. Wallmeier, H. D. Njiende
munding@lea.uni-paderborn.de

Universität Paderborn, Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik
Warburger Straße 100, D-33098 Paderborn

Zusammenfassung

Ein neues Werkzeug für den rechnergestützten optimierenden Entwurf von Schaltnetzteilen wird vorgestellt, bei dem die Auswahl einer leistungselektronischen Schaltung auf einem Expertensystem beruht. Neben der Auswahl der Schaltung parametrisiert das Werkzeug die Bauelemente sowie den Regler und erlaubt so die schnelle Erzeugung von Simulationsmodellen. Die enge Kopplung mit einem Simulator macht es möglich, magnetische Bauelemente unter Berücksichtigung realistischer elektrischer Größen zu optimieren. Der Einbezug einer Simulation des thermischen Verhaltens der magnetischen Bauelemente und des Schaltnetzteils vervollständigt das Entwurfswerkzeug.

Einleitung

Der manuelle Entwurf von Schaltnetzteilen ist ein aufwendiger Prozess: Für eine gegebene Spezifikation wählt der Schaltungsentwickler zunächst eine leistungselektronische Schaltung (Topologie) mit zugehörigem Ansteuerschema aus. Es folgt die Dimensionierung der Schaltung und die Auswahl konkreter Bauteile. Magnetische Bauteile müssen häufig anwendungsspezifisch entworfen werden, wobei die nicht zu vernachlässigenden Skin- und Proximity-Effekte zu berücksichtigen sind. Die Wahl eines Regelungskonzepts, die Reglerparametrierung sowie Simulationen bilden zusammen mit der mechanischen Konstruktion und der thermischen Auslegung des Schaltnetzteils häufig den Abschluß des Entwurfs. Bei allen Entwurfsschritten spielt das individuelle Erfahrungswissen des Entwicklers heute noch eine wesentliche Rolle. Daneben kann der Entwickler den zeitaufwendigen Entwurf nicht für beliebig viele unterschiedliche Topologien durchführen und wird daher in technischer oder ökonomischer Hinsicht nur *suboptimale* Lösungen erzielen. Um die Auswahl und Parametrierung von Schaltungen objektivierbar und automatisierbar zu machen, arbeiten zur Zeit im Rahmen eines durch die Europäische Union geförderten Gemeinschaftsprojektes¹ die Universitäten Paderborn und Leuven (Belgien) zusammen mit einem internationalen Firmenkonsortium an einem Software-Werkzeug, das am Beispiel von Schweißstromquellen den optimie-

¹ CAE-WPS, gefördert durch Contract N° BRST-CT98-5310 der Europäischen Gemeinschaft

renden Entwurf magnetischer Bauteile sowie die auf Simulationen basierende Optimierung von Schaltnetzteilen unterstützt. Dieser Beitrag beleuchtet den Ansatz des entstehenden Software-Werkzeugs *CAE-WPS* (Computer Aided Engineering of Welding Power Supplies) sowie dessen enge Kopplung mit dem Simulator SIMPLORER [1] der SIMEC GmbH, Chemnitz.

Rechnergestützter Entwurf und Aufbau des Werkzeugs

Für Teilprobleme des Entwurfs stehen schon heute leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung [2]. So vereinfachen beispielsweise MATLAB/SIMULINK-Toolboxen den Reglerentwurf, das thermische System kann mit FlowTherm simuliert werden und selbst für den Entwurf der Magnetik ist leistungsfähige Software am Markt verfügbar. Nicht zuletzt gibt es Schaltungssimulatoren zur Simulation des elektrischen Systems.

Das vorgestellte Werkzeug deckt dagegen viele Aspekte des Entwurfs in *einem* Werkzeug ab und erlaubt dadurch einen rechnergestützten optimierenden Gesamtentwurf. Den Kern des Werkzeugs bilden:

- Die Auswahl und Parametrierung einer Topologie der leistungselektronischen Schaltung und des zugehörigen Steuer- und Regelschemas basierend auf dem von der NASA entwickelten und jetzt frei verfügbaren Expertensystem CLIPS [3].
- Eine enge automatisierte und benutzerfreundliche Kopplung des Expertensystems mit dem Simulator SIMPLORER durch das in C implementierte Modul *TSelect*.

