

Transiente Messverfahren: Entwicklungen und Tendenzen

Ulf Hammerschmidt

Phys.-Techn. Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38023 Braunschweig,

ulf.hammerschmidt@ptb.de

Kurzfassung: Mit den Worten „good“ und „poor“ beschrieb in Philadelphia im Jahre 1753 der Staatsmann und Verleger, Benjamin Franklin, erstmalig die „unterschiedliche Befähigung von Stoffen Wärme aufzunehmen und zu befördern“. Er schlug vor, in Wachs getauchte Stangen verschiedener Metalle mit einer gemeinsamen Wärmequelle zu verbinden und in festen Zeitabständen deren „Schmelzlängen“ zu messen.

Jan Ingenhausz, Physikus und Botaniker des Kaisers am Hof zu Wien, führte dieses, aus heutiger Sicht transiente Experiment, 1789 aus. Er fand, dass das Quadrat der abgeschmolzenen Länge die jeweilige Fähigkeit eines Stoffes zur Leitung von Wärme beschreibt. Dieses erste Maß für den Materialparameter „Wärmeleitfähigkeit“ wurde 30 Jahre später mathematisch bestätigt vom zweiten Fourierschen Gesetz, der theoretischen Grundlage aller zeitabhängigen, also transienten Verfahren zur Messung der genannten thermischen Transportgröße.

Obwohl am Anfang das transiente Verfahren nach Franklin stand, wurden zuerst zeitunabhängige, stationäre Messmethoden für die Wärmeleitfähigkeit entwickelt und vervollkommen, so wesentlich von Nusselt (Kugel) und Poensgen (Platte). Dies lag an der noch unausgereiften elektrischen Messtechnik des 19. Jahrhunderts und, noch immer andauernd, an der komplizierten formalen Darstellung transienter Temperaturfelder. So sind bisher nur wenige analytische Lösungen der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung bekannt. Sie sind ein- oder zweidimensional, weil die mathematischen Schwierigkeiten sehr schnell mit der Anzahl der unabhängigen Variablen wachsen.

Die Kunst des Experimentators besteht also darin, die bekannten Lösungen in zuverlässige Messtechnik umzusetzen, nicht umgekehrt.

Messgeräte für die Wärmeleitfähigkeit bestehen grundsätzlich aus vier verschiedenen Bauelementen: Wärmequelle, Wärmesenke, Thermometer und natürlich der Probe. Bei stationär arbeitenden Geräten findet man diese Elemente in zum Teil unterschiedlicher Anzahl jeweils gesondert vor. Die Mehrzahl transienter Gerätetypen hingegen nutzt die Probe gleichzeitig als Wärmesenke und kombiniert Wärmequelle und Temperatursensor in einem Element. So benötigt die diese Geräteklasse nur zwei statt vier Bauelementtypen. Ferner entfallen die bei stationären Geräten zwingend erforderlichen Schutzheizungen zur Herstellung adiabatischer Randbedingungen. Transiente Geräte beenden den Messvorgang, bevor äussere Randbedingungen verletzt werden.

Die rasante Entwicklung der elektronischen Messdatenerfassung und rechnergestützten –verarbeitung einschließlich numerischer Modelle zeitabhängiger Temperaturfelder (z.B. Finite Elemente Methoden) hat inzwischen eine Vielzahl

verschiedenartiger transienter Verfahren hervorgebracht. Sogar die „Lücke“ zwischen den transienten und den stationären Methoden wurde mit den sogenannten quasi-stationären Techniken geschlossen.

Transiente Verfahren lassen sich hinsichtlich ihrer jeweiligen Wärmequelle klassifizieren: (1) entsprechend der Form der zugeführten Energie (optisch, elektrisch), (2) nach ihrem Ort (eingebettet, aufgesetzt, berührungslos) und (3) ihrer Geometrie (linien-, streifen-, flächen-förmig) sowie (4) dem zeitlichen Verlauf der Anregung (pulse/flash, periodic, stepwise).

Verglichen mit stationär arbeitenden Messmethoden laufen transiente Verfahren wesentlich schneller ab, je nach Gerätetyp um bis zu fünf bis sechs Größenordnungen. Sie begnügen sich mit kleineren Proben und einem zumeist geringeren technischen Aufwand, was sie am Markt preisgünstiger macht. Ferner ermöglichen viele Verfahren die simultane Bestimmung weiterer Messgrößen, wie der Temperaturleitfähigkeit und der volumetrischen spezifischen Wärme.

Das Rennen um das genaueste Messverfahren ist für fluide Proben wohl endgültig entschieden: the winner is ... the transient hot wire. Hier werden Unsicherheiten von unter 0,8% veröffentlicht.

Für feste Proben, Schüttgüter, Pulver, Pasten usw. bestehen kaum noch Unterschiede hinsichtlich der Messunsicherheit der beiden diskutierten Verfahrensklassen. So steht die Ablösung des „Arbeitspferdes“ der Wärmeleitfähigkeitsmessungen, des Plattengerätes, durch ein geeignetes transientes Verfahren mutmaßlich in den nächsten zehn Jahren an.

Wesentliche Weiterentwicklungen transienter Verfahren werden zur Zeit von Arbeitsgruppen am NIST, der PTB, der slowakischen Akademie der Wissenschaften, den Universitäten Southampton und Lissabon betrieben sowie von einigen europäischen und amerikanischen Messgeräteherstellern. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der immer präziseren mathematischen Beschreibung der zeitabhängigen Temperaturfelder sowie der auftretenden Randbedingungen. Damit einher geht die weitere Verringerung der Messunsicherheit. Auch die Erweiterung der Zustandsbereiche von Temperatur und Druck (Gase) wird intensiv betrieben.