Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 15 (1942)
Heft: III

Artikel: Zwei Beiträge zur Hitzdraht-Messmethode
Autor: Dätwyler, G.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-111305

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Zwei Beiträge zur Hitzdraht-Messmethode

von **G. Dätwyler.**
Institut für Aerodynamik, ETH.

(24. I. 1942.)

I.

Bei *Turbulenzmessungen* mit dem Hitzdrahtanemometer erfordert die *Eichung* der Hitzdrahtsonde einen beträchtlichen Mehraufwand an Einrichtungen und Arbeit. Die Sonde muss ja meistens in einem besonderen Eichkanal für einen ganzen Geschwindigkeitsbereich und für verschiedene Heizstromwerte geeicht werden. Die so gewonnenen Eichkurven geben die am Hitzdraht je nach Strom I und Windgeschwindigkeit V herrschende Spannung

$$E = E(V; I) \quad \text{(siehe Fig. 1).}$$

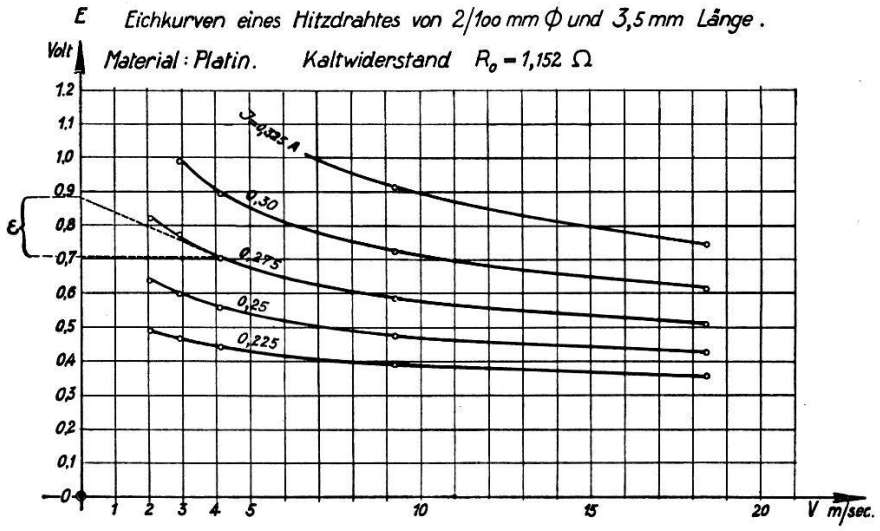

Fig. 1.

Aus ihnen folgt die Empfindlichkeit $\left(\frac{dE}{dV}\right)$ als Tangente im jeweiligen Arbeitspunkte des Hitzdrahtes. Sie ist nun aber oft zeitlich variabel und besonders auch temperaturabhängig. Ferner beeinflusst der Turbulenzgrad bei Eichung und Messung die Empfindlichkeit, und bei Messungen in Grenzschichten sehr nahe an festen Oberflächen wird der Wärmezustand des Hitzdrahtes durch die Wand in unbekanntem Masse beeinflusst. Es wäre daher wün-

schenswert, ohne besondere Einrichtungen die Eichung des Hitzdrahtes jeweils an Ort und Stelle durchzuführen, um jede Messung durch die zugehörige Eichung zu ergänzen.

Nachfolgend soll ein Eichverfahren beschrieben werden, das die Bestimmung der Hitzdraht-Empfindlichkeit direkt auf prozentuelle Turbulenzgrade erlaubt, unter gleichzeitiger Vermeidung der oben angeführten Schwierigkeiten.

