

Differential-Temperatur-Anemometer (DTA)

Differential Temperature Anemometer (DTA)

H. Nobach

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Am Faßberg 17, 37077 Göttingen

Hitzdrahtanemometer, thermisches Anemometer, Temperaturgradient, schnelle Reaktion
hot-wire anemometer, thermal anemometer, temperture gradient, fast response

Zusammenfassung

Die Reaktionszeiten thermischer Anemometer (Hitzdraht-, Heißfilm- o. ä.) sind aufgrund der thermischen Trägheit ihrer Sensorelemente in schnell schwankenden Strömungsprozessen oft unzureichend. Dieser Beitrag zeigt eine Möglichkeit, die Reaktionsgeschwindigkeit des Anemometers zu verbessern, wenn statt des thermischen Gleichgewichts zwischen elektrischer Heizung und konvektiver Kühlung des Sensorelements, das Wärmeungleichgewicht und der daraus resultierende Temperaturgradient ausgewertet werden.

1 Einführung

Bei der thermischen Anemometrie (Hitzdraht-, Heißfilm- o. ä.) zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Mediums wird die Wärmebilanz zwischen elektrischer Heizung des Sensorelements und dem konvektiven Wärmeabtrag vom Sensorelement genutzt, um aus der aufgewendeten elektrischen Heizleistung auf die abgetragene Wärmeleistung und daraus bei bekannten kalorischen Parametern des Umgebungsmediums auf die Strömungsgeschwindigkeit desselben zu schließen.

Konventionelle thermische Anemometer nutzen für die benötigte Bilanzierung der Wärmemengen den thermischen Gleichgewichtszustand zwischen elektrischer Heizung und konvektivem Wärmeabtrag, bei dem die Temperatur des Sensorelements konstant bleibt. Constant-Voltage-Anemometer (CVA) und Constant-Current-Anemometer (CCA) messen zur Bestimmung der elektrischen Heizleistung entweder die Spannung über dem Heizelement oder den Strom durch das Heizelement, während die jeweils andere Größe vom Messgerät in einer Regelschleife konstant gehalten wird. Die Kombination aus Spannung und Strom ergibt unmittelbar die elektrische Heizleistung. Im thermischen Gleichgewichtszustand ist diese unter Vernachlässigung anderer Verluste dann identisch zum konvektiven Wärmeabtrag.

Die abgetragene Wärmeleistung hängt neben der Strömungsgeschwindigkeit auch von der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität sowie der Temperatur des Umgebungsmediums und außerdem von der effektiven Grenzschichtdicke ab, die ihrerseits eine nichtlineare Funktion der Strömungsgeschwindigkeit ist. Deshalb wird für den Schluss aus der abgetragenen Wärmeleistung auf die Anströmgeschwindigkeit eine Kalibrierung des Instruments, nämlich der gemessenen elektrischen Größe, Spannung oder Strom, bzw. der entsprechenden Sensortemperaturen im thermischen Gleichgewichtszustand in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit benötigt.

Da die thermische Anemometrie eine weit verbreitete Methode zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten ist, hat sie vielfältige Entwicklungen durchlaufen [1, 2]. Das zeitliche Verhalten der verschiedenen Verfahren wurden ebenfalls intensiv untersucht [3].

Bei der CVA- oder CCA-Messung in schwankenden Strömungen muss das Sensorelement nach einem Wechsel der Strömungsgeschwindigkeit zunächst wieder in den Gleichgewichtszustand übergehen, be-

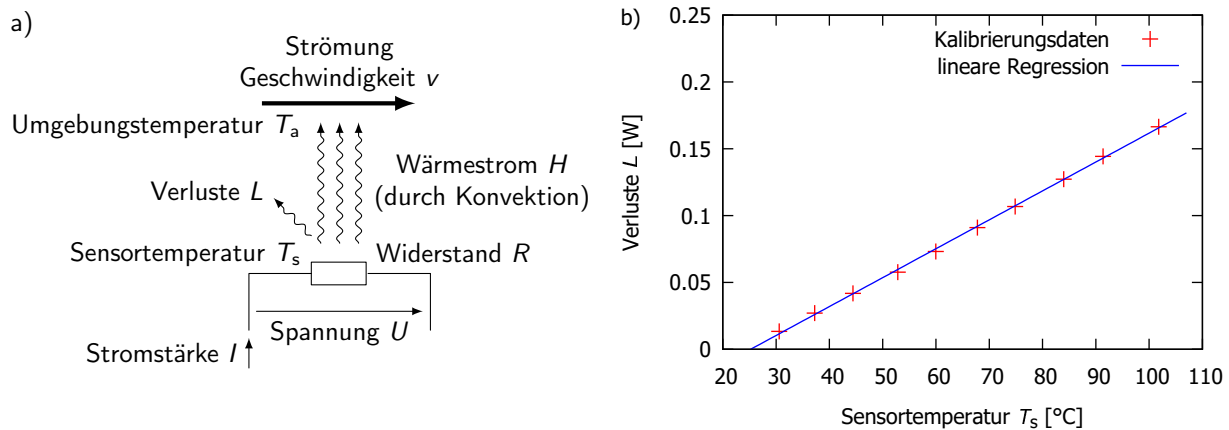


Abbildung 1: a) Messprinzip der thermischen Anemometrie zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit, b) Kalibrierung der temperaturabhängigen Verluste.

