T E C H N I S C H E   U N I V E R S I T Ä T

TUHH

H A M B U R G — H A R B U R G

Arbeitsbereich Strömungsmechanik

Prof. Dr.-Ing. L. Friedel

Große Konstruktive Studienarbeit

Entwicklung einer Meßmethode zur Bestimmung des thermodynamischen Ungleichgewichts bei Durchströmung von Drosselorganen mit siedendem Wasser bzw. Wasser/Dampf-Gemischen

Autor: cand. ing. Oliver Czygan

Betreuer: Dipl.-Ing. Ralf Diener

Ich versichere, diese Arbeit im Rahmen der am Arbeitsbereich üblichen Betreuung selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Die wörtlichen oder sinngemäßen Zitate habe ich als solche gekennzeichnet.

Hamburg, im September 1996

Aufgabenstellung

Drosselorgane wie zum Beispiel Blenden oder Stellventile werden in der Verfahrenstechnik insbesondere im Hochdruckbereich häufig zum Entspannen von siedenden Flüssigkeiten oder Gemischen aus Dampf und siedender Flüssigkeit eingesetzt. Während der Entspannung verdampft infolge des Druckabfalls ein Teil der Flüssigkeit, wobei je nach gebildeter Dampfmenge der Massenstrom gemindert oder sogar begrenzt werden kann. Wegen der hohen Fluidgeschwindigkeiten während der Entspannung stellt sich jedoch häufig ein thermodynamisches Ungleichgewicht ein, das heißt die Flüssigkeit ist überhitzt, so daß im Vergleich zur Gleichgewichtsströmung weniger Flüssigkeit verdampft. Die Kenntnis der Überhitzung ist somit zur Bestimmung der entstehenden Dampfmenge und damit auch zur Berechnung des Massendurchsatzes durch die Armatur notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Modellarmaturen, bestehend aus Düse und Carnotdiffusor hergestellt werden. Für diese Armaturen ist dann die entsprechende Meßtechnik zur experimentellen Ermittlung der Überhitzung der Flüssigkeit auszuwählen und am Flashing-Versuchsstand des Arbeitsbereiches Strömungsmechanik zu testen. Weiterhin sind Möglichkeiten für die Erfassung der Dampftemperaturen zu diskutieren.

Inhaltsverzeichnis

Anhang

Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Oberfläche
A_E	cm^2	Sensorfläche
c_p	kJ/kg K bzw. cal/g °C	massenspezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_w	—	Strömungswiderstandsbeiwert
C	—	dimensionslose Konstante
d	cm	Durchmesser
D	cm $\sqrt{\mathrm{Hz}}$ / W	Detektivität
D*	$\sqrt{\mathrm{Hz}}$ / W	spezifische Detektivität
f	Hz	Frequenz
F	verschied.	Fehler
G	$lb/ft^2\,s$	Massendurchfluß
I	cm^4	Flächenmoment 2. Grades
k	$W/m^2\,K$	Wärmedurchgangskoeffizient
k	mV/K	Thermospannungskoeffizient
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
n	1/min	Drehzahl
NEP	W/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$	äquivalenter Strahlfluß
Nu	—	Nusseltzahl
Pr	—	Prandtlzahl
q	N/m	Streckenlast
r	cm	Radius
R	Ω	elektrischer Widerstand
R	V/ W	Empfindlichkeit
R_0	Ω	elektrischer Widerstand bei 0 °C
Re	—	Reynoldszahl
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
U	V	elektrische Spannung
v	m/s	Geschwindigkeit
W	cm^3	Widerstandsmoment
$\dot{x}$	—	Strömungsmassendampfgehalt
α	$W/m^2\,K$	Wärmeübergangskoeffizient
α_R	1/K	linearer Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands
ε	—	Emissionskoeffizient
η	μPa s	dynamische Viskosität

Symbol	**Einheit**	**Bedeutung**
ϑ	°C	Temperatur
λ	μm	Wellenlänge
λ	W/m K	Wärmeleitkoeffizient
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ϱ	g/cm^3	Dichte
σ	N/mm^2	mechanische Spannung
σ	verschied.	Standardabweichung
τ	s	Zeitkonstante
Φ	W	Strahlfluß

Abkürzungen und Indizes

Symbol	Bedeutung
a	außen
abs	absolut
Betrpkt	Betriebspunkt
B	Biegung
c	Grenz... („cut-off-“)
Dim.	Dimension
E	Einspannstelle
F	Fühler
Fa.	Firma
i	innen
IR	Infrarot
max	maximal
N	Norm...
NEP	äquivalente Rauschleistung („Noise Equivalent Power“)
o	oben
R	Rausch...
rel	relativ
S	Signal...
u	unten
zugeh.	zugehörig

