

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 92 (2001)

Heft: 19

Artikel: Thermische Simulation

Autor: Kiser, Andy / Stössel, Zeno

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855754>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Thermische Simulation

Thermisches Management zur Reduktion von Temperaturen und Temperaturzyklen in elektronischen Geräten und Baugruppen

Kostspielige und zeitaufwändige Redesigns bei Prototypen lassen sich weit gehend vermeiden, wenn schon in frühen Projektphasen mit Hilfe von Designmethoden und Simulationen mögliche thermische Schwachstellen erkannt, durch zweckmässiges Design abgefangen und durch weitere Simulationen getestet werden. Dadurch können Produkte schneller auf den Markt gebracht werden. Dieses Vorgehen wird im folgenden Artikel begründet und an Beispielen aus der industriellen Praxis erläutert.

In der Industrie verwendete elektronische Baugruppen müssen immer kleiner, schneller, zuverlässiger werden und sollen zudem stets mehr Funktionalitäten aufweisen. Dieser Trend hat jedoch zunehmend mehr Verlustleistung pro Volumen zur Folge, was einen starken Einfluss auf die Temperaturen der einzelnen Baugruppe hat.

Auch die Fortschritte bei Strom sparenden Schaltungen haben einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit, denn Stromsparkonzepte, bei denen ganze Baugruppen

Andy Kiser, Zeno Stössel

ein- und ausgeschaltet oder deren Takt-raten anpasst werden, verursachen – je nach Auslastung – eine markante Zunahme von Temperaturzyklen.

Neuentwicklungen müssen zudem immer schneller und zu immer tieferen Kosten gefertigt werden können. Unzulänglichkeiten im Design, die erst in einer späten Projektphase entdeckt werden, haben grosse Zeitverzögerung zur Folge und sind daher äusserst kostspielig.

Aus diesem Grunde gewinnt das thermische Management zunehmend an Bedeutung, denn die Prävention von auf thermische Probleme zurückzuführenden Redesigns ist eine Strategie, die sich schnell bezahlt macht [1, 2].

Thermisches Management

Erhöhte Temperaturen und Temperaturzyklen in elektronischen Baugruppen stehen im Zusammenhang mit deren

Funktion, deren Sicherheit oder deren Zuverlässigkeit. Aus diesem Grunde muss die Temperatur des Gesamtsystems wie auch einzelner Komponenten in der Entwicklung bestimmt und eingeplant werden.

Funktion

Viele elektrische Parameter wie etwa die Taktfrequenz oder die Offsetspannung sind temperaturabhängig, wodurch sich der Arbeitspunkt der Schaltung verschiebt. Diese Verschiebung muss vom Entwickler berücksichtigt werden, damit die Schaltung unter allen Umgebungsbedingungen einwandfrei funktioniert.

Sicherheit

Teile, die berührt werden können, dürfen gesetzlich vorgeschriebene Maximaltemperaturen nicht überschreiten.

Zuverlässigkeit

Die meisten Defektmechanismen sind abhängig von Temperatur, Temperaturzyklen und Temperaturgradienten. Dazu zwei Beispiele¹:

- Eine Schaltung mit 2 NF Bipolartransistoren und 6 Widerständen hat bei 55 °C eine Ausfallrate von 0,18% pro Jahr, d.h. von 428 Schaltungen fällt eine aus. Bei einer Temperatur von 80 °C steigt die Ausfallrate auf 0,28%, womit im selben Zeitraum bereits eine von 352 Schaltungen ausfällt.
- Bei einer integrierten Schaltung verzehnfacht sich die Ausfallrate falls die Chip-Temperatur von 55 °C auf 85 °C erhöht wird.

Technologische und physikalische Aspekte

Die Vermischung von Kunststoffen, Silizium und Metallen mit ihren unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten generieren für die einzelnen Bauteile hohen mechanischen Stress: Die modernen Gehäuseformen für ICs und passive Elemente verzichten aus Platzgründen oft auf federnde Elemente, die die unterschiedlichen Wärmedehnungen auffangen könnten.

So verursachen beispielsweise Übergänge von angelöteten Bauteilen mit Beinen, die mechanisch federnd sind und somit thermische Ausdehnungen ausgleichen können, weniger mechanischen Stress als Bauteile ohne Beine – wie etwa Lotkugeln (Bilder 1 und 2).

