

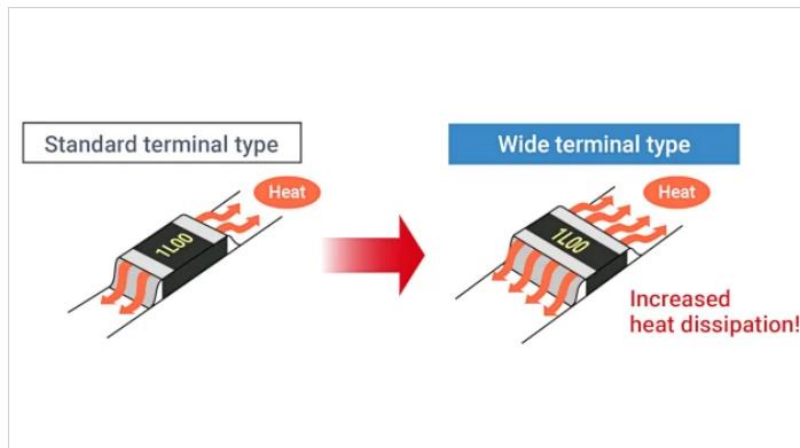
Zur Temperatur von Shunt Widerständen

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Modellparameter	2
3. High-power thick film shunt resistor <i>LTR10L</i>	4
4. Ultra-low ohmic chip resistor <i>PML10</i>	5
Literatur	7
Anhang. Bildergalerie	8
LTR10L Schmaleitiger Anschluss	8
LTR10L Breitseitiger Anschluss	10
LTR10L Breitseitiger Anschluss bei längsausgerichtetem Bauteil	11
PML10 Breitseitiger Anschluss	11
Kontakt	12

1. Einleitung

In Bodo's Power Magazine ist mir in einem Beitrag von ROHM's Trevis Moench sofort das Bild aufgefallen welches ich in Fig.1 wiedergebe [1]. Wieviel bringt das Drehen des Widerstands für das Thermal Management wirklich und was ist der Beitrag der Leiterbahn? Das will ich in numerischen Experimenten näher untersuchen.



Wide terminal-style packages deliver improved thermal performance. Image used courtesy of Bodo's Power Systems [PDF]

Figure 1. Motivation: Kann das wirklich sein? [1]

Die Temperatur des Widerstands hängt von etlichen Einflüssen ab [2,3]:

- direkte Wärmeabgabe von der Bestückungsseite an die Umgebung über Konvektion und Strahlung
- Wärmespreizung (Wärmeleitung) in der Leiterbahn und innerhalb der Leiterplatte in kühlere Gebiete hinein (Fig. 2)
- Wärmeabgabe von der gegenüberliegenden Seite des Bauteils an die Umgebung

Zusätzlich wird hier interessant:

- Selbstheizung der Leiterbahn (sog. Joule Heating)
- Temperaturabhängigkeit der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer.

In einer Baugruppe kann je nach Layout, Lagenanzahl und der Anordnung anderer Wärmequellen kann der ein oder andere Mechanismus unterdrückt sein und damit wirkungslos sein. Zum Beispiel gibt es keine

Wärmespreizung, wenn die Baugruppe aufgrund von vielen gleichen Bauteilen überall gleich warm ist. Andererseits könnte Wärmespreizung verstärkt werden indem direkt unterhalb der Hauptwärmequelle eine GND Lage die Wärme aufnimmt und in kühlere Randbereiche wegtransportiert.

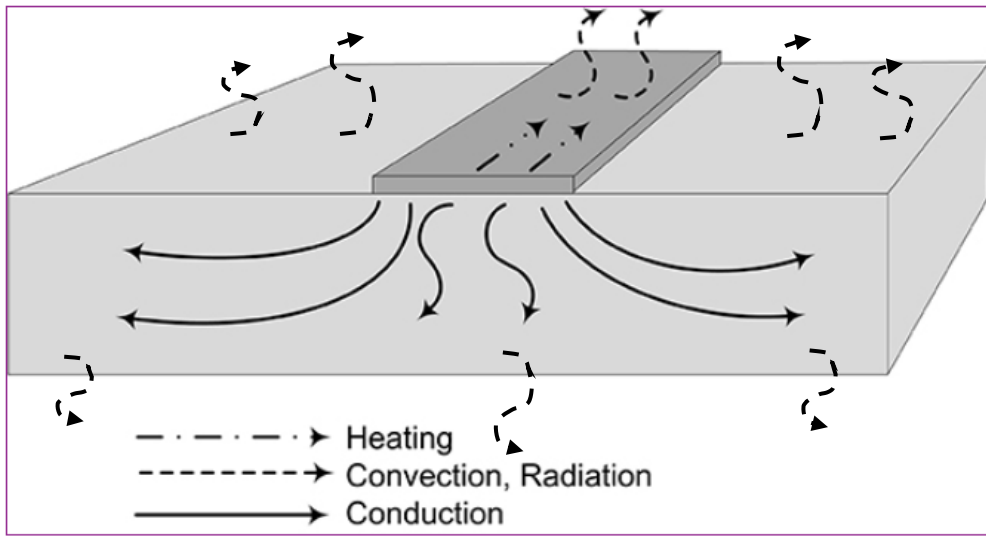


Figure 2: Wärmeabfuhr von einer Leiterbahn [2]








Es liegt für diese Untersuchung kein geroutetes Design vor, das entsprechend hätte umgebaut werden können. Deshalb wird eine 4-lagige Leiterplatte angenommen, bestehend aus 2 vollflächigen Kupfer-Innenlagen GND und VCC und einer Signallage mit dem Widerstand auf Top. Mein Werkzeug für die nachfolgenden Untersuchungen ist die numerische Berechnung des Temperaturfelds mit der TRM Software von ADAM-Research, welche Lagen und Layout zu einem dreidimensionalen Berechnungsmodell schnürt [4]. Für das hier notwendige „Layout“ braucht man kein CAD. Die Leiterbahnen können aus extrudierten Rechtecken in der Software erzeugt werden.