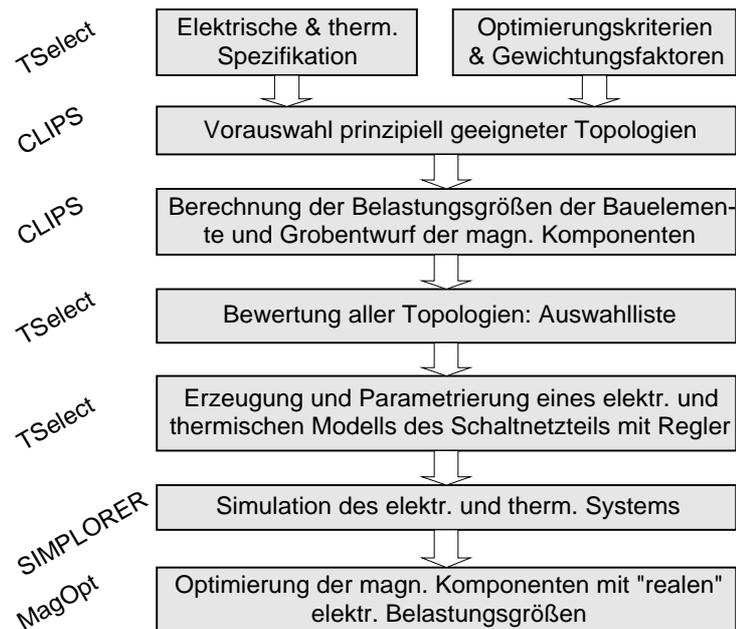
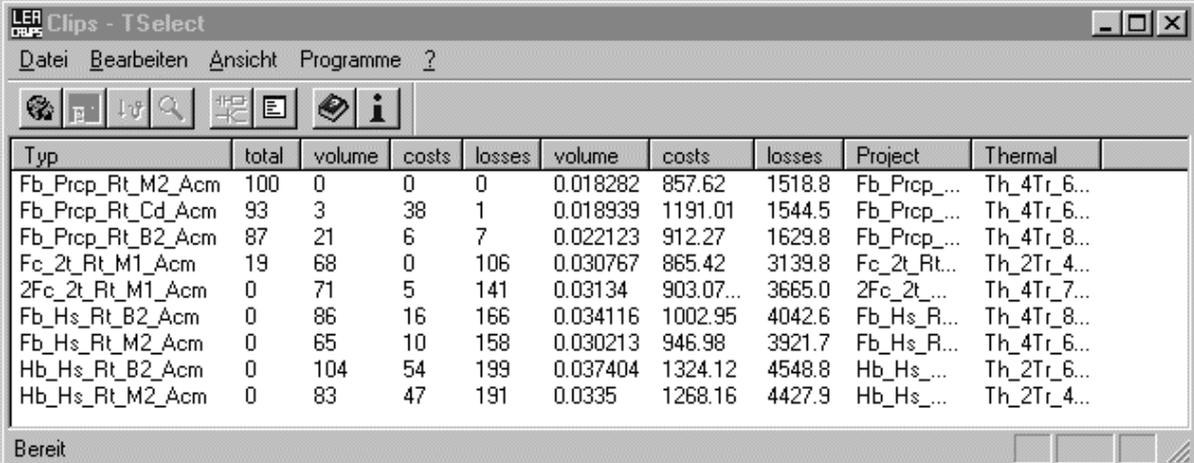


Bild 1: Rechnergestützter Entwurf

- Das Programm-Modul *MagOpt* [4], das eine automatisierte Optimierung magnetischer Bauteile gestattet. Die Verwendung simulierter, das heißt realistischer elektrischer Größen, ermöglicht eine genauere Berücksichtigung der Hochfrequenz- und Luftspalteffekte und damit eine verbesserte Modellierung.
- Die Kopplung der Simulation des elektrischen und des thermischen Modells des Schaltnetzteils.

