

# **BERECHNUNG VON STATISCHEN UND DYNAMISCHEN VERLUSTEN VON SMD-POWER MOSFET TRANSISTOREN DURCH TEMPERATURMESSUNG**

S. Wicki, R. Böniger und H. Burtscher

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Neue Entwicklungen bei Leistungstransistoren erlauben deren Realisierung in SMD Technik, wobei die Verlustleistung direkt über den Print ohne zusätzliche Kühlkörper abgeführt wird. Zur Auslegung solcher Schaltungen ist eine gute Kenntnis der auftretenden Verluste sehr wichtig. Dazu wird ein einfaches Modell zur Berechnung der Verlustleistung von SMD Power MOSFET aus der Messung der Transistortemperatur vorgestellt. Am Beispiel einer einphasigen H-Brücke wird gezeigt wie damit statische und dynamische Verluste bestimmt werden können.

Stefan Wicki, Levitronix GmbH, Technoparkstrasse 1, CH-8005 Zürich  
e-mail: [wicki@levitronix.com](mailto:wicki@levitronix.com)

Ralph Böniger, Fachhochschule Aargau, Klosterzelgstrasse, CH-5210 Windisch

Heinz Burtscher, Fachhochschule Aargau, Klosterzelgstrasse, CH-5210 Windisch,  
e-mail: [h.burtscher@fh-aargau.ch](mailto:h.burtscher@fh-aargau.ch)

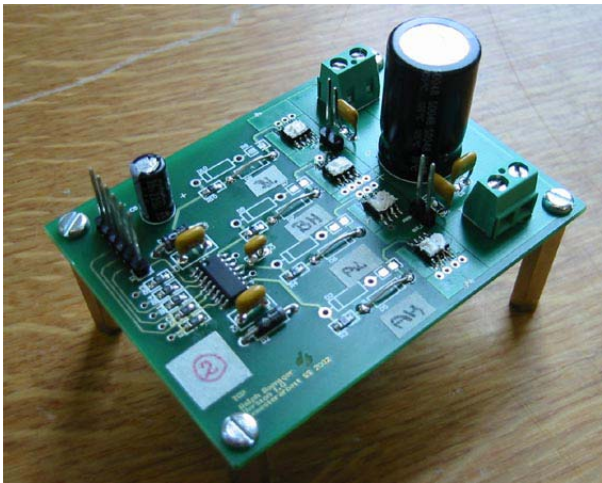
# 1. EINLEITUNG

Die Kenndaten von MOSFET Leistungstransistoren verbessern sich laufend: Ein- und Ausschaltzeiten werden kürzer, das  $R_{Dson}$  halbiert sich etwa alle zwei Jahre - die Verlustleistung von geschalteten Transistoren kann somit stets verkleinert werden. Dadurch ist es möglich, Leistungstransistoren mit maximal gegebenen Strömen in immer kleineren Gehäusen anzubieten. Solche Transistoren sind immer mehr in SMD-Bauweise anzutreffen. So z.B. hat Vishay vor etwa einem Jahr das SO-8 Powerpack Gehäuse auf den Markt gebracht. Dies hat das selbe Pinout, wie ein IC im SO-8 Gehäuse, zusätzlich aber noch eine Kühlfläche um die Verlustleistung direkt über den Print abzuführen.

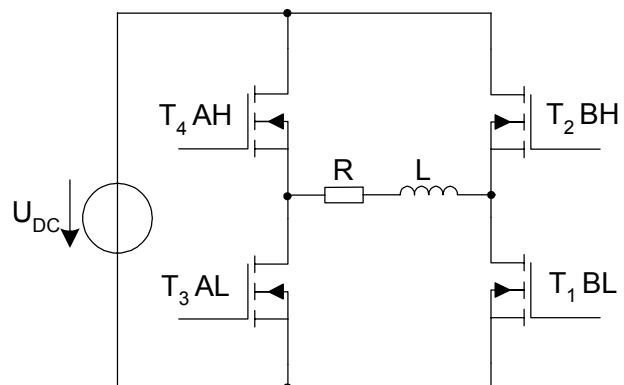
Mit diesen Transistoren kann eine kompakte H-Brücke ohne eine zusätzliche Kühlung aufgebaut werden, die für Ströme bis ca. 7A (RMS-Wert) betrieben werden kann. Dazu muss die Schaltung optimiert werden und deshalb interessiert man sich oft für die statische und dynamische Verlustleistung in den einzelnen Transistoren.