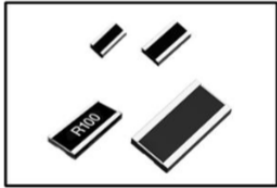
2. Modellparameter

Der Lagenaufbau wird „typisch“ gewählt. Die Wärmeleitfähigkeit ($k_{x,y}=0.54$, $k_z= 0.3$ W/(m·K)) des „FR4“ ist aus der IPC-2152 entnommen. Die Leiterbahnen in Top bestehen aus Kupfer mit Temperaturkoeffizient. Der Widerstand ist ein einfacher Block mit vorgegebenem Widerstand ohne Temperaturkoeffizient. Stromstärke wird so gewählt, dass der Widerstand bei Raumtemperatur mit der „rated power“ aus dem Datenblatt heizt. Gleichstrom wird über einen Plus- und einen Minuspol ein- und ausgebracht und fließt durch das Bauteil.


Der Shuntwiderstand, der in [1] gezeigt wird, ist mit 2 mm x 1.25 mm nicht besonders groß, was für die Wärmeabfuhr eher ungünstig ist. Es gibt 2 Klassen von Widerständen mit gleicher Bauform: eine mit hohem Widerstand „LTR“ und eine mit sehr kleinem Widerstand „PML“. Das macht die Sache noch interessanter.

Table 1: Die wichtigsten Parameter und Annahmen zu den thermischen PCB Modellen.

	Name	Type	File	View	FR4 white	Thick (um)	Conductor	Dielectric	Expo:	Color
Lagenaufbau	Top			View	<input checked="" type="checkbox"/>	50	Cu\$TRM	FR4-1A\$TRM		
	pre1	pre		View	<input checked="" type="checkbox"/>	250		FR4-1A\$TRM		
	inner1	met		View	<input checked="" type="checkbox"/>	35	Cu\$TRM			
	core	pre		View	<input checked="" type="checkbox"/>	900		FR4-1A\$TRM		
	inner2	met		View	<input checked="" type="checkbox"/>	35	Cu\$TRM			
	pre3	pre		View	<input checked="" type="checkbox"/>	250		FR4-1A\$TRM		
	Bottom	pre		View	<input checked="" type="checkbox"/>	50		FR4-1A\$TRM		
Boardgröße	100 mm x 100 mm									

Leiterbahnen	Rechts und links jeweils 40 mm lang																																											
Kupfer	Spezifischer elektrischer Materialwiderstand: $\rho_{el}(T) = 0.0175 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0.00395 \cdot (T - 20^\circ\text{C})) \Omega \text{ m}^2/\text{m}$																																											
Bauteile	LTR10L Datenblatt 1: R = 200 mΩ (Annahme). PML10 Datenblatt 2: R = 2 mΩ (Annahme).																																											
Verlustleistungen	LTR10L Datenblatt 1: P = 1 W (rated power) PML10 Datenblatt 2: P = 0.66 W (rated power)																																											
Stromstärke	Datenblatt 1: P=1 W -> $I_{bc} = 2.23 \text{ A}$. Spannungsabfall am Bauteil $\Delta U = R \cdot I = 0.45 \text{ V}$ Datenblatt 2: P=0.66 W -> $I_{bc} = 18 \text{ A (!!)}$																																											
Umgebung	20 °C, freie Konvektion + Strahlung, Laborbedingungen																																											
Datenblatt 1 ltr-low-e.pdf	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="border: 2px solid red; padding: 2px;"> <p style="margin: 0;">High Power Thick Film Shunt Resistors</p> <p style="margin: 0;">Wide terminal type</p> <p style="margin: 0;">LTR/LTRL series</p> </div> <div style="margin-left: 10px;"> <p style="margin: 0;">Datasheet</p> </div> </div> <p>•Features</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Chip Resistors for current detection : 10mΩ ~ 2) High joint reliability with long side terminations. 3) Improvement of rated power enables to displace smaller size of resistors, and it contributes space savings in your set. 4) ROHM resistors have obtained ISO9001 / IATF16949 certification. 5) Corresponds to AEC-Q200. <div style="text-align: right; margin-top: 10px;">  </div> <table border="1" style="margin: 10px auto; width: 80%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Part No.</th> <th>(mm)</th> <th>(inch)</th> <th>L</th> <th>W</th> <th>t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LTR10L</td> <td>1220</td> <td>0508</td> <td>1.25±0.15</td> <td>2.0±0.15</td> <td>0.55±0.10</td> </tr> </tbody> </table> <p>•Products list</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Part No.</th> <th colspan="2">Type code</th> <th rowspan="2">Rated power (W)</th> <th rowspan="2">Rated ambient temperature (°C)</th> <th rowspan="2">Rated terminal temperature (°C)</th> <th rowspan="2">Resistance tolerance</th> <th rowspan="2">Temperature coefficient (ppm / °C)</th> <th rowspan="2">Resistance range (Ω)</th> </tr> <tr> <th>(mm)</th> <th>(inch)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4" style="text-align: center;">LTR10L</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;">1220</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;">0508</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;">1.0</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;">70</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;">125</td> <td rowspan="4" style="text-align: center;">D(±0.5%)</td> <td>0~150</td> <td>100m ≤ R < 200m (E24 series)</td> </tr> <tr> <td>0~100</td> <td>200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)</td> </tr> <tr> <td>0~150</td> <td>33m ≤ R < 100m (E24 series)</td> </tr> <tr> <td>0~100</td> <td>200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">F(±1%) J(±5%)</td> <td>0~150</td> <td>100m ≤ R ≤ 200m (E24 series)</td> </tr> <tr> <td>0~100</td> <td>200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)</td> </tr> </tbody> </table>	Part No.	(mm)	(inch)	L	W	t	LTR10L	1220	0508	1.25±0.15	2.0±0.15	0.55±0.10	Part No.	Type code		Rated power (W)	Rated ambient temperature (°C)	Rated terminal temperature (°C)	Resistance tolerance	Temperature coefficient (ppm / °C)	Resistance range (Ω)	(mm)	(inch)	LTR10L	1220	0508	1.0	70	125	D(±0.5%)	0~150	100m ≤ R < 200m (E24 series)	0~100	200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)	0~150	33m ≤ R < 100m (E24 series)	0~100	200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)	F(±1%) J(±5%)	0~150	100m ≤ R ≤ 200m (E24 series)	0~100	200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)
Part No.	(mm)	(inch)	L	W	t																																							
LTR10L	1220	0508	1.25±0.15	2.0±0.15	0.55±0.10																																							
Part No.	Type code		Rated power (W)	Rated ambient temperature (°C)	Rated terminal temperature (°C)	Resistance tolerance	Temperature coefficient (ppm / °C)	Resistance range (Ω)																																				
	(mm)	(inch)																																										
LTR10L	1220	0508	1.0	70	125	D(±0.5%)	0~150	100m ≤ R < 200m (E24 series)																																				
							0~100	200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)																																				
							0~150	33m ≤ R < 100m (E24 series)																																				
							0~100	200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)																																				
F(±1%) J(±5%)	0~150	100m ≤ R ≤ 200m (E24 series)																																										
	0~100	200m ≤ R ≤ 910m (E24 series)																																										

