

Thermische Betrachtungen - Temperatur und Zeit -

von

Dr. Johannes Adam
ADAM Research, Deutschland

1. Einleitung

Wir präsentieren zeitabhängige Temperaturverläufe an Leiterplatten und Flachbaugruppen und teilen den Vortrag in folgende Kapitel ein:

- Innere Heizung
 - Wärmequelle in Kurzzeit
 - Aufheizung im Dauerbetrieb
 - Gepulste Wärmequelle
- Äußere Heizung
 - Feststehende, sich ändernde Wärmequelle
 - Bewegte Wärmequelle

In jeder dieser Kategorien gibt es einerseits Lehrbuchstandards und andererseits eine unendliche Vielzahl von Variationsmöglichkeiten auf Grund der Vielfalt der Layouts und der Boardparameter. Ziel des Vortrags ist es die physikalischen Phänomene in einfachster Form zusammenzufassen und vor allem die Randbedingungen (= „Umstände“) ihrer Gültigkeit hervorzuheben. Bei komplexen Situationen helfen nur numerische Simulationen weiter.

2. Wärmequellen auf dem Board

2.1. Zerfließen nach Gauß

Denkt man an die Temperaturentwicklung eines Hotspots auf einer (unendlich großen) Platte, so fällt einem vielleicht zuerst das Zerfließen einer anfänglichen, einmaligen Punktwärmequelle in Form einer Gauß'schen Glockenkurve ein. In den Lehrbüchern über Differentialgleichungen findet man als Lösung der eindimensionalen Diffusionsgleichung mit der Zeit t

$$T(x, t) = T_{\text{Umgebung}} + \frac{A}{2\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (2.1)$$

Zu Gl. (2.1) muss man wissen, dass es hierbei keine Wärmeabgabe an die Umgebung gibt. Man nennt diese Art der Randbedingung „adiabatisch“. Die Wärmequelle wird nur deswegen kälter, weil sich die Temperatur in die kalten Gebiete ausdehnt und sich dabei ausgleicht. Für die Praxis ist Gl. (2.1) nur von geringem Nutzen, weil eine Leiterplatte über lange Zeiten immer gleichzeitig Wärme über Konvektion und Strahlung verliert, was in (2.1) eben nicht enthalten ist. Sie taugt aber zur Einführung der Temperaturleitfähigkeit a (entspr. Diffusions-

konstante) $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ (m^2/s), mit der Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK), der Dichte ρ (kg/m^3) und

der spezifischen Wärmekapazität c (J/kgK). Grob geschätzt ist a für eine Leiterplatte in der Gegend von $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Abb. 1 zeigt die Glockenkurve für verschiedene Zeitpunkte t .

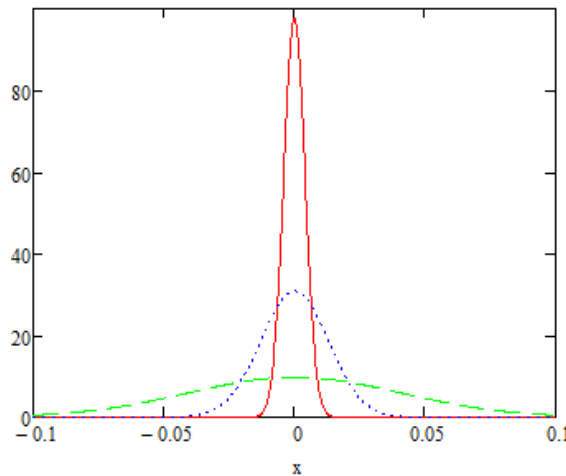


Abbildung 1: Adiabatisches Zerfließen eines Hotspots

2.2. Kurzzeitwärmequelle (Kurzschlussstrom)

Es gibt aber Wärmequellen deren Aktivität so kurz ist und wobei der Laufweg der Wärme so klein ist, dass man wirklich adiabatisch rechnen kann - und auch, weil das was nach der adiabatischen Phase passiert nicht mehr interessiert. Wir betrachten dafür einen sehr kurzen Strompuls=Kurzschlußstrom I_K und nehmen an, dass die während des Strompulses im Leiter erzeugte Wärme im Leiter selbst stecken bleibt (die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung und Konvektion wird absichtlich nicht berücksichtigt). Als weitere Nebenbedingung: wir wollen den Leiter nicht zum Schmelzen bringen.