Es gibt viele Methoden, um die Verlustleistung von geschalteten Transistoren zu bestimmen: Man kann z.B. die Spannungs- und Stromverläufe messen und dadurch die Verlustleistung berechnen. Dies ist jedoch meist ungenau und auch sehr aufwändig, da in schnell geschalteten Systemen Verzögerungszeiten von Messsonden berücksichtigt werden müssen und auch die Berechnung nicht einfach ist. Eine andere Möglichkeit ist die theoretische Berechnung der Verlustleistung durch Linearisierung der Spannungs- und Stromverläufe und mit den einzelnen Zeiten als Parametern. Dies ist zwar nützlich, um den Einfluss von Parameteränderungen abzuschätzen, aber man weiss nie wirklich, ob das gerechnete Resultat der Realität entspricht.

Die zuverlässigste Methode ist die simple Messung der Temperatur der einzelnen Transistoren. Denn eines ist sicher: je mehr Verlustleistung ein Transistor hat, desto höher wird seine Temperatur!



**Fig. 1** Zeigt einen Versuchsprint mit Power-Transistoren im SO-8 Gehäuse mit ca. 300W Leistung.



**Fig. 2** Zeigt die Anordnung und die Beschriftung der Transistoren.

## 2. THEORIE

Sämtliche Betrachtungen im Folgenden gelten für eine einphasige Vollbrücke, welche vier Transistoren mit integrierten Freilaufdiolen enthält.

### 2.1 Temperaturmodell

Der Zusammenhang zwischen den Temperaturen der einzelnen MOSFETS und deren mittlerer Verlustleistung ist grafisch in Fig. 3 dargestellt: die Verlustleistungen der einzelnen Transistoren können als Stromquellen modelliert werden, die Wärmeübergangswiderstände als gewöhnliche Widerstände – Temperaturen entsprechen Spannungen und Temperaturunterschiede Spannungsabfällen. Die Temperaturkopplung zwischen den einzelnen Transistoren und der Wärmetransport auf dem Print wird zuerst als Black-Box betrachtet.

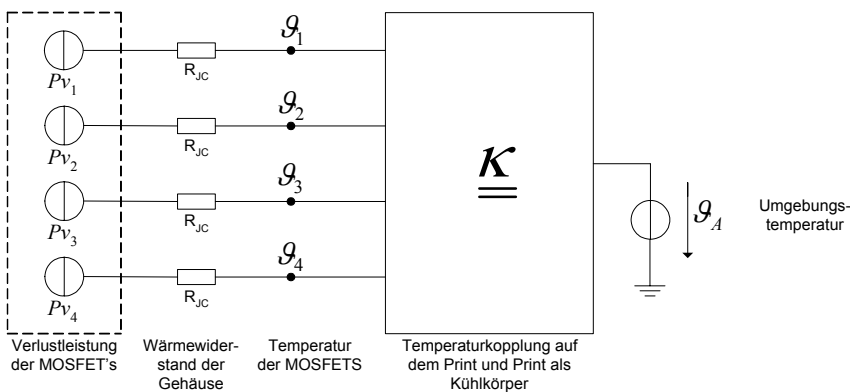


Fig. 3 Temperaturersatzschema

Da bei diesen Temperaturen vorwiegend Wärmeleitung stattfindet, darf man die Black-Box als linear betrachten.