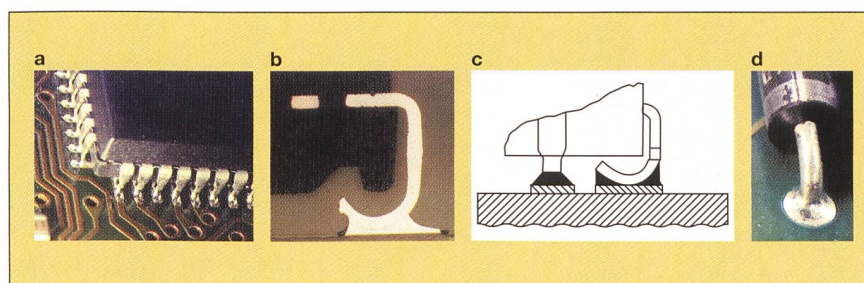


Bild 1 Mechanische Federung zum Ausgleich der thermischen Ausdehnung

Mechanische Spannungen, welche durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen des Gehäuses und der Leiterplatte entstehen, werden federnd über den Anschluss (J-Lead und Drahtbogen) aufgenommen. Der mechanische Stress ist klein.

- a: Integrierte Schaltung in einem PLCC 68 Package mit J-Lead Anschlüssen
 b: J-Lead Anschluss im Querschliff
 c: Skizze eines J-Lead Anschlusses
 d: Bedrahtetes Bauelement (Diode)

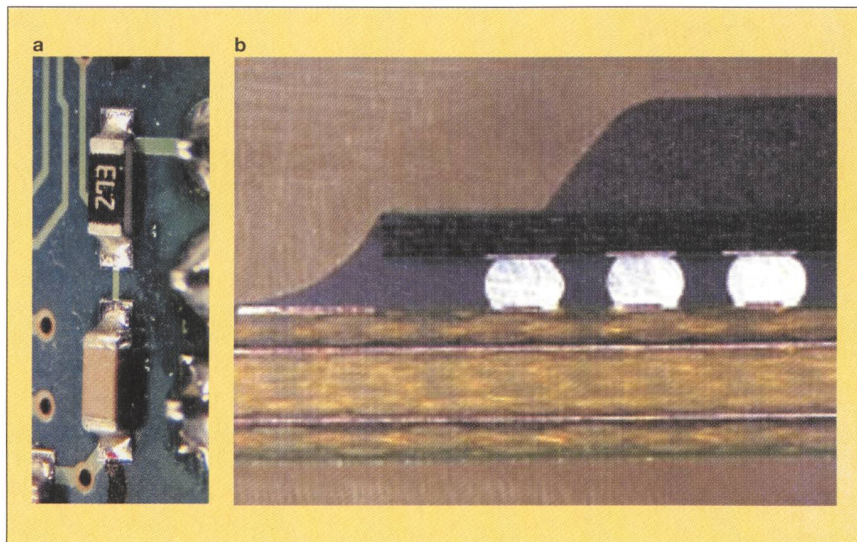


Bild 2 Starre Verbindung bedeutet hohen Stress bei SMD-Technologie

Durch die starre Verbindung ohne federnde Elemente, werden mechanische Spannungen, welche durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen entstehen, direkt von den Gehäusen, dem Substrat und der Lötverbindung aufgenommen. Der mechanische Stress ist gross.

- a: SMD Bauteile aufgelötet
- b: Schnittbild durch ein BGA-Gehäuse

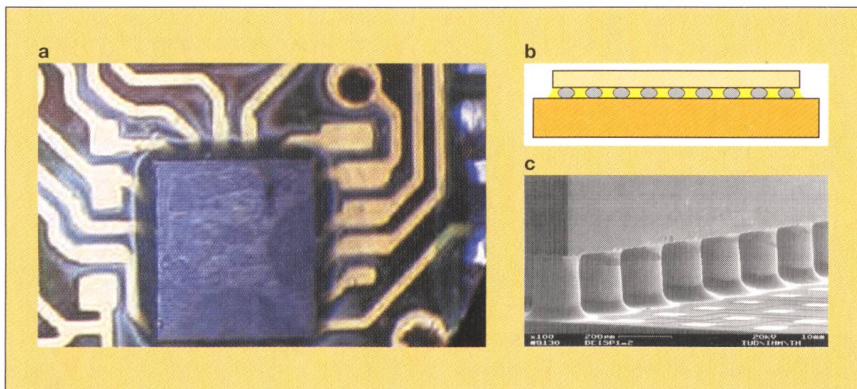


Bild 3 Starre Verbindung bedeutet hohen Stress bei der Flip-Chip-Technologie

- a: Nackter Halbleiterchip «kopfüber» direkt auf die Leiterplatte gelötet (Flip-Chip) und mit Lack (Underfill) zwischen Chip, Lötugeln und Leiterplatte verstärkt
- b: Schematische Darstellung eines Flip-Chip mit Underfill
- c: Vergrösserte Aufnahme eines aufgelöteten Flip-Chip ohne Underfill. Die mechanische Spannung, welche durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen entsteht, wird über den harten Lack und den Lötugeln auf den Chip und auf die Leiterplatte (oder Keramiksubstrat) verteilt. Der mechanische Stress ist gross.