1 Problem, Ziel und Vorgehensweise

Bei Durchströmung von Drosselorganen wie z. B. Stellventilen mit nur gering unterkühlter oder gar gesättigter Flüssigkeit kommt es infolge des Druckabfalls zur Nachverdampfung der Flüssigkeit. Der Massendurchsatz sowie die zur Einstellung eines bestimmten Hubes aufzuwendenden Stellkräfte hängen wesentlich von der im engsten Querschnitt der Armatur verdampften Flüssigkeitsmenge ab. Die Vorhersage des entstehenden Dampfmassenstromes allein auf Basis des Differenzdruckes ist aufgrund des sich einstellenden thermodynamischen Ungleichgewichts, das vereinfachend als Differenz zwischen Sättigungstemperatur und der Temperatur der (überhitzten) Flüssigkeit infolge schneller Druckabsenkung charakterisiert werden kann, a priori nicht möglich. Bei realen Armaturen kommt erschwerend hinzu, daß der sich aufgrund von Strömungsablösung und -kontraktion einstellende engste Strömungsquerschnitt (Vena Contracta) nicht mit dem geometrisch engsten Querschnitt identisch ist und derzeit nicht zuverlässig bestimmt werden kann.

Die experimentelle Ermittlung des Siedeverzugs im engsten Strömungsquerschnitt der Armatur durch Erfassung von Temperatur und Druck ist schwierig, da Lage und Größe der Vena Contracta unbekannt sind. Aus diesem Grund sollen einfache Modellarmaturen, bestehend aus idealer Düse und nachgeschalteter plötzlicher Erweiterung, konstruiert werden, die an den charakteristischen Querschnitten (Zulauf, engster Düsenquerschnitt, Ablauf) mit für Zweiphasenströmung geeigneten Druck- und Temperaturmeßstellen zu versehen sind. Hierfür sind zweckmäßige Temperatur- und Drucksensoren auszuwählen. Die Temperatursensoren sollen dabei über den gesamten Querschnitt verschiebbar sein, so daß sich eventuell über den jeweiligen Querschnitt einstellende Temperaturgradienten gemessen werden können. Im Zusammenhang mit der Auswahl der Temperatursensorik sollen Möglichkeiten für eine schnelle Temperaturmessung, z. B. bei transienter Strömung oder zur Erfassung der Dampftemperatur, diskutiert werden.

Zunächst werden die Anforderungen an die Temperatur- und Druckmeßtechnik definiert. Anhand dieser Anforderungen wird die Sensorik ausgewählt, wobei auf die Temperaturmeßtechnik detaillierter eingegangen wird. Hier sollen Möglichkeiten zur schnellen Temperaturmessung geprüft werden. Anhand der ausgewählten Sensorik und der vorgegebenen Abmessungen sind die Armaturen entsprechend zu konstruieren. Abgeschlossen wird mit der Erprobung der Armaturen am Flashing-Versuchsstand mit siedendem Wasser.

2 Anforderungen an die Meßtechnik

Die Versuchsstrecke und die Lage der an der jeweils zu untersuchenden Armatur angeordneten Temperaturmeßstellen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Im Zulauf der Modellarmatur (siehe Meßstrecke X1), an der die Temperatur- und Druckmessungen vorgenommen werden sollen, liegt siedendes oder gering unterkühltes Wasser vor, das beim Durchströmen teilweise verdampft. Zur Bestimmung des Siedeverzugs sind die entsprechenden Meßwerte vor der Armatur, im engsten Querschnitt und im Ablauf aufzunehmen.

Aus den Abmessungen des Versuchsaufbaus und den geforderten Genauigkeiten ergibt sich dann für das zu entwickelnde Meßsystem das in Tabelle 3 dargestellte Anforderungsprofil.