Datenblatt 2
pml-e-3.pdf

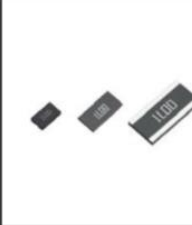


Ultra-low ohmic chip resistors for current detection <Wide terminal ty

PML series

●Features

- 1) Ultra low-ohmic resistance range.
- 2) Wide terminal configuration for high joint reliability.
- 3) Improved current detection accuracy by trimming-less structure.
- 4) ROHM resistors have obtained ISO9001 / IATF16949 certification.
- 5) Corresponds to AEC-Q200

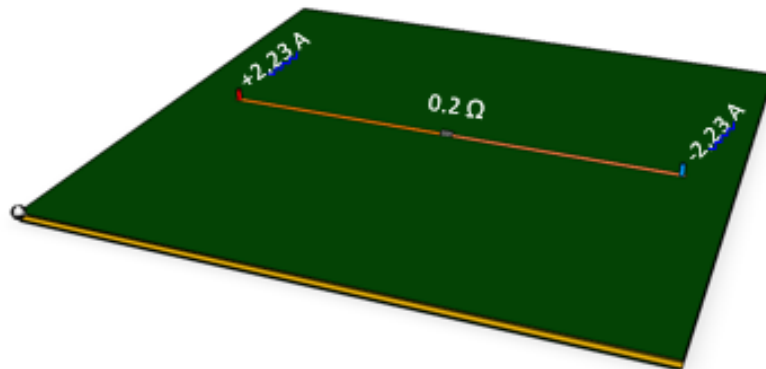


●Products List

Part No.	Size		Rated power (70°C) (W)	Temperature coefficient (ppm / °C)	Resistance tolerance (%)	Resistance range (mΩ)	Operating temperature range (°C)
	(mm)	(inch)					
PML10	1220	0508	0.66	±200	G (±2%) J (±5%)	1.0,1.5,2.0,2.5	-55 ~ +155

3. High-power thick film shunt resistor *LTR10L*

Dieses und alle nachfolgend beschriebenen Berechnungsmodelle bestehen aus einem Raumgitter mit einer Auflösung von 0.1 mm. Dazu kommen Materialzuweisung an den Knoten und 2 Kabelenden an denen Strom ein- und ausgebracht wird.



Die Algorithmen in TRM berechnen für die elektrischen Knoten das DC Potentialfeld, daraus die lokale Wärmeentwicklung und letztendlich das Temperaturfeld in der ganzen Baugruppe. Wie in Brooks erklärt wird spaltet sich der Wärmefluss in einen Leitungs-, Konvektions- und Strahlungsanteil auf [3].

Das Ergebnis der Berechnungen für die beiden Situationen aus Fig. 1 zeigt Fig. 3. und mit Zahlenwerten die Tabelle darunter. Es ist tatsächlich so wie in [1] behauptet wird: mit einem breiten Anschluss ist es kälter.

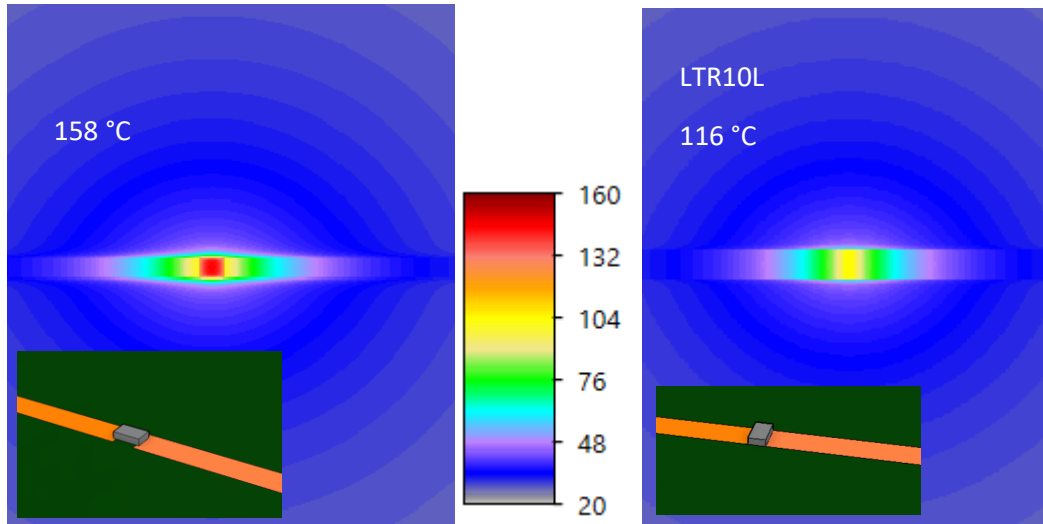
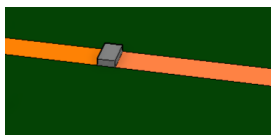
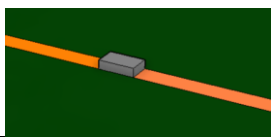
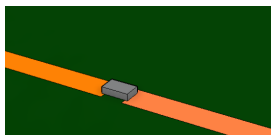


Figure 3: Tatsächlich! Die breitseitige Montage mit der breiteren Leiterbahn (rechts) ist thermisch vorteilhafter als schmalseitig mit einer schmalen Leiterbahn (links).