Somit lässt sich der Zusammenhang mathematisch mit einer 4x4-Matrix beschreiben:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix}}_{\underline{\theta}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix}}_{\underline{\kappa}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} P_{V1} \\ P_{V2} \\ P_{V3} \\ P_{V4} \end{bmatrix}}_{\underline{P_V}} + \theta_A \tag{1}$$

$\theta_1 \dots \theta_4$ : Temperatur der MOSFETS Nr. 1... Nr. 4 [°C oder K]

$\alpha_i \dots \delta_i$ : Temperaturkopplungskoeffizienten [K/W],  $i = 1 \dots 4$

$P_{V1} \dots P_{V4}$ : Verlustleistungen der MOSFETS Nr. 1... Nr. 4 [W]

$\theta_A$ : Umgebungstemperatur [°C oder K]

oder abgekürzt:

$$\underline{\mathcal{G}} = \underline{\kappa} \cdot \underline{P_V} + \mathcal{G}_A \quad (2)$$

$\underline{\mathcal{G}}$ :	Temperaturvektor [ $^{\circ}\text{C}$ oder K]
$\underline{\kappa}$ :	Temperaturkopplungsmatrix [K/W]
$\underline{P_V}$ :	Verlustleistungsvektor [W]

Durch Umstellung dieser Gleichung kann die Verlustleistung jedes einzelnen MOSFETS einfach berechnet werden.

$$\underline{P_V} = \underline{\kappa}^{-1} \cdot (\underline{\mathcal{G}} - \mathcal{G}_A) \quad (3)$$

## 2.2 Bestimmung der Matrixelemente - Kalibrierung auf statische Verluste

Durch das Superpositionsprinzip können die Matrixelemente aus vier einfachen Messungen bestimmt werden, indem jeweils nur ein Transistor der H-Brücke durch eine Spannungsquelle eingeschaltet und ein Strom eingespeist wird. Die Temperatur aller MOSFETS wird jeweils gemessen wie auch der Spannungsabfall über dem eingeschalteten MOSFET und der Strom durch den MOSFET.

Die Gate-Source Spannung  $U_{GS}$  wird vorzugsweise gleich gross gewählt wie die Bootstrapspannung eines später verwendeten Treibers. Beim Anschliessen der Gate-Source Spannung ist Vorsicht geboten, da bei unsorgfältigem Handling Transistoren wie auch Treiber zerstört werden können.

Der Drainstrom muss gross genug sein, um genügend statische Verluste und somit Wärme zu erzeugen. Am besten erhöht man den Strom solange, bis der Transistor eine ähnliche Temperatur wie im Betrieb erreicht – so kann der Temperatureinfluss des Drain-Source Widerstandes  $r_{DSon}$  minimiert werden.

Die Temperaturmessung verlangt viel Geduld: sämtliche Einschwingvorgänge müssen abgeklungen sein – die Temperatur muss sich im stationären Gleichgewicht befinden. Messzeiten von zehn Minuten und mehr haben sich in der Praxis bewährt.

Ist der transiente Vorgang abgeklungen, können die Temperaturen aller MOSFETS gemessen werden. Durch Messung des Spannungsabfalls über dem Transistor und Messung des Drainstroms kann der Drain-Source Widerstand  $r_{DSon}$  wie auch die Verlustleistung im Transistor berechnet werden.