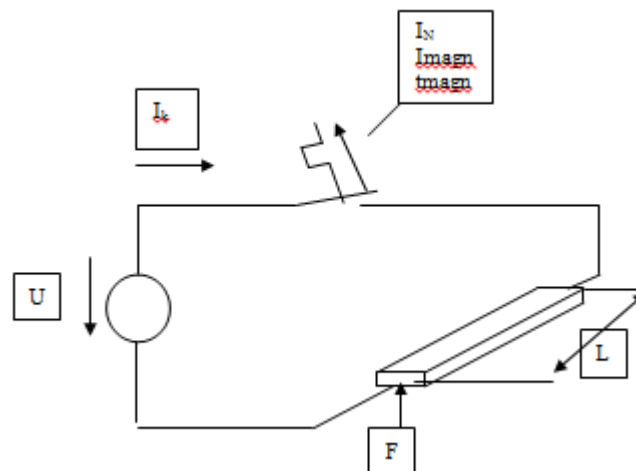


Abbildung 2: Kurzstrombelastung von Leitern [1]

Der Lösungsweg ist folgender: der Gewinn an Wärmeenergie des Leiterbahnvolumens durch den elektrischen Strom (Joule'sche Wärme) über die Zeitspanne Δt (rechte Seite Gl. 2.2) wird vollständig zur Aufheizung genau dieses Volumens verwendet (linke Seite Gl. 2.2)

$$c \cdot M \cdot \Delta T = R_{el} \cdot I_K^2 \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

Die Einheit auf beiden Seiten ist W·s=Joule. Masse $M=\rho V$ und elektrischer Widerstand R_{el} hängen von der Leitergeometrie ab. Mit der Grundformel für den elektrischen Widerstand eines geraden Leiterstücks, den Stoffwerten für Kupfer und weiteren Umformungen folgt (Details in [2]) daraus

$$\Delta T = 6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{I_K}{F(\text{mm}^2)} \right)^2 \cdot \Delta t \quad \text{bzw.} \quad \Delta t \approx 170 \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{F(\text{mm}^2)}{I_K} \right)^2 \quad (2.3)$$

Nach DIN/VDE 0298 Teil 4 ist bei beliebigen Isolierungen die max. Endtemperatur des Leiters auf $T_{\max} = 160^\circ\text{C}$ begrenzt, wenn eine Weichlötung vorliegt. Das trifft bei Leiterplatten ebenfalls zu [1]. Wenn der dauerbelastete Leiter schon eine Temperatur T_L hat, ist der erlaubte Temperaturhub $\Delta T = T_{\max} - T_L$. In Gl (2.3) eingesetzt, folgt als geschätzte maximal erlaubte Dauer des Kurzschlußstroms I_K (damit 160°C nicht überschritten werden)

$$\Delta t_K = 170 \cdot (160 - T_L) \cdot \left(\frac{F(\text{mm}^2)}{I_K} \right)^2 \quad (2.4)$$

Wenn der Leiter im Grundzustand schon sehr warm ist, wird die die Kurzschlusszeit kürzer oder I_K kleiner (sog. derating).

Zahlenbeispiel: Leiterbreite=1 mm und Lagendicke=35 μm . $F=0.035 \text{ mm}^2$. Die DC-Temperatur des Leiters sei $T_L=50^\circ\text{C}$, der Kurzschlussstrom sei $I_K=50 \text{ A} \rightarrow \Delta t_K=9 \text{ ms}$.

Wie lange gilt die adiabatische Näherung? Das ist der Fall, solange $\Delta t < \frac{1}{a}(\Delta x)^2$ ist. Was soll

man hier als Wegstrecke Δx nehmen? Wir wählen für Δx eine Prepregdicke von der Größenordnung 100 μm , weil das prepreg nicht heißer als T_{\max} werden soll. a von prepregs ist ca. $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Es ergibt sich mit diesen Zahlenwerten $\Delta t \ll 40 \text{ ms}$. Also wäre das obige Zahlenbeispiel im Gültigkeitsbereich. Was ist der Haken an dieser Schätzung? Schon geringe Lauflängen von 1 mm entziehen genug Wärme, so dass sich die Temperatur des Leiters reduziert. Je länger der Kurzschlussstrom dauert, desto mehr überschätzt Gl. (2.3 links) ΔT .

2.3. Langzeitwärmequelle (Aufheizvorgang)

2.3.1. Die Zeitkonstante

Manchmal interessiert den Baugruppenentwickler nicht so sehr der Beharrungszustand der Bauteil- oder Baugruppentemperatur, sondern der zeitliche Ablauf: zum Beispiel der Aufheizvorgang bis eine Grenztemperatur erreicht ist oder die Peakwerte in einer Pulsfolge.

Die physikalischen Anteile, die das zeitliche Verhalten bestimmen sind erst einmal die Massen und die spezifische Wärmekapazitäten im Layout (Cu- und FR4-Anteile) und der Bauteile. Das ist für kurze (adiabatische) Zeitspannen ausreichend, aber man sieht leicht ein (s. Gl. 2.2), dass für lange Zeiträume eine weitere Angabe benötigt wird, sonst würde die Temperatur unendlich lange steigen. Die Begrenzung der Temperaturanstiegs wird durch die Wärmeabgabe an die Umgebung/Luft bewirkt und durch den Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient α ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) (s. [3,4]) parametrisiert, der in Application Notes über Transienten leider gerne unterschlagen wird. Nehmen wir an, an ein und derselben Baugruppe nähmen Thermoelemente die Temperatur das eine Mal bei freier Konvektion („ruhende Luft“) und das anderes Mal mit Ventilatorbelüftung auf. Man wird feststellen, dass der Beharrungszustand mit dem Ventilator viel schneller erreicht wird als ohne (und das Temperaturniveau wird niedriger sein). In α geht zudem noch die Infrarot-Emissivität der Oberfläche ein.