Table 2: Vergleich einiger Berechnungsexperimente zu LTR10L. Zeilen 1 und 2 sind in Fig.3 dargestellt.

	Montage LTR10L	Leiterbahnbreite	Shunttemperatur ¹	ΔU Leiterbahnen	P_{Joule} linke+rechte Leiterbahn	R linke+rechte Leiterbahn
1		2 mm	116 °C	0.032 V	0.07 W	0.014 Ω
2		1.2 mm	158 °C	0.054 V	0.12 W	0.024 Ω
3		2 mm	141 °C			

- Die Joulesche Wärmeleistung der Leiterbahnen ist verglichen mit dem 1 W des Widerstands klein.
- Daher macht es kaum einen Unterschied, dass die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers in der Nähe des Bauteils wegen des Wärmeeintrags durch das Bauteil sinkt (s. Fig. 7).
- Weit entfernt vom Widerstand ist die Leiterbahn kalt.
- Die „Hauptarbeit“ der Kühlung machen die beiden Innenlagen.
- Der Wärmeabfluss in die Leiterbahnen ein substantieller Beitrag.

4. Ultra-low ohmic chip resistor *PML10*

Der Strom, der mit 0.002 Ω zu 0.66 W Bauteilheizung führt ist ca. 18 A. Würde das die Leiterbahn zum Schmelzen bringen? Die Simulation zeigt, dass es erstaunlicherweise nicht dazu kommt. An Fig. 4 sieht

¹ Genauigkeit etwa +- 5%, da die wirklichen thermischen Eigenschaften des Widerstands unbekannt sind.

man, dass die Innenlagen in den Innenlagen massiv die Wärme verteilt und der Kühlung in die Umgebung zur Verfügung stellt.

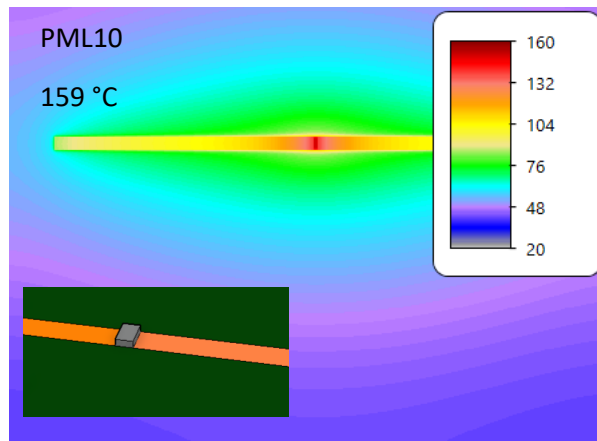
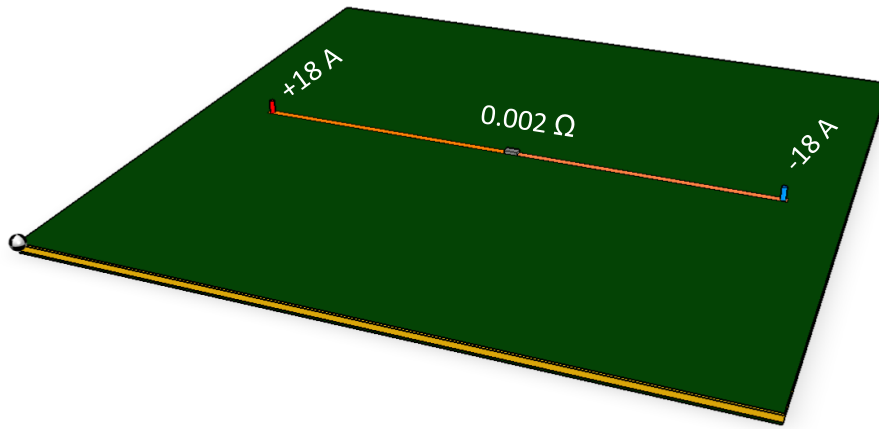
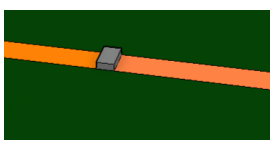
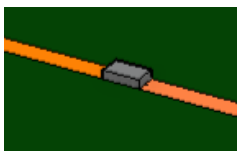


Figure 4. Erstaunlich! Auch 18 A und Gesamtverlustleistung von 6.3 W führen nicht zur Schmelzung

Table 3: Berechnungsexperiment zu PML10.

	Montage PML10	Leiterbahnbreite	Shunttemperatur ²	ΔU Leiterbahnen	P_{Joule} linke+rechte Leiterbahn	R linke+rechte Leiterbahn
1		2 mm	159 °C	0.32 V	5.7 W	0.017 Ω
2		1.2 mm	280 °C	0.74 V	13 W	0.04 Ω

² Genauigkeit etwa +- 5%, da die wirklichen thermischen Eigenschaften des Widerstands unbekannt sind.

Die Wärme fließt auch in diesem Fall teilweise vom Bauteil in die Leiterbahn, weil die letztere kühler ist. Die richtige Maßzahl für die Temperatur ist nämlich nicht die Verlustleistung, sondern die Flächenleistung q'' , d.h. W/mm². Große Bauteile bleiben bei gleicher Verlustleistung kälter als kleine. Vergleichen wir nun die berechneten Flächenleistung der beiden Leiterbahnteile mit der eingegebenen des Shunt³:

Shunt: P=0.66 W A=2 mm x 1.2 mm $q''=P/A=0.27$ W/mm²

Leiter: P=5.7 W A= 2 mm x 2x40 mm $q''=P/A=0.035$ W/mm²

Wäre die Situation umgekehrt, dann wäre es wirklich ein Problem.