2.2.1 Messung 1:

Transistor 1:	Transistor 2:	Transistor 3:	Transistor 4:
$P_{V1} = U_{DS1} \cdot I_{D1}$	$P_{V2} = 0$	$P_{V3} = 0$	$P_{V4} = 0$
$r_{DSon1} = \frac{U_{DS1}}{I_{D1}}$			
$\alpha_1 = \frac{g_1 - g_A}{P_1}$	$\beta_1 = \frac{g_2 - g_A}{P_1}$	$\gamma_1 = \frac{g_3 - g_A}{P_1}$	$\delta_1 = \frac{g_4 - g_A}{P_1}$

2.2.2 Messung 2:

Transistor 1:	Transistor 2:	Transistor 3:	Transistor 4:
$P_{V1} = 0$	$P_{V2} = U_{DS2} \cdot I_{D2}$	$P_{V3} = 0$	$P_{V4} = 0$
	$r_{DSon2} = \frac{U_{DS2}}{I_{D2}}$		
$\alpha_2 = \frac{g_1 - g_A}{P_2}$	$\beta_2 = \frac{g_2 - g_A}{P_2}$	$\gamma_2 = \frac{g_3 - g_A}{P_2}$	$\delta_2 = \frac{g_4 - g_A}{P_2}$

Die dritte und vierte Messung verlaufen analog.

Nach diesen Messungen sind sämtliche Matrixelemente bestimmt. Die Diagonalelemente  $\alpha_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_3$  und  $\delta_4$  haben die grössten Werte, da diese die eigentliche Erwärmung des Transistors durch die eigenen Verluste beschreibt. Die anderen Elemente beschreiben die Temperaturkopplung der Transistoren untereinander. Zudem ist durch Symmetriebedingungen die Matrix mindestens theoretisch diagonalsymmetrisch ( $\alpha_2 = \beta_1$ ;  $\alpha_3 = \gamma_1$ , ...).

### 2.3 Messung von Verlusten

Sind nun sämtliche Matrixelemente bestimmt, kann die Matrix  $\underline{\kappa}$  numerisch mit Hilfe eines Programms wie MATLAB, Maple oder Mathcad zu  $\underline{\kappa}^{-1}$  invertiert werden.

Der Akzent liegt bewusst auf der numerischen Invertierung der Matrix. Die allgemeine analytische Invertierung ist sehr aufwändig und deren Darstellung ziemlich kompliziert.

Wird die H-Brücke nun im gewünschten Arbeitspunkt betrieben, kann mit Hilfe der Temperaturmessung im stationären Zustand die Gesamtverlustleistung der einzelnen Transistoren mit Gleichung (3) berechnet werden. Wird zudem der RMS-Strom in jedem Transistor gemessen, können diese Verluste in statische und dynamische Verluste aufgeteilt werden.

$$P_{V_{statisch}} = I_D^2 \cdot r_{DSon} \quad (4)$$

$P_{V_{statisch}}$ : statische Verlustleistung [W]  
 $I_D$ : RMS-Strom im Transistor [A RMS]  
 $r_{DSon}$ : Drain-Source Widerstand des Transistors [ $\Omega$ ]

$$P_{V_{dynamisch}} = P_V - P_{V_{statisch}} \quad (5)$$

$P_{V_{dynamisch}}$ : dynamische Verlustleistung [W]

### 3. MESSBEISPIEL

Das Messbeispiel bezieht sich auf eine Vollbrücke, welche mit den Transistoren Si78752DP im SO-8 Powerpack Gehäuse von Vishay aufgebaut wurde.

#### 3.1 Bestimmung der Matrixelemente - Kalibrierung auf statische Verluste

Bei all den Messungen war die Umgebungstemperatur konstant 25.0°C. Die Drainströme wurden auf 5.00A konstant gehalten:

$$g_A = 25.0^\circ\text{C} \quad I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = 5.00\text{A}$$

##### 3.1.1 Messung 1:

Elektrische Messung und Berechnung:

$$U_{DS1} = 89.70 \text{ mV} \quad r_{DSon1} = 17.9 \text{ m}\Omega \quad P_{V1} = 449 \text{ mW}$$

Thermische Messung und Berechnung:

<i>Transistor 1:</i>	<i>Transistor 2:</i>	<i>Transistor 3:</i>	<i>Transistor 4:</i>
$g_1 = 40.9^\circ\text{C}$	$g_2 = 31.6^\circ\text{C}$	$g_3 = 29.9^\circ\text{C}$	$g_4 = 27.9^\circ\text{C}$
$\alpha_1 = 35.45 \text{ K/W}$	$\beta_1 = 14.72 \text{ K/W}$	$\gamma_1 = 10.93 \text{ K/W}$	$\delta_1 = 6.47 \text{ K/W}$

##### 3.1.2 Tabellarische Auflistung aller Messresultate:

Die folgenden Messungen verlaufen analog, dargestellt sind nur die Messresultate:

Elektrische Messung und Berechnung:

<b>1. Messung:</b>	$U_{DS1} = 89.70 \text{ mV}$	$r_{DSon1} = 17.9 \text{ m}\Omega$	$P_{V1} = 449 \text{ mW}$
<b>2. Messung:</b>	$U_{DS2} = 83.20 \text{ mV}$	$r_{DSon2} = 16.6 \text{ m}\Omega$	$P_{V2} = 416 \text{ mW}$
<b>3. Messung:</b>	$U_{DS3} = 81.70 \text{ mV}$	$r_{DSon3} = 16.3 \text{ m}\Omega$	$P_{V3} = 409 \text{ mW}$
<b>4. Messung:</b>	$U_{DS4} = 78.10 \text{ mV}$	$r_{DSon4} = 15.6 \text{ m}\Omega$	$P_{V4} = 391 \text{ mW}$

Thermische Messungen:

	<i>Transistor 1:</i>	<i>Transistor 2:</i>	<i>Transistor 3:</i>	<i>Transistor 4:</i>
<b>1. Messung:</b>	$g_1 = 40.9^\circ\text{C}$	$g_2 = 31.6^\circ\text{C}$	$g_3 = 29.9^\circ\text{C}$	$g_4 = 27.9^\circ\text{C}$
<b>2. Messung:</b>	$g_1 = 31.2^\circ\text{C}$	$g_2 = 38.8^\circ\text{C}$	$g_3 = 30.2^\circ\text{C}$	$g_4 = 28.1^\circ\text{C}$
<b>3. Messung:</b>	$g_1 = 29.1^\circ\text{C}$	$g_2 = 30.3^\circ\text{C}$	$g_3 = 43.9^\circ\text{C}$	$g_4 = 31.1^\circ\text{C}$
<b>4. Messung:</b>	$g_1 = 27.7^\circ\text{C}$	$g_2 = 28.5^\circ\text{C}$	$g_3 = 32.0^\circ\text{C}$	$g_4 = 39.2^\circ\text{C}$

Die Drain-Source Widerstände der einzelnen Transistoren können in einem Vektor übersichtlich dargestellt werden:

$$r_{DSon} = [17.9 \quad 16.6 \quad 16.3 \quad 15.6] \cdot [\text{m}\Omega]$$

Der typische Wert für das  $r_{DSon}$  laut Datenblatt für eine Gate-Source-Spannung von 10V und einer Gehäusetemperatur von 25°C ist 13.5mΩ, der maximale 16.5mΩ. Die deutliche Abweichung der Messwerte vom typischen Wert hin zum Maximalwert ist mit der Erwärmung der Transistoren zu begründen.

Die Temperaturkopplungsmatrix  $\underline{\underline{\kappa}}$  hat in dieser Konfiguration folgende Koeffizienten:

$$\underline{\underline{\kappa}} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 35.45 & 14.90 & 10.04 & 6.91 \\ 14.72 & 33.17 & 12.97 & 8.96 \\ 10.93 & 12.50 & 46.27 & 17.93 \\ 6.47 & 7.45 & 14.93 & 36.36 \end{bmatrix} \cdot [\text{K/W}]$$