vor der kalibrierte Zusammenhang zwischen Sensortemperatur und Anströmgeschwindigkeit genutzt werden kann. Dafür muss sich die Temperatur des Sensorelements ändern, was bei einer gleichmäßigen Anströmung entlang einer exponentiellen Kurve geschieht. Da der Wärmeabtrag durch das umströmende Medium typischerweise sehr ineffizient gegenüber der elektrischen Heizung ist, wird der Gleichgewichtszustand nur sehr langsam angenommen und ist bei CVA- und CCA-Messungen der limitierende Faktor des zeitlichen Reaktionsvermögens des Messverfahrens.

Wird stattdessen die Temperatur des Sensors konstant gehalten (Constant-Temperatur-Anemometer, CTA), dann ist die zur Aufrechterhaltung der Temperatur nötige elektrische Heizleistung ebenfalls ein Maß für die abgetragene Wärmeleistung. Da sich die Sensortemperatur dabei idealerweise nicht ändert, ist die erreichbare zeitliche Auflösung viel besser als mit CVA oder CCA und hängt im Wesentlichen von der Reaktionsgeschwindigkeit der Regelschleife ab.

Bei der Transient-Thermal-Anemometrie (TTA) [4] wird der thermischen Gleichgewichtszustand nicht abgewartet und stattdessen der transiente Bereich zur Strömungsbestimmung ausgewertet. Da der Temperaturübergang exponentiell erfolgt, wird eine Exponentialfunktion an die aufgenommenen Messwerte angeglichen und aus deren Parametern und nach einer entsprechenden Kalibrierung auf die Anströmgeschwindigkeit geschlossen. Damit ist die TTA-Messung prinzipiell ebenfalls deutlich schneller als CVA oder CCA. Da die Exponentialfunktion als stationäre Lösung der zugrundeliegenden Differentialgleichung verwendet wird, erfordert diese Technik während der eigentlichen Messung stationäre Randbedingungen, insbesondere die Heizleistung und die Anströmgeschwindigkeit. Zur Vereinfachung wird die Heizung deshalb während der Messung abgeschaltet. Die Messung erfolgt dann nicht kontinuierlich.

Bei der hier vorgestellten Differential-Temperatur-Anemometrie (DTA) wird stattdessen die Differentialgleichung für den Wärmeübergang direkt ausgewertet und alle beitragenden Größen gleichzeitig und kontinuierlich bestimmt. Aus dem Temperaturgradienten des Sensorelements kann dann die Wärmebilanz erstellt werden und mit einer entsprechenden Kalibrierung selbst im Ungleichgewicht auf die Anströmgeschwindigkeit geschlossen werden. Das Verfahren wurde von der Max-Planck-Gesellschaft zum Patent angemeldet [5].

2 Thermische Anemometrie

Bei der thermischen Anemometrie wird das Sensorelement elektrisch mit dem Strom I geheizt. Dabei fällt die Spannung U über dem Sensorelement ab (Abb. 1a). Gleichzeitig kühlt das umgebende Medium das Sensorelement durch Konvektion mit der Strömungsgeschwindigkeit v . Im thermischen Gleichgewicht zwischen elektrischer Heizung und konvektiver Kühlung hat das Sensorelement eine Temperatur T_s oberhalb der Umgebungstemperatur T_a . Dabei ergibt sich ein Wärmestrom vom Sensorelement in die Umgebung H , der die Leistung der elektrischen Heizung $P = UI$ genau kompensiert.

Eine Änderung der Anströmgeschwindigkeit bewirkt ein Ungleichgewicht zwischen elektrischer Heizung und konvektiver Kühlung. In der Folge ändert sich die Temperatur des Sensors und damit der Wärmestrom in das umgebende Medium bis das thermische Gleichgewicht wiederhergestellt ist, je nach Anströmgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen des Sensors.

CCA und CVA halten jeweils eine primäre elektrische Größe konstant (I bzw. U) und messen jeweils die andere als ihre jeweilige Ausgangsgröße, die wiederum gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit kalibriert werden muss. Da sich einerseits mit der Strömungsgeschwindigkeit auch die Sensortemperatur ändern muss und andererseits der Wärmeübergang vom Sensor in das umgebende Medium langsam erfolgt, haben diese beiden Verfahren der elektrischen Speisung starke dynamische Einschränkungen. CTA speist dagegen durch eine Regelschleife so viel elektrische Leistung P in das Sensorelement, dass die Temperatur des Sensors unabhängig vom aktuellen Wärmeabtrag durch das umströmende Medium konstant gehalten wird. Ohne den langsamen Temperaturübergang kann das CTA deutlich schneller auf Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit reagieren. Allerdings wird auch hier das Gleichgewicht zwischen elektrischer Heizung und Wärmeabtrag durch Konvektion eingestellt ($P = H$). Eine primäre Änderung der Anströmung bewirkt zunächst eine (zumindest kleine) Temperaturänderung des Sensors. Erst danach kann die Regelschleife die elektrische Heizleistung so anpassen, dass sich die Zieltemperatur des Sensors wieder einstellt. Die Reaktionsgeschwindigkeit des CTAs hängt damit unmittelbar von der Güte und der Geschwindigkeit des Regelkreises ab, was wiederum vom Schaltungsaufwand und der Erfahrung beim Entwurf und der Auslegung abhängt.