Auswahl und Parametrierung einer Topologie

Wie **Bild 1** zeigt, sind neben den elektrischen und thermischen Spezifikationen des Schaltzerteils die Optimierungskriterien sowie deren Gewichtung Ausgangspunkt des optimierenden Entwurfs. Da der Auswahl der Topologie eine entscheidende Rolle zukommt, bewertet das Werkzeug zunächst alle in einer Wissensbasis enthaltenen Topologien auf ihre Eignung für die konkrete Aufgabenstellung. Um unnötige Berechnungen zu vermeiden, werden durch das Expertensystem mit heuristischem Wissen Topologien, die Mindestkriterien nicht erfüllen, sofort verworfen. So sind beispielsweise Tiefsetzsteller ungeeignet, wenn eine galvanische Trennung von Eingang und Ausgang gefordert ist. Zur Beurteilung, und damit letztlich zur Auswahl der Topologien, dienen i. W. die elektrischen Belastungsgrößen, die sich ihrerseits auf Optimierungskriterien wie Baugröße, Ausfallrate und Kosten auswirken. Da der optimierte Entwurf magnetischer Bauteile zeitaufwendig ist, bestimmt das Expertensystem zur Auswahl der Topologie nur grobe Entwürfe dieser Bauteile, die jedoch bereits eine Abschätzung der Abmessungen und der Verlustleistungen zulassen. Der Feinentwurf erfolgt später. Die Ergebnisse der Bewertung stellt *TSelect* in einer Tabelle dar, woraus der Benutzer eine Topologie auswählen kann, wie in **Bild 2** exemplarisch gezeigt ist. Die Bezeichnungen der Typen sind systematisch aufgebaut: Zum Beispiel kennzeichnet das erste Textfeld den



The screenshot shows a window titled "LEA Claps - TSelect" with a menu bar (Datei, Bearbeiten, Ansicht, Programme, ?) and a toolbar. Below the toolbar is a table with the following data:

Typ	total	volume	costs	losses	volume	costs	losses	Project	Thermal
Fb_Prcp_Rt_M2_Acm	100	0	0	0	0.018282	857.62	1518.8	Fb_Prcp_...	Th_4Tr_6...
Fb_Prcp_Rt_Cd_Acm	93	3	38	1	0.018939	1191.01	1544.5	Fb_Prcp_...	Th_4Tr_6...
Fb_Prcp_Rt_B2_Acm	87	21	6	7	0.022123	912.27	1629.8	Fb_Prcp_...	Th_4Tr_8...
Fc_2t_Rt_M1_Acm	19	68	0	106	0.030767	865.42	3139.8	Fc_2t_Rt...	Th_2Tr_4...
2Fc_2t_Rt_M1_Acm	0	71	5	141	0.03134	903.07...	3665.0	2Fc_2t_...	Th_4Tr_7...
Fb_Hs_Rt_B2_Acm	0	86	16	166	0.034116	1002.95	4042.6	Fb_Hs_R...	Th_4Tr_8...
Fb_Hs_Rt_M2_Acm	0	65	10	158	0.030213	946.98	3921.7	Fb_Hs_R...	Th_4Tr_6...
Hb_Hs_Rt_B2_Acm	0	104	54	199	0.037404	1324.12	4548.8	Hb_Hs_...	Th_2Tr_6...
Hb_Hs_Rt_M2_Acm	0	83	47	191	0.0335	1268.16	4427.9	Hb_Hs_...	Th_2Tr_4...

At the bottom of the window, the status bar shows the word "Bereit".

Bild 2: Typische Ausgabe der Beurteilung der einzelnen Topologien durch TSelect

Grundtyp der Schaltung (Fb= Full Bridge, Fc=Forward Converter, usw.) und das letzte Feld die Art der Stromregelung (hier alle ACM= Average Current Mode). Die Gesamtwertung (total) gibt eine Rangfolge unter den Topologien wieder, wobei 100 die Maximalpunktzahl ist. Bei dem Volumen, den Kosten und der Verlustleistung deuten hingegen kleine Zahlenwerte auf gute Eigenschaften der Topologie.

Jeder Topologie sind durch die Felder "Project" und "Thermal" Namen von Vorlagen mit elektrischen und thermischen Simulationsmodellen zugeordnet. Sobald der Entwickler eine Topologie aus der Liste der Kandidaten wählt, wobei er sich im Regelfall an den Bewert-

ungen durch CLIPS orientieren wird, erstellt TSelect mit Hilfe dieser Vorlagen Simulationsmodelle und parametriert diese, wie in **Bild 3** exemplarisch gezeigt.