Bereits vor über 20 Jahren wurde angekündigt, ICs mit der so genannten Flip-Chip-Methode (FC) zu montieren. Dabei wird das Silizium nicht in ein Gehäuse verpackt, sondern direkt auf der aktiven Oberseite mit Lotkugeln versehen und dann kopfüber auf die Leiterplatte verlötet.

Bisher scheiterte diese Technik an der ungenügenden Zuverlässigkeit. Die Lötverbindungen wurden durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen von Silizium und Leiterplatte zu stark belastet und dadurch zerstört. Erst dank dem Vergrössern der Lötstellen mit sogenanntem Underfill² ist es heute möglich, die Flip-

Chip-Technik zuverlässig einzusetzen (Bild 3). Trotzdem bleibt das Verfahren aufwändig und wird erst für Massenprodukte wie Mobiltelefone eingesetzt.

Thermische Aspekte lange vernachlässigt

Designmethoden sind in der mechanischen und elektronischen Konstruktion etabliert und werden laufend angewendet. Thermische Aspekte hingegen wurden lange erst dann berücksichtigt, wenn beim Prototypen Probleme auftraten.

In den letzten Jahren hat sich die Situation allerdings geändert: Der gesteigerte Kosten- und Zeitdruck hat dazu geführt,

dass sich der Ingenieur kaum mehr erlauben darf, bedeutende Fehler erst im Prototypenstadium zu erkennen. Er muss allen relevanten Aspekten – auch den thermischen – frühzeitig Rechnung tragen.

Warum thermische Simulation

Der Anspruch, nur soviel Qualität wie nötig zu bieten und Überdimensionierung wo immer möglich zu vermeiden, stellt bewährte Designregeln in Frage, da diese grosse Unsicherheiten aufweisen, die mit der Komplexität der Systeme noch ansteigen. Beim Versuch, ans noch vertretbare Limit zu gehen, genügen einfache Modelle mit thermischen Widerständen nicht mehr: genauere Methoden sind gesucht. Gerade die modernen Gehäuseformen führen einen wesentlichen Teil der Wärme nicht an die Luft ab, sondern über die Anschlüsse an die Leiterplatte. Damit wird der Wärmewiderstand zu einem Parameter, der vom Lageraufbau und sogar vom Layout der Leiterplatte abhängig ist. Der thermische Widerstand zur Umgebung, der in Datenblättern angegeben wird, gilt nur für eine ganz bestimmte Situation und vernachlässigt den Einfluss der Leiterplatte genauso wie den Einfluss eines Lüfters oder heisser benachbarter Bauelemente.

Für verschiedene Aufgaben – wie etwa das Zeichnen von Schemata, das Platzieren von Komponenten, die elektronische Simulation, das Leiterplattendesign oder das Computer Aided Manufacturing (CAM) – liegen raffinierte und technisch ausgeklügelte Softwarewerkzeuge vor, und die Interfaces zwischen diesen Softwarewerkzeugen werden ständig besser. Aber auch für das thermische Management gibt es heute gute und anwenderfreundliche Werkzeuge. An der Hochschule für Technik und Architektur wird das Softwarewerkzeug Flotherm eingesetzt, das mit seiner grafischen Oberfläche einfach zu bedienen ist und mit seinen leistungsstarken Berechnungsalgorithmen schnell brauchbare Resultate liefert. Der Ingenieur kommt zwar nicht darum herum, die Physik der Wärmeleitung, Luftströmung und der eingesetzten Materialien auf der einen Seite und Effekte numerischer Berechnung und Gitterbildung auf der anderen Seite zu verstehen, doch bietet das Werkzeug grosse Hilfestellungen und praktische Einstellungsmöglichkeiten.

