

VEREIN DEUTSCHER
INGENIEURE

VERBAND DEUTSCHER
ELEKTRO-TECHNIKER

Netzmessungen in Strömungsquerschnitten
**Allgemeine Richtlinien
und mathematische Grundlagen**

VDI/VDE 2640

Blatt 1

Measurement of fluid flow in closed conduits
General guidelines and mathematical basics

Inhaltlich überprüft und unverändert
weiterhin gültig: Februar 1999

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
1 Allgemeines	2
1.1 Gegenstand und Anwendung	2
1.2 Begriffe, Zeichen, Einheiten	3
2 Grundlagen	6
2.1 Prinzip der Netzmessung	6
2.2 Meßquerschnitt	8
2.3 Anordnung und Anzahl der Meßpunkte	8
2.4 Referenzmessung	8
2.5 Auswahl des Netzmeßverfahrens	10
2.6 Auswertung von Netzmessungen	10
2.7 Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsfeldes	22
3 Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit und des Durchflusses ...	24
3.1 Allgemeines	24
3.2 Numerische Integration	24
3.3 Arithmetische Integration, Schwerlinienverfahren	26
3.4 Arithmetische Integration bei spezieller Geschwindigkeitsverteilung .	33
3.5 Randzonenkorrekturen	33
3.6 Weitere Integrationsmethoden	33
3.7 Arithmetische Integration bei stark gestörten Geschwindigkeitsfeldern	33
3.8 Betriebsmeßverfahren	34
3.9 Vergleich verschiedener Integrationsmethoden für Kreisquerschnitte am Beispiel einer unsymmetrischen Geschwindigkeitsverteilung	34
4 Mittelwerte anderer physikalischer Größen	35
4.1 Allgemeines	35
4.2 Durchsatz und Mittelwerte physikalischer Größen	35
4.3 Punktweise Erfassung physikalischer Größen	38
4.4 Bestimmungsgleichungen der Mittelwerte physikalischer Größen ...	39
4.5 Mittelwerte physikalischer Größen bei spezieller Geschwindigkeits- verteilung im Kreisrohr	47
5 Störeinflüsse und Meßunsicherheiten, Abschätzung der Fehler	50
5.1 Bei ungestörten Geschwindigkeitsfeldern	50
5.2 Zusätzliche Meßunsicherheiten bei gestörten Geschwindigkeitsfeldern	50
Schrifttum	51
Anhang Ergänzungen zu Abschnitt 3 und 4	53

VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik
Fachausschuß Netzmessungen in Strömungsquerschnitten

VDI/VDE-Handbuch Meßtechnik I
VDI-Handbuch Energietechnik

Frühere Ausgabe: 3.91 Entwurf

Zu beziehen durch Beuth Verlag GmbH, Berlin – Alle Rechte vorbehalten © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1993

BEST BeuthStandardsCollection - Stand 2016-11

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet

Vorbemerkung

Netzmessungen sind Verfahren zur Bestimmung des Volumen- bzw. Massenstromes oder der Mittelwerte und Verteilung anderer physikalischer Größen von Flüssigkeiten oder Gasen in meist großen Strömungsquerschnitten. Sie werden – vorwiegend im Rahmen von Abnahmeuntersuchungen und Untersuchungen zum Garantienachweis – z. B. in Rauchgas und Luftkanälen, in Wasserkraftanlagen oder in Kühlwassersystemen thermischer Kraftwerke eingesetzt.

Netzmessungen müssen meistens in Anlagen vor Ort oder auf Großprüfständen durchgeführt werden. Die verwendeten Meßgeräte und Meßeinrichtungen müssen den schwierigen Betriebsbedingungen technisch entsprechend ausgeführt sein.

Die vorliegende Richtlinie VDI/VDE 2640 „Netzmessungen in Strömungsquerschnitten“ besteht aus folgenden Blättern:

- Blatt 1 Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen
- Blatt 2 Bestimmung des Wasserstromes in geschlossenen, ganz gefüllten Leitungen mit Kreis- oder Rechteckquerschnitt
- Blatt 3 Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt
- Blatt 4 Bestimmung der mittleren Temperatur in strömenden Flüssigkeiten

In Blatt 1 sind die mathematischen Grundlagen der Verfahren behandelt, wobei der Hauptteil die für die Praxis notwendigen und der Anhang weiterführende Betrachtungen sowie mathematische Ableitungen enthält. Dieses Blatt ist in Hauptteil und Anhang aufgeteilt, wobei die Nummern der entsprechenden Abschnitte korrespondieren.