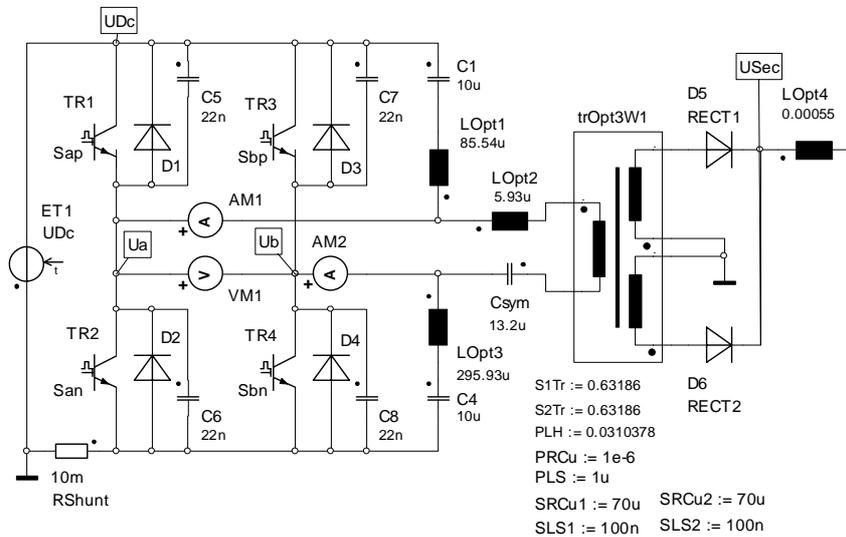


Bild 3: Typisches elektrisches Modell (Auszug)

Neben der Modellierung durch elektrische Netzwerke können in SIMPLORER auch Blockdiagramme und Zustandsgraphen benutzt werden, die insbesondere die effiziente Modellierung schaltender Netzwerke zulassen. Von beiden Möglichkeiten wird bei den Vorlagen Gebrauch gemacht.

Reglerauslegung

Prinzipiell sind für die meisten Topologien verschiedene Reglerstrukturen denkbar, die u. a. mit den klassischen Frequenzkennlinienverfahren ausgelegt werden können. Obwohl zur Modellierung schaltender Netzwerke leistungsfähige Methoden, wie z. B. die Zustandsraum-Mittelwertmethode, entwickelt wurden, ist dieser Weg insbesondere für aufwendige sogenannte

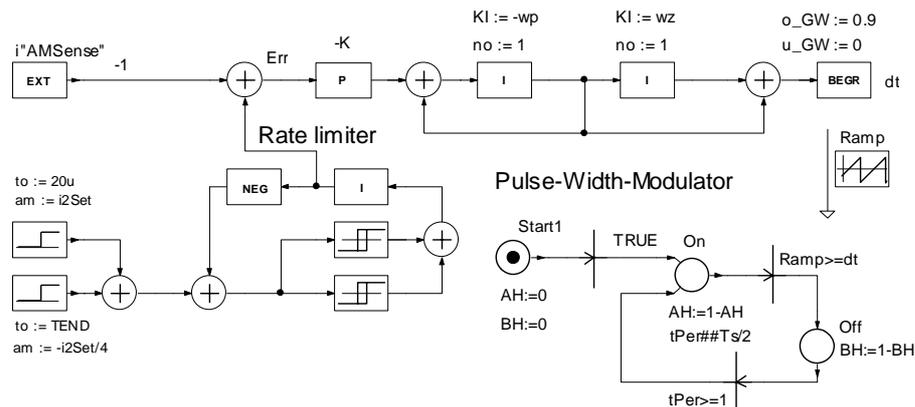


Bild 4: Modell von Stromregler und Modulator (Auszug)

resonant schaltende Topologien langwierig oder bei hoher Systemordnung nicht anwendbar. Für die Anwendung der Schaltnetzwerke als Schweißstromquellen wurde in das Werkzeug die Parametrierung einer einfachen Stromregelung integriert, die direkt mit der Dimensionierung der Schaltung sowie den Betriebsbedingungen erfolgen kann [5]. Durch ein Führungsgrößenfilter erhält man trotz der einfachen Parametrierung ein hervorragendes dynamisches und statisches Verhalten. Die Modellierung in SIMPLORER zeigt **Bild 4**, wobei der Regler mit Blockdiagrammen und der Modulator durch einen Zustandsgraphen modelliert wurden.

