

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Umweltmeteorologie  
Bodengebundene Fernmessung  
meteorologischer Parameter  
Mikrowellenradiometer

VDI 3786  
Blatt 23  
Entwurf

Environmental meteorology – Ground-based  
remote sensing of meteorological parameters –  
Microwave radiometers

*Einsprüche bis 2023-11-30*

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchportal  
<http://www.vdi.de/3786-23>
- in Papierform an  
VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft  
Fachbereich Umweltmeteorologie  
Postfach 10 11 39  
40002 Düsseldorf

Inhalt	Seite
Vorbemerkung .....	2
Einleitung .....	2
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	2
<b>2 Normative Verweise</b> .....	3
<b>3 Begriffe</b> .....	3
<b>4 Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	6
<b>5 Grundlagen</b> .....	7
5.1 Ursprung der Strahlung .....	7
5.2 Mikrowellenspektrum im Detail .....	8
5.3 Strahlungstransport .....	9
<b>6 Zielgrößen</b> .....	11
6.1 Messgrößen .....	11
6.2 Primäre Zielgrößen .....	11
6.3 Sekundäre Zielgrößen .....	12
6.4 Hilfsgrößen .....	12
<b>7 Systemkomponenten</b> .....	12
7.1 Funktionsprinzip .....	12
7.2 Kalibration .....	13
7.3 Antennen, Optik und Wellenleiter .....	13
7.4 Isolator .....	14
7.5 Rauschquelle .....	15
7.6 Empfänger .....	15
7.7 Filter .....	16
7.8 Detektor .....	16
7.9 Digitalisierung und Datenerfassung .....	16
7.10 Betriebssteuerung .....	17
7.11 Kalibrationsstandards .....	17
7.12 Hilfsdaten .....	17
7.13 Methoden zur Ableitung sekundärer Zielgrößen .....	18
7.14 Systemcharakterisierung (Qualitätsmerkmale) .....	18

Inhalt	Seite
<b>8 Verfahrensmerkmale</b> .....	22
8.1 Verfahren zur Kalibration sowie zur Bestimmung der primären Zielgröße (Strahlungstemperatur) .....	22
8.2 Methoden zur Ableitung der sekundären Zielgrößen .....	23
8.3 Auflösung .....	24
<b>9 Unsicherheitsbetrachtung</b> .....	26
9.1 Technische und systembedingte Unsicherheitsquellen .....	26
9.2 Absolute Messgenauigkeit .....	27
9.3 Unsicherheiten der sekundären Zielgrößen .....	30
<b>10 Messplanung</b> .....	31
<b>11 Betrieb, Qualitätssicherung und   Instandhaltung</b> .....	31
<b>12 Personal – Kompetenzen und Schulung</b> .....	31
<b>Anhang</b> Messbeispiele .....	32
A1 Vertikalprofile der Temperatur aus elevationsaufgelösten Messungen .....	32
A2 Vertikalprofile des Wasserdampfes .....	33
A3 Zeitserie des integrierten Wasserdampfgehalts .....	33
A4 Zeitserie des Flüssigwasserpfads .....	33
A5 Spektrum der atmosphärischen Dämpfung .....	34
Schrifttum .....	36

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss  
Fachbereich Umweltmeteorologie

VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b: Umweltmeteorologie

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

An der Erarbeitung dieser Richtlinie waren beteiligt:

Dr. *Dietrich Althausen*, Leipzig

Dr. *Harald Czekala*, Meckenheim

Prof. Dr. *Stefan Emeis*, Garmisch-Partenkirchen

Dipl.-Met. *Hans-Jürgen Kirtzel*, Elmshorn

Dr. *Christine Knist*, Lindenberg

Dr. *Volker Lehmann*, Lindenberg

Dr. *Gerrit Maschwitz*, Meckenheim

Dipl.-Math. *Christoph Münkkel*, Hamburg

Dr. *Gerhard Peters*, Elmshorn

Dr. *Bernhard Pospichal*, Köln

Dr. *Christoph Ritter*, Potsdam

Dr. *Volker Thiermann*, Rottenburg

Dipl.-Met. *Ludwig Wagner*, Erfstadt

Dr. *Matthias Wiegner*, München †

Dipl.-Phys. *Holger Wille*, Berlin

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/3786](http://www.vdi.de/3786).