Thermische Simulation bietet verschiedene Vorteile

Neben der reinen Ermittlung von Temperaturen bietet die thermische Simu-

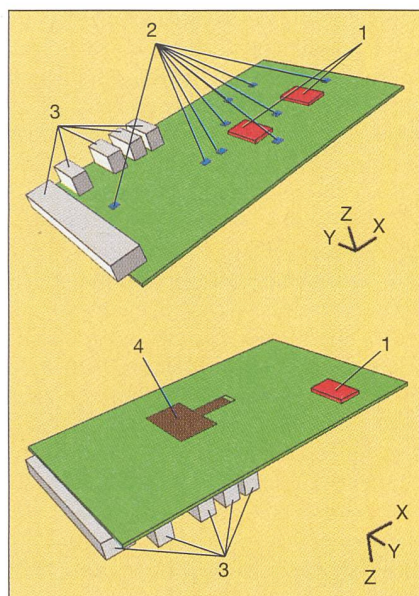


Bild 4 Demonstrator-Leiterplatte

1: BGA (IC₁ und IC₂ auf der Oberseite, IC₃ auf der Unterseite); 2: Temperatursonden; 3: Stecker; 4: Kühlfläche

lation auch weiter gehende Resultate, die man in der Praxis nur mit hohem Aufwand ermitteln kann: Die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse zeigt die Temperaturverteilung sowie die Luftströmungen in beliebigen Ebenen. Die Analyse dieser Bilder führt zu einem besseren Verständnis der Vorgänge und erlaubt es, wenn nötig gezielte Verbesserungsmaßnahmen zu ergreifen.

Ebenfalls nicht zu vernachlässigen sind die Vorteile auf nicht-technischer Seite. Die Resultate der Simulation sind Bilder. Damit lassen sich thermische Probleme und Lösungen viel einfacher erklären als mit einigen punktuellen Temperaturwerten. Das kann für eine Präsentation bei der Geschäftsleitung genauso hilfreich sein wie als unterstützende Dokumentation für eine externe Abnahmeprüfung.

Realitätsnahe Modellierung

Bei der Simulation werden die geometrischen (3-dimensionalen) und physikalischen Eigenschaften der Baugruppe wie etwa die Wärmeströme oder die natürliche und die erzwungene Konvektion korrekt berücksichtigt. Dabei ist zu beachten, dass aus Komplexitätsgründen die Baugruppen sinnvollerweise in einem vereinfachten Modell abstrahiert werden, da die Modelle sonst zu gross und zu rechenintensiv werden. Die Praxis zeigt auch, dass in der Regel nie alle Daten zu den Materialien, zu den Verlustleistungen und zu den geometrischen Details bekannt sind.

Neben der Abschätzung der thermischen Gegebenheit einer geplanten Konstruktion bietet die Simulation einen virtuellen Arbeitsplatz an, an dem ausprobiert werden kann, welche thermischen Einflüsse auf das Design durch konstruktive Änderungen hervorgerufen werden. Dadurch lassen sich langwierige und kostspielige Redesigns von Prototypen vermeiden.

Grenzen der Simulation

Ein Modell ist eine Beschreibung der Wirklichkeit und nur so gut, wie es diese beschreibt. Um 3-dimensionale Wärmeflüsse komplexer Baugruppen berechnen zu können, werden FE-Werkzeuge³ eingesetzt, da analytische Berechnungsmethoden schnell an ihre Grenzen stossen.

Es gibt generell folgende Limitierungen:

- Aus Gründen der Modellgrösse und der Rechenzeit muss die Geometrie der Baugruppe vereinfacht werden. Mit dem physikalischen Know-how des Designingenieurs können die relevanten Grössen – auf die es sich zu konzentrieren gilt – von den wenig relevanten aussortiert werden.
- Häufig fehlt das Wissen über geometrische Details, Material und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Baugruppen. Auch hier braucht es die Erfahrung des Designingenieurs. Es gibt viele verschiedene Materialien mit sehr ähnlichen Eigenschaften.
- Es fehlt an Wissen über die Verlustleistungen der einzelnen Baugruppen. Diese Limitierung ist nicht zu unterschätzen. Es kommt häufig vor, dass man von integrierten Schaltkreisen, z.B. von Prozessoren, nur die maximale Verlustleistung kennt und nicht die mittlere bzw. die in den einzelnen Betriebszuständen benötigte Leistungen. Hier müssen Messungen gemacht oder vernünftige Annahmen getroffen werden.
- Bei FE-Werkzeugen ist die Feinheit des Gitters aus Gründen der Modellgrösse und der Rechenzeit beschränkt. Das Gleiche gilt für die zu Grunde liegenden Modelle der physikalischen Effekte, wie z.B. die Konvektion (laminare oder turbulente Strömung). Heutige Werkzeuge sind so ausgereift, dass sie den Entwicklungsingenieur im Bereich der Thermodynamik und der FE-Mathematik unterstützen.