So wenig wie es möglich ist die Endtemperatur eines Hotspots auf einer „richtigen“ Leiterplatte als Formel aufzuschreiben, so wenig ist es möglich, die Aufheizkurve universell anzugeben. Näherungsweise geht es aber für eine homogene flache Platte, deren Verlustleistung über die Platte gleichmäßig verteilt ist. Die Dynamik der Temperatur wird durch die Bilanz $c \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} = P - A \cdot \alpha \cdot (T(t) - T_U)$ beschrieben. Auf der linken Seite steht die Änderung der Energie im Plattenvolumen und rechts die Zufuhr durch Verlustleistung P und der Verlust durch Wärmeabgabe über die Oberfläche A an die Umgebung. Die Lösung lautet

$$T(t) = T_U + (T_f - T_U)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.5)$$

Bei Zeit $t=0$ startet die Platte mit Umgebungstemperatur T_U und erreicht asymptotisch die finale Gleichgewichtstemperatur T_f . Die Größe τ (s) nennt man Zeitkonstante. Im Energiegleichgewicht von Heizung und Kühlung ist $dT/dt=0$ woraus die Beharrungstemperatur als

$$T_f = T_U + \frac{P}{\alpha \cdot A} \quad (2.6)$$

folgt. Die Graphen in Abb. 3 zeigen die theoretischen Aufheizkurven nach Gl. (2.5) für zwei Extremfälle: eine metallisch glänzende und eine lackierte Platte von Europaformat. Die Zeitkonstante einer 2-lagigen Europlatte, lackiert und ohne Bauteile (2x35 µm Kupfer, in freier Konvektion, $\alpha \approx 12 \text{ W/m}^2\text{K}$) liegt bei etwa 90 s, wobei das FR4 zehn Mal mehr zu $M \cdot c$ beiträgt wie die Kupferlagen. Eine metallisch glänzende Platte ($\alpha \approx 6$) gibt ihre Wärme schlechter und langsamer ab (mit Zeitkonstante 180 s), da der infrarote Strahlungsanteil fast wegfällt. Der Gesamtwärmeübergangskoeffizient α taucht aber nicht nur in der Endtemperatur, sondern auch in der Zeitkonstante τ auf! Für die spezielle glatte homogene Platte ist sie einfach

$$\tau = \frac{M \cdot c}{\alpha \cdot A} \quad (2.7)$$

(man beachte, dass die Wärmeleitfähigkeit hier nicht eingeht und, dass $\rho \cdot c$ von Cu und FR4 von gleicher Größenordnung sind (s. Anhang)). Nach einer Zeitkonstante τ ist 63% der Aufheizung erreicht, nach einer weiteren Zeitspanne τ sind es 86% u.s.w. Wenn man die Formel genauer anschaut erkennt man, dass es sich um das thermische $R_{th} \cdot C_{th}$ Glied handelt ($C_{th} = M \cdot c$, $R_{th,U} = 1/(\alpha A)$), analog zum elektrischen RC. Für richtige bestückte Leiterplatten kommt man um eine eine Messung oder eine numerische 3-dimensionale und zeitliche Simulation [5,8] nicht herum.

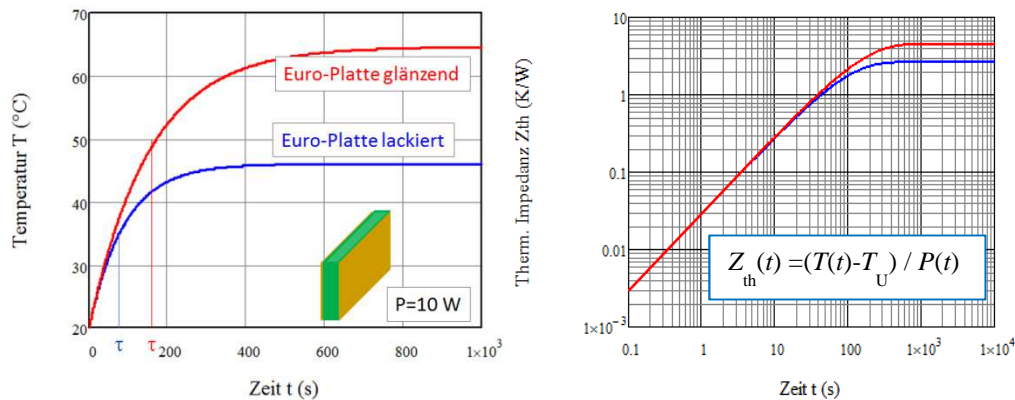


Abbildung 3: Aufheizkurven einer glatten lackierten und metallisch blanken Euroformat-Platte (links) und deren thermische Impedanzkurven (rechts)