Beim TTA wird das Ungleichgewicht zwischen P und H während des Übergangs betrachtet. Dieses ist mit einer zeitlichen Temperaturänderung $\dot{T}_s = dT_s/dt$ des Sensors verbunden. Durch Messung von P und \dot{T}_s wird dann bei bekannter Wärmekapazität des Sensors C_s durch

$$C_s \dot{T}_s = P - H$$

auf den konvektiven Wärmestrom H geschlossen. Dieser hängt seinerseits von der Temperaturdifferenz des Sensors zu der Umgebung ab. Durch Regression einer Exponentialfunktion als die stationäre Lösung der zugrundeliegenden Differentialgleichung und Bestimmung der Zeitkonstanten kann durch eine passende Kalibrierung auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Die Zulässigkeit der stationären Lösung der Differentialgleichung hängt von der Einhaltung der Stationarität während der Messung ab. Das gilt sowohl für die Strömungsgeschwindigkeit als auch für die elektrische Heizung des Sensors. Der Einfachheit halber wird die Heizung während der Messung mit TTA abgeschaltet, das Messgerät wird also nur impulsweise und nicht kontinuierlich wie andere thermische Anemometer betrieben.

3 Differential-Temperatur-Anemometrie (DTA)

Statt der stationären Lösung der zugrundeliegenden Differentialgleichung werden beim DTA alle beitragenden Größen direkt bestimmt. Dafür werden die elektrische Heizleistung P und die Sensortemperatur T_s mit der gewünschten zeitlichen Auflösung aufgenommen. Die elektrische Leistung wird dafür unmittelbar aus den primären elektrischen Messgrößen U und I bestimmt. Diese beiden ergeben auch den elektrischen Widerstand des Sensors $R = U/I$. Dieser gibt seinerseits Auskunft über die Temperatur des Sensors, entweder durch genaue Kenntnisse des Sensormaterials oder durch eine geeignete Kalibrierung des Sensorwiderstandes gegen seine Temperatur. Die Differentialgleichung enthält neben der Temperatur des Sensors auch dessen zeitlichen Gradienten, den man durch numerische Differentiation aus aufeinanderfolgenden Werten der Temperatur bestimmen kann.

$$\dot{T}_s = \frac{\Delta T_s}{\Delta t}$$

mit der Temperaturänderung ΔT_s innerhalb des Intervalls Δt . Der Unterschied zwischen elektrischer Heizung P und der im Sensor gesammelten Wärmeleistung $C_s \dot{T}_s$ ergibt dann den Wärmeverlust durch

$$H = P - C_s \dot{T}_s - L(T_s), \quad (1)$$

wobei bereits die temperaturabhängigen Verluste $L(T_s)$ berücksichtigt werden. Die hier gezeigten Untersuchungen haben im relevanten Temperaturbereich eine lineare Abhängigkeit der Verluste von der Sensortemperatur ergeben. Der konvektive Wärmeabtrag ist seinerseits linear abhängig von der Differenz der Sensortemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur.

$$H = (T_s - T_a)g(v) \quad (2)$$

Die Kalibrierungsfunktion $g(v)$ gibt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem konvektiven Wärmeabtrag pro Temperaturdifferenz zur Umgebung an. Diese Kalibrierungsfunktion ist selbst aber unabhängig von der Temperaturdifferenz des Sensor gegenüber der Umgebung. Das ermöglicht überhaupt erst die Auswertung und die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit bei veränderlichen Sensortemperaturen. Die Umgebungstemperatur kann für die Gültigkeit der Zusammenhänge entweder konstant gehalten werden, oder sie muss zusätzlich zu den zuvor genannten Messgrößen parallel mit aufgenommen werden. Die Schwankungen der Umgebungstemperatur dürfen ohnehin nicht groß sein, da es Einflüsse auf die Dichte und die Viskosität des Umgebungsmediums gibt, die die Kalibrierungsfunktion $g(v)$ ungültig machen. Die hier verwendete Kalibrierungsfunktion $g(v)$ ist genau diejenige, die auch bei TTA verwendet wird, wobei eine explizite Benennung an einer anderen Stelle erfolgte [1].

4 Kalibrierung

Die beiden grundlegenden Gleichungen (1) und (2) für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit legen auch die benötigten Kalibrierungen fest.

