

Vladislav Meier

Bericht über den aktuellen Stand der Transient-Hot-Bridge-Technik

Stand: 10.01.2011

Kontakt:

Vladislav Meier

AG1.74

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Bundesallee 100

D-38116 Braunschweig

Tel: +49 531/592-3217

e-mail: vladislav.meier@ptb.de

Beschreibung des Messverfahrens

Das Heizbrückenverfahren „Transient-Hot-Bridge (THB)“ für Messungen der thermischen Transporteigenschaften von Stoffen ist eine Weiterentwicklung der Heizstreifenmethode „Transient-Hot-Strip (THS)“. Beide genannten Verfahren gehören zur Klasse der instationären, also zeitabhängigen Messmethoden, die, im Gegensatz zu den stationären Verfahren, sehr viel kürzere Messzeiten bieten und jeweils neben der Wärmeleitfähigkeit auch gleichzeitig noch die Temperaturleitfähigkeit bestimmen können. Das wesentliche Bauelement beider Verfahren ist der streifenförmige elektrische Leiter, der sowohl als Joulesche Wärmequelle als auch als Widerstandsthermometer dient (Fig. 1a). Eingebettet zwischen die beiden Probenhälften (Fig. 1b) gibt der Streifen während der Messung einen konstanten Heizstrom ab, wobei er auch sich selbst erwärmt. Sein zeitlicher Temperaturanstieg ist das Maß für die genannten thermischen Transporteigenschaften. Während beim THS-Verfahren nur ein einziger Streifen, beispielsweise aus einer sehr dünnen Nickelfolie, eingesetzt wird, sind es deren vier beim THB-Verfahren. Durch die geschickte Anordnung der vier gleichen Streifen konnten die wesentlichen messtechnischen Nachteile des THS-Verfahrens überwunden werden, ohne auf dessen Vorteile verzichten zu müssen.

Die wichtigsten Entwicklungsschritte vom THS-Messgerät zum THB-Gerät sind:

1. THS-Verfahren: Als Sensor dient ein einziger Heizstreifen aus Ni-Folie ($100 \times 3 \times 0,01 \text{ mm}^3$) mit einem elektrischen Widerstand von etwa $0,25 \Omega$. Die Quelle „ I “ prägt dem Streifen einen konstanten elektrischen Strom auf, der mit dem Amperemeter „ A “ gemessen wird. Der Spannungsabfall zwischen den beiden Enden des Streifens erzeugt das Ausgangssignal am Voltmeter „ V “.

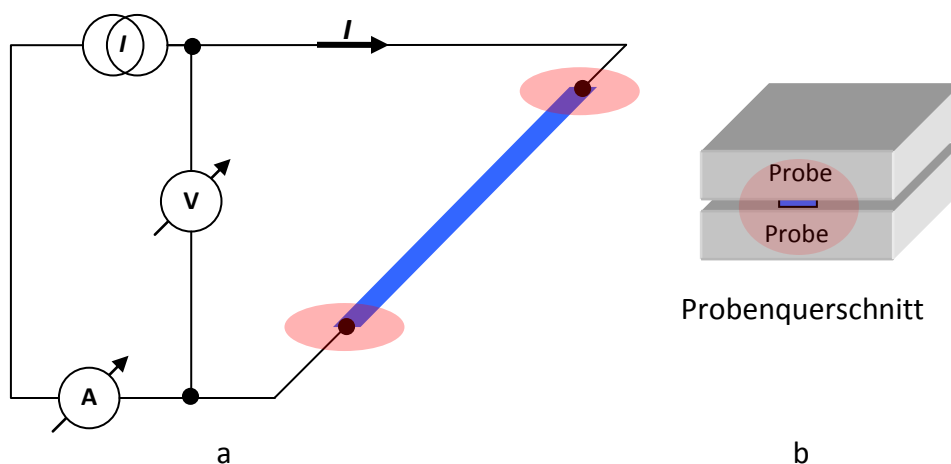


Fig. 1

Diese einfache Anordnung hat drei wesentliche messtechnische Nachteile:

- 1) Während der Messung fließt ein Teil der im Streifen erzeugten Wärme über die beiden elektrischen Leitungen ab. Dieser Wärmeverlust verhindert den von der zugrundeliegenden Theorie geforderten homogenen Temperaturverlauf längs des Streifens und führt zu systematischen Messabweichungen (Randeinfluß (end-effect)).
- 2) Wegen des geringen elektrischen Widerstandes des Streifens ist dieser bei einer Temperaturänderung relativ unempfindlich, das Ausgangssignal bleibt sehr gering.
- 3) Die nur 5 bis 10 μm dicke und wenige Millimeter breite Nickelfolie ist sehr empfindlich gegen mechanische Belastung, beispielsweise durch Zug oder Verdrehen.