Aus Sicht der Zuverlässigkeit – z.B. wenn es darum geht, Lebensdauern bzw. Ausfallmechanismen abzuschätzen – sollten die Temperaturen relativ genau

auf $\pm 3^\circ\text{K}$ simuliert werden können. Leider ist eine solche Genauigkeit meist nicht mit vernünftigem Aufwand zu erreichen.

Für viele Anwendungen hingegen ist die Kenntnis der genauen absoluten Temperaturen nicht so wichtig. Häufiger will der Entwicklungsingenieur wissen, welche positiven bzw. negativen Effekte eine konstruktive Massnahme nach sich zieht. Aussagen wie: *Die Änderung X hat zur Folge, dass der Prozessor um 10°K kühler ist und somit die ...*, sind in der Regel genügend.

Praxisbeispiele

Demonstratorleiterplatte

Beschreibung

Für die ersten Schritte im Bereich des thermischen Managements und der Simulation wurde eine einfache Demonstratorleiterplatte erstellt (Bild 4). Sie ermöglicht es, den Einfluss verschiedener thermischer Massnahmen zu messen und die Genauigkeit der Simulation zu überprüfen.

Dafür wurden drei ICs im BGA-Gehäuse⁴ im Abstand von 35 mm auf eine doppelseitige Leiterplatte gelötet – IC₁ und IC₂ auf der Oberseite, IC₃ auf der Unterseite. IC₁ wurde zudem an eine Kupferfläche von 10 cm² angeschlossen.

Resultate

Bei vertikaler Aufstellung der Leiterplatte erwärmen sich IC₂ und IC₃ auf 82°C und 78°C. Das mit der Kühlfläche versehene IC₁ wird 70°C warm. Das Layout beeinflusst die Erwärmung um bis zu 20%. Wird die Leiterplatte hori-

Massnahmen	$\Delta T_{\text{Prozessor}}$ [°C]
Horizontale Lage (Referenz)	0
Thermischer Leiter zum Gehäuse	-46
Ventilator über Pentium	-24
Luftschlitz (vertikal)	-24
Vertikale Lage	-16
Ventilator Richtung Mainboard	-7
Gut leitendes Mainboard	-6
Grösserer Abstand zwischen den Leiterplatten	-5
Luftschlitz (horizontal)	-5
Flacher Kühlkörper	+2
Flachbandkabel entfernt	+10
Schlecht leitendes Mainboard	+33

Tabelle 1 Änderung der Prozessortemperatur des Mini-PC durch verschiedene Massnahmen

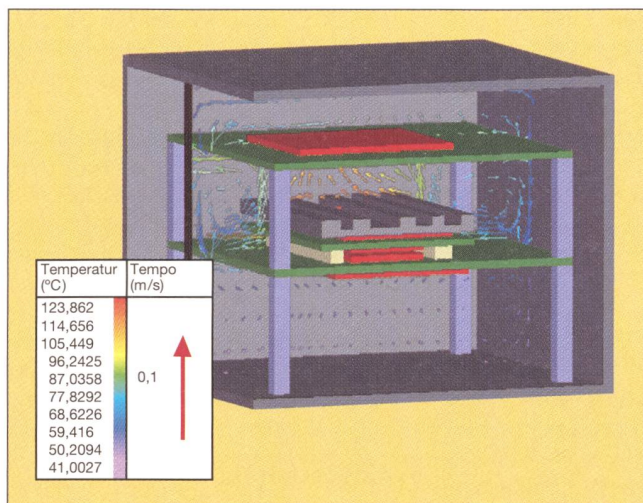


Bild 5 Simulationsanordnung
PC mit Mainboard (unten), aufgestecktem Pentium-Prozessormodul inkl. Kühlblech und Peripherieboard (oben) Gehäuse auf zwei Seiten durchsichtig

zontal aufgestellt, erwärmt sich z.B. IC₂ um weitere 10% auf 90°C.

Die Simulation konnten die Chip-Temperaturen auf ca. 7°C genau voraussagen. Vor allem aber war der Einfluss der Kühlfläche und anderer Massnahmen deutlich zu sehen. Die Simulation kann also sehr gut dazu dienen, ein Design aus thermischer Sicht zu optimieren.

