

# Thermische FEM – Simulation eines planaren Wicklungsstapels für Transformatoren

Bei der Entwicklung von elektronischen Komponenten und Baugruppen ist das Wissen über das thermische Verhalten eines Bauteils von entscheidender Bedeutung für den weiteren Entwicklungsprozess. Die FEM (Finite Elemente Methode) – Simulation ist hierbei ein nützliches Werkzeug. In diesem Beitrag wird die Vorgehensweise zur Berechnung eines Temperaturfeldes in einem planaren Wicklungsstapel beschrieben. Die Ergebnisse werden anhand von Messungen verifiziert.

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/m · K]	Spezifische Wärmekapazität [J/kg · K]
Epoxidharz	1 200	0,249	1 000
FR4	1 900	0,58 in der Ebene	1 500
		0,35 senkrecht zur Ebene	
Kupfer	8 954	386	383

**Tabelle 1**  
Materialdaten

## Einleitung

In einem Transformator ergibt sich die Temperaturverteilung aus den Verlustleistungen im Kern und in den Windungen, sowie aus der Geometrie, den Material-

eigenschaften und den Umgebungsbedingungen. Die Verluste in planaren Transformatoren werden in [1] weiterführend diskutiert.

Der planare Transformator besteht aus separaten Printed Circuit Board (PCB) Stapeln für die primäre und sekundäre Wicklung. In diesem Fall besteht der Transformator aus vier primären und zwei sekundären PCB – Stapeln. In Bild 1 ist ein Schema des Aufbaus dargestellt.

Durch die einzusetzenden Werkstoffe, vor allem durch die kunststoffhaltigen Komponenten, wird eine maximale Temperaturbelastbarkeit vorgegeben. Bei der Entwicklung sowie beim späteren Einsatz darf diese Grenze nicht überschritten werden, so dass entsprechende Designoptimierungen und Entwärmungsmaßnahmen erforderlich sind. Von vornherein wurde daher eine Flüssigkeitskühlung des Transformators vorgesehen.

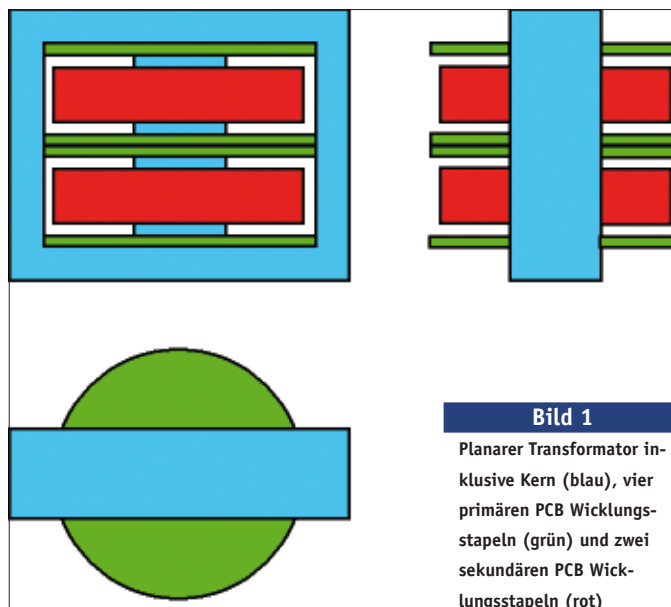
Im ersten Schritt wurde der sekundäre Wicklungsstapel dieses Aufbaues isoliert betrachtet. Ein FEM-Modell wurde generiert und die Temperaturverteilung im Wicklungsstapel sowie der Wärmeübergang an eine idealisierte Umgebung berechnet. Anschließend wurde das Ergebnis der thermischen Simulation experimentell verifiziert. Alle im Modell gemachten Annahmen und die verwendeten Werkstoffparameter konnten so überprüft werden.

