Olaf Magnor (Autor)

Hochdynamische Akustische Temperaturmessung

https://cuvillier.de/de/shop/publications/3198

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einleitung

Die Temperatur ist eine physikalische Größe, die einen wesentlichen Einfluß auf unser Wohlergehen hat, sich alltäglich mal mehr, mal weniger angenehm äußert und im privaten Bereich, im Verkehr, in der Industrie und anderenorts eine bedeutende Rolle spielt. Daher ist es nicht weiter verwunderlich, daß bereits im beginnenden 18. Jahrhundert Instrumente entwickelt wurden, um die Temperatur an unterschiedlichen Orten zu unterschiedlichen Zeiten zu erfassen und miteinander zu vergleichen. Skalen wurden definiert – die Namen René Antoine Ferchault de Réaumur (1683 - 1757), Gabriel Daniel Fahrenheit (1686 - 1736), Anders Celsius (1701 - 1744), William Rankine (1820 - 1872) und William Lord Kelvin of Largs (1824 - 1907) erinnern daran.

Entsprechend weit ist die Temperaturmeßtechnik heute fortgeschritten. Die Meßabweichungen liegen nicht selten bei einigen zehntel Kelvin, im Laborbetrieb im Bereich von hundertstel Kelvin und die der Temperaturforschungslabors bei weniger als einem Millikelvin. Die Frage nach dem Nutzen von Forschungsaktivitäten mit dem Ziel immer kleinerer Meßabweichungen liegt nahe; das Forschungspotential in der Temperaturmeßtechnik scheint erschöpft. Dem ist jedoch nicht so, wenn hohe Ansprüche an die Dynamik der Messung gestellt werden und das „saubere“ Labor mit seinen bekannten und konstanten Umweltbedingungen durch eine rauhere Umgebung wie die freie, strömende, mit Partikeln durchsetzte Atmosphäre ersetzt wird. Meßabweichungen von deutlich mehr als einem Kelvin als Folge zahlreicher Störgrößen sind nicht selten – so auch im vorliegenden Fall der Flugmeßtechnik, der seinen Ursprung in der Meteorologie hat:

Die Vorhersage des Wettergeschehens auf der Erde erfolgt immer seltener nach phänomenologischen, also auf einem Katalog historischer Wetterlagen basierender Methoden. Sie wurden weitgehend durch numerische, rechnergestützte Verfahren verdrängt. Hierzu wird die Erdatmosphäre durch eine große Zahl kleiner aneinandergrenzender Volumina (in der Größenordnung einiger Kubikkilometer) dargestellt, denen atmosphärische Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck, Windvektor und Wasserdampfgehalt zugeordnet werden. Beobachtungen von Land- und Seestationen, Radiosondenaufstiegen, automatisierten Messungen von Verkehrsflugzeugen und Fernerkundungen durch Wettersatelliten liefern die Zustandsgrößen einiger weniger Volumina des Atmosphärenmodells. Die Zustände des Großteils des Modells müssen jedoch durch Interpolation zwischen den gemessenen Volumina und Extrapolation nach außen, zur Erdoberfläche, zum Weltraum und zu datenarmen Gebieten angenähert werden. Besonders schwierig ist hierbei die Berechnung in Bereichen über großflächigen, unbewohnten Gebieten mit einer geringen Stationsdichte sowie mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche. Nach einer erstellten Analyse des Istzustandes des Gesamtmodells lassen sich durch die zeitliche Fortschreibung Vorhersagen für die atmosphärischen Zustände der einzelnen Volumina gewinnen.

Die Aktivitäten auf dem Gebiet der numerischen Meteorologie zeigen, daß sowohl die Interpolation und Extrapolation, als auch die zeitliche Fortschreibung noch erheblichen Forschungsaufwandes bedürfen [10]. Immer wieder werden bestehende Modelle verbessert oder durch neue ersetzt und heben die Analyse- und Vorhersagequalität an. Ein wichtiges Instrument bei diesen Arbeiten sind Verifikationsmessungen. Hierzu wird ein kleiner Teil der Atmosphäre mit einem Meßflugzeug zeilen- und schichtweise abgeflogen und die Atmosphärenzustände innerhalb möglichst kurzer Zeit – das Wetter ändert sich schließlich fortwährend – gemessen. Für diese Messungen werden Instrumente benötigt, die genau und zudem zeitlich sehr hochauflösend messen. Erschwerend kommt die im allgemei-

nen unfreundliche Meßumgebung „freie Atmosphäre“ mit flüssigen und festen Niederschlägen und Ablagerungen sowie Erosion an den Sensoren hinzu, welche die Messungen verfälschen, verhindern oder sogar irreparable Schäden an den Sensoren verursachen können.