1. Die elektrische Heizleistung wird aus der gemessenen Spannung U über dem Sensor und dem Strom I durch diesen bestimmt. Typische elektrische Messaufnehmer sind darauf ausgelegt, Spannungen mit der benötigten Genauigkeit zu messen, und zwar mit einem hinreichend großen Innenwiderstand um die Schaltung nicht zu belasten. Der Strom durch den Sensor kann durch Messung des Spannungsabfalls über einem Shuntwiderstand in Reihe mit dem Sensor bestimmt werden. Dafür sollte der Shuntwiderstand einen möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten haben und vor der eigentlichen Messung hinreichend genau bestimmt werden.
2. Die Bestimmung der Temperatur des Sensors aus dessen Widerstand setzt die genaue Kenntnis des funktionalen Zusammengangs voraus, welcher vom Material, der Geometrie und auch von der elektrischen Kontaktierung abhängt. Deshalb sind entweder hinreichend genaue Kenntnisse über den Aufbau des Sensors oder eine Kalibrierung in einem entsprechenden Experiment nötig. Da diese Kalibrierung spezifisch für den verwendeten Sensor ist, muss sie nur einmal durchgeführt werden und kann Teil des Herstellungsprozesses sein. Dasselbe gilt auch für die Messung der Umgebungstemperatur, falls diese mit einem ähnlichen Sensor erfolgt.
3. Tests haben gezeigt, dass die von der Sensortemperatur abhängigen Verluste $L(T_s)$ einen erheblichen Störeinfluss haben. Sie sind von den Einbaugegebenheiten im Experiment abhängig und müssen daher direkt im experimentellen Umfeld kalibriert werden. Dafür wird die Sensortemperatur für unterschiedliche Heizleistungen erfasst, während alle anderen Terme in Gleichung (1) null gehalten werden. Das betrifft einerseits den konvektiven Wärmeabtrag, dadurch zu erreichen, dass die Kalibrierung im stehenden Medium, also ohne Strömung vollzogen wird, und andererseits den Temperaturgradienten des Sensors, also nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts zwischen Sensor und Umgebung.
4. Die Wärmekapazität C_s des Sensors kann durch Beobachtung des Temperaturgradienten des Sensors \dot{T}_s nach einer Änderung der Heizleistung P ohne konvektiven Wärmeabtrag ($H = 0$) bestimmt werden. Gleichung (1) wird dann zu

$$C_s = \frac{P - L(T_s)}{\dot{T}_s}$$

Diese Messung kann für unterschiedliche Heizleistungen wiederholt werden um eine möglichst robuste Schätzung der Wärmekapazität des Sensors zu erzielen. Da die Wärmekapazität spezifisch für einen bestimmten Sensor ist, kann deren Bestimmung auch Teil des Herstellungsprozesses sein. Danach darf der Sensor allerdings keinen Einflüssen ausgesetzt werden, die diese Kalibrierung verändern, z. B. benetzende Tröpfchen in der Anströmung.

5. Schließlich muss noch der während der Messung bestimmte Wärmeverlust H durch die Konvektion des umgebenden Mediums in eine Strömungsgeschwindigkeit v umgerechnet werden. Im thermischen Gleichgewicht ($\dot{T}_s = 0$) ergeben die beiden Gleichungen (1) und (2) die Antwortgröße des DTA-Verfahrens in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit

$$g(v) = \frac{P - L(T_s)}{T_s - T_a}$$

Bei dieser Kalibrierung müssen verschiedene, bekannte Strömungsgeschwindigkeiten v eingestellt werden und die dazu passende Antwortgröße des Messgerätes $g(v)$ aufgenommen werden. Dieses Vorgehen ist identisch zur klassischen thermischen Anemometrie und kann auch mit genau den vorhandenen Kalibrierungseinrichtungen erfolgen. Einziger Unterschied ist die Notwendigkeit, die Temperatur des Sensors nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts mit zu erfassen. Da auch die Umgebungstemperatur Einfluss hat, muss diese ebenfalls miterfasst werden wie auch während des Experiments.

5 Experimentelle Überprüfung

Das vorgestellte Verfahren soll die erreichbare zeitliche Auflösung von thermischen Anemometern verbessern. Ein Testexperiment soll deshalb nachweisen, dass die Reaktion auf Strömungsänderungen schneller als mit klassischen Anemometern erfolgt. Zum Nachweis wurde deshalb ein recht träger Sensor verwendet, nämlich ein 2.3 mm × 2 mm großer PT100-Dünnsfilm-Chip S8P038 von Telemeter. Der Sensor wurde elektrisch geheizt und durch eine Luftströmung gekühlt, die mit einem axialen 12 V-Netzteil Lüfter HEC FD128020HS mit einem Durchmesser von 80 mm erzeugt wurde. Der PT100 wurde jeweils 20 s lang der Strömung ausgesetzt, und dann für weitere 20 s von der Strömung isoliert. Während der Pausen wurde die Strömungsgeschwindigkeit geändert und dann wieder für die Dauer der Anströmung des Sensors konstant gelassen.