## Aufbau und Materialeigenschaften

Der in Bild 2 schematisch dargestellte Stapel setzt sich wechselnd aus PCBs und Schichten zur elektrischen Isolation zusammen. Das PCB-Trägermaterial sowie das Isolationsmaterial ist FR4. Auf jedem PCB befindet sich als Leiter jeweils beidseitig eine Kupferspirale. Diese Kupferspiralen haben eine Dicke von 150 µm und sind ca. 1 mm breit. Die PCB-Lagen und die Isolationschichten sind durch einen Epoxidharz miteinander verbunden.

In der Tabelle 1 sind die Werkstoffparameter aller verwendeten Materialien im sekundären Wicklungsstapel aufgeführt. Das Material FR4 hat eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit, die in den Berechnungen berücksichtigt wurde.

Für die erwähnte Flüssigkeitskühlung kam ein Isolieröl zum Einsatz.



**Bild 1**  
Planarer Transformator inklusive Kern (blau), vier primären PCB Wicklungsstapeln (grün) und zwei sekundären PCB Wicklungsstapeln (rot)

**Autoren**

Ronald Grieger  
Dr. Bernd Ackermann  
Christoph Loef  
alle bei  
Philips Technologie GmbH Forschungslaboratorien  
Engineering & Technology  
Weißhausstraße 2  
52066 Aachen  
Tel.: 02 41/6 00 32 23  
Fax: 02 41/6 00 34 65  
E-Mail: ronald.grieger@philips.com  
www.philips.com

Kontakt zu Comsol:  
FEMLAB GmbH  
Berliner Strasse 4  
37073 Göttingen  
Tel.: 05 51/99721-0  
Fax: 05 51/99721-29  
E-Mail: info@femlab.de  
www.femlab.de  
www.comsol.com

Die für die Berechnung des Wärmeübergangs relevanten Stoffdaten des Kühlmediums sind die Prandtl-Zahl, die kinematische Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit und der Ausdehnungskoeffizient. Ein entsprechendes Datenblatt mit den temperaturabhängigen Werten stand für die Berechnungen zur Verfügung [2].

### Berechnungen

In Bild 4 ist das Ergebnis der thermischen Simulation des sekundären Wicklungsstapels zu sehen. Eine signifikante Abhängigkeit der Temperaturverteilung von der Spiralform des Kupferleiters konnte durch vorangegangene Berechnungen ausgeschlossen werden, so dass für die Simulation eines kompletten Wicklungsstapels eine 2D, axial-symmetrische Berechnung durchgeführt wurde.

Die Simulation wurde für den Fall durchgeführt, dass sich der Wicklungsstapel senkrecht, wie in Bild 4 dargestellt, in einem Ölbad befindet.

Der Wärmeübergang durch natürliche Konvektion an das Isolieröl trifft für den linken, rechten und den unteren Rand zu. Der obere Rand bzw. die innere Zylindermantelfläche ist thermisch isoliert. Die Wärmeübergangskoeffizienten für den Wärmetransport an das Isolieröl wurden aus einem iterativen Prozess zwischen FEM-Simulation und analytischer Berechnung ermittelt. In Bild 3 ist die Vorgehensweise zu Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten in Form eines Flußdiagrammes dargestellt. Der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  ergibt sich aus der Nusselt-Zahl  $Nu$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Öls und der Anströmlänge  $l$ .

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (1)$$

Für die Simulation sind zwei Wärmeübergangskoeffizienten notwendig, zum Einen  $h_1$  für die im Ölbad senkrecht stehenden Seitenwände und zum Anderen  $h_2$  für die horizontal liegende Zylindermantelfläche des Wicklungsstapels. Die