Wenn man voraussetzt, dass die Verlustleistung des Shunts auf einer gegebenen Leiterplatte eine vernünftige Temperatur erzeugt und den Temperaturkoeffizient des Kupfers nicht berücksichtigt, kann man sogar auf folgende Weise auch *Leistung, Strom und Leiterlänge eliminieren*

Shunt: $q''_{shunt} = R_{shunt} \cdot I^2 / A_{shunt}$

Leiter [3]: $q''_{trace} = [\rho_{el} \cdot L / (b \cdot d) \cdot I^2] / (L \cdot b)$ Länge L, Breite b, Dicke d in meter

Wenn also $q''_{trace} < q''_{shunt}$, dann kann die Leiterbahn Wärme aufnehmen. Wieviel, das hängt von den Umständen des Designs und des Lagenaufbaus ab.

$$q''_{trace} < q''_{shunt} : \quad \frac{\rho_{el}}{b^2 \cdot d} < \frac{R_{shunt}}{A_{shunt}}$$

Für die Art von Designs (Shunt + Leiterbahnen) in diesem paper gilt das Kriterium quasi immer ist nur mit großer Mühe zu verletzen.

Für unsere Shunts gilt:

LTR10L: quer	85 < 80000	längs: 240 < 80000
PML10 : quer	85 < 830	längs: 240 < 850

Literatur

[1] Moench, T.: „High-Power, Low-Ohmic Current Sense Resistors“. Bodo's Power Systems® (Heft Jan 2023, S. 40-41). s. auch: <https://eepower.com/technical-articles/high-power-low-ohmic-current-sense-resistor/>

[2] Brooks D., Adam, J.: "The Dynamics of PCB Trace Heating and Cooling, and a Call to Action". Printed Circuit Design & Fab. July (2016) <https://www.pcdandf.com/pcdesign/index.php/magazine/10931-conductor-temperatures-1607>

[3] Adam, J., Schmidt, W.-D. *Elektronikkühlung*. Vogel-Fachbuch, Würzburg (2022)

[4] TRM3. <https://www.adam-research.de/software/>
bzw. <https://www.youtube.com/@adamresearch-thermalriskma7955/videos>

³ q'' ist in der Fachliteratur die gängige Notation für Leistung/Fläche

Anhang. Bildergalerie

LTR10L Schmalseitiger Anschluss

Die Leiterbahn ist 1.2 mm breit.