Bei einem mittleren Schwankungsquadrat $\overline{(dV)^2}$ ist der prozentuelle Turbulenzgrad gegeben durch den Quotienten

$$v' = \frac{\sqrt{\overline{(dV)^2}}}{V}.$$

Er wird berechnet aus dem am Turbulenzmessgerät angezeigten quadratischen Mittelwert der Hitzdraht-Signalspannung e nach der Beziehung

$$v' = \frac{1}{V} \cdot \frac{e}{\left(\frac{dE}{dV}\right)_I} = \frac{e}{E} \cdot \frac{\left(\frac{dV}{V}\right)_I}{\left(\frac{dE}{E}\right)_I} \text{ [1]}.$$

Nach der üblichen Methode müsste nun der Quotient $\left(\frac{dE}{dV}\right)_I$ den Eichkurven entnommen werden. Die neue Methode ersetzt, wie wir noch sehen werden, diese „Geschwindigkeitseichung" bei konstantem Heizstrom I durch eine „Stromeichung" bei konstanter (und meist unbekannter) Geschwindigkeit V. Diese Eichung ergibt den Zusammenhang von E und I bei $V =$ const., und es fragt sich nun, wie der Quotient $\left(\frac{dV}{V}\right)_I \Big/ \left(\frac{dE}{E}\right)_I$ auf diese Daten zurückgeführt werden kann.

Wir beginnen mit dem Nenner $\left(\frac{dE}{E}\right)_I$. Offenbar ist bei $I =$ const.

$$\left(\frac{dE}{E}\right)_I = \left(\frac{dR}{R}\right)_I.$$

Dagegen, bei $V =$ const.,

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_V = \left(\frac{dE}{E}\right)_V - \left(\frac{dI}{I}\right)_V,$$

wie sich aus dem Ohm'schen Gesetze leicht ableiten lässt.

Aus diesen zwei Gleichungen folgt für gleiche Effekte

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_V = \left(\frac{dR}{R}\right)_I \cdots \left(\frac{dE}{E}\right)_I = \left(\frac{dE}{E}\right)_V - \left(\frac{dI}{I}\right)_V.$$

[1]) Subscripta bedeuten: $I \ldots\ldots I =$ const., $V \ldots\ldots V =$ const.

Der Zähler $\left(\frac{dV}{V}\right)_I$ lässt sich mit Hilfe der KING'schen Gleichung[1]) durch einen äquivalenten Wert von $\left(\frac{dI}{I}\right)_V$ ersetzen. Diese Gleichung lautet

$$E \cdot I = I^2 \cdot R = (A + B\sqrt{V}) \cdot (t - t_0)^2 + (K + \Gamma\sqrt{V}) \cdot (t - t_0),$$

und stellt die Wärmebilanz des Hitzdrahtes dar. Die Glieder mit den Koeffizienten A und K geben die durch Strahlung, Konvektion und Ableitung, die Glieder mit $\sqrt{V}$ die durch den Wind V fortgeführte Wärmemenge an. Mit

$$R = R_0\,[1 + \alpha(t - t_0)]$$

folgt

$$\frac{I^2 R}{R - R_0} = (a + b\sqrt{V}) \cdot (R - R_0) + (\varkappa + \gamma\sqrt{V}).$$

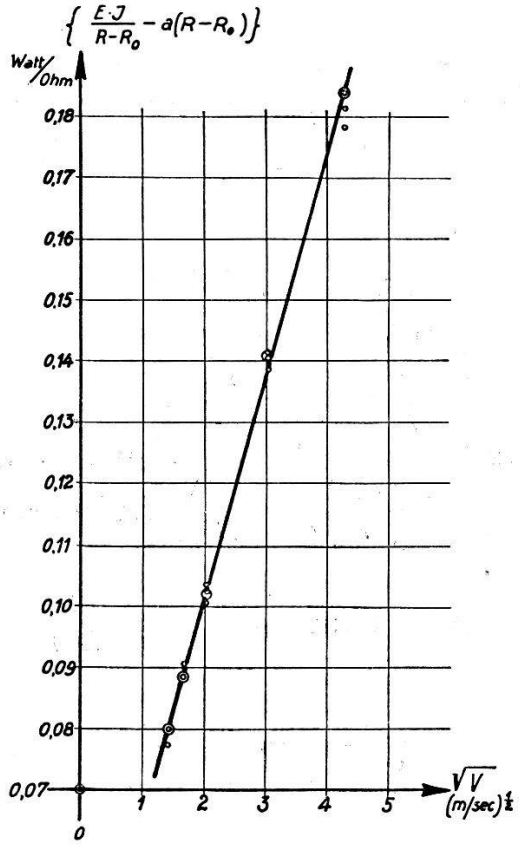

Fig. 2.