2. Zur Kompensation des Randeinflusses erhält der Streifen zwei zusätzliche elektrische Anschlüsse mit einem Abstand rechts und links von seiner Mitte (Fig. 2). Der Abstand zwischen diesen beiden Potentialabgriffen wird so gewählt, dass der dazwischenliegende Temperaturverlauf noch homogen ist. Das Voltmeter „V“ wird nun hier angeschlossen. Zur Verbesserung seiner mechanischen Stabilität bettet man den Streifen zwischen dünne Folien aus Polyimid (Kapton[®]) und verklebt die Schichten miteinander.

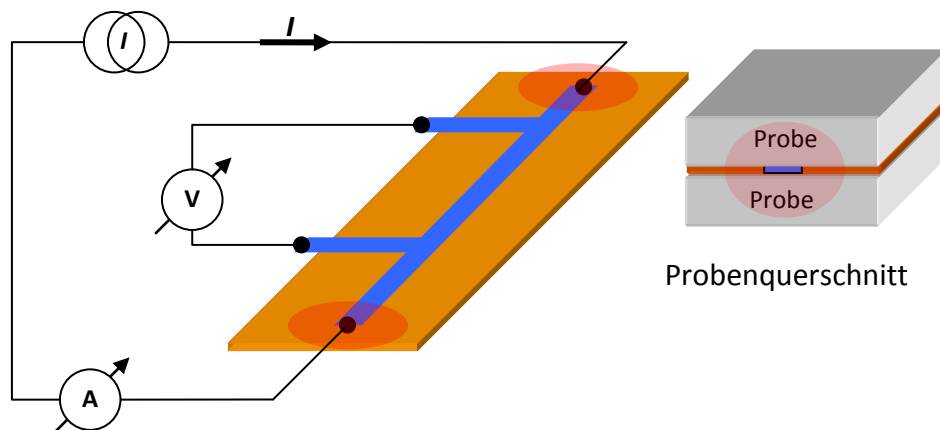


Fig. 2

3. Zur Vergrößerung seines elektrischen Widerstandes verlängert man den Strompfad des Streifens von bisher 100 mm durch Mäanderbildung auf ein Vielfaches (Fig. 3). Da hierbei die ursprüngliche Breite des Streifens erhalten bleiben soll, geht mit dieser Designänderung eine Verschlankung der Breite des Strompfades, was den Widerstand weiter erhöht. Mittels Finite-Elemente-Untersuchungen lässt sich zeigen, dass die Lücken zwischen den einzelnen Strombahnen des Mäanders die Temperaturverteilung in Querrichtung nicht signifikant beeinflussen. Nachteilig an dieser Anordnung ist zunächst, dass die Potentialkontakte wegfallen und somit der Randeffect wiederum ungünstig wirken kann.



Fig. 3

4. Zur Kompensation des Randeffects eines mäandrierten Streifens teilt man diesen in zwei Segmente mit den unterschiedlichen Längen L_K und L_L (Fig. 4). Auf diese Weise entstehen zwei galvanisch getrennte Einzelwiderstände, die jedoch thermisch zusammenhängen und nach wie vor einen streifenförmigen Heizer, den sogenannten Tandemstreifen bilden. Subtrahiert man nun den Spannungsabfall des kurzen Segments von demjenigen des langen Segments, so erhält man ein Signal, das aus der Mitte des Streifens mit der Länge L_{eff} stammt.