2.3.2 Thermische Impedanz

Der übliche stationäre thermische Widerstand R_{th} (K/W) zur Umgebung ist definiert als Temperaturdifferenz geteilt durch die Verlustleistung (z.B. $R_{th,U} \approx 1/(\alpha \cdot A)$). Ähnlich definiert man eine „thermische Impedanz“ $Z_{th}(t) = (T(t) - T_U) / P(t)$ (K/W) als Temperaturerhöhung gegen

Umgebung zum Zeitpunkt t geteilt durch die Verlustleistung P . Die Form der $Z_{th}(t)$ Kurve für die glatte Platte sieht genauso aus wie in Abb. 3 (links), nur mit geänderter vertikaler Achse. Um die Auflösung bei kleinen Zeiten besser darzustellen wird meistens eine doppelt-logarithmische Skala verwendet (Abb. 3, rechts). Bei der Zeitmarke $t \rightarrow \infty$ kann man den Beharrungs-Wärmewiderstand R_{th} ablesen (ist z.B. für die blaue Kurve 2.6 K/W) (Bem.:

leider bezeichnet man den spezifischen Wärmewiderstand von Wärmeleitfolien öfters auch als „thermal impedance“).

2.3.3. Die IPC-2221 - zeitlich gesehen (Dauerstrom)

In früheren Aufsätzen hatten wir uns mit der stationären DC-Strombelastbarkeit von Leiterbahnen beschäftigt [6,7]. Wie sieht eine Transiente mit Konstantstrom aus und wie ist mit gepulsten DC-Stromquellen umzugehen?

Die IPC-2221 Richtlinie geht von einer bestromten 35 µm Leiterbahn auf Top und einer vollen Kupferkaschierung - als Wärmespreizer - auf Bottom aus. Wir simulieren [5,8] eine ideale 5 mm breite Leiterbahn mit $I=11$ Ampere auf einer Euro-Karte mit stationärem Erwartungswert von ca. 20 K über Umgebung [9]. Die Kabel und Anschlüsse sind in einer Simulation immer ein heikles Thema, da elektrische und thermische Kontaktwiderstände und Kabelkühlung oft nicht bekannt sind. Wir werden hier deren Masse und Einfluss einfach vernachlässigen. Abb. 4 (links) zeigt den Anfangsteil der Aufheizkurve an verschiedenen virtuellen Thermoelementen: zentrales Thermoelement im Hotspot, eines am kühleren Leiterende und eines im FR4 ca. 5 mm von der Leiterbahn entfernt. Der Endwert nach ca. 500 s wäre der stationäre Wert von ca. $20^{\circ}\text{C} + 20\text{ K} = 40^{\circ}\text{C}$.

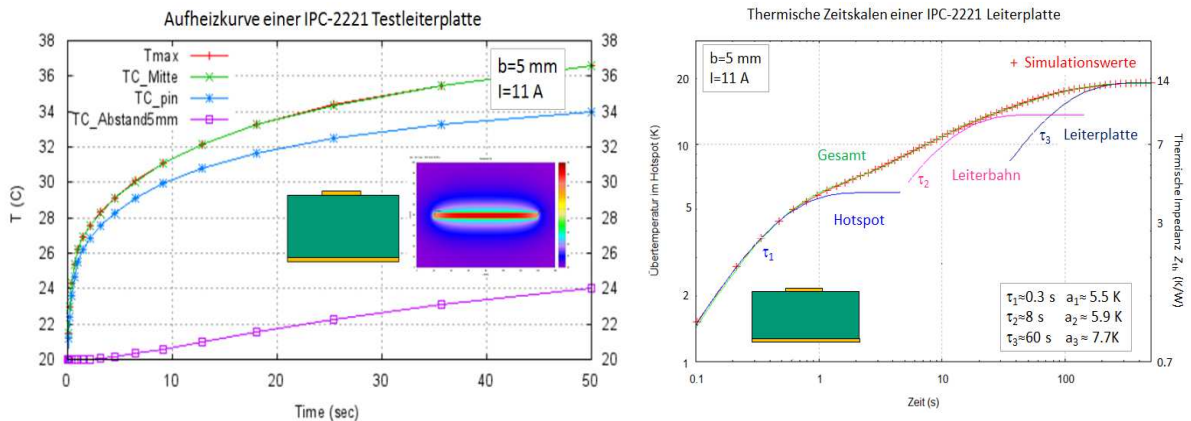


Abbildung 4: Links: Die ersten 50 Sekunden der Aufheizung einer 5 mm breiten Leiterbahn nach IPC-2221 und berechnetes Thermogramm bei 50 s. Rechts: Relativtemperatur zur Umgebung und thermische Impedanz (rechte Achsenbeschriftung) mit feiner Zeitabastung und logarithmischen Achsen.