resonant schaltende Topologien langwierig oder bei hoher Systemordnung nicht anwendbar. Für die Anwendung der Schaltnetzwerke als Schweißstromquellen wurde in das Werkzeug die Pa-

Optimierung der magnetischen Bauteile

Zur Optimierung magnetischer Bauteile werden die elektrischen Größen im eingeschwungenen Zustand herangezogen, die Dank der Simulation schnell und genau verfügbar sind. Im Gegensatz zu sonst benutzten, idealisierten Signalverläufen ist es dadurch möglich, nicht ideales Schaltverhalten der Ventile und Hochfrequenzeffekte bei der Optimierung genauer und einfacher zu berücksichtigen. Wie in [4] ausführlich dargelegt, ist es mit Hilfe eines so-

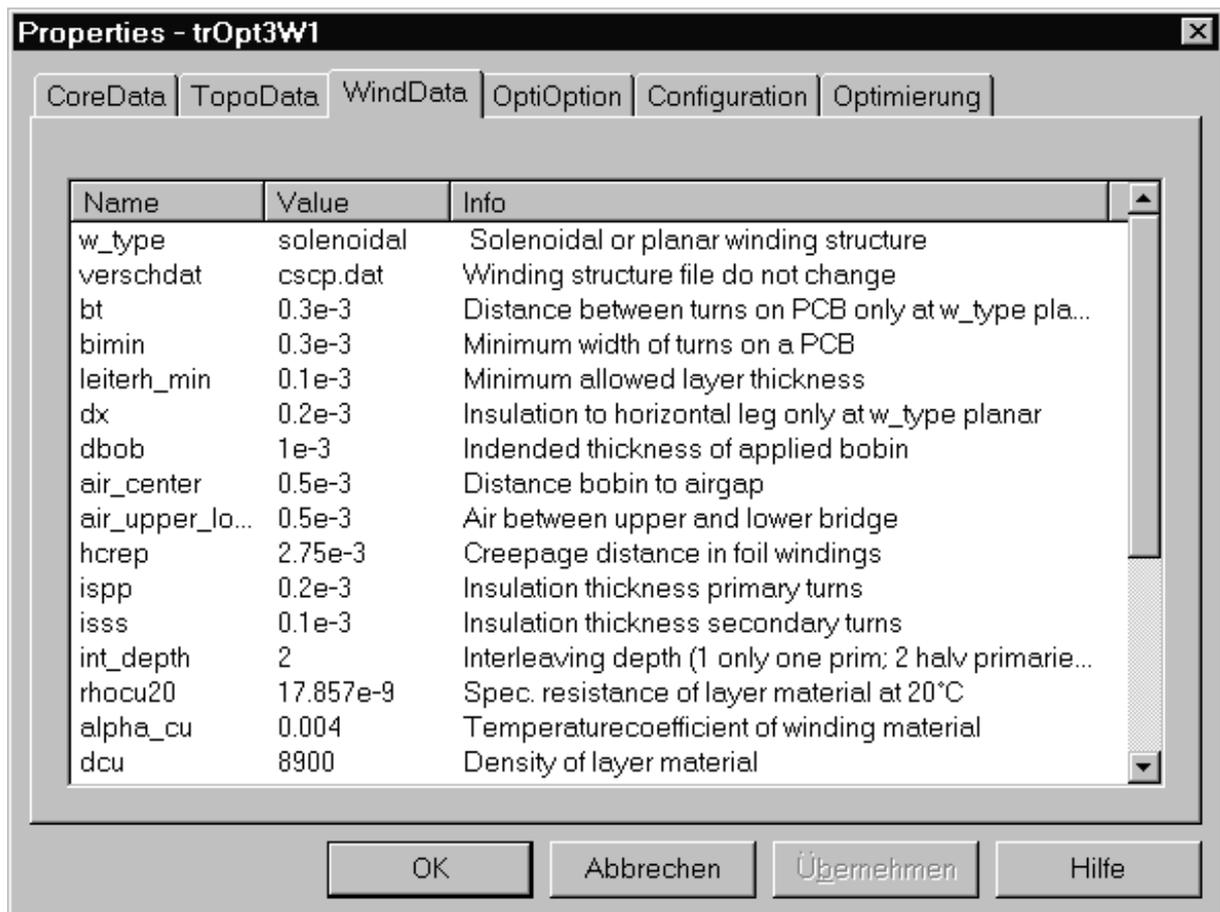


Bild 5: Dialogfenster des Magnetik-Wizards

nannten "Magnetik-Wizards" möglich (siehe **Bild 5**), zunächst Ziele, Wertebereiche und Randbedingungen der Optimierung vorzugeben, die sich auf den magnetischen Kern des Bauteils, aber auch auf die Temperaturverteilung, die Art und Lage der Wicklungen usw. beziehen. Ein vorgeschalteter Evolutions-Algorithmus und ein Nelder-Mead-Verfahren suchen daraufhin die optimalen Werte der freien Parameter, d. h. beispielsweise den optimalen Drahtdurchmesser für unterschiedliche Verschaltungen der Wicklungen, Kernformen etc.

Basierend auf einer verbesserten Modellierung magnetischer Bauteile mit röhrenförmigen Wicklungen [6] konnte gezeigt werden, dass der Optimieralgorithmus in kurzer Zeit im Allgemeinen bessere Lösungen findet als ein erfahrener Magnetik-Entwickler [4].

Thermische Modellierung

Für die Funktion einer leistungselektronischen Schaltung ist die Ableitung der Verlustleistung für die Auslegung der Kühlmittel von größter Bedeutung. Deshalb enthält das Werkzeug für jede implementierte Topologie ein korrespondierendes Modell des thermischen Systems, dessen Elemente das thermische Verhalten von leistungselektronischen Bauteilen, Kühlkörpern, Lüftern, Kühlkanälen usw. repräsentieren, wie es exemplarisch in **Bild 6** gezeigt ist. Die Verbindungslinien stellen hier keine elektrischen Verbindungen dar, sondern vielmehr thermische Kopplungen. Ströme bzw. Spannungen sind äquivalent zu ihren thermischen Gegenstücken Durchfluss und Wärmestrom bzw. Druck- und Temperaturdifferenz.