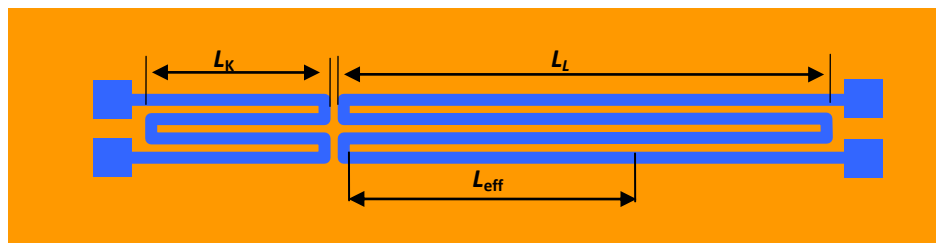
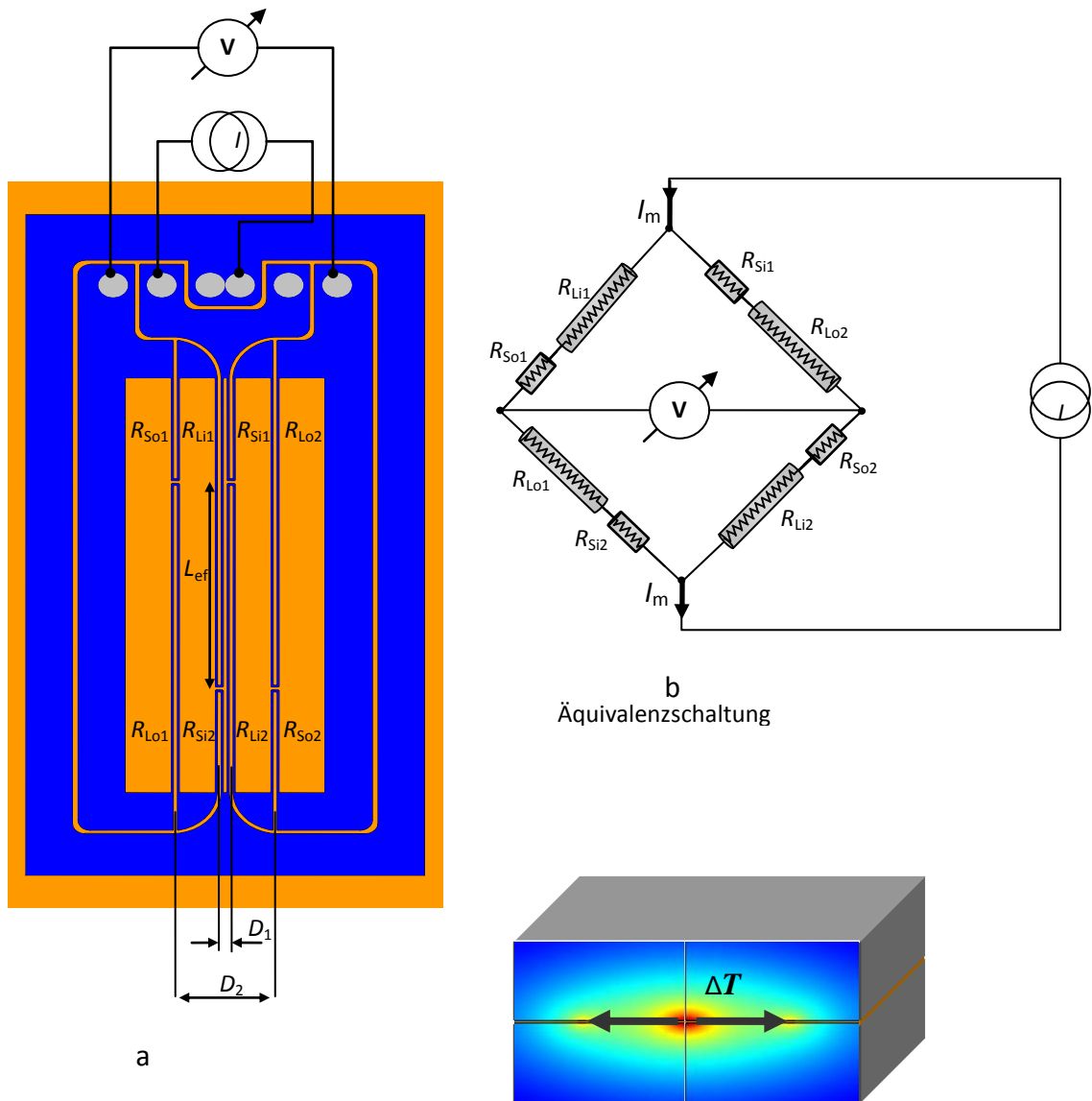


Fig. 4

5. Zur wirkungsvollen Verbesserung der Empfindlichkeit des Tandemstreifens geht man zu einer Brückenschaltung aus vier parallelen Tandemstreifen über. Diese werden paarweise in der Mitte der Trägerfolie und jeweils einzeln an deren beiden Ränder zum sogenannten Hot-Bridge-Sensor angeordnet (Fig. 5). Durch geschickte Verschaltung aller acht Widerstandselemente entsteht eine symmetrische Brücke, die keinen Nullabgleich erfordert. Die Diagonalspannung der Brücke ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den mittleren Teilen (L_{eff}) der inneren und äußeren Streifen.