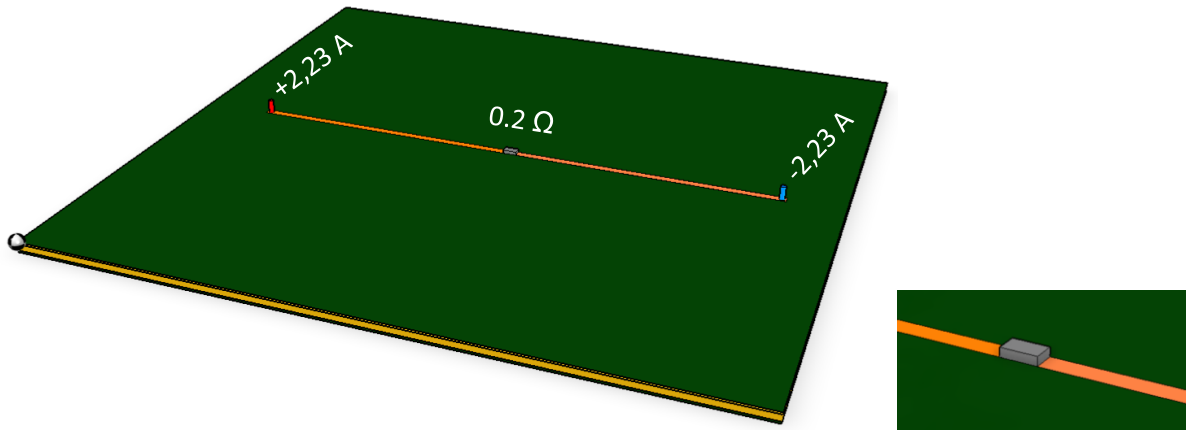


Figure 5: Baugruppenmodell mit schmalseitigem Anschluss

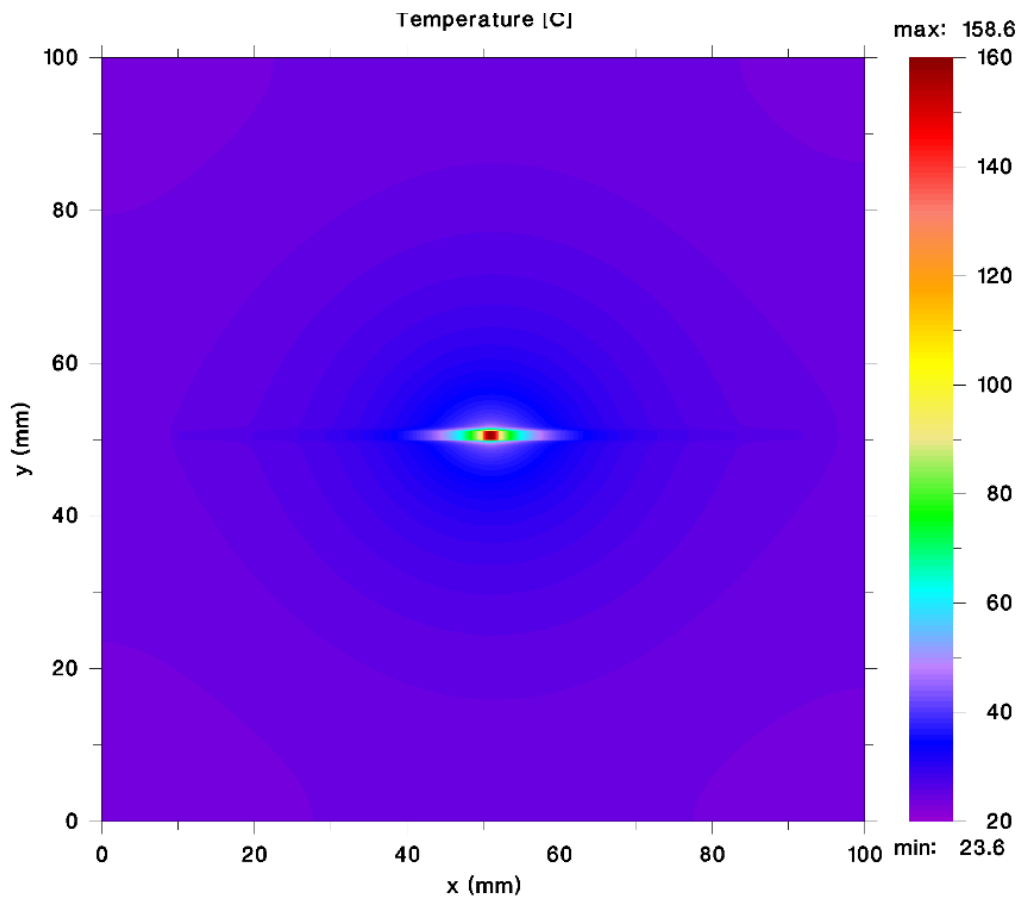


Figure 6: Temperatur auf Top. Shunt ≈ 161 °C mit schmalseitigem Anschluss

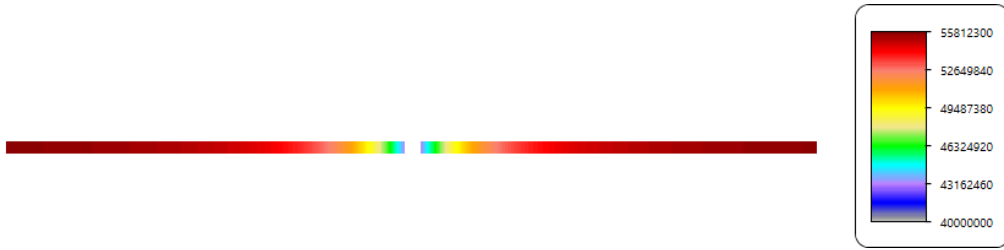


Figure 7: Abfallen der elektrischen Leitfähigkeit (S/m) in der heißen Zone mit schmalseitigem Anschluss

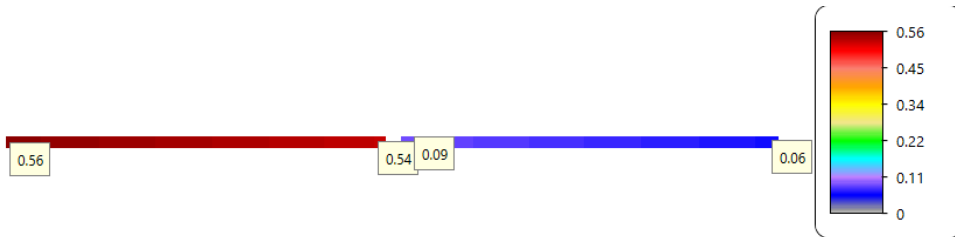


Figure 8: Spannungsabfall (V). Am Bauteil 0.45 V in den Leiterbahnen je ≈ 0.025 V mit schmalseitigem Anschluss

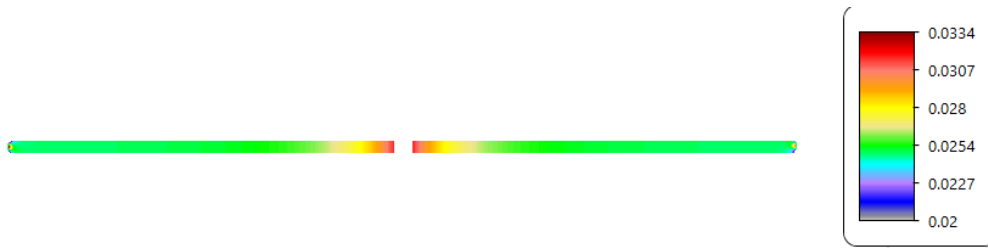


Figure 9: „Joule Heating“ (mW/mm³) mit schmalseitigem Anschluss

LTR10L Breitseitiger Anschluss

Die Leiterbahn ist 2.0 mm breit. Der Widerstand liegt „quer“.