Was könnten wir aus der Abb. 4 (links) ableiten? Zum Beispiel, dass für einen in Rechteckpulsen PWM-getakteten Strom mit Einschaltdauer $t_1 = 5$ s, der T -Anstieg des ersten Pulses ungefähr 9 K betragen würde. Abb. 4 (rechts) zeigt die analoge Graphik in feinerer Zeitabastung und $T-T_U$ in doppelt-logarithmischer Darstellung. Wir erkennen einen leicht gewellten Verlauf, der darauf hinweist, dass mehr als nur eine Zeitkonstante für die Wärmeabfuhr zuständig ist. Ein numerischer Fit der Berechnungspunkte mit 3 Exponentialtermen liefert eine gute Approximation (grüne Kurve) und die Zahlenwerte der Zeitkonstanten und Amplituden sind eingeblenet (die farbigen Kurvenfragmente der Einzelanteile dienen nur der Illustration). Drei Zeitskalen deuten darauf hin, dass es für die Wärme einen „schnellen“, „mittelschnellen“ und einen „langsamen“ Pfad gibt: die kleinste Zeitkonstante $\tau_1 \approx 0,3$ s ist in etwa die Diffusionszeitskala, die der zentrale Hotspot braucht um zu zerfließen, bzw. sich aufzuteilen. Die mittlere Zeitkonstante $\tau_2 \approx 8$ s ist die thermische Zeitkonstante des Leiterbahnvolumens. Die längste Zeitkonstante $\tau_3 \approx 60$ s ist die des erwärmten Teils der Leiterplatte selbst. Wenn man die Übertemperatur durch die Verlustleistung dividiert erhält man wieder die thermische Impedanz (die Verlustleistung dieser Leiterbahn (Länge 100 mm) ist 1.44 W). *Vorsicht:* die Leistung (bzw. Widerstand) einer Leiterbahn ist proportional zur Länge, ihre

Temperatur hängt aber kaum von der Länge ab! Eine universellere, weil spezifische Größe wäre hier „Impedanz mal Footprintfläche“. Wir wollen das weite Feld der Impedanzen und Darstellungen (Foster gegen Cauer) [10] hier nicht vertiefen.

2.4. Niederfrequente Wärmequellen (Pulsweitenmodulation)

Wie kann man diese Kurven für gepulste Wärmequellen nutzen und die Spitzentemperatur einer PWM herausfinden? Ohne Formelapparat: angenommen die Platte zur blauen Kurve (lackiert) wechselt immer für 100 Sekunden die Leistung von 0 auf 10 Watt und für die nächsten 100-Sekunden wieder sprungartig zurück auf 0 Watt. Man definiert zuerst das Taktverhältnis D als $D = \text{Dauer der Last} / \text{Periodendauer}$ (s. insert Abb. 5). Hier ist es $D = 100\text{s} / 200\text{s} = 0.5$. Die mittlere Leistung der Platte beträgt dann $D * 10\text{ W} = 5\text{ W}$. Wir schätzen mit Hilfe des $R_{\text{th,U}}$ erst die Durchschnittstemperatur ab. Sie ist $20\text{ °C} + 2.6\text{ K/W} * D * P = 33\text{ °C}$. Der zu betrachtende ON-Zeitschritt mit 10 Watt addiert in den nächsten 100 Sekunden (aber nur) 5 Watt zusätzlich zum Durchschnitt und erhöht T nach Abb. 3 um $1.9\text{ K/W} * 5\text{ W} = 10\text{ K}$. Wir sind also am Ende des Pulses bei ca. $33\text{ °C} + 10\text{ K} = 43\text{ °C}$ angelangt. Das ist schon ein guter Wert für die gesuchte Peaktemperatur. Genauer geht es mit Exponentialfunktionen [3] woraus als Peakwert 40 °C folgen würde. Die genaue Temperaturabfolge ist in Abb. 5 abgebildet.

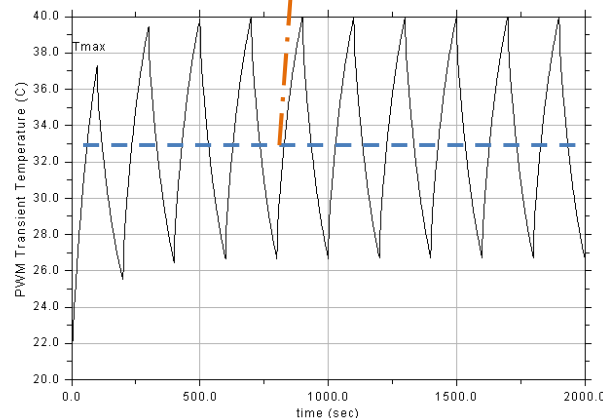


Abbildung 5: PWM Temperatur der Testplatte mit Hilfe der Impedanzkurve

Die Impedanzkurven, die man zu Bauteilen in Datenblättern findet sind ähnlich gewellt wie die in Abb. 4. Das liegt daran, dass die Wärme sich vom Chip durch das Package und durch die Leiterplatte an die Luft durcharbeiten muss. Jeder Abschnitt der Passage erzeugt einen kleinen Knick. Abb. 6 (links) zeigt als Beispiel die Z_{th} -Kurve eines D-DIP-20 Gehäuse mit einem Einmalpuls der Dauer t_p [11]. Das entspricht genau der Situation von Abb. 2. Der R_{th} im zeitlich Unendlichen wäre ca. 45 K/W .