Die Invertierung der Matrix  $\underline{\underline{\kappa}}$  ergibt folgende neue Matrix  $\underline{\underline{\kappa}}^{-1}$ :

$$\underline{\underline{\kappa}}^{-1} = \begin{bmatrix} 35.44 & -14.37 & -3.12 & -1.66 \\ -13.67 & 39.76 & -6.97 & -3.77 \\ -3.94 & -6.16 & 27.91 & -11.49 \\ -1.88 & -3.06 & -9.48 & 33.28 \end{bmatrix} \cdot [\text{mW/K}]$$

### 3.2 Messung und Auswertung von Verlusten

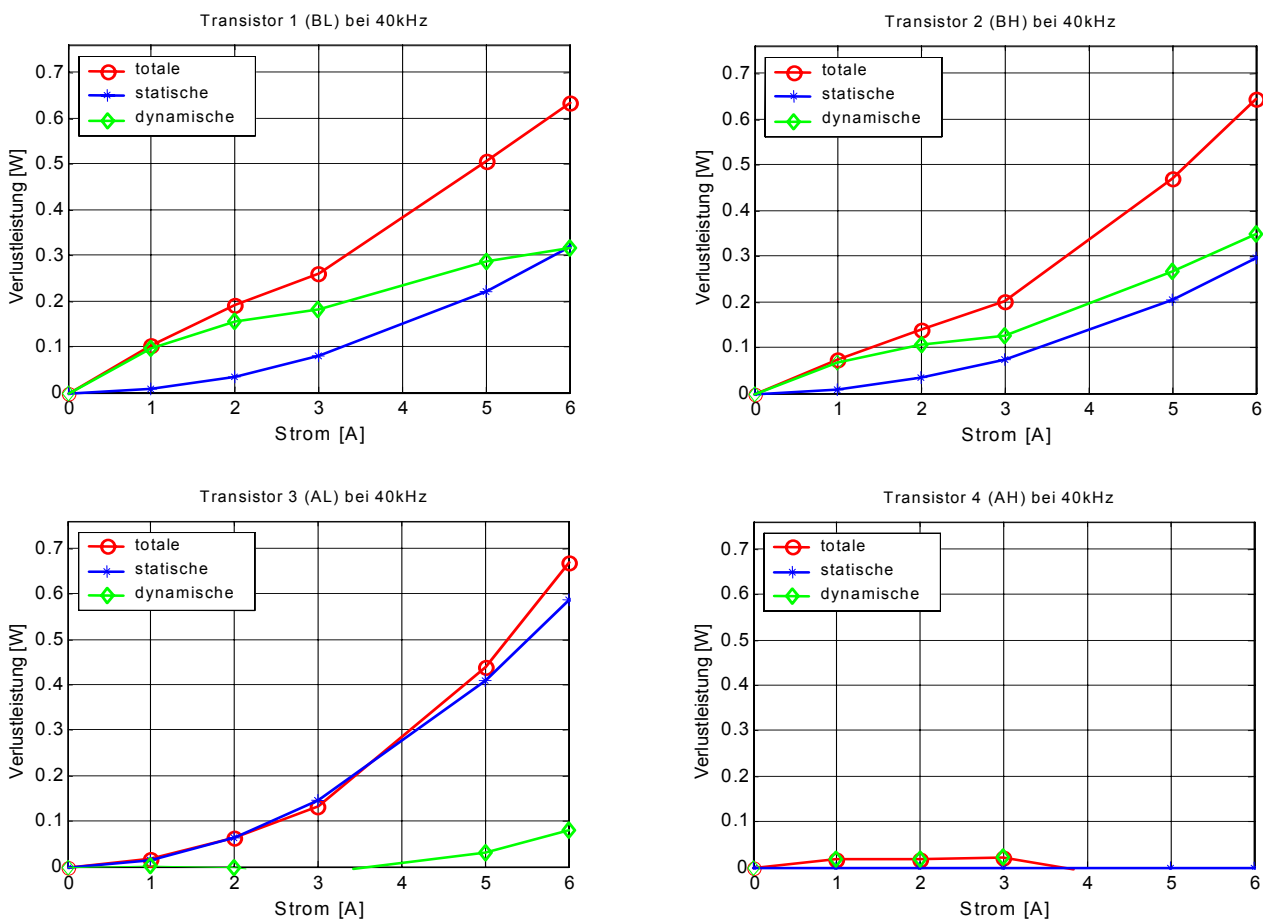
Nun können bei verschiedenen Betriebspunkten die Verluste von den einzelnen Transistoren in einer H-Brücke bestimmt werden. Als Beispiel wurde folgende Schaltkonfiguration gewählt: Transistor 1 (BL) und Transistor 2 (BH) schalten mit einem Dutycycle von je 50%, Transistor 3 (AL) ist immer eingeschaltet, Transistor 4 (AH) ist immer ausgeschaltet. Die Last ist induktiv. Somit erwarten wir für die einzelnen Transistoren folgende Verluste: Transistor 1 (BL) und Transistor 2 (BH) statische und dynamische Verluste, Transistor 3 (AL) nur statische Verluste, Transistor 4 (AH) eigentlich keine oder nur sehr wenige Verluste. Mit dieser Schaltkonfiguration kann die Genauigkeit des Modells sehr genau geprüft werden.