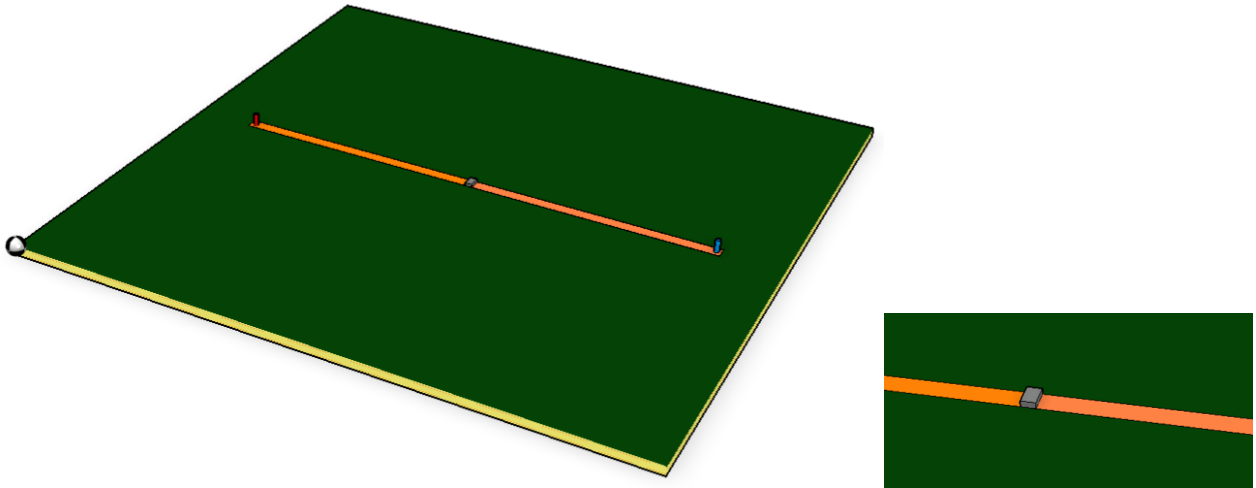


Figure 10: Baugruppenmodell mit breitseitigem Anschluss

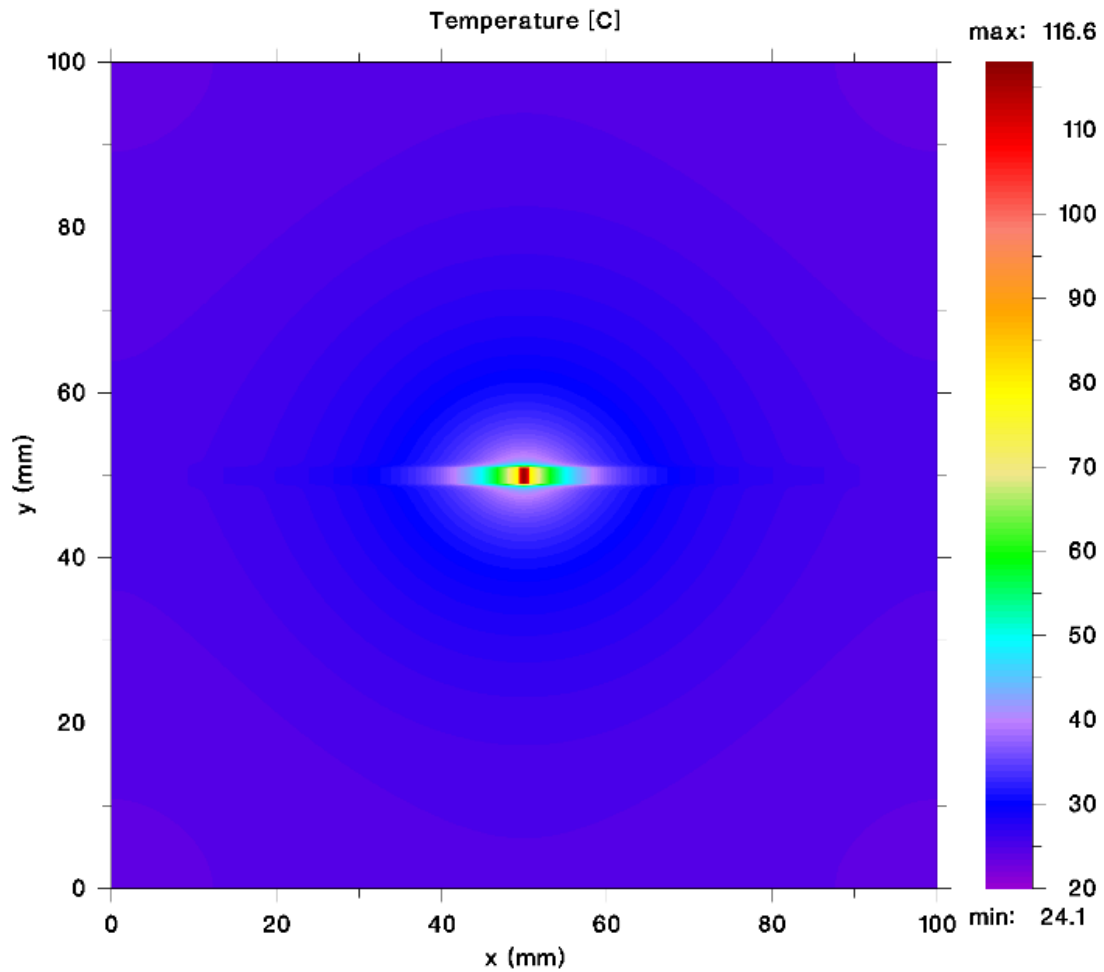


Figure 11: Temperatur auf Top. Shunt ≈ 109 °C mit breitseitigem Anschluss

LTR10L Breitseitiger Anschluss bei längsausgerichtetem Bauteil

Wodurch wird die niedrigere Temperatur eigentlich erreicht? Durch die breite Temperaturabfuhr, so, wie in Fig.1 dargestellt, oder einfach durch die breitere Leiterbahn und die geringere Stromheizung?

Leiterbahnbreite 2.0 mm

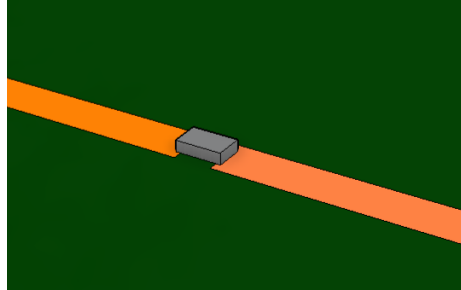


Figure 12: Schmales Bauteil auf breiter Leiterbahn: "breitseitigem Anschluss bei längsausgerichtetem Bauteil"