Die genaue Mathematik der Pulsweitenmodulation [3] ist in den Datenblättern, die wie Abb. 6 (rechts) aussehen bereits eingearbeitet [11]. Hieraus kann man den Peakwert der Bauteiltemperatur direkt ablesen, wenn man die Verlustleistung mit Z_{th} für das Datenpaar (Pulsweite, Taktverhältnis) multipliziert und die Umgebungstemperatur addiert. Die Kurve der Dauerbelastung aus Abb. 4 ist in Abb. 6 ausschnittsweise diejenige zur Beschriftung $D=0$.

Vorsicht: Datenblattkurven gelten üblicherweise nur für diese eine Testleiterplatte in ihrer thermodynamischen Testumgebung. Vermutlich ist es eine Leiterplatte mit wenig Kupfer in ungestörter Laborluft.

In der Aufheizkurve steckt die komplette zeitliche Information. Die Temperaturantwort auf jede Form einer Leistungskurve kann daraus berechnet werden. Allerdings ist es eine kompliziertere mathematische Faltung, die dafür kaum Rechenzeit beansprucht. Komplexe Belastungszyklen z.B. von Motorsteuerungen können damit effektiv bearbeitet werden.

Vorsicht: was man nie machen darf, ist einfach $T(t) = T_U + Z_{th}(t) * P(t)$ verwenden, weil darin die Temperaturvorgeschichte (vor dem Zeitpunkt t) des Bauteils nicht enthalten ist.

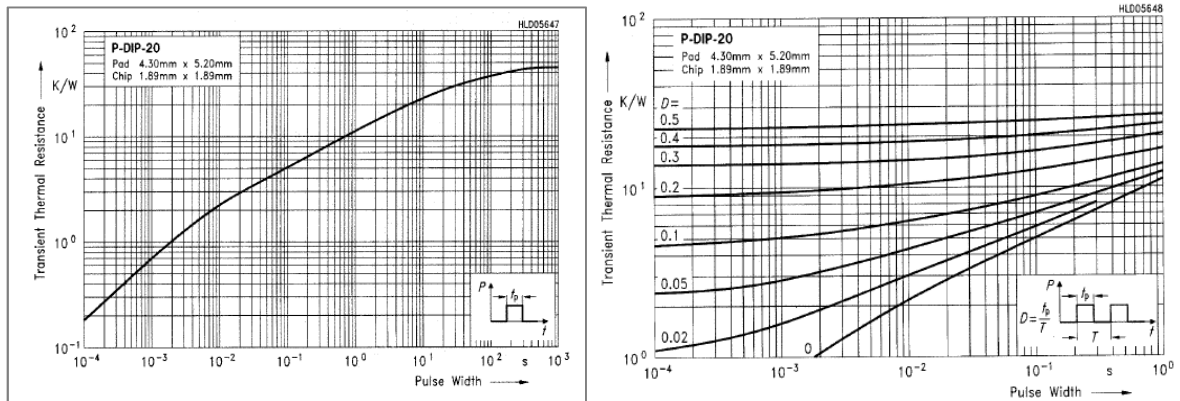


Abbildung 6: Links: Impedanzkurve eines Bauteils auf Testleiterplatte [11]. Rechts: Pulsweitenmodulierte Impedanzkurve [11]. D heißt Taktverhältnis.

2.5. Hochfrequente Wärmequellen (niederfrequente Ströme)

Je höher die Frequenz des ON-OFF Zyklus, desto kleiner wird die Amplitude der ‚Haifischflossen‘. Im Beispiel von Abb. 4 (rechts) würde eine Stromfrequenz von 10 Hz ($\Delta t = 0.1$ s) nur eine T -Amplitude von 1.5 K erzeugen, die um den Mittelwert aus I_{RMS} schwankt.

2.6. Hochfrequente Ströme

Je höher die Wechselstromfrequenz ist, desto höher ist der elektrische Widerstand eines Leiters weil der Strom immer weiter an den Rand des Leiters gedrängt wird (Skinneffekt). Die Maxwell'schen Gln. liefern als Formel für diese elektromagnetische Skindicke δ

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \sigma}} \xrightarrow{\text{Kupfer}} \frac{66 \text{ mm}}{\sqrt{f(\text{Hz})}} \quad (2.8)$$

Die elektrischen Feldwerte nehmen in der Art $e^{-x/\delta}$ von der Oberfläche zur Mittellinie des Leiters ab. Für die Wärmeentwicklung ist der Ohmsche Widerstand wichtig. Für Rundleiter gibt es allortigen Formeln, für Rechteckleiter (wie Leiterbahnen) scheint es komplizierter zu sein [12]. Solange die Skindicke größer ist als die Leiterbahndicke braucht man keine Korrekturen an den Gleichstromwiderstand anbringen. Für Praktiker gibt [13] in einer Graphik (Abb. 7)

einen Korrekturfaktor k zum Gleichstromwiderstand (längenspezifisch) $R_- = \frac{1}{\sigma b \cdot h}$ (Ω/m)

an. Die elektrische Leitfähigkeit von Cu bei 20 °C ist $\sigma \approx 57 \text{ S} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$. Diese Schreibweise ist praktisch, wenn man b und h in mm eingibt. Die Verlustleistung des Leiters ist $P_{AC} = R_- \cdot I_{RMS}^2$. Den Stromsinus sieht man im Thermogramm natürlich nicht mehr.