Die Bestimmung der Sensortemperatur aus dessen Widerstand erfolgt anhand der bekannten Temperaturkoeffizienten von Platin ($\alpha = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ and $\beta = -5.775 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$) ohne weitere Kalibrierung des verwendeten Sensors. Die Kalibrierung der temperaturabhängigen Verluste in Abb. 1b) zeigt eine lineare Abhängigkeit mit einer Steigung von 2.16 mW/k. Die Wärmekapazität des Sensors wurde aus den aufgenommenen Intervallen ohne Anströmung zu $C_s = 11.5 \text{ mWs/k}$ bestimmt.

Die Testmessungen wurden sowohl mit einer CCA-, einer CVA- also auch mit einer CTA-Regelung durchgeführt. Die CCA-Schaltung wurde separat aufgebaut. Die CVA- und die CTA-Regelung konnten in einer gemeinsamen Schaltung realisiert werden, die zuerst eine konstante Spannung bereitstellt und dann in einer inneren Regelschleife die Temperatur des Sensors konstant hält. Bei einer kleinen Spannung und unbegrenzter Temperatur wird dann eine konstante Spannung über der Halbbrücke bestehend aus dem Sensor und dem Shuntwiderstand angelegt, während bei einer großen Spannung die Sensortemperatur durch den nachfolgenden Regelkreis begrenzt wird. Während der Messung wurden sowohl der Strom als Spannung über dem Shuntwiderstand als auch die Spannung über dem Sensor mit einem USB-Oszilloskop PicoScope 5443B aufgenommen. Der Shuntwiderstand wurde vor der Messung separat bestimmt. Er beträgt 10.14 Ω für die CCA-Schaltung und 10.16 Ω für die kombinierte CVA-/CTA-Schaltung. Eigentlich wäre für CCA und CVA die Bestimmung einer elektrischen Größe (Spannung bzw. Strom) ausreichend. Die jeweils andere elektrische Größe wird entweder konstant gehalten, oder sie lässt sich aus den vorher bekannten Eigenschaften der Schaltungselemente eindeutig bestimmen. Die gezeigten Testmessungen sollen aber nachweisen, dass das vorgestellte Verfahren auch dann funktioniert, wenn die elektrischen Größen zur Heizung des Sensors nicht konstant gehalten werden. Deshalb wurden unabhängig von der Art der Treiberschaltung immer beide primären elektrischen Größen U und I aufgenommen und verarbeitet.

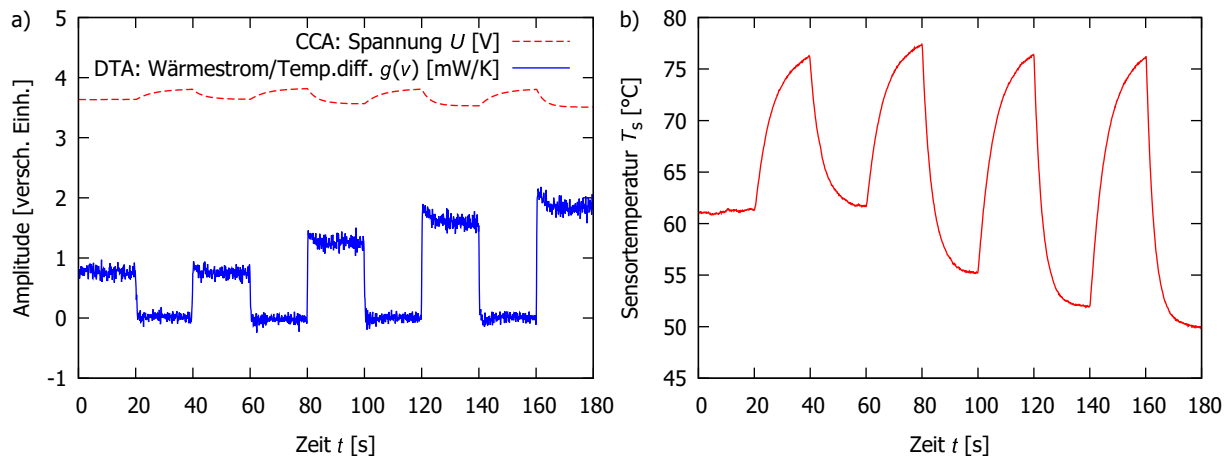


Abbildung 2: Testdaten. a) CCA- vs. DTA-Verfahren aus einem gemeinsamen Experiment mit einer CCA-Schaltung, b) Sensortemperatur während des Experiments.

5.1 CCA-Treiberschaltung

Die CCA-Schaltung speiste einen konstanten Strom von $I = 29.4$ mA in den thermischen Sensor. Die Spannung über dem Sensor wurde dabei als Ausgangsgröße des CCA gemessen, die nach entsprechender Kalibrierung in die Strömungsgeschwindigkeit umgerechnet werden kann. Für die DTA-Verarbeitung wurden die Spannung U und der Strom I gleichzeitig gemessen, zur Heizleistung $P = UI$ und dem Sensor-Widerstand $R = U/I$ sowie mit einem Polynom zweiten Grades mit den für Platin bekannten Temperaturkoeffizienten von oben zu dessen Temperatur T_s weiterverarbeitet. Numerische Differentiation von je zwei aufeinanderfolgenden Temperaturmesswerten ergibt dann eine Schätzung des Temperaturgradienten \dot{T}_s .