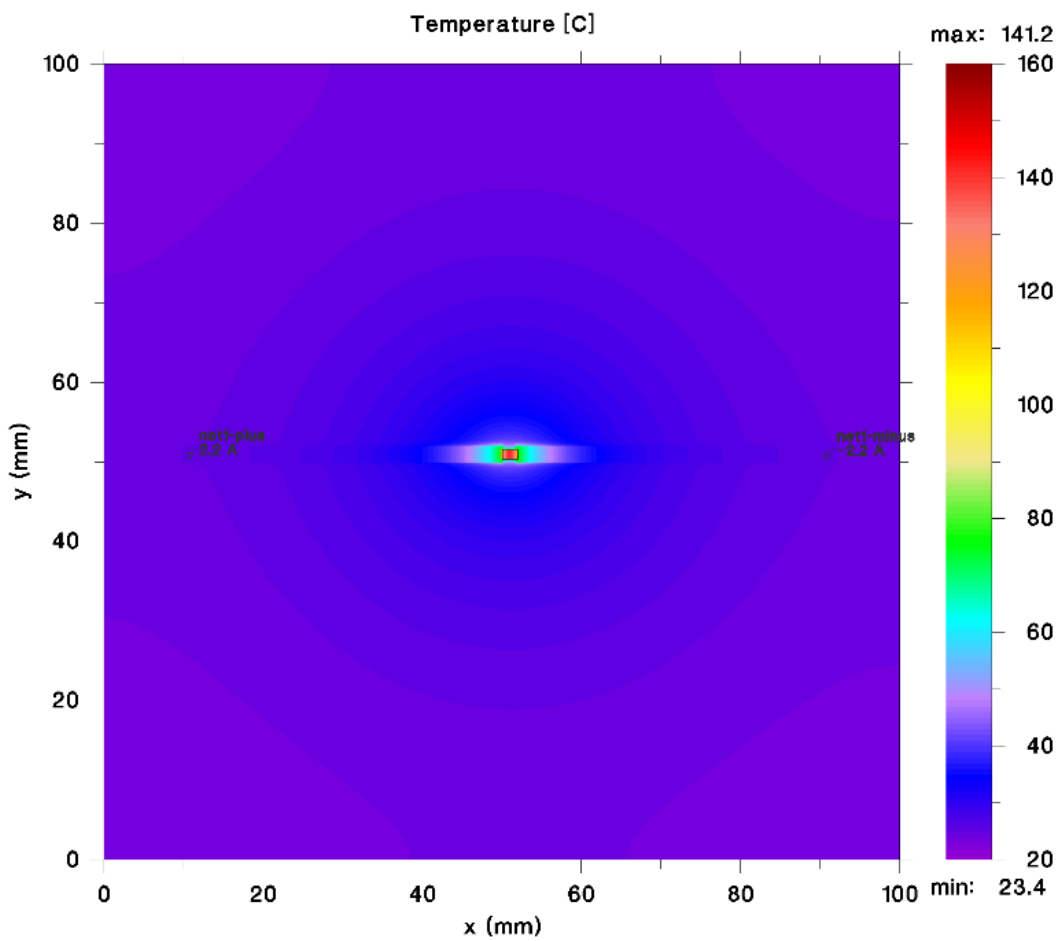
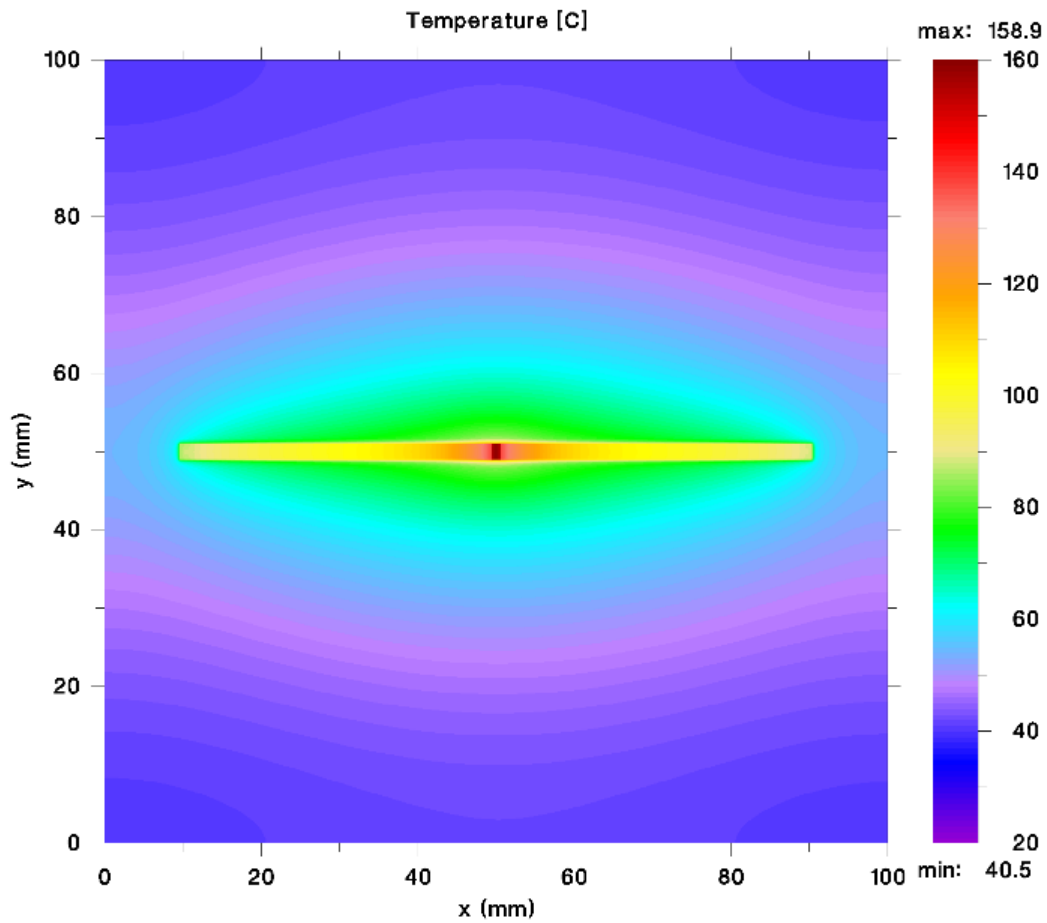


Figure 13: Temperatur auf Top. Shunt ≈ 143 °C mit breitseitigem Anschluss bei längsausgerichtetem Bauteil

PML10 Breitseitiger Anschluss

Leiterbahnbreite 2.0 mm. 18 Ampere, Gesamtverlustleistung 6.6 W!

Das Temperaturniveau der Leiterbahn hat sich erhöht, aber die Maximaltemperatur bleibt erträglich.



Kontakt

ADAM-Research

info@adam-research.de

<http://www.adam-research.de>

<https://www.youtube.com/@adamresearch-thermalriskma7955/videos>

<https://www.adam-research.de/dokumente/white-papers/>

08.02.2024