Mini-PC

Beschreibung

Ein Produzent vertreibt miniaturisierte Pentium-PC in geschlossenen Gehäusen von etwa 10×10×10 cm. Mit zunehmender Geschwindigkeit der neuen Prozessorgenerationen benötigen die Geräte immer höhere Leistungen, wodurch die thermischen Aspekte immer wichtiger werden. In einer Studie sollte mittels Simulation aufgezeigt werden, wie sich das thermische Verhalten durch konstruktive Massnahmen und Einbauvorschriften verbessern lässt, damit auch zukünftige Prozessorgenerationen mit noch höherer Leistung zuverlässig arbeiten.

Für diese Simulation wurde weniger Wert auf die absoluten Temperaturen gelegt, sondern vor allem darauf, wie sich Veränderungen auswirken. Ausgehend von einem Grundmodell wurden jeweils einzelne Massnahmen ergriffen und deren Einfluss auf die Temperatur simuliert. Die genauere Auswertung der Bilder erlaubte es, das Zusammenspiel verschiedener Massnahmen abzuschätzen, ohne dass jede Variante durchgespielt werden musste (Bild 5).

Resultate

Es konnte gezeigt werden, dass die Temperatur des Prozessors – der einerseits das empfindlichste Element ist, aber andererseits auch den grössten Teil der Wärme erzeugt – durch verschiedene Massnahmen deutlich gesenkt werden

kann. Das Kippen des Gehäuses, so dass die Leiterplatten vertikal liegen, entlastet den Prozessor bereits um 16°C (Tab. I). Auch durch Luftschlitze oder einen Ventilator im geschlossenen Gehäuse kann die Temperatur stark gesenkt werden. Den grössten Effekt erreicht man, wenn man den Prozessor, beispielsweise über ein Aluprofil an das Computergehäuse koppelt.

Leistungschalter

Beschreibung

Eine neue Generation eines elektronisch gesteuerten Leistungsschalters mit Relaiskontakten soll sehr kompakt und kostengünstig aufgebaut werden. Die Speisespannung für die Elektronik und die Relaisspule wird direkt aus dem Netz erzeugt, ohne Trafo und ohne DC/DC-Wandler. Die Verlustleistung liegt bei 5W und wird hauptsächlich über zwei Leistungswiderständen verheizt. Die

Schaltung ist auf zwei kleinen Leiterplatten aufgebaut und in einem Kunststoffgehäuse zusammen mit der Relaisspule und den Relaiskontakten verpackt. Das Kunststoffgehäuse beispielsweise erträgt Temperaturen von maximal 120°C. Die Umgebungstemperatur kann bis auf 75°C ansteigen. Wie sind die Leiterplatten und das Gehäuse auszulegen?

Die Geometrie vom Gehäusevorschlag und der ersten Leiterplattenvarianten wurde übernommen und zu einem vereinfachten Modell verarbeitet. Nicht jede Facette des Gehäuses oder jeder Radius ist für die Simulation wichtig. Das gleiche gilt für die elektronischen Bauteile; nur der empfindliche IC, die beiden Leistungswiderstände, ein Kondensator, die Relaisspule, die vereinfachten Kontakte und die beiden Leiterplatten mit ihren massiven elektrischen Verbindungen wurden berücksichtigt (Bild 6).

Die Leiterplatten wurden mit ihren thermischen Eigenschaften inkl. den beidseitigen Kupferlagen berücksichtigt, und zwar so, dass zwei Regionen unterschieden werden: Eine Region mit beidseitig 100% Kupferlage und eine Region mit lediglich 10% Kupfer (ebenfalls beidseitig). Diese unterscheiden sich durch ihre horizontale und vertikale thermische Leitfähigkeit.

Resultate

Mit wenig Änderungen am ursprünglichen Design – z.B. maximaler Vergrößerung der Kupferflächen unter den beiden Leistungswiderständen und Vergrößerung des Abstandes zwischen dem oberen Widerstand und dem Kondensator – konnte die Temperatur auf ein erträgliches Mass gesenkt werden. Die Simula-