Aufgabe des Projektes *Flugmeßtechnik* war die Bereitstellung eines Meßsystems für meteorologische Verifikationsmessungen. Dem Projekt gingen die Forschungsarbeiten zum *Helipod* voraus, einer von einem Hubschrauber geschleppten Sonde, die Mitte der neunziger Jahre unter der Leitung des Institutes für Klimatologie der Universität Hannover fertiggestellt wurde [29]. Im Gegensatz zum *Helipod* sollte jetzt ein Meßsystem in ein Forschungsflugzeug integriert werden, das die in situ Messung, Verarbeitung und Speicherung der gewonnenen Daten erlaubte, damit sie anderen Sensoren an Bord als Hilfsgrößen zur Verfügung standen. Als Meßflugzeug diente eine zweimotorige Do 128-6 der Technischen Universität Braunschweig (Abbildung 1.1). Wegen der Komplexität des Projektes erfolgte eine Gliederung in Teilprojekte, die von mehreren Instituten der Technischen Universität Braunschweig, der Universität Hannover, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, beide in Braunschweig, wahrgenommen wurden. Von 1997 bis 2000 wurde das Projekt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches [32] finanziell unterstützt.

Die gleichzeitig schnelle und genaue Messung der Temperatur steht in einem Widerspruch, der sich unter dem Einfluß eines strömenden Gases noch verstärkt: Einerseits geht die Forderung einer zeitlich hochauflösenden Messung mit einer geringen Wärmekapazität des Meßfühlers einher, andererseits verlangt eine genaue Messung eine möglichst große Zeit für eine gute Annäherung des thermischen Gleichgewichts zwischen Meßobjekt und Meßfühler. Das strömende Gas wiederum erfordert eine mechanisch stabile Auslegung des Temperatursensors, die mit größeren Massen, höheren Wärmekapazitäten und so wieder mit trägeren Eigenschaften des Sensors verbunden ist.

Abbildung 1.1: *Forschungsflugzeug D-IBUF der Technischen Universität Braunschweig vom Typ Dornier Do 128-6. Unter dem Bug des Flugzeuges ist bereits ein Nasenmast zur Aufnahme von Sensoren angebracht.*

Der im Teilprojekt *Messung der Temperatur* verfolgte Lösungsansatz für dieses Problem besteht im wesentlichen aus der Auftrennung des Meßsignals in zwei parallele Meßzweige, von denen sich der eine durch seine höhere Genauigkeit, jedoch geringere Dynamik und umgekehrt der andere durch seine hohe Dynamik, dafür aber weniger gute Meßgenauigkeit auszeichnet. Die Signale beider Zweige durchlaufen anschließend zwei in ihren Frequenzgängen komplementäre Filter, bevor sie in einer Additionsstelle wieder zusammentreffen. Das Ergebnis ist ein gemeinsames Temperatursignal hoher Genauigkeit und hoher Dynamik, wenn auch Genauigkeit und Dynamik der Zweige jeweils teilweise eingebüßt werden.

Wesentlicher Bestandteil des genauen Meßzweiges ist ein Präzisionsthermometer nach Huhnke [32], das auf sechs Platin-Widerstandsdraht-Thermometern basiert, die in einem strömungs-, wärmeleitungs- und strahlungsoptimierten Konus untergebracht sind. Die Einführung der zu messenden Luft in das Innere des Konus erfolgt zur Herstellung der Anströmrichtungsunabhängigkeit über

mehrere Bohrungen und einen „Turbolator“[1]. Die Luft umströmt die Widerstandsthermometer bevor sie den Konus durch seitliche Bohrungen wieder verläßt. Zum Schutz vor Wärmeleitung sind die Widerstandsthermometer auf einem Ring aus PEEK[2] mit geringen Wärmeleitungseigenschaften montiert und zum Schutz vor Strahlung ihre Oberflächen metallisch blank überzogen. Auch der Konus besitzt außen wie innen hochreflektierende Oberflächen. [13]