Temperaturbereich	90...130 °C
Temperaturmeßgenauigkeit	± 0,5 °C
Betriebsdruck	≤ 10 bar
Druckmeßgenauigkeit	± 0,03 bar
Strömungsgeschwindigkeit	≤ 100 m/s
Durchmesser des engsten Querschnitts	17,4; 22,3; 32,7 mm
Rohrdurchmesser	54,5 mm

Tabelle 3: Betriebsbedingungen und Anforderungen an das Meßsystem

Soll die dem Druck zugeordnete Siedetemperatur, deren Kenntnis für die Bestimmung des Siedeverzugs erforderlich ist, auch mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\,^\circ\mathrm{C}$ angegeben werden können, so ergibt sich die erforderliche Druckmeßgenauigkeit aus der Steigung der Dampfdruckkurve von Wasserdampf im interessierenden Temperaturbereich: Bei der Temperatur $\vartheta = 120\,^\circ\mathrm{C}$ z. B. beträgt die Steigung der Dampfdruckkurve etwa

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{2,0492 - 1,9233}{121 - 119}\ \frac{\mathrm{bar}}{^\circ\mathrm{C}} = \frac{0,1259}{2}\ \frac{\mathrm{bar}}{^\circ\mathrm{C}} = 0,0630\ \frac{\mathrm{bar}}{^\circ\mathrm{C}} \qquad (1)$$

Der Druck muß hier also mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0630\ \frac{\mathrm{bar}}{^\circ\mathrm{C}} \cdot 0,5\,^\circ\mathrm{C} = \pm 0,0315$ bar gemessen werden können.

Sollen neben Flüssigkeits- auch Dampftemperaturen erfaßt werden, so sind wegen der geringeren Wärmekapazität des Dampfes deutlich kleinere Ansprechzeiten als bei der Messung der Flüssigkeitstemperatur erforderlich. Das Hauptproblem stellt hierbei das Erreichen einer niedrigen Ansprechzeit bei noch akzeptabler Meßgenauigkeit dar. Die Größenordnung der erforderlichen Ansprechzeit des Meßsystems wurde für den extremen Fall unter der Annahme ermittelt, daß die dampfförmige Phase in Form 1 mm großer