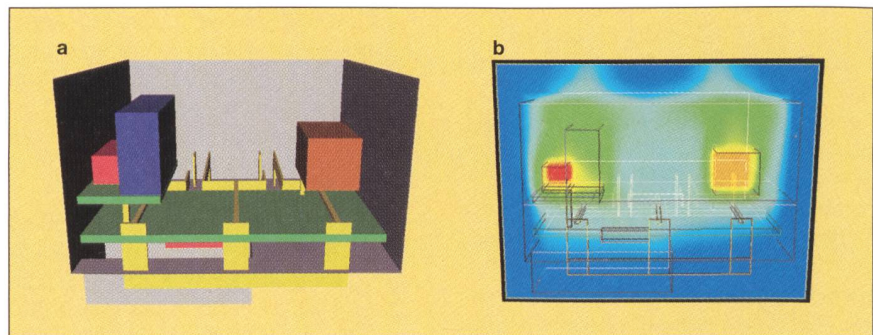


Bild 6 Thermische Simulation eines Leistungsschalters

- a: Das Gehäuse ist vorne und oben geöffnet. Die beiden Leiterplatten (grün) mit den beiden Leistungswiderständen (rot) – einer auf der oberen Leiterplatte links, der andere auf der unteren Leiterplatte unten Mitte. Der Kondensator ist blau, die Relaisspule braun eingezeichnet. Die Stecker und die Leistungsschalter (Relaiskontakte) sind gelb und das Gehäuse grau. Die integrierte Schaltung ist nicht ersichtlich: sie ist unten auf der unteren Leiterplatte. Die Unterteilung der Leiterplatten in Regionen verschiedener thermischer Leitfähigkeit wegen der Kupferbeschichtung ist ebenfalls nicht ersichtlich.
- b: Schnitt mit Sicht von vorne. Die Farben zeigen die Temperaturverteilung der verschiedenen Komponenten. Der Schnitt ist durch den oberen Widerstand, den Kondensator und das Relais gelegt. Der Widerstand wird etwa 90°C warm, der Kondensator in der linken unteren Ecke rund 70°C, die Spule etwa 75°C. Der zweite Widerstand wird auch warm, was in diesem Bild aber nicht ersichtlich ist, da die Schnittebene nicht durch diesen Widerstand geht.

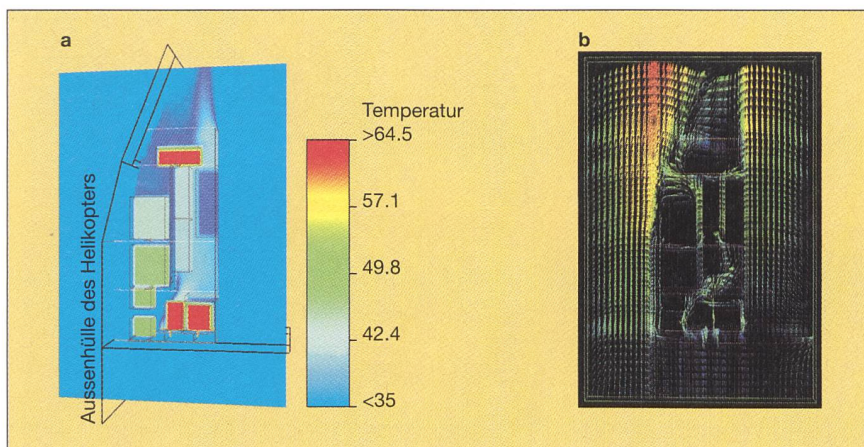


Bild 7 Temperaturverteilung und Luftströmung im Schaltschrank

Links: Temperaturverteilung im Schaltschrank. Rot = heiss, etwa 65 °C, blau = kalt, etwa 35 °C. Die beiden kritischen Geräte sind unten, beide «heiss». – Rechts: Luftströmung (Konvektion) im Schaltschrank

tion zeigte, dass keines der Bauteile seine maximale Temperatur überschreitet. Dies wurde mit Messungen bestätigt.

Approbation eines Elektroschranks

Ausgangslage

In einen mit Elektronik gefüllten Elektroschrank eines Super Puma Helikopters⁵ soll ein neues System eingebaut werden, das 125 W zusätzliche Verlustleistung erzeugt. Auf Grund der strengen Vorschriften muss der Nachweis erbracht werden, dass die Funktion der anderen Systeme nicht beeinträchtigt wird.

Dieser Nachweis ist aufwändig und teuer. Um nicht erst bei der ersten Messung zu merken, dass der Einfluss der Temperaturerhöhung auf die anderen Systeme zu gross ist und dass konstruktive Änderungen nötig sind, wurde eine Simulation durchgeführt, welche den Temperatureinfluss des neuen Systems auf die bereits bestehenden Systeme aufzeigte. Die Simulation soll auch – neben den Messungen – den Approbationsbehörden vorgelegt und für die Erteilung der Freigabe eingesetzt werden.