Beispiel: eine Leiterbahn von 70 μ m Dicke hat erst ab einer Frequenz von ca. 1 MHz ein $\delta < 70 \mu$ m. Wenn die Breite 0.5 mm ist, dann ist $R_- = 0.5 \text{ Ohm}/m$. Der Wert auf der x-Achse in Abb.7 ist 44 und der Korrekturfaktor zum Aspektverhältnis $0.5/0.07 = 7$ ist $k \approx 1.13$.

3. Außere Heizung

3.1. Quasistationäre Wärmequelle (Reflowofen)

Wenn wir auf alle Details einer Baugruppe verzichten, sie also als einen einzigen Temperaturknoten annähern, folgt die Dynamik einer Aufheizung von außen, wie z.B. im Reflowofen, der Wärmestrombilanz $c \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} = A \cdot \alpha \cdot (T_{Zone} - T(t))$, wobei die Temperatur T ein irgend-

wie gearteter Mittelwert ist. So lange die Gastemperatur $T_{zone} > T(t)$ fließt Wärme in die Platte hinein, ansonsten heraus. Wenn wir Temperatur der Platte bei Eintritt in die Reflow-Zone mit

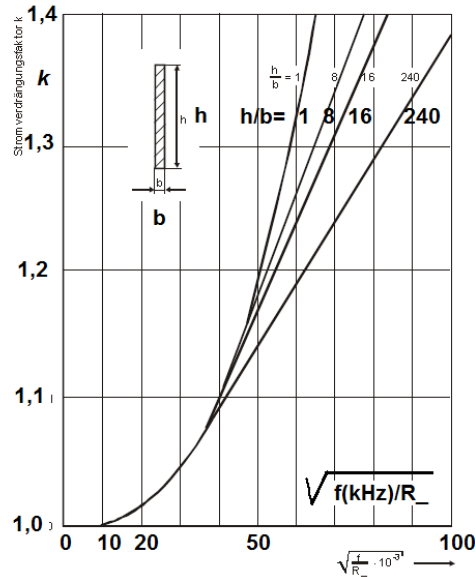


Abbildung 7: Frequenz- und aspektabhängiger Korrekturfaktor k zum DC Widerstand eines Rechteckleiters [13]

T_{eintritt} bezeichnen, ist die Lösung wieder eine Exponentialfunktion mit derselben obigen Zeitkonstanten τ

$$T(t) = T_{\text{eintritt}} + (T_{\text{zone}} - T_{\text{eintritt}})(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.1)$$

Sei t_{zone} die Verweildauer der Platte in einer Zone, dann ist bei konstanter Zonentemperatur die Plattentemperatur am Ende der Zone $T_{\text{austritt}} = T_{\text{eintritt}} + (T_{\text{zone}} - T_{\text{eintritt}})(1 - e^{-t_{\text{zone}}/\tau})$. Die Eintrittstemperatur in die nächste Zone ist wiederum die Austrittstemperatur aus der vorangegangenen Zone. Auf diese Weise kann man sich eine Näherung des Temperaturprofils aus stückweisen Temperaturzonen zusammensetzen [14]. Die Information über die turbulente Strömung um den Nutzen herum steckt im Wärmeübergangskoeffizient α . Dieser muss empirisch mit Profilingplatten [15] ermittelt werden (s. Vortrag). Das Zusammensetzen der zonenweisen Funktionen ist wesentlich schneller als eine aufwendige strömungstechnisch-numerische Berechnung [16] und kann zur groben Erstabschätzung der Reflowparameter genutzt werden. Abschattungseffekte durch große Bauteile fallen natürlich unter den Tisch.

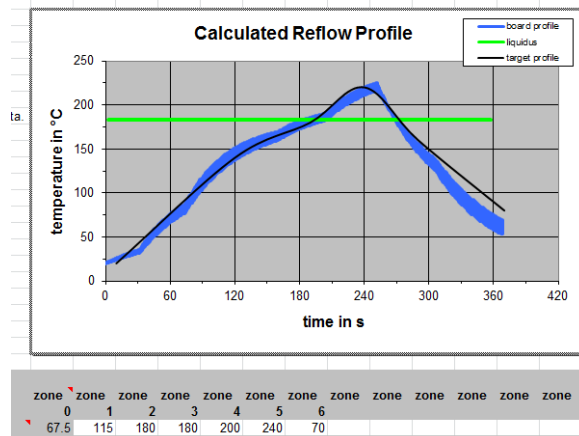


Abbildung 8: Reflowprofil, vereinfacht aus analytischen Teilfunktionen zusammengesetzt [14]

3.2. Bewegte Wärmequelle (Lotwelle)

Bei einer Lotwelle greift die Wärme nicht mehr an der ganzen Platte an sondern die Wärmequelle ändert streifenartig ständig ihre Position - dafür mit annähernd konstanter Temperatur. Hier nun ist es mit analytischen Abschätzungen zu Ende, weil das Layout und der Lagenaufbau die Geometrie kompliziert machen. Dieses und andere animierte numerische Simulationsexperimente werden dazu im Vortrag gezeigt werden.