In Blatt 2 bis 4 werden in sich abgegrenzte Anwendungen (z. B. Bestimmung der mittleren Temperatur in strömenden Flüssigkeiten) behandelt. Diese Blätter sind auf die Belange der Praxis zugeschnitten, z. B. durch die Darstellung von Meßprotokollen und Aussagen zur Meßunsicherheit.

Um die Konsistenz mit den früher erschienenen Blättern 2 bis 4 der Richtlinie zu bewahren, entsprechen die verwendeten Begriffe in einzelnen Fällen nicht immer der gültigen Norm DIN 1319.

Die Richtlinie ist unter Berücksichtigung der Arbeiten in ISO/TC 30 SC 4 entstanden, allerdings mit einem wesentlich stärkeren Bezug auf die Anforderungen der Praxis. Sie basiert auf den grundsätzlichen Arbeiten von Herrn Dr.-Ing. Kurt Renner †, Bergbauforschung Essen, und wurde vom Fachausschuß „Netzmessungen in Strömungsquerschnitten“ der VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik erstellt.

1 Allgemeines

1.1 Gegenstand und Anwendung

Netzmessungen sind Verfahren zur Ermittlung der Mittelwerte physikalischer Größen von Fluiden in Strömungsquerschnitten. Bei dieser Art der Messung wird eine Vielzahl von einzelnen Meßpunkten netzartig über den Strömungsquerschnitt verteilt und in diesen Punkten die Werte der Größe gemessen. Aus den gemessenen Einzelwerten wird anschließend ein Mittelwert gebildet.

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen können im Querschnitt nicht beliebig viele Meßpunkte untergebracht werden. Deshalb sind verschiedene Verfahren entwickelt worden, nach denen die Meßpunkte angeordnet werden können.

In der Richtlinie VDI/VDE 2640 sind diese Verfahren zur Ermittlung des Volumen- bzw. Massenstromes und zur Bestimmung von Mittelwerten anderer physikalischer Größen beschrieben, z. B.

- Geschwindigkeit
- Temperatur von Gasströmen
- Enthalpie von Gasströmen
- statischer Druck in Gasströmen
- Dichte in Gasströmen
- Konzentration der Gemischanteile
- Gaskonstante von Gemischen
- Feststoffanteile von Flüssigkeiten
- Staubgehalt in Gasströmen
- Feuchte in Gasströmen
- Energie- und Impulsströme

In Blatt 1 sind verschiedene Netzmeßverfahren mit unterschiedlicher Anordnung der Meßpunkte im Meßquerschnitt und verschiedene Integrationsverfahren zur Bestimmung von Durchfluß und Mittelwerten bei beliebiger Verteilung physikalischer Größen beschrieben. Besondere Bedeutung kommt den Netzmeßverfahren zu, deren Meßpunktanordnung so gewählt ist, daß eine arithmetische Integration möglich ist, d. h. die einzelnen Meßwerte einfach summiert werden können. In Blatt 1 sind auch die Grundlagen solcher Betriebsmeßverfahren beschrieben, bei denen ein Aufnehmer im Meßquerschnitt entlang eines bestimmten Linienzuges geführt wird (z. B. Schlaufenverfahren mit Flügelradanemometer).

Bei allen Verfahren der Netzmessung und unabhängig von der physikalischen Größe, die gemessen und/oder durch Integration gemittelt werden soll, hat die Geschwindigkeitsverteilung im Hinblick auf die Meßpunktanordnung, Integration und Fehlerermittlung eine besondere Bedeutung.

Aus diesem Grund werden zunächst in Abschnitt 3 die Verfahren der Netzmessung zur Bestimmung des Durchflusses und der mittleren Geschwindigkeit behandelt. Die Verfahren der Netzmessung für die Bestimmung der Mittelwerte anderer physikalischer Größen folgen in Abschnitt 4. In Abschnitt 5 werden Effekte beschrieben, die die Meßgenauigkeit beeinflussen, z. B. Fehler bei der Querschnittsbestimmung, der Meßpunkteinstellung usw., aber auch Fehler infolge von zeitlichen Schwankungen der Meßgrößen, wie sie durch Vergleich mit einer Referenzmeßstelle

zu beobachten sind. An Beispielen wird die Abschätzung der Meßunsicherheit erläutert.