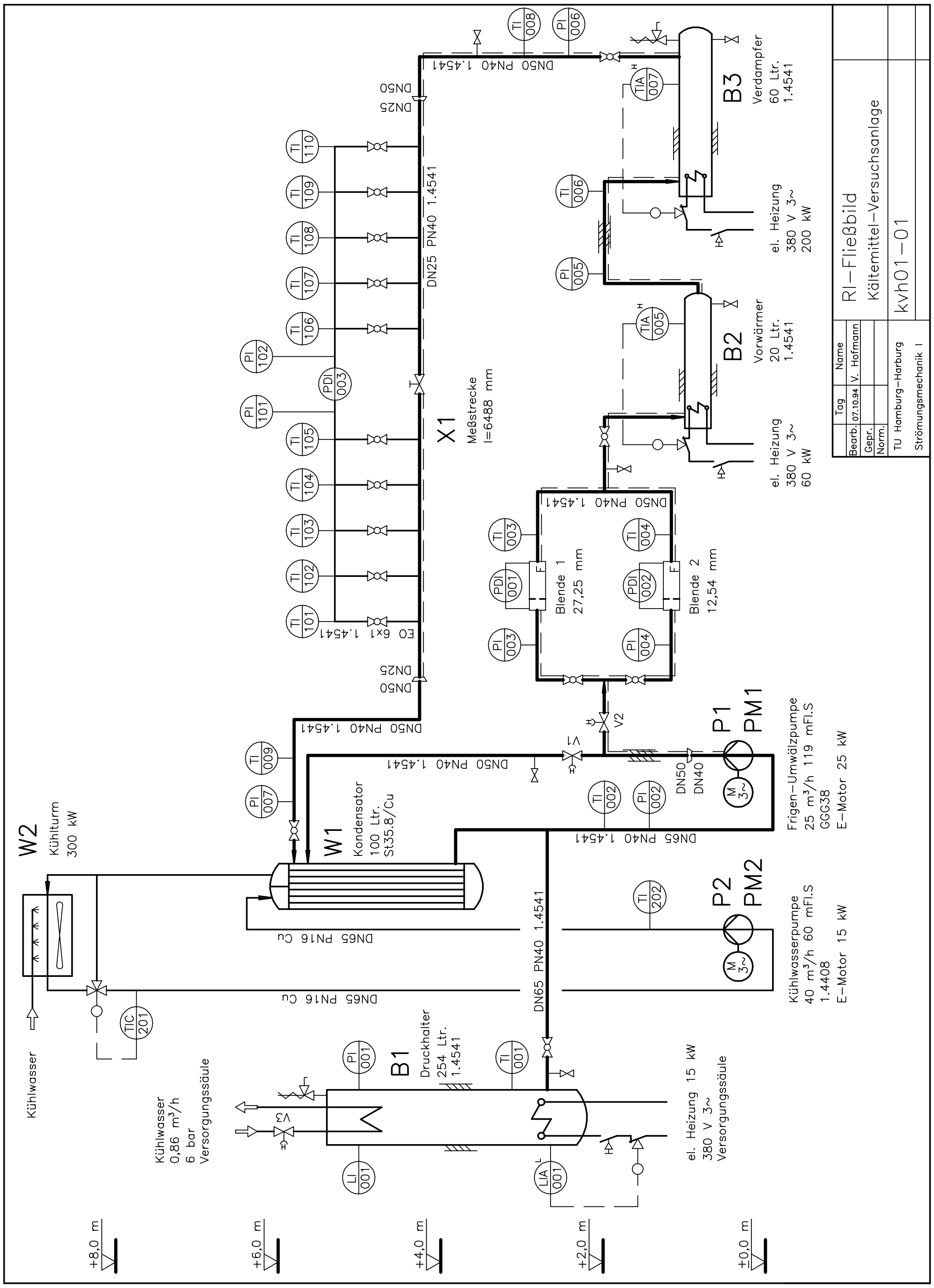


Abbildung 1: Schema der Versuchsanlage (mit freundl. Genehmigung von V. Hofmann)

Dampfblasen in der flüssigen Phase vorliegt. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/s hat die Blase am Meßfühler also eine Verweilzeit von

$$t = \frac{d_{\text{Blase}}}{v} = \frac{1\ \text{mm}}{100\ \text{m/s}} = 0{,}01\ \text{ms}. \tag{2}$$

Geht man davon aus, daß zur Bestimmung der Dampfblasentemperatur zwar einerseits nicht das vollständige Verstreichen der Thermometeransprechzeit erforderlich ist[1], aber andererseits die Dampfblasen den Fühler nicht unbedingt mittig treffen, so liegt die maximal zulässige Ansprechzeit etwa in der Nähe des berechneten Wertes von 0,01 ms. Für größere Dampfblasen und niedrigere Fluidgeschwindigkeiten sind entsprechend größere Thermometeransprechzeiten erforderlich, z. B. $t = 1\ \text{cm}/10\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1\ \text{ms}$.

[1] siehe hierzu Vorversuch in Kapitel 3.2.1, Seite 13

3 Auswahl von Druck- und Temperatursensoren

3.1 Drucksensorik

An allen Druckmeßstellen der Meßstrecke werden die Druckaufnehmer der Firma VDO Industrie-Meßtechnik GmbH verwendet:

Druckbereich:	0 ... 25 bar abs
Strombereich:	0 ... 20 mA
Fehlerklasse:	0,25% (v. E.)

Die Druckaufnehmer wurden mit einer Druckwaage kalibriert.

Die Drücke werden an Ringmeßkammern aufgenommen, die an den charakteristischen Querschnitten montiert wurden. Sie sind mit der Rohrwand verschweißt und stellen über jeweils drei um 120° versetzte Bohrungen von 1,5 mm Durchmesser die notwendige Verbindung mit dem Rohrinneren her. Es ist auf sorgfältige Bearbeitung zu achten, da sonst eventuell die Meßwerte erheblich verfälscht würden: Die Bohrungen sind gratfrei auszuführen, und sie müssen exakt radial verlaufen.

3.2 Temperatursensorik

Im folgenden soll für die Messungen an den charakteristischen Stellen in der Modellarmatur eine Temperaturmeßvorrichtung entwickelt werden, die einerseits sehr schnell ist und damit hochfrequente Temperaturschwankungen aufzeichnen kann und andererseits die Temperaturaufnahme über den gesamten Querschnitt erlaubt, um eventuell vorhandene Temperaturgradienten zu erfassen. Es stehen verschiedene Meßverfahren zur Verfügung. Sie werden in Anhang B vorgestellt und bezüglich ihrer Tauglichkeit für diesen Anwendungsfall — unter Berücksichtigung des in Kapitel 2 formulierten Anforderungskatalogs — untersucht. Hier sollen aus Gründen geforderter niedriger Ansprechzeiten nur zwei Verfahren näher betrachtet werden: Die Temperaturerfassung mit einem Thermoelement und mit einem IR-Fühler.

Zunächst werden Vorversuche durchgeführt, um Aussagen über die grundsätzliche Tauglichkeit und über die Gestaltung von Details in der anschließend zu konstruierenden Temperaturmeßvorrichtung treffen zu können. Mit dieser Vorrichtung sollen dann die eigentlichen Messungen an der Modellarmatur durchgeführt werden.