Über $\sqrt{V}$ als Abszisse aufgetragen ergibt sich eine Gerade (Fig. 2).

Für I = const. folgt nun

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_I = -\left(\frac{dV}{V}\right)_I \cdot \frac{\frac{\sqrt{V}}{2} \cdot [\gamma + b\,(R - R_0)]}{\frac{I^2 R R_0}{(R - R_0)^2} + R\,(a + b\sqrt{V})}.$$

[1]) BURGERS, Hitzdrahtmessungen. Handbuch der Experimentalphysik von Wien-Harms IV, 1. Teil, S. 635—649.

Für $V = \text{const.}$ ergibt sich dagegen

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_V = \left(\frac{dI}{I}\right)_V \cdot \frac{\dfrac{2\,I^2 R}{R - R_0}}{\dfrac{I^2 R\,R_0}{(R-R_0)^2} + R(a + b\sqrt{V})}\,.$$

Für gleiche Effekte

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_V = \left(\frac{dR}{R}\right)_I$$

folgt

$$\left(\frac{dV}{V}\right)_I = -\,\frac{4\left(\dfrac{dI}{I}\right)_V}{1 - \dfrac{a(R-R_0)^2 + \varkappa(R-R_0)}{I^2 R}}\,.$$

Das heisst: die einer gegebenen Heizstromänderung $\left(\frac{dI}{I}\right)_V$ äquivalente Geschwindigkeitsänderung $\left(\frac{dV}{V}\right)_I$ muss mindestens viermal so gross sein wie jene. Der Hitzdraht reagiert also auf Heizstromänderungen mehr als viermal so stark wie auf Geschwindigkeitsänderungen.

Für $V = 0$ findet man aus der KING'schen Gleichung, dass der Nennerausdruck

$$\frac{a(R-R_0)^2 + \varkappa(R-R_0)}{I^2 R}$$

angibt, wieviel von der gesamten Heizleistung $(I^2 R)$ durch Strahlung, Konvektion und Ableitung verloren geht $(a[R-R_0]^2 + \varkappa\,[R-R_0])$, also nicht vom Winde V fortgeführt wird. Der Ausdruck $(a[R-R_0]^2 + \varkappa\,[R-R_0])$ ist demnach gleich der Heizleistung $(I^2 R)_{V=0}$, die bei abgestelltem Winde den Hitzdraht auf die gleiche Temperatur bringt wie die Heizleistung $(I^2 R)$ im Winde V. Es ist also

$$\frac{a\,(R-R_0)^2 + \varkappa(R-R_0)}{I^2 R} = \left[\frac{(E\cdot I)_{V=0}}{(E\cdot I)_{V>0}}\right]_{\left(\frac{E}{I}\right)=R}\,,$$

und wir erhalten

$$\left(\frac{dV}{V}\right)_I = -\,\frac{4\left(\dfrac{dI}{I}\right)_V}{1 - \left[\dfrac{(E\cdot I)_{V=0}}{(E\cdot I)_{V>0}}\right]_{\left(\frac{E}{I}\right)=R}}\,.$$

Nach Einsetzen der Ausdrücke $\left(\frac{dE}{E}\right)_I$ und $\left(\frac{dV}{V}\right)_I$ in die Auswertungsgleichung folgt

$$v' = \frac{e}{E} \cdot \frac{\dfrac{-4\left(\frac{dI}{I}\right)_V}{1 - \left[\frac{(E \cdot I)_{V=0}}{(E \cdot I)_{V>0}}\right]\left(\frac{E}{I}\right)_{=R}}}{\left(\frac{dE}{E}\right)_V - \left(\frac{dI}{I}\right)_V}.$$