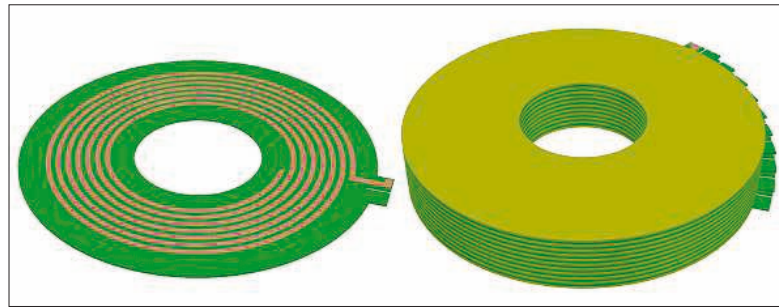


Bild 2

Aufbau des sekundären Wicklungsstapels (rechts) Er besteht wechselnd aus PCBs (grün) und Schichten zur elektrischen Isolation (gelb). Links ist ein PCB mit Kupferspirale schematisch dargestellt

entsprechenden mittleren Nusseltzahlen wurden nach [3] berechnet.

$$Nu_1 = \left( 0,825 + 0,387 \cdot (Ra \cdot f_1(Pr))^{1/6} \right)^2 \quad (2)$$

$$Nu_2 = \left( 0,752 + 0,387 \cdot (Ra \cdot f_2(Pr))^{1/6} \right)^2 \quad (3)$$

$$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{16} \right]^{1/9} \quad (4)$$

$$f_2(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{16} \right]^{1/9} \quad (5)$$

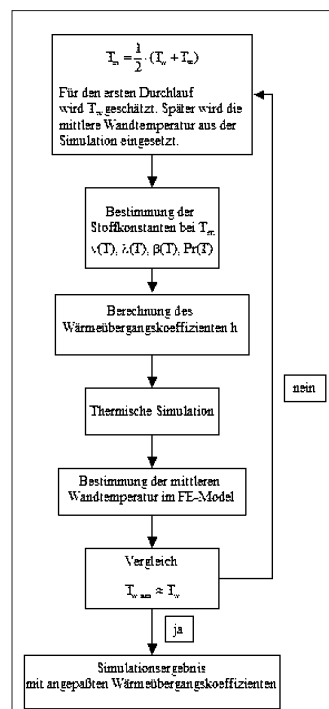


Bild 3

Vorgehensweise zur Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten für das FEM-Modell

Die Gleichungen beschreiben die Nusseltzahlen für freie Konvektion an vertikalen Flächen und horizontalen Zylindern. Die Rayleigh-Zahl  $Ra$  ist das Produkt aus der Grashof-Zahl  $Gr$  und der Prandtl-Zahl  $Pr$ .

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (7)$$

Die Simulation wurde mit dem FEM-Programm Comsol Multiphysics Ver. 3.2 (Vertrieb FEMLAB GmbH) durchgeführt.

### Ergebnisse und experimentelle Verifikation

Das in Bild 4 dargestellte Simulationsergebnis zeigt die stationäre Temperaturverteilung im sekundären Wicklungsstapel. Für das hier vorgestellte Resultat wurde eine Verlustleistung von 10 W im gesamten Leitervolumen eingesetzt. Mit den oben beschriebenen Randbedingungen ergibt sich im Simulationsergebnis eine maximale Temperatur von 43°C. Der relativ hohe Unterschied zwischen der maximalen Temperatur und der Randtemperatur resultiert aus der geringen Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Kunststoffe.

Um eine Aussage über die Genauigkeit einer solchen Berechnung bei der beschriebenen Vorgehensweise machen zu können, folgte eine experimentelle Verifikation.

Für diesen Versuch wurde ein Wicklungsstapel (Bild 2) aufgebaut, in den mehrere Thermolemente eingebaut wurden. Anschließend wurden bei gleicher Verlustleistung und identischen Umgebungsbedingungen die Temperaturen bis zum sta-

tionären Zustand aufgezeichnet.

Der Vergleich zwischen den gemessenen Endtemperaturen und den entsprechenden Profilen aus der FEM-Simulation ist in Bild 5 dargestellt.

Die unteren beiden Grafiken in Bild 5 zeigen die relative Abweichung der FEM-Simulation an den Messstellen. Als maximale Abweichung ergibt sich dabei ein Wert von 5%, sodass die beschriebene Vorgehensweise sowie die verwendeten Werkstoffparameter als hinreichend genau angesehen werden können.