3.2.1 Vorversuche

Vorversuch zur meßtechnischen Eignungsprüfung eines feinen Thermoelements Es soll untersucht werden, ob ein feines Thermoelement den Ansprüchen aus Tabelle 3 genügt und wie die Sensorspitze im Detail zu gestalten ist.

Folgender, durch einen einfachen Versuchsaufbau realisierter, Vorversuch wird durchgeführt: Zur Bestimmung des Zeitverhaltens von Temperatursensoren wird ein Thermoelement schlagartig in ruhendes bzw. bewegtes Wasser, von der Umgebung abweichenden Temperaturniveaus, eingetaucht. Hierbei wird die von der Fühlertemperatur abhängige, sich zeitlich verändernde Thermospannung (hier: Sprungantwort) verstärkt und per Computer aufgezeichnet. Aus den ausgegebenen Spannungswerten können anschließend über den zugehörigen Fühlertemperatur-Zeit-Verlauf charakteristische Ansprechzeiten ermittelt werden.

Eintauchen in ruhendes Wasser Ein Thermodraht (Durchmesser 0,2 mm) ohne Schutzrohr wird in ein thermostatisch geregeltes Bad, das Wasser einer bekannten (von der Umgebungstemperatur verschiedenen) Temperatur enthält, eingetaucht.

Ein typischer Fühlertemperatur-Zeit-Verlauf für plötzliches Eintauchen in heißes Wasser kann dem Diagramm der Abbildung 2 entnommen werden. Zu beachten war hier, daß als Anfangstemperatur für die Ansprechzeitenbestimmung im allgemeinen nicht die Umgebungstemperatur gewählt werden konnte: Vor dem eigentlichen exponentiellen Kurvenanstieg gab es eine Phase leichter etwa zeitlich linearer Temperaturzunahme. Dies ist vermutlich auf die über der Flüssigkeitsoberfläche vorhandene Dampfphase zurückzuführen, die vor Eintauchen des Fühlers durchdrungen werden muß. Die Auswertung kann deshalb erst ab dem deutlich erkennbaren Kurvenknick (in Abbildung 2: nach etwa 0,21 Sekunden) erfolgen. Wird ein exponentieller Kurvenverlauf vorausgesetzt, dann kann aber jeder — auch während der Aufwärmperiode auftretende — Temperaturzustand als Aufwärmbeginn für die nachfolgende Bestimmung der charakteristischen Zeiten aufgefaßt werden.

Die aus den jeweiligen Meßdaten ermittelten Ansprechzeiten sind in Tabelle 4 aufgelistet. Die hier verwendeten charakteristischen Thermometerkenngrößen sind in Anhang A näher erläutert.

Als Ergebnisse der Messungen sind zu nennen:

- Die Zeitkonstante τ ist schon bei Meßfrequenzen von 500 Hz ausreichend genau bestimmbar. Bei dieser Frequenz liegen hinreichend geringe Streuungen der Einzelmessungen vor (Messung 02). Ungenauigkeiten der ermittelten Ansprechzeiten in der Größenordnung von 15 % sind hier auf Schwankungen in der Temperaturmessung zurückzuführen, wie die Abbildung 2 unschwer erkennen läßt.

- Weder die Länge der Abisolierung noch die Länge des tatsächlich verdrillten Ther-