Die prozentuelle Empfindlichkeit ε ist demnach

$$\varepsilon = V\left(\frac{dE}{dV}\right)_I = -\frac{E}{4} \cdot \frac{\left(\frac{dE}{E}\right)_V - \left(\frac{dI}{I}\right)_V}{\left(\frac{dI}{I}\right)_V} \cdot \left\{1 - \left[\frac{(E \cdot I)_{V=0}}{(E \cdot I)_{V>0}}\right]\left(\frac{E}{I}\right)_{=R}\right\},$$

und kann also ohne Kenntnis der Geschwindigkeit V gefunden werden. Sie erscheint im Diagramm

$$E = E(V\,;\,I)$$

als die Strecke zwischen den Schnittpunkten der Horizontalen und der Tangente durch den Betriebspunkt $(V\,;\,I)$ mit der Ordinatenachse (siehe Fig. 1). Sie ist gleich der Spannungsänderung ΔE am Hitzdraht bei einer Geschwindigkeitsänderung $\left(\frac{\Delta V}{V}\right) = 1$, wenn die Kurve $E = E(V\,;\,I)$ mit der Tangente im Arbeitspunkte $(V\,;\,I)$ identisch wäre. Der Ausdruck

$$\frac{\left(\frac{dE}{E}\right)_V - \left(\frac{dI}{I}\right)_V}{\left(\frac{dI}{I}\right)_V}$$

kann umgeformt werden in

$$\left\{\frac{\left(\frac{dE}{E}\right)_V}{\left(\frac{dI}{I}\right)_V} - 1\right\} = \left\{\left(\frac{dE}{dI}\right)_V \cdot \frac{1}{\left(\frac{E}{I}\right)_V} - 1\right\} = \left\{\left(\frac{dE}{dI}\right)_V \cdot \frac{1}{R} - 1\right\},$$

oder auch, mit Berücksichtigung von

$$\left(\frac{dE}{dI}\right)_V = \left(\frac{I \cdot dR + R \cdot dI}{dI}\right)_V,$$

in

$$\left(\frac{I}{R}\right) \cdot \left(\frac{dR}{dI}\right)_V.$$

Dies ergibt für die Empfindlichkeit die Beziehung

$$\varepsilon = -\left(\frac{I}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{dR}{dI}\right)_V \cdot \left\{1 - \left[\frac{(E \cdot I)_{V=0}}{(E \cdot I)_{V>0}}\right]_{\left(\frac{E}{I}\right)=R}\right\},$$

und für die Auswertung der Turbulenzmessung folgt

$$v' = -\frac{e}{\left(\frac{I}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{dR}{dI}\right)_V \cdot \left\{1 - \left[\frac{(E \cdot I)_{V=0}}{(E \cdot I)_{V>0}}\right]_{\left(\frac{E}{I}\right)=R}\right\}}.$$

Es ist nun sehr einfach, bei jeder Messung den Quotienten $\left(\frac{dE}{dI}\right)_V$ bzw. $\left(\frac{dR}{dI}\right)_V$ mittelst einer rasch und bequem durchzuführenden „Stromeichung" zu bestimmen. Infolge der mindestens viermal grösseren „Stromempfindlichkeit" des Hitzdrahtes besitzt diese Eichmethode auch den Vorteil grösserer Genauigkeit. Es muss ferner noch jeweils bei abgestelltem Winde ($V = 0$) die Heizleistung $(E \cdot I)_{V=0}$ für $(E/I) = R$ gemessen werden, was gleichfalls keine Mühe macht. Damit sind dann die zur Auswertung nötigen Daten bekannt, und sie können also immer direkt am Orte der Messung gewonnen werden. So sind alle anfangs genannten Sekundäreinflüsse miterfasst bzw. eliminiert, und die Aufstellung einer besonderen Eicheinrichtung bleibt erspart.