Mit diesen Größen können dann aus Gleichung (1) der Wärmeabtrag durch Konvektion H und aus Gleichung (2) die Ausgangsgröße $g(v)$ und mit der entsprechenden Kalibrierung schließlich auch die Strömungsgeschwindigkeit v bestimmt werden. Abb. 2a stellt die Ausgangsgrößen der beiden Verarbeitungsverfahren CCA und DTA gegenüber. Die beiden Kurven wurden aus den Messdaten eines einzigen Experiments gewonnen. Da die Verfahren unterschiedliche Ausgangsgrößen liefern, sind ihre Amplituden nicht direkt vergleichbar. Die Kalibrierung zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit aus den jeweiligen Ausgangsgrößen der beiden Verfahren wurden nicht durchgeführt, da in diesem Testexperiment nur die Reaktionsgeschwindigkeiten der Verfahren gegenübergestellt werden sollten. Der wegen der Temperaturänderungen des Sensors zeitlich stark gedämpfte Verlauf der CCA-Auswertung wird sehr deutlich. Abb. 2b zeigt den entsprechenden Temperaturverlauf während des Experiments. Die DTA-Auswertung reagiert dagegen deutlich schneller und gibt nahezu den rechteckförmigen zeitlichen Strömungsverlauf wieder.

Das kleine Überschwingen unmittelbar nach einem Wechsel der Strömungsgeschwindigkeit deutet darauf hin, dass das System zwei unterschiedliche Zeitkonstanten hat, wobei nur die längere durch die Kalibrierung der Wärmekapazität des Sensors berücksichtigt wurde. Das bedeutet auch, dass die verwendete Differentialgleichung das betrachtete System nicht vollständig beschreibt. Der Aufbau des hier eingesetzten Sensors mit dem Platin-Messwiderstand auf einem vergleichsweise dicken Keramiksubstrat ist die vermutete Ursache dieses zeitlichen Verhaltens. Richtige Hitzdrähte haben dagegen kein solches Wärmereservoir und sollten diesen Fehler nicht zeigen.

5.2 CVA-Treiberschaltung

Die kombinierte CVA- und CTA-Treiberschaltung wurde so eingestellt, dass eine konstante Spannung von $U = 4.07$ V über der Reihenschaltung des Sensors und des Shuntwiderstands zur Strommessung anlag. Die Temperatur des Sensors wurde dabei nicht begrenzt. Wenn die Spannung über der Reihenschaltung der beiden Widerstände konstant ist, dann schwankt die Spannung über dem Sensor je nach hindurchfließendem Strom. Das ist also keine echte CVA-Schaltung. Allerdings ist der Shuntwiderstand

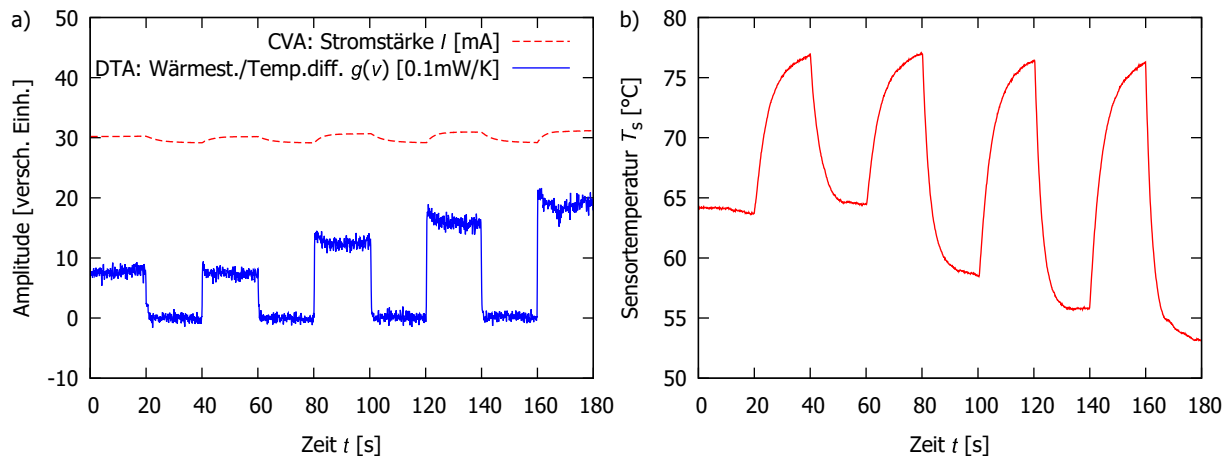


Abbildung 3: Testdaten. a) CVA- vs. DTA-Verfahren aus einem gemeinsamen Experiment mit einer CVA-Schaltung, b) Sensortemperatur während des Experiments.

eine ganze Größenordnung kleiner als der Sensorwiderstand, sodass die Schwankungen der Spannung über dem Sensor vergleichsweise klein sind. Das zeitliche Verhalten der CVA-Verarbeitung, bei der die gemessene Stromstärke I durch den Shuntwiderstand und den Sensor die Ausgangsgröße bildet, ist davon nicht beeinflusst. Für die DTA-Verarbeitung werden wieder beide Größen U (hier aber die nicht ganz konstante Spannung über dem Sensor) und I zunächst zur Heizleistung P , dem Sensorwiderstand R , dessen Temperatur T_s und dem Temperaturgradienten \dot{T}_s weiterverarbeitet und schließlich mit den Gleichungen (1) und (2) zum konvektiven Wärmeabtrag H und der DTA-Ausgangsgröße $g(v)$. Die Kalibrierung der Ausgangsgrößen der beiden Verarbeitungsverfahren wurde auch hier nicht durchgeführt, da nur die zeitlichen Reaktionen der Verfahren betrachtet wurden.