## Einleitung

Mikrowellenradiometer sind geeignet, vertikale Profile von Temperatur und Luftfeuchte sowie Flüssigwasser in der atmosphärischen Grenzschicht und in der unteren Troposphäre zu erfassen. Die beiden Parameter „Temperatur“ und „Luftfeuchte“ und deren vertikale Verteilung sind in mehrfacher Hinsicht für die Umweltmeteorologie relevant.

- Temperaturverteilung und Feuchteverteilung bestimmen die Stabilität der Grenzschicht und damit die Stärke des vertikalen Austauschs von Luftschadstoffen.
- Beide haben einen Einfluss auf die Bildung sekundärer Aerosole in der Grenzschicht.

- Die Kenntnis der Feuchte ist bei der Beurteilung der Lufttrübung wichtig.

Letztlich ist der Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas in unserer Atmosphäre.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie beschreibt die passive Mikrowellenfernmessung mit Mikrowellenradiometern für verschiedene atmosphärische Parameter. Mikrowellen liegen typischerweise im Frequenzbereich von 1 GHz bis 300 GHz; der Submillimeter bzw. Terahertz-Bereich beginnt oberhalb von 300 GHz bzw. 1000 GHz. Mit Radiometern können z. B. die folgenden Parameter gemessen werden:

- Temperaturprofile mit Schwerpunkt in der Grenzschicht
- Feuchteprofile (absolute und relative)
- säulenintegrierte Gesamtgehalte von Wasserdampf und Flüssigwasser (IWV und LWP)
- atmosphärische Radiowellendämpfung und Laufzeitverzögerung
- Indizes atmosphärischer Stabilität
- charakteristische Atmosphären-Höhen wie Grenzschichthöhe, Schmelzschicht und Level-of-free-convection usw.)

Die am meisten verbreiteten Profilierungsradiometer (K-Band/V-Band für Wasserdampf/Temperatur) können alle diese Parameter gleichzeitig erfassen.

Darüber hinaus können polarisationssensitive Radiometer die Einflüsse der Form von Regentropfen auswerten und so Wolkenwasser von Regenwasser unterscheiden. Für die Fernerkundung von Eisteilchen, Spurengasanalyse, Messungen von Laufzeitverzögerungen und Dämpfung der Atmosphäre für Radioastronomie wird (in weit geringeren Stückzahlen) das Prinzip der Mikrowellenradiometrie in höhere Frequenzbereiche verschoben.

Diese Richtlinie erläutert die theoretischen Grundlagen der Anwendung, die technischen Anforderungen an die Messgeräte, deren qualitative Beurteilung/Charakterisierung, die Methodik der Informationsgewinnung (inklusive ihrer Beschränkungen und Fehler, aber auch ihrer Vorteile und Stärken), die Qualitätssicherung und den Betrieb der Messgeräte.

Der besondere Nutzen von Mikrowellenradiometern besteht in ihrem Allwettereinsatz (auch bei Wolken und Regen) sowie der guten zeitlichen Auflösung, was sie trotz der aus dem passiven Messprinzip resultierenden räumlichen Auflösungsbeschränkung zu einem nahezu kontinuierlich einsetzbaren nützlichen System zur Wetterbeobachtung macht.

Unter den tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten solcher Systeme finden sich im Wesentlichen die folgenden Anwendungen:

- Meteorologie (numerische Wettervorhersage, Forschung)
- Kurzfrist-Wetterprognosen (Zivilschutz, Katastrophenschutz)
- Luftfahrt, Flughäfen, Flugsicherheit
- Luftqualität/Umweltmeteorologie, Schadstoff-Ausbreitungsrechnungen
- Satellitenkommunikation (Dämpfung, Laufzeitverzögerung (Delay))
- Militär (Ballistik, Radarreichweitensimulation)

In dieser Richtlinie wird der bodengebundene, rein passive Einsatz von nicht phasensensitiven („total-power“) Mikrowellenradiometern behandelt.

Trotz der inhaltlichen Nähe der Konzepte behandelt die Richtlinie aber keine

- Flugzeug- oder satellitengebundene Mikrowellenradiometrie,
- aktiven Systeme (Radar),
- Infrarotradiometer,
- Sub-Millimeter- und THz-Systeme sowie
- Spektrometer (mit vielen tausend Kanälen hochaufgelöster Daten anstelle von wenigen (unter 100) Kanälen).