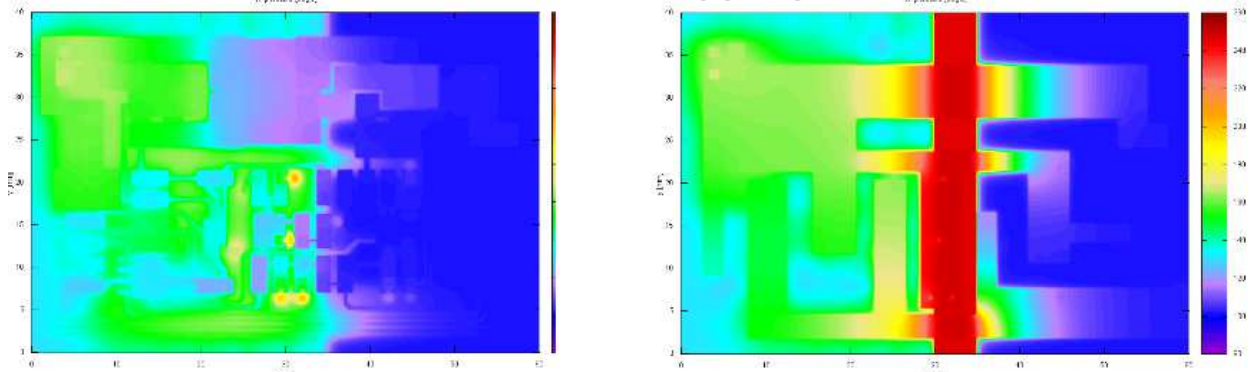


Abbildung 9: Berechnungsexperiment eines Lotwellendurchgangs von links nach rechts (links: top, rechts: bottom).

Anhang.

	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (J/kgK)	a (m ² /s)	σ_{el} (S/m)	α (W/m ² K)
Cu	390	8900	380	0.0001	$57 \cdot 10^7$	-
Epoxyharz+Glasgewebe	0.3-0.5	1200	1000	$2.5 \cdot 10^{-7}$	-	-
Mischwert „Leiterplatte“	5-50 (x-y)	-	-	-	-	-
Freie Konv. + Strahlung	-	-	-	-	-	≈ 10
Erzwungene K.	-	-	-	-	-	$\approx 20-50$

Literaturverzeichnis.

- [1] Poschmann, H.: „Kurzschlußstrombelastungen von Leitern“, PLUS Heft 2, pp. 200-201 (2001)
- [2] Adam, J.: http://www.adam-research.de/pdfs/TRM_WhitePaper8_ShortCircuit.pdf (2013)
- [3] Wutz, M.: Wärmeabfuhr in der Elektronik. Vieweg Verlag (1991)
- [4] Adam, J.: „Virtuelle Thermographie von Leiterbahnen und Leiterplatten I. Hotspots durch Bauteile“. PLUS Heft 3 , pp. 471-479 (2013)
- [5] Adam, J.: „Virtuelle Thermographie von Leiterbahnen und Leiterplatten III. Zeitabhängigkeit“. PLUS Heft 5 , 970-974 (2013)
- [6] Adam, J.: „Virtuelle Thermographie von Leiterbahnen und Leiterplatten II. Strombelastung“. PLUS Heft 4 , 734-739 (2013)
- [7] Adam, J.: „Strombelastbarkeit von Leiterbahnen III.“. PLUS Heft 4, 513-518 (2004)
- [8] <http://www.adam-research.de/index.php?seite=trm>
- [9] FED: Designrichtlinie IPC-2221B - Allgemeine Richtlinie für das Design von Leiterplatten
- [10] Schütze, Th.: „Thermische Ersatzschaltbilder“. Infineon AN2008-03 (2008)
- [11] Infineon: „Thermische Eigenschaften von Halbleitergehäusen. Addendum“. Themenbuch 07.99 (1999)
- [12] Belevitch, V.: „The lateral skin effect in a lateral conductor“ <http://www.cvni.net/abc/rip2/r9/index.html> (1971)
- [13] Löbl, H. „Praktikum Hochstromtechnik. Versuch G7 Stromverdrängung in elektrischen Leitern“, TU Dresden (2001)
- [14] <http://www.isit.fraunhofer.de/en/Arbeitsgebiete/QZ/applikationszentrum/reflow.html>
- [15] http://atco-us.com/data/brochures/ReflowSimulation_IPC-TM-650ThermalStress.pdf (2011)
- [16] Adam, J., Poech, M.H.: „Simulation der Leiterplatte im Reflow-Ofen“. 14. FED Konferenz, pp. 274-284, Kassel (2006)