### Zusammenfassung und Ausblick

Entscheidend für ein gutes Simulationsergebnis ist die Annahme der richtigen Stoffparameter und Randbedingungen. Durch die experimentelle Verifikation konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte

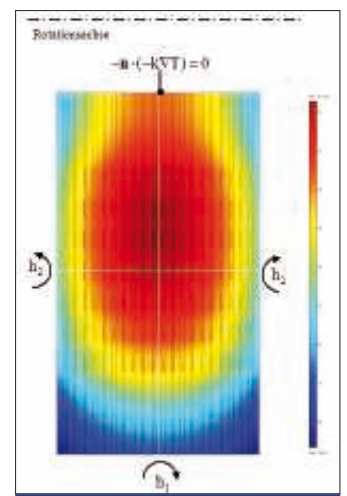
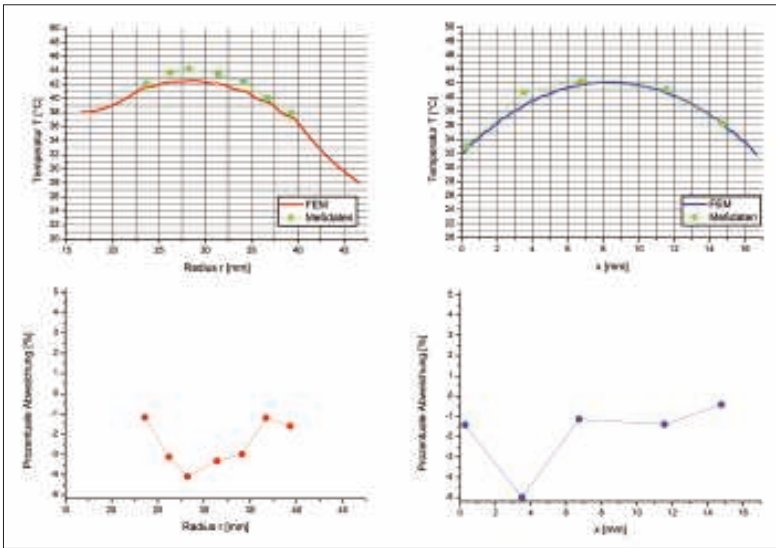


Bild 4

Temperaturfeld im sekundären Wicklungsstapel. Zusätzlich sind die Randbedingungen eingetragen. Die weißen Linien markieren die Temperaturprofile für den Vergleich zwischen Simulation und Experiment (vgl. Bild 5)



**Bild 5**

Vergleich zwischen FEM-Simulation und Messdaten.

Im linken, oberen Diagramm ist das radiale Temperaturprofil dargestellt

Im rechten, oberen Diagramm ist das axiale Temperaturprofil dargestellt

FEM-Modell ein hinreichend genaues Ergebnis berechnet.

Die für den Wärmeübergang an das Kühlmedium notwendigen Wärmeübergangskoeffizienten wurden durch Iteration zwischen Simula-

tion und analytischer Berechnung bestimmt. Auf eine aufwendigere Kopplung mit einer Strömungssimulation konnte so verzichtet werden.

Im weiteren Verlauf der Unter-

suchungen sind die Berechnung von Temperaturfeldern für ähnliche Spulendesigns, nach der beschriebenen Vorgehensweise, sowie die 3D Simulation des gesamten Transformators geplant.

Durch den Einsatz der FEM-Simulation im Entwicklungsprozess lassen sich die eher aufwendigen Experimente auf die Durchführung von Verifikationsmessungen reduzieren.

**Literatur**

[1] Ackermann, B., Lewalter, A.: Two-dimensional Calculation of Winding Losses in Planar Magnetic Components, Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, October 2001, Bali, Indonesia, S. 674-679  
 [2] Shell AG: Datenblatt Shell Diala Öl G/GX  
 [3] Verein Deutscher Ingenieure: VDI – Wärmeatlas, 8. Auflage, Springer, 1997