Messung	Meßfrequenz [Hz]	$t_{0,10}$ [ms]	$t_{0,20}$ [ms]	$t_{0,30}$ [ms]	$t_{0,50}$ [ms]	τ [ms] $= t_{0,623}$	$\sigma(\tau)$ [ms]	$t_{0,90}$ [ms]	$t_{0,90}/t_{0,50}$
01a	100	25	30	25	50	55	—	85	1,70
01b	100	10	20	25	35	40	—	70	2,00
01c	100	5	10	15	25	30	—	60	2,40
01 (ø)	—	13,3	20,0	21,7	36,7	41,7	12,6	71,7	2,03
02a	500	10	16	22	34	42	—	84	2,47
02b	500	7	13	18	28	34	—	64	2,29
02 (ø)	—	8,5	14,5	20,0	31,0	38,0	5,7	74,0	2,38
03a	1000	8	14	19	29	36	—	70	2,41
03b	1000	9	14	18	28	35	—	62	2,21
03 (ø)	—	8,5	14,0	18,5	28,5	35,5	0,7	66,0	2,31
04a	100	10	20	25	35	40	—	75	2,14
04b	100	10	15	20	35	40	—	85	2,43
04c	100	5	10	15	25	35	—	70	2,80
04 (ø)	—	8,3	15,0	20,0	31,7	38,3	2,9	76,7	2,46
05a	500	104	200	324	660	1008	—	2284	3,46
05b	500	72	184	324	692	1108	—	2764	3,99
05c	500	76	192	352	776	1384	—	2820	3,63
05 (ø)	—	84,0	192,0	333,3	709,3	1166,7	194,7	2622,7	3,69
06a	500	8	13	18	27	35	—	64	2,37
06b	500	9	15	22	35	44	—	84	2,40
06 (ø)	—	8,5	14,0	20,0	31,0	39,5	6,4	74,0	2,39
07a	500	11	18	23	36	46	—	84	2,33
07b	500	10	18	24	36	46	—	84	2,33
07c	500	12	19	26	39	48	—	84	2,15
07 (ø)	—	11,0	18,3	24,3	37,0	46,7	1,2	84,0	2,27
08a	500	12	18	26	40	49	—	88	2,20
08b	500	9	15	20	31	39	—	76	2,45
08c	500	11	16	22	32	40	—	72	2,25
08 (ø)	—	10,7	16,3	22,7	34,3	42,7	5,5	78,7	2,30

01: Eintauchen in heißes Wasser; Abisolierung 5 mm; Meßfrequenz: 100 Hz
02: Eintauchen in heißes Wasser; Abisolierung 5 mm; Meßfrequenz: 500 Hz
03: Eintauchen in heißes Wasser; Abisolierung 5 mm; Meßfrequenz: 1000 Hz
04: Eintauchen in kaltes Wasser; Abisolierung 5 mm
05: Herausziehen aus heißem Wasser
06: Eintauchen in heißes Wasser; Abisolierung 10 mm
07: Eintauchen in heißes Wasser; Abisolierung 20 mm; gesamter blanker Draht verdrillt
08: Eintauchen in heißes Wasser; Abisolierung 20 mm; nur Spitze verdrillt

Tabelle 4: Meßdaten des Thermoelement-Vorversuchs: Temperaturmessungen in ruhendem Wasser

Abbildung 2: Typischer Fühlertemperatur-Zeit-Verlauf bei einer Meßfrequenz von 500 Hz modrahtendes haben einen nennenswerten Einfluß auf die Ansprechzeit des Thermoelementes (Messungen 06 – 08).

- Bei Kenntnis der charakteristischen Zeit $t_{0,90}$ kann schon mit genügender Genauigkeit der Temperaturendwert angegeben werden. Es wäre zwar wünschenswert, schon nach möglichst kurzen Zeiten auf das weitere Temperaturverhalten schließen zu können, aber erst ab $t_{0,30}$ sind Aussagen auf das gesamte Zeitverhalten ausreichend zuverlässig extrapolierbar. Die Kennwerte $t_{0,10}$ und $t_{0,20}$ unterliegen noch großen Streuungen — ihre Aussagekraft ist gering.

- Bei den Messungen, bei denen der Thermodraht aus der Flüssigkeit herausgezogen wurde, lagen große Ansprechzeiten und hierbei noch große Streuungen $\sigma(\tau)$ bei diesen Zeiten vor (Messung 05). Die erhöhten Ansprechzeiten können darauf zurückgeführt werden, daß noch Flüssigkeitstropfen am Thermodraht hingen, die ein allzuschnelles Fühlerabkühlen verhinderten.

- Bei Drahteintauchen sind praktisch zwischen Fühlerabkühlung und Fühlererwärmung keine wesentlichen Unterschiede der Ansprechzeiten erkennbar (Vgl. Messungen 01 und 04).

- Bei fast allen Einzelmessungen wurde eine Nacheilung des Fühlertemperatur-Zeit-Verhaltens festgestellt ($t_{0,9}/t_{0,5} < 3,322$): Anders als z. B. bei einem dünnen Mantelthermoelement ist hier der innere Wärmedurchgangskoeffizient k_i nicht groß gegenüber dem Wärmeübergangskoeffizienten α (siehe Anhang A, S. 34; [17], S. 4).