Bei einer Schaltfrequenz von 40 kHz und einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta_A = 24.2^\circ\text{C}$  wurden bei verschiedenen Strömen folgende Temperaturen gemessen:

<b>Strom:</b>	<b>1 A</b>	<b>2 A</b>	<b>3 A</b>	<b>5 A</b>	<b>6 A</b>
<b>Transistor 1 (BL):</b>	29.3 °C	33.8 °C	37.9 °C	53.4 °C	62.7 °C
<b>Transistor 2 (BH):</b>	28.6 °C	32.6 °C	36.6 °C	52.7 °C	63.2 °C
<b>Transistor 3 (AL):</b>	27.4 °C	31.3 °C	36.1 °C	55.4 °C	69.4 °C
<b>Transistor 4 (AH):</b>	26.3 °C	28.1 °C	30.1 °C	36.3 °C	41.5 °C

Die totale Verlustleistung wurde mit Formel (3) berechnet. Die Aufteilung in statische und dynamische Verlustleistung erfolgte mit Formel (4) und (5).



**Fig. 4** Zeigt die berechnete Verlustleistung der einzelnen Transistoren

Die Genauigkeit des Modells ist verblüffend. Der Transistor 1 (BL) und Transistor 2 (BH) haben wie erwartet die ziemlich gleichen Verlustleistungen. Der Transistor 3 (AL) hat nur statische Verluste. Die Abweichung zur Berechnung ist mit einer zusätzlichen Erhöhung des Drain-Source Widerstandes mit zunehmender Temperatur zu erklären. Der Transistor 4 (AH) verursacht, obwohl er auch warm wird, keine Verlustleistung. Die Differenz zu Null zeigt die Genauigkeit des Modells auf – diese liegt ungefähr bei 5-10% der Messwerte.

Betrachten wir im Folgenden nur noch den Transistor 1 (BL) und variieren zusätzlich zum Strom auch die Frequenz der H-Brücke, so kann man die Verlustleistung als Funktion des Stromes und der Frequenz darstellen:

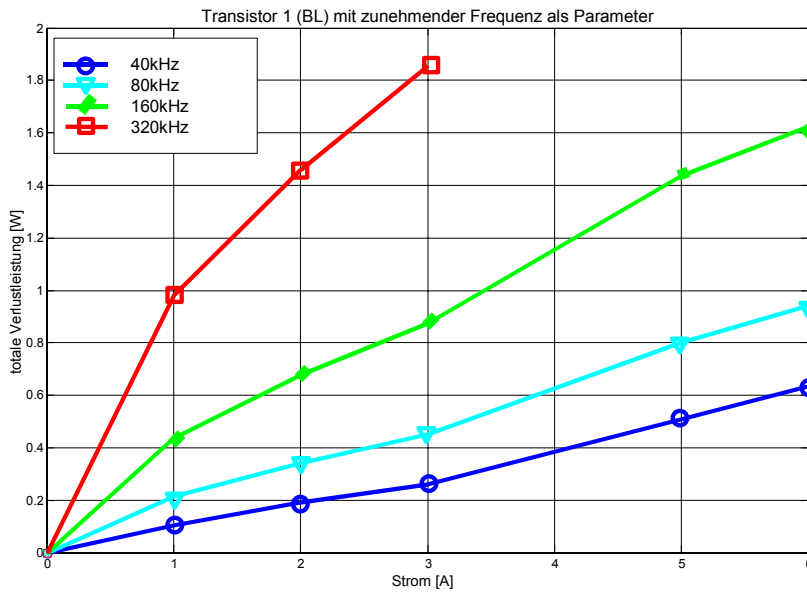


Fig. 5 Zeigt die totale Verlustleistung des Transistors 1 (BL) als Funktion des Stromes und Frequenz

Dies kann man auch in einem dreidimensionalen Plot darstellen:

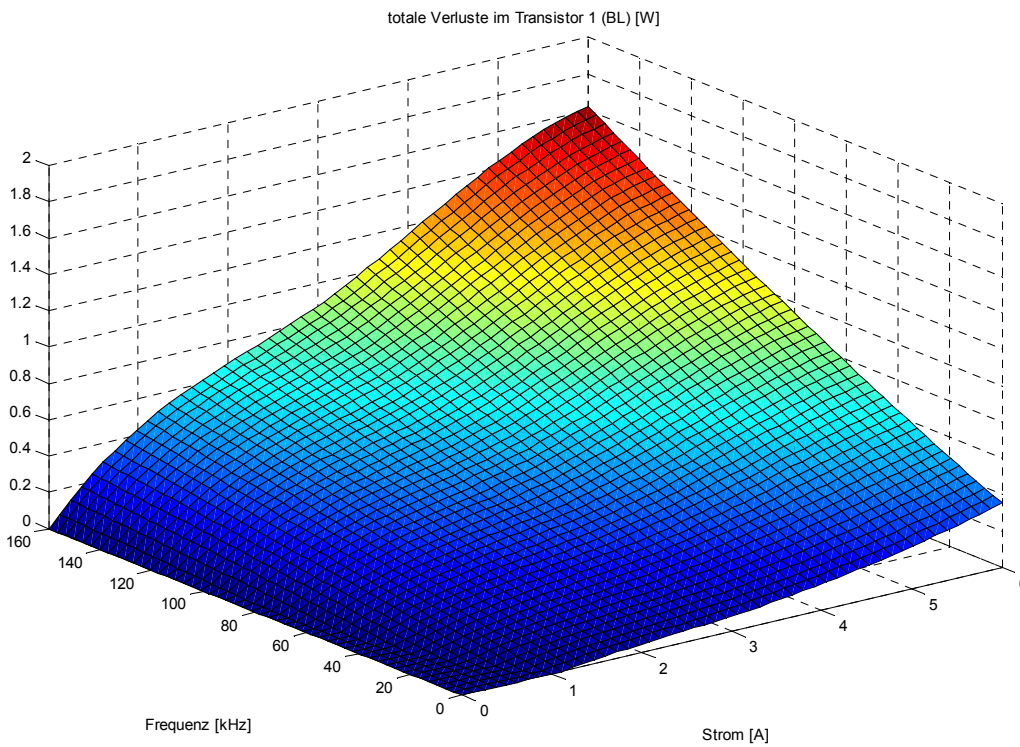


Fig. 6 Zeigt die Verluste des Transistors 1 (BL) als 3-D Plot