Probenquerschnitt während der Messung
Mit Farbverlauf ist das erzeugte Temperaturfeld
dargestellt (FEM-Simulation)

Fig. 5

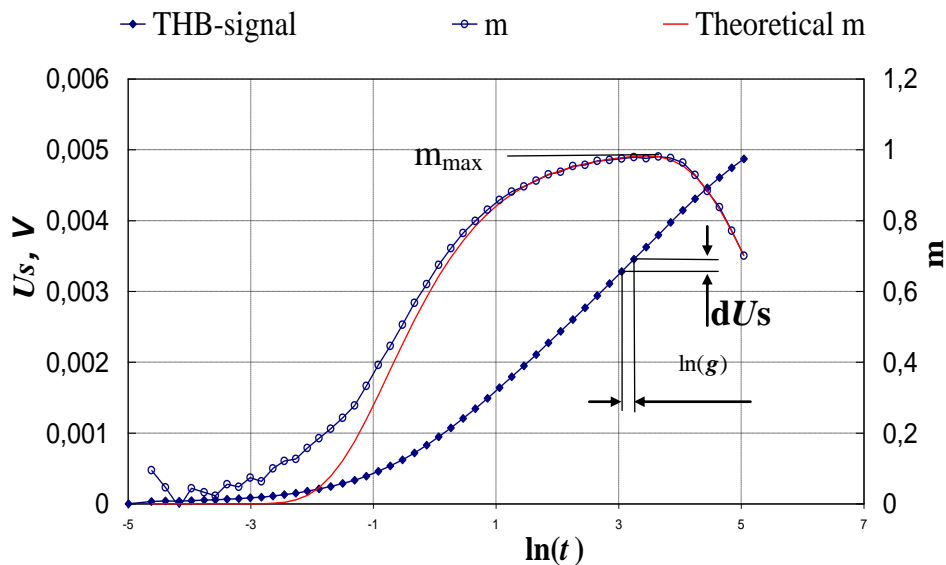


Fig. 6. Typisches THB-Messsignal $U_s(\ln t)$ und seine dimensionslose Steigung (Ableitung) m

Die Abbildung Fig. 6 zeigt eine typische Messkurve des THB-Sensor-Ausgangssignal, $U_s(\ln t)$, sowie deren erste dimensionslose Ableitung $m(\ln t)$ nach $\ln t$. Die maximale Steigung der durch Selbsterwärmung mit einem Strom I_m entstehenden Temperaturdifferenz ΔT , beziehungsweise die maximale Steigung des Signals $d(U_s)_{\max}$ ist ein Maß für Wärmeleitfähigkeit. Die Zeit t_{\max} für dieses Maximum ist ein Maß für die Temperaturleitfähigkeit der Probe.

Die charakteristischen Parameter eines THB-Sensors sind:

- Elektrischer Widerstand - R_s ,
- Effektive Länge - L_{eff} ,
- Effektiver elektrischer Widerstand (Widerstand auf der effektiven Länge) - R_{eff} ,
- Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes der Ni-Folie - α ,
- Abstand zwischen den Längsachsen der inneren Heizstreifen - D_1 ,
- Abstand zwischen den Längsachsen der äußeren Heizstreifen - D_2

Die Arbeitsgleichungen sind:

$$WLF = \frac{\alpha \cdot R_{eff}^2 \cdot \ln(g)}{4 \cdot \pi \cdot L_{eff} \cdot d(U_s)_{\max}} \cdot \left(\frac{I_m}{2}\right)^3 \cdot m_{\max} \quad , \quad \text{hier} \quad m_{\max} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{2 \cdot D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}} - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{2 \cdot D_2^2}{D_2^2 - D_1^2}}$$

$$TLF = \frac{D_2^2 - D_1^2}{8 \cdot t_{\max} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}$$



Das THB-Meßgerät kann beispielsweise aus folgenden Komponenten aufgebaut sein: Foliensensor, Sourcemeter Keithley 26XX) und, falls erforderlich, ein PC oder Laptop.