Abb. 3a stellt die Ausgangsgrößen der beiden Verarbeitungsverfahren CVA und DTA gegenüber. Die beiden Kurven wurden aus den Messdaten eines einzigen Experiments gewonnen. Da die Verfahren unterschiedliche Ausgangsgrößen liefern, sind ihre Amplituden nicht direkt vergleichbar. Der wegen der Temperaturänderungen des Sensors zeitlich stark gedämpfte Verlauf der CVA-Auswertung wird sehr deutlich. Abb. 3b zeigt den entsprechenden Temperaturverlauf während des Experiments. Die DTA-Auswertung reagiert dagegen deutlich schneller und gibt nahezu den rechteckförmigen zeitlichen Strömungsverlauf wieder.

Auch hier ist das Überschwingen nach einem Wechsel der Strömungsgeschwindigkeit genau wie im CCA-Experiment zu erkennen, was auf ein System mit einer Dämpfung höherer Ordnung, eben mit einem versteckten Wärmereservoir hindeutet. Richtige Hitzdrähte sollten dieses Verhalten nicht aufweisen, da sie anders aufgebaut sind als der in diesem Testexperiment verwendete Sensor, nämlich ohne den Keramikchip als Substrat.

5.3 CTA-Treiberschaltung

Durch Einstellung einer höheren Spannung über der Halbbrücke aus Shuntwiderstand und Sensor erfolgte in der inneren Regelschleife eine Begrenzung der Sensortemperatur. Die Regelung war ausreichend schnell, sodass die verbliebenen Temperaturschwankungen des Sensors in Abb. 4b vernachlässigbar sind gegenüber den beiden anderen Treiberschaltungen. Bei CTA ist die aus U und I bestimmte Heizleistung $P = UI$ die Ausgangsgröße. Wegen des Wegfalls der Temperaturschwankungen des Sensors reagiert CTA deutlich schneller als CCA oder CVA (Abb. 4a). Auch hier erfolgt die Weiterverarbeitung der primären elektrischen Messgrößen U und I zum Sensorwiderstand R , dessen Temperatur T_s , dem Temperaturgradienten \dot{T}_s , dem konvektiven Wärmeabtrags H und der DTA-Ausgangsgröße $g(v)$. Die Kalibrierung zur Strömungsgeschwindigkeit wurde auch hier nicht durchgeführt, da nur die zeitlichen Reaktionen der Verfahren untersucht wurden. Deshalb lassen sich die Kurven von CTA und DTA anhand ihrer Amplituden auch hier nicht vergleichen, die zeitlichen Reaktionen der beiden Verfahren dagegen lassen sich direkt vergleichen.

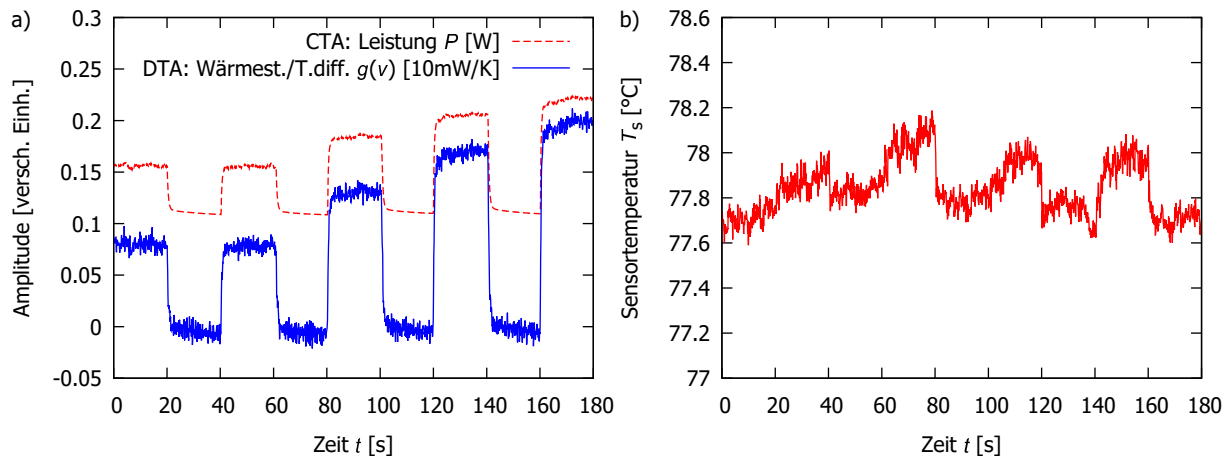


Abbildung 4: Testdaten. a) CTA- vs. DTA-Verfahren aus einem gemeinsamen Experiment mit einer CTA-Schaltung, b) Sensortemperatur während des Experiments.