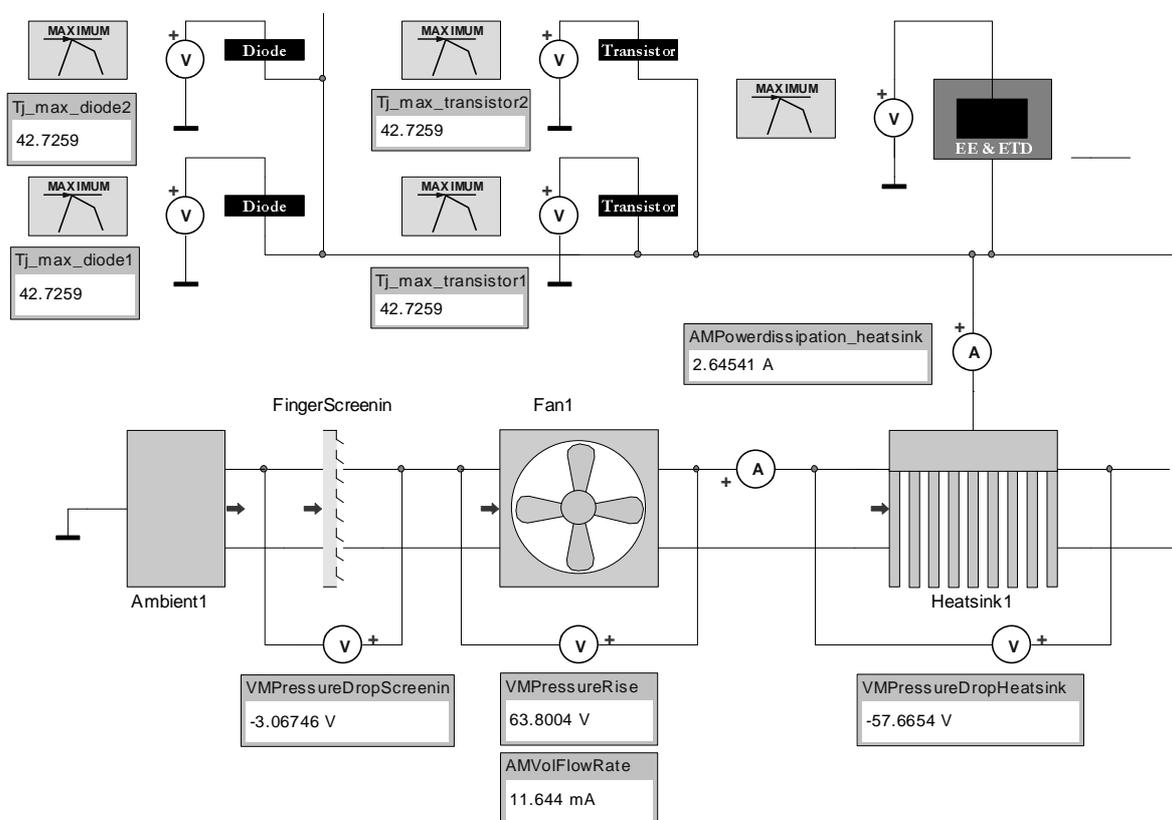


Bild 6: Beispiel eines thermischen Modells (Auszug)

Gekoppelt wird das thermische Modell an das elektrische Modell über die Verteilung der elektrischen Verlustleistung, die direkt im stationären Zustand des elektrischen Modells für jedes leistungselektronische Bauteil bestimmt wird. Diese Trennung zwischen der Simulation des elektrischen und des thermischen Modells ist sinnvoll, da die Zeitkonstanten des thermischen und des elektrischen Systems stark differieren, insbesondere, wenn man das thermische Verhalten, wie hier gesehen, nur auf Bauteilebene modelliert. Die Trennung ermöglicht das thermische System über viele Minuten oder Stunden zu simulieren, sogenannte „Hot-Spots“ zu erkennen und damit den mechanischen und thermischen Aufbau des Schaltnetzteils zu optimieren. Messungen an Prototypen zur Verifikation der Modelle sind in Vorbereitung.

Stand der Arbeiten

Bis heute sind insgesamt 14 Topologien implementiert, d. h. sie stehen dem Expertensystem als mögliche Kandidaten zur Verfügung und können durch TSelect in automatisch parametrisierten Simulationsmodellen benutzt werden. Besonders weit fortgeschritten ist das Entwurfsprogramm und der Optimierer für magnetische Bauteile sowie dessen Einbindung in den Simulator SIMPLORER. Die Modelle des thermischen Systems sind funktionsfähig und wurden messtechnisch verifiziert, wohingegen die Kopplung des elektrischen Modells mit dem thermischen Modell noch in Arbeit ist.

Danksagung

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

Literatur

- [1] SIMEC GmbH; *Reference Manual to the simulator system SIMPLORER*, Chemnitz, Feb. 1999
- [2] K. Shenai; Made-to-order power electronics, *IEEE Spectrum*, July 2000, pp. 50-55
- [3] STB Lyndon B. Johnson Space Centre; *CLIPS User Manual*, Aug. 98, www.ghgcorp.com/clips/CLIPS.html
- [4] P. Wallmeier; N. Fröhleke; D. Hahm; H. Munding; *Integrating magnetic component design and optimization into circuit simulator SIMPLORER*, Conf. On Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2000, Nürnberg, 6/2000, S. 533-539
- [5] J. Sun; R. M. Bass; *Modeling and Practical Design Issues for Average Current Control*, IEEE Applied Power Electronic Conf. (APEC), Dallas, Texas, 1999, pp. 980-986
- [6] P. Wallmeier; *Automatisierte Optimierung von induktiven Bauelementen für Stromrichteranwendungen*, Dissertation, Universität Paderborn, 2000