Verglichen mit marktüblichen Mess-Instrumenten hat das THB-Verfahren folgende Vorteile:

- Simultane Messung von Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit sowie vol. spezifische Wärme
- Die thermische Eindringtiefe in das Probematerial entspricht der Sensorkonstante D_2
- Automatische Auswertung der Messung mit Angabe von Messwert und zugehöriger Messunsicherheit
- Einfache Bedienung
- Unkomplizierte Probenvorbereitung:
jeweils eine ebene und glatte Oberfläche pro Probenhälfte genügen, insbesondere sind weder Bohrungen noch Nuten erforderlich
- Einfache, kostengünstige Herstellung der THB-Sensoren
ähnlich Gedruckter Schaltungen

Zurzeit sind verschiedene Größen von Sensoren erprobt. Die kleinen Sensoren (42x22 mm) sind für die Messungen mit Flüssigkeiten und Kunststoffen gut geeignet, während mit den großen Sensoren (162x82 mm) kann man gut Dämmstoffe oder Metalle messen.

Das Diagramm Fig. 7 zeigt die Messbereiche, welche zurzeit vom THB-Verfahren abgedeckt werden.

Messbereich für THB-Messsystem

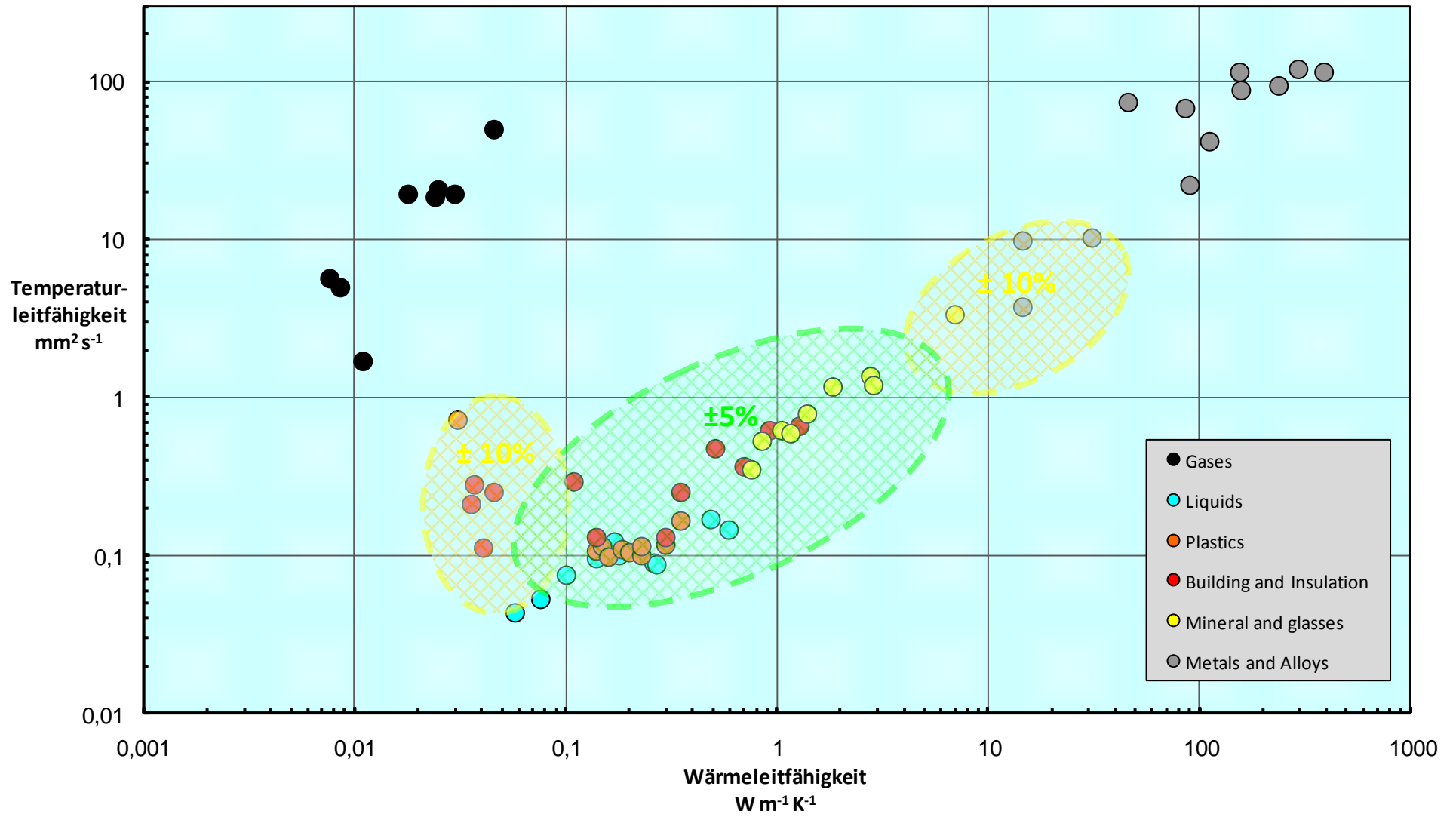


Fig. 7

Das grün schraffierte Feld zeigt das Gebiet mit der geringsten Messunsicherheit. Es umfaßt die gebräuchlichsten Baumaterialien, Kunststoffe, Minerale und Naturstoffe:

- von 0,05 bis 5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ für Wärmeleitfähigkeit und
- von 0,05 bis 5 $mm^2 \cdot s^{-1}$ für Temperaturleitfähigkeit
- mit einer Messunsicherheit $\pm 5 \%$ (Erweiterungsfaktor $k = 2$).

Innerhalb der beiden gelb schraffierten Gebiete beträgt die Messunsicherheit 10 %. Dieser Wert ist noch hinreichend für viele praktische Anwendungen. Da die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auch hier wesentlich (fünffach) besser ist als die Messunsicherheit, kann man mögliche Änderungen der Messgrößen gut verfolgen.

Es muß erwähnt werden, dass sowohl das Heizstreifen- als auch das Heizdrahtmessverfahren grundsätzlich in radialer Richtung messen. Beide Verfahren können daher sehr empfindlich gegen Inhomogenität in einer Probe sein.

- Die Materialkennwerte der Probe sollen richtungsunabhängig sein (isotrop)