Messungen zum Vergleich der neuen mit der alten Eichmethode ergaben Übereinstimmung der Ergebnisse innerhalb der Messgenauigkeit.

II.

Oft stören *Pulsationen* bei Turbulenzmessungen in Luftstrahlen und Kanälen, indem sie als „Pseudoturbulenz" mitgemessen werden. Nachfolgend soll eine Messanordnung zur Elimination ihrer störenden Wirkung beschrieben werden. Voraussetzung ist dabei, dass der Masstab der über den Messquerschnitt gleichmässigen Turbulenz klein ist im Vergleich zum Strahl- oder Kanalquerschnitt, und dass die Pulsationen gleichmässig und gleichzeitig über den Querschnitt auftreten.

Es werden, wie bei der Messung des Turbulenzmasstabes[1]), zwei möglichst genau gleiche Hitzdrähte H_1 und H_2 auf gleiche Temperatur geheizt und in der Messebene in einem Abstand voneinander montiert, der ein Mehrfaches des Turbulenzmasstabes beträgt. e_1 und e_2 seien die Momentanwerte der Spannungsschwankungen an den beiden Hitzdrähten. Die Drähte werden elektrisch

[1]) Dryden, Schubauer und Skramstad, Report Nr. 581 des National Advisory Committee for Aeronautics, USA. 1936.

so geschaltet, dass ihre Signalspannungen einander entgegenwirken und als Differenz $(e_1 - e_2)$ zum Eingang des Messverstärkers gelangen (Schema siehe Fig. 3). Das Thermokreuz am Verstärkerausgang gibt eine Anzeige proportional zu $\overline{(e_1 - e_2)^2}$. Bei richtig

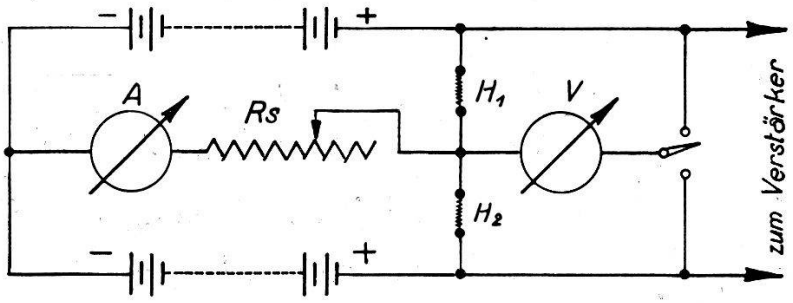

Fig. 3.

kompensiertem Frequenzgang des Verstärkers ist diese Anzeige proportional zu $\overline{(u_1 - u_2)^2}$, d. h. proportional dem mittleren Quadrat der Differenz der Geschwindigkeitsschwankungen u_1 und u_2 an den beiden Hitzdrähten. Mit K als Eichkonstante des Messverstärkers ist diese Anzeige

$$A = K \cdot \overline{(u_1 - u_2)^2}.$$

Nach Ausführung des Quadrates ergibt sich

$$A = K \cdot (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} - 2\,\overline{u_1 \cdot u_2}).$$

Bei echter Turbulenz ist bei genügendem Abstand der Hitzdrähte die Korrelation

$$R_{\text{turb.}} = \text{prop. } \overline{u_1 \cdot u_2} = 0,$$

und die Anzeige wird

$$A_{\text{turb.}} = K \cdot (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2}) = 2\,K \cdot \overline{u^2},$$

also gleich der doppelten Anzeige bei Verwendung nur eines Hitzdrahtes.

Die Kanalpulsationen $\pm \Delta V$ dagegen mit der Korrelation

$$R_{\text{puls.}} = 1$$

ergeben eine Anzeige

$$A_{\text{puls.}} = K \cdot \overline{(\Delta V - \Delta V)^2} = 0,$$

d. h. sie sind aus der Messung eliminiert.