1.2 Begriffe, Zeichen, Einheiten

Bei der Zusammenstellung der verwendeten Größen in Tabelle 1 sind die Bezeichnungen in Übereinstimmung mit [5]¹⁾ gewählt worden. Als Einheiten werden ausschließlich diejenigen des ab 1. 1. 1978 gesetzlich vorgeschriebenen SI-Systems benutzt.

¹⁾ Ausnahme: Bezeichnung für den Volumenstrom nach ISO 3966 [17]

Tabelle 1. Begriffe, Zeichen; Einheiten

Nr.	Begriff	Zeichen	Einheit	Bemerkungen
1. Abmessungen				
1	Innendurchmesser (Strömungsquerschnitt)	D	m; mm	$R = D/2$ Kreis: $Y_i = R - r_i$ \square : $Y_j = H - h_j$; $Y_j = B - b_j$ Kreis: $Y_i = D - Y_i$ \square : $Y_j = H - h_j$; $Y_i = B - Y_i$ z. B. für Meßpkt: $v^+ = v_m$ $\Delta t = t_i - t_{i-1}$
2	Innenradius	R	m; mm	
3	Durchmesser	d	m; mm	
4	Durchmesser des Flügelrads oder Anemometers	d_F	m; mm	
5	Radius (Polarkoordinaten)	r	m; mm	
6	Winkel (Polarkoordinaten)	φ	rad; °	
7	(lichte) Breite des Kanalquerschnitts	B	m; mm	
8	(lichte) Höhe des Kanalquerschnitts	H	m; mm	
9	Breite (kartesische Koordinaten)	b	m; mm	
10	Höhe (kartesische Koordinaten)	h	m; mm	
11	Abschrägung des Rechtecks	e	m; mm	
12	Abrundungsradius des Rechtecks	r_e	m; mm	
13	Schwerpunkt- (Meßpunkt-) Verschiebung in der Eckteilfläche des Rechtecks mit Abschrägung	Δs	m; mm	
14	Länge	L ; l	m; mm	
15	Winkel eines Kreissektors	α	rad; °	
16	Einstellwinkel einer Sonde (Einpunkt-Sondeneinführung)	β	rad; °	
17	Exzentrizität des Sonden-Schwenkpunktes	ϵ	mm	
18	Wandabstand eines Meßpunktes bzw. einer Meßgeraden	Y	mm	
19	Wandabstand des symmetrisch zur Mittellinie gelegenen Meßpunktes	Y'	mm	
20	„Repräsentativer“ Wandabstand	Y^+	mm	
21	Zeitpunkt der i -ten Messung	t_i	s	
22	Zeitspanne	Δt	s	
23	Meßquerschnitt	A	m ²	
24	Teilfläche des Meßquerschnitts	ΔA	m ²	
25	Flächenintegral einer Verteilung	J_v	mm ²	
2. Meß- und Zustandsgrößen				
26	Strömungsgeschwindigkeit	v	m · s ⁻¹	z. B. im Referenz-Meßpunkt Kreis: $\varphi = \varphi_i$; \square : $b = b_i$ i -ter Teilkreisring i -ter Rechteckrahmen Kreis: für Meßgerade φ_i \square : für einen Quadranten Kreis: f. Meßradius φ_i \square : f. einen Quadranten i ; j
27	Geschwindigkeitskomponente ($\perp A$)	v_A	m · s ⁻¹	
28	Mittlere Geschwindigkeit im Meßquerschnitt	v_m	m · s ⁻¹	
29	Arithmetischer Mittelwert gemessener Geschwindigkeiten	\bar{v}	m · s ⁻¹	
30	Bezugsgeschwindigkeit	v_0	m · s ⁻¹	
31	Zeitl. Mittelwert der Referenzgeschwindigkeit	v_{0m}	m · s ⁻¹	
32	Referenzgeschwindigkeit zur Zeit t_i	$v_0(t_i)$	m · s ⁻¹	
33	Geschwindigkeit am wandnächsten Meßpunkt (Y_1)	v_1	m · s ⁻¹	
34	Arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeit für eine Meßgerade	\bar{v}_{φ_i}	m · s ⁻¹	
35	Arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeit der i -ten Teilfläche	\bar{v}_i	m · s ⁻¹	
36	Maximalwert der arithmetisch gemittelten Geschwindigkeit	\bar{v}_{\max}	m · s ⁻¹	
37	Minimalwert der arithmetisch gemittelten Geschwindigkeit	\bar{v}_{\min}	m · s ⁻¹	