- Die Breite des Heizstreifens darf nicht vom Strukturmaß der Probe überschritten werden.

Vor jeder Messung sollte die Probenstruktur untersucht werden. Das betrifft insbesondere Verbundmaterialien.

Nach dem aktuellen Entwicklungsstand des THB-Verfahrens sind folgende Materialien nicht hinreichend präzise messbar:

- Stoffe mit einer geringen volumetrischen Wärmekapazität, wie beispielsweise Dämmstoffe mit einer Dichte von weniger als $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ sowie Gase.
- Metalle mit einer Wärmeleitfähigkeit von über $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, wegen des vergleichsweise großen thermischen Widerstandes zwischen dem Sensor und der Probe
- Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität unter $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ wegen der hohen Neigung zu Konvektion (Konvektion ist nicht im Auswertungsmodell berücksichtigt).

Die Arbeitstemperatur von THB-Sensoren liegt zwischen -30 und $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Für Kurzzeit-Belastungen sind Temperaturen zwischen -50 und bis $250 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich.

Die empfohlenen Literaturquelle:

1. "Springer handbook of materials measurement methods"
von Czichos, Saito, Smith, 2006
2. „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Heizdraht-Verfahren“,
DIN EN 993-14, DIN EN 993-15
3. „Transient hot-strip method for simultaneously measuring thermal conductivity and
thermal diffusivity of solids and fluids“, S. Gustafsson et. all, J. Phys. D: Appl. Phys.,
Vol. 12, 1979
4. "Transient Hot Strip (THS) Method: Uncertainty Assessment", Hammerschmidt, U.,
Sabuga, W., International Journal of Thermophysics, 21, (1), 217-248, 2000
5. "New Transient Hot-Bridge Sensor to Measure Thermal Conductivity, Thermal
Diffusivity, and Volumetric Specific Heat", U. Hammerschmidt, V. Meier, International
Journal of Thermophysics, Vol. 27, N. 3, 2006
6. „Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgrößer einer Probe“, V. Meier,
DE 10 2008 020 471
7. „Sensor zur Messung der Wärmeleitfähigkeit einer Probe“, V. Meier, U.
Hammerschmidt, DE10323827A1, 05.01.2005