Für den hochdynamischen Zweig standen zunächst mehrere konkurrierende Verfahren zur Diskussion, darunter ein sehr dünner Platinwiderstandsdraht (ähnlich [11]) sowie ein Hitzdrahtthermometer, die beide wegen zu großer mechanischer Empfindlichkeit ausschieden. Untersucht wurde auch die Eignung eines Widerstandsthermometers auf Basis einer Dünnfilm-Sandwichbauweise, analog dem Prinzip des gesteuerten elektrischen Schirms koaxialer Leitungen: Hierbei wird die dynamikbestimmende Wärmekapazität des Sensorkörpers durch fortwährende aktive Angleichung an die Lufttemperatur bis auf eine geringe Regelabweichung annähernd wirkungslos. Da das Verfahren jedoch zu große technische Probleme für diesen Anwendungsfall bereitete, wurde es verworfen. Schließlich wurden noch zwei faseroptische Verfahren untersucht, die jedoch ebenfalls wegen mechanisch empfindlicher Meßfühler ausschieden. Die beste Eignung für die hochdynamische Messung versprach die akustische Temperaturmessung, die das Thema der vorliegenden Arbeit ist.

Das Signal des Präzisionssensors wird mit dem des hochdynamischen in einer Additionsstelle verknüpft. Zuvor durchläuft das Präzisionssignal ein Tiefpaßfilter, so daß die niederfrequenten Signalanteile durch den Präzisionssensor bestimmt werden. Das hochdynamische Signal durchläuft ein Hochpaßfilter, um die hochfrequenten

[1] Als Turbolator wird ein feststehendes, propellerähnliches Gebilde bezeichnet, welches die Strömung verwirbelt und dadurch Strömungsinhomogenitäten verringert.

[2] Bei PEEK (Polyarylenetherketon) handelt es sich um einen Kunststoff, der wegen seiner hohen Temperaturbeständigkeit, sehr hohen Zug- und Biegefestigkeit, hohen Schlagzähigkeit, schlechten Entflammbarkeit und guten chemischen und Strahlungsbeständigkeit in der Luftfahrttechnik oft Einsatz findet.

Anteile im Summensignal zu bestimmen. Die beiden Filter sind so dimensioniert, daß sie jeweils zusammen mit ihren vorhergehenden Sensoren zueinander komplementäre Frequenzgänge haben.

Die Arbeiten zum komplementären Streckenpaar mit anschließender Additionsstelle befinden sich noch im Anfangsstadium. Auf den ersten Blick scheint die Bereitstellung dieses Filterpaares eher trivialer Art zu sein. Bei Betrachtung der Abweichung der Filterantwort von der Sollantwort, die eine Folge nicht vollständig komplementärer Frequenzgänge ist, entstehen nicht hinnehmbare Abweichungen. Ob das Filterpaar auf rein analogelektronischem Wege überhaupt realisierbar ist, ist fraglich. Vermutlich wird die Analog-Digital-Umsetzung und anschließende zeit- und wertediskrete Filterung durch ein Rechenprogramm erfolgversprechender sein, da hier die Übertragungsfunktionen wesentlich freier definierbar sind. Ein erster Ansatz ist in [14] wiedergegeben.

Der Umfang der vorliegenden Arbeit beschränkt sich auf den hochdynamischen Temperatursensor in Gestalt eines akustischen, also nicht-dinglichen Sensors. Zunächst wird im folgenden Kapitel auf die Grundlagen der akustischen Temperaturmeßtechnik eingegangen, im Kapitel 3 auf die Besonderheiten, die sich durch die strömende, freie Atmosphäre ergeben. Im nächsten Kapitel erfolgt die Beschreibung des konzipierten Temperatursensors aus mechanischer und elektronischer Sicht, gefolgt von der Vorstellung von Messungen im Kapitel 5. Den Schluß der Arbeit bilden eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf Ansätze weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu diesem Thema sowie eine Übersicht über die verwendeten Literaturstellen.