Die Reaktion des DTA-Verfahrens nach einer sprunghaften Änderung der Strömungsgeschwindigkeit sieht auf den ersten Blick nach einer zu klein geschätzte Wärmekapazität des Sensors aus. Die sehr geringen Temperaturschwankungen während des gesamten Experiments sprechen allerdings gegen einen Einfluss durch langsame Temperaturänderungen des Sensorwiderstands. Die CTA-Kurve zeigt dagegen eine klare Drift der Heizleistung während der Phasen mit konstanter Anströmung. Die notwendige Leistung, um die Temperatur des Sensorwiderstandes konstant zu halten, nahm also z. B. während der Phase mit Anströmung langsam zu, ohne Anströmung nahm sie dagegen langsam ab. Das deutet auf einen Wärmepuffer hin, der von der Messung nicht erfasst wird, aber nach starker zeitlicher Dämpfung ebenfalls Wärme vom Sensorwiderstand abzieht und in die umgebende Strömung abgibt oder umgekehrt Wärme in das Sensorelement einspeist. Das Keramiksubstrat unter dem Dünnschichtsensor könnte genau so ein Verhalten bewirken. Die zu beobachtenden Reaktionen der CTA-Treiberschaltung auf der einen Seite und der CCA- und CVA-Treiberschaltungen auf der anderen Seite passen gut zusammen und legen den Aufbau des Sensors mit seinem Keramiksubstrat als Ursache für das beobachtete Phänomen nahe. Richtige Hitzdrähte ohne ein solches Wärmereservoir sollten demnach dieses Verhalten nicht zeigen.

6 Zusammenfassung

Die Testexperimente zeigen, dass die Reaktionsgeschwindigkeit und damit das zeitliche Auflösungsvermögen eines thermischen Anemometers durch die DTA-Verarbeitung der Messgrößen deutlich verbessert werden können. Die Methode kann auf bestehende Anemometerschaltungen angewendet werden, sofern aus den aufgenommenen Messgrößen auf beide benötigten primären elektrischen Größen geschlossen werden kann. Darüber hinaus kann das Verfahren aber auch auf viel einfachere Hardware angewendet werden, da keine der in die Rechnung einfließenden Größen konstant gehalten werden müssen. Dadurch ergibt sich eine große Flexibilität sowohl in der Realisierung der Treiberschaltung als auch in der Verwendung unterschiedlicher Sensormaterialien. Sowohl Metallwiderstände als auch nichtlineare Halbleiterwiderstände, insbesondere solche mit unterschiedlichem Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten sind möglich.

Es soll aber noch erwähnt werden, dass die mit dem USB-Oszilloskop aufgenommenen Daten ein erhebliches Problem durch überlagertes Rauschen hatten. Deshalb musste eine extreme Überabtastung der Messdaten und eine anschließende Mittelung der Daten für die Weiterverarbeitung durchgeführt werden. Die primären Messdaten wurden mit 100 kHz aufgenommen, die weiterverarbeiteten Daten wurden dann auf eine Abtastrate von 10 Hz reduziert. Sowohl die Rohdaten als auch die gemittelten Daten sind unter <http://www.nambis.de/publications/gala23.html> abrufbar. Die Vermeidung von Rauscheinflüssen während der Messung ist also ein vielversprechender Ansatz zur Verbesserung des Verfahrens. Die Entwicklung rauscharmer Schaltungen und der Einsatz von echten Hitzdrähten

ohne das störende Wärmereservoir sind vermutlich die nächsten Schritte zur Etablierung des DTA-Verfahrens.

Literatur

- [1] L M Fingerson. Thermal anemometry, current state, and future directions. *Review of Scientific Instruments*, 65(2):285–300, 1994.
- [2] B McKeon, G Comte-Bellot, J Foss, J Westerweel, F Scarano, C Tropea, J Meyers, J Lee, A Cavone, R Schodl, M Koochesfahani, Y Andreopoulos, Werner Dahm, J Mullin, J Wallace, P Vukoslavčević, S Morris, E Pardyjak, and A Cuerva. *Thermal Anemometry*, chapter Velocity, Vorticity, and Mach Number, pages 229–287. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [3] D Bestion, J Gaviglio, and J P Bonnet. Comparison between constant-current and constant-temperature hot-wire anemometers in high-speed flows. *Review of Scientific Instruments*, 54(11):1513–1524, 1983.
- [4] J F Foss, J K Schwannecke, A R Lawrenz, M W Mets, S C Treat, and M D Dusel. The thermal transient anemometer. *Measurement Science and Technology*, 15(11):2248, 2004.
- [5] Thermal anemometry method and thermal anemometer for measuring a flow velocity of a flowing fluid at a high temporal resolution, April 2023. patent request PCT/EP2023/059236.