Der betrachtete Elektroschrank besteht aus vier Ebenen, einer vertikalen Zwischenwand und wird links, rechts vorne und hinten mit Blechwänden abgeschlossen. Es sind diverse Geräte eingebaut, die über Kabelbäume elektrisch verbunden sind. In einer Seitenwand sind

Bedienelemente und Sicherungen eingelassen. Es gibt viele L-Profile, an denen Geräte und Wände angeschraubt sind. Die Komplexität, jedes einzelne Profil, jeden Stecker und jedes Kabel zu modellieren, ist gewaltig und der Aufwand nicht gerechtfertigt. Die Geometrie musste somit stark vereinfacht werden. Die Kabelbäume waren besonders schwierig, da sie nicht nur Wärme leiten, sondern auch auf die Konvektion einen grossen Einfluss haben. Dazu kommt, dass nicht alle Daten bekannt sind, da die meisten Geräte im Schaltschrank und der Schaltschrank selber nicht vom Kunden entwickelt worden ist. Ihn interessieren v.a. die thermischen Konsequenzen eines Systembaus bzw. die geschickteste Einbauanordnung. Ausserdem muss in Erfah-

rung gebracht werden, ob ggf. zusätzlich Kühlmassnahmen nötig sind.

Resultate

Die Simulation (Bild 7) zeigte, dass sich die anderen Geräte um 1 °K bis 4 °K erwärmen und somit keine weiteren konstruktiven Änderungen nötig sind. Ferner zeigte sich, dass – falls doch zusätzlich Wärme abgeführt werden muss – eine Querschnittvergrösserung zweier Montage-träger unter den beiden kritischen Geräten die Temperaturerhöhung im Wesentlichen kompensieren kann.

Erste Messresultate bestätigen die Simulation. Auf Grund dieser Resultate kann in diesem Fall auf den aufwändigen Messaufbau verzichtet werden.

Referenzen

- [1] C. J. M. Lasance: The Need for a Change in Thermal Design Philosophy. Philips Research, Electronics Cooling, Okt 1995.
- [2] J. Adams: Thermisches Management von Baugruppen. Flomerics, Schulungsunterlagen WIE (Weiterbildungsinitiative Elektronik der Fachhochschulen der Schweiz), Nachdiplomkurs 2000 der HTA Horw, www.hta.fhz.ch/fse.

Adresse der Autoren

Hochschule für Technik+Architektur, 6048 Horw: dipl. El.-Ing. HTL Andy Kiser, ackiser@hta.fhz.ch; Physiker und dipl. El.-Ing. HTL Zeno Stössel, zstoessel@hta.fhz.ch

¹ Beispiele aus den Schulungsunterlagen der Firma Quinel, Zug

² Underfill: Vergussmasse, die zwischen Chip, Lötkegeln und Leiterplatte angebracht wird

³ FE = Finites Element

⁴ BGA = Ball Grid Array (siehe dazu auch Bild 2)

⁵ Firma Ruag Aerospace

Simulation thermique

La modification de prototypes après-coup, qui coûte du temps et de l'argent, peut être évitée dans de nombreux cas si, dès les phases précoces du projet, on détecte les points faibles thermiques par des méthodes de développement et de simulation pour les éviter par une conception appropriée et les tester par d'autres simulations. Cela permet de mettre les produits plus rapidement sur le marché. Dans l'article présent, cette manière de procéder est exposée et expliquée sur la base d'exemples tirés de la pratique industrielle.



Das LAN im Haus erspart den Datenträger.

Wenn alle am Netz sind, sind alle überall. Schneller, robuster, sicherer: das sind die Qualitäten der Dätwyler-uniLAN-Systemlösungen. Da sind innovative Optofil Glasfaser- und Uninet Kupferdatenkabel, Anschluss- und Steckersysteme so perfekt aufeinander abgestimmt, dass wir zusammen mit unseren Partnern ohne Zögern Garantien geben. Rufen Sie uns an, wenn Sie garantiert à jour sein möchten.

*Dätwyler **LAN**-Systeme
Wir bringen Highspeed ins Haus.*

Dätwyler AG, Kabel+Systeme
Gotthardstrasse 31, CH-6460 Altdorf, Telefon 041-875 12 68, Fax 041-875 19 86
e-mail: cable.swiss@daetwyler.ch, internet: <http://www.daetwyler.ch>

Dätwyler