Eintauchen in bewegtes Wasser Vor allem um die Abhängigkeit der Ansprechzeiten von der Meßspitzenausführung experimentell zu ermitteln, wird der folgende Vorversuch unter ähnlichen Bedingungen wie in VDI/VDE 3522 [17] geschildert durchgeführt:

Der gleiche Thermodraht wie bei ruhendem Wasser dient jetzt auch als Temperatursensor für die Bestimmung der Ansprechzeiten bei Eintauchen in bewegtes Wasser. Das Wasser wird in einem auf einer Heizplatte stehenden Becherglas (Durchmesser 9,2 cm) auf ein konstantes Temperaturniveau erwärmt. Ein von einem elektrischen Drehfeld angetriebener Magnetrührer sorgt für die Wasserbewegung. Geht man davon aus, daß zwischen Rührmagnet und Wasser kein Schlupf auftritt und die Wassergeschwindigkeit von der Behältermitte nach außen linear zunimmt, so genügt die Kenntnis der Rührerdrehzahl und der Thermoelementeintauchlage, um auf die Wassergeschwindigkeit schließen zu können. Die Drehzahl wurde mit einem Stroboskop ermittelt. Die Geschwindigkeit wurde damit nach

$$v = 2\pi n \cdot r \tag{3}$$

zu $v = 2\pi \cdot 1400 \, \frac{1}{\mathrm{min}} \cdot 3,3 \, \mathrm{cm} = 4,8 \, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ bestimmt. Hierbei bezeichnet v die Wassergeschwindigkeit, n die Rührerdrehzahl und r den Eintauchabstand vom Becherglasmittelpunkt. Wegen der Feinheit des Thermodrahtes ist jetzt zusätzlich ein Schutzrohr (Werkstoff: austenitischer Stahl 1.4571) erforderlich, in dem der Thermodraht fixiert wurde. Wird der Draht ungeschützt in die Strömung eingebracht, biegt er sich je nach Strömungsbewegung, und die Meßspitze ist schon bei relativ niedriger Wassergeschwindigkeit nur schwer lokalisierbar. Das hier verwendete Schutzrohr unterscheidet sich von üblichen, von Meßtechnikherstellern angebotenen Schutzrohrausführungen dadurch, daß es an der Meßspitze offen ist. Damit ist im späteren Versuch aufgrund des erhöhten Betriebsdruckes zwar eine zusätzliche Abdichtung erforderlich, es können aber wegen der geringeren Wärmekapazität bzw. dem Fehlen einer störenden Luftschicht im Rohr wesentlich kleinere Ansprechzeiten erreicht werden. Mit dem Innen- und Außendurchmesser $d_i = 4{,}0$ mm bzw. $d_a = 6{,}0$ mm besitzt das Schutzrohr folgende Querschnittsgrößen: Flächenmoment 2. Grades $I = 51{,}05$ mm^4 und Widerstandsmoment $W = 17{,}02$ mm^3. Mit diesen großen Kennwerten treten weder unzulässige Verformungen noch zu hohe mechanische Spannungen auf (siehe Anhang A).

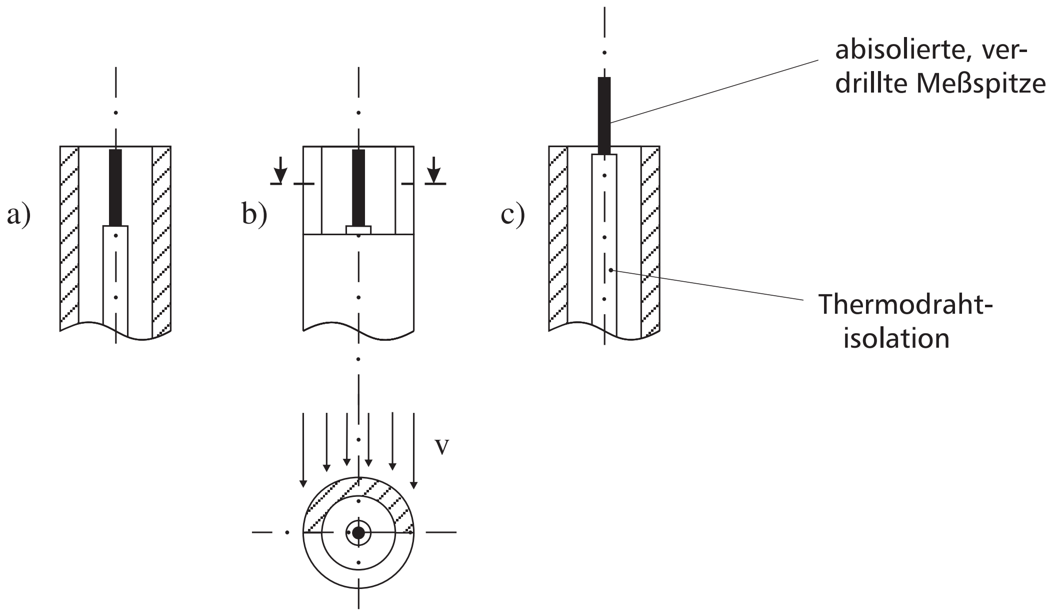


Abbildung 3: Mögliche Meßspitzenausführungen

Hier sind als Meßergebnisse zu nennen:

- Der Geschwindigkeits- bzw. Turbulenzeinfluß auf den Wärmeübergang — und damit auch auf die Ansprechzeiten — ist geringer als erwartet. Allerdings entsprach die tatsächliche Wassergeschwindigkeit vermutlich bei weitem nicht dem theoretisch ermittelten Wert: Die Annahme fehlenden Schlupfes zwischen dem rotierenden Magneten und dem Wasser ist vermutlich — gerade bei dem kleinen Rührgefäß — nicht zutreffend. Auch die exakte Lage des Thermoelements, also der geschwindigkeitsbestimmende Abstand vom Bechermittelpunkt, war nur schwer einzuhalten.

- Das den Thermodraht umgebende Schutzrohr verschlechtert das Ansprechzeitverhalten deutlich. Vor allem das geschlossene Schutzrohr (siehe Abbildung 3a), aber selbst das einseitig offene Schutzrohr (Abbildung 3b) führen zu höheren Ansprechzeiten. Für die weiteren Messungen sollte also die Thermodrahtspitze aus dem Schutzrohr herausragen (Abbildung 3c).

- Genauso wie bei ruhendem Wasser besitzen auch hier die Messungen, bei denen das Thermoelement aus der Flüssigkeit herausgezogen wird, geringe Aussagekraft. Eine deutliche Senkung der Ansprechzeit konnte durch die Luftbewegung erzielt werden. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß neben der Steigerung des Wärmeübergangskoeffizienten α auch die einfache Tatsache, daß Wassertropfen durch den Luftzug abgestrichen werden und auf diese Weise die Abkühlung schneller erfolgt, Einfluß hat.

Vorversuch zur meßtechnischen Eignungsprüfung eines Strahlungspyrometers
Die Anbieter von Infrarotmeßgeräten zur Temperaturbestimmung können im allgemeinen keine Auskunft über die Tauglichkeit ihrer Meßgeräte für diesen speziellen Anwendungsfall geben, da sie gar keine oder nur sehr wenig Erfahrung mit berührungsfreier Temperaturaufnahme flüssiger oder gar dampfförmiger Medien haben. Für unsere Messungen sind insbesondere folgende Fragen zu klären:

- Ist eine direkte Messung von Dampftemperaturen grundsätzlich realisierbar, oder müßten feste Teilchen in die Strömung eingebracht werden, die eine indirekte Messung ermöglichten?
- Wie kann das Meßgerät auf einen bestimmten Rohrradius fokussieren? Ist dies physikalisch überhaupt möglich, oder sind wir darauf angewiesen, Oberflächen- bzw. Mischtemperaturen aufzunehmen?
- Könnte es passieren, daß bestimmte lokale Bereiche (z. B. die Rohrwand) die Temperaturmessung dominieren und mit dieser „Hintergrundstrahlung“ die Messung an anderen Orten verfälscht wird?

Neben diesen grundlegenden Anfragen müssen noch weitere Punkte geprüft werden:

- Sind die Zeitkonstanten klein genug?
- Wie ist der Sensor auszubilden und dann im Versuchsaufbau anzuordnen?

Ein einfacher, mit möglichst geringem apparativen Aufwand durchzuführender Vorversuch soll zeigen, ob ein angebotenes Infrarotmeßgerät überhaupt in Frage kommt:

Ein Eiswürfel wird gemäß Abbildung 4 in ein Gefäß mit etwa 20 °C warmem Wasser gehalten. Der Vorteil gegenüber anderen Körpern liegt darin, daß der Eiswürfel trotz Wärmeaufnahme vom umgebenden Medium aufgrund des Phasenübergangs seine Temperatur beibehält. Das Meßgerät soll auf den Eiswürfel fokussiert werden, um dessen Temperatur anzuzeigen.

Gemessen wurde mit dem Temperaturmeßgerät „Vanguard II 4100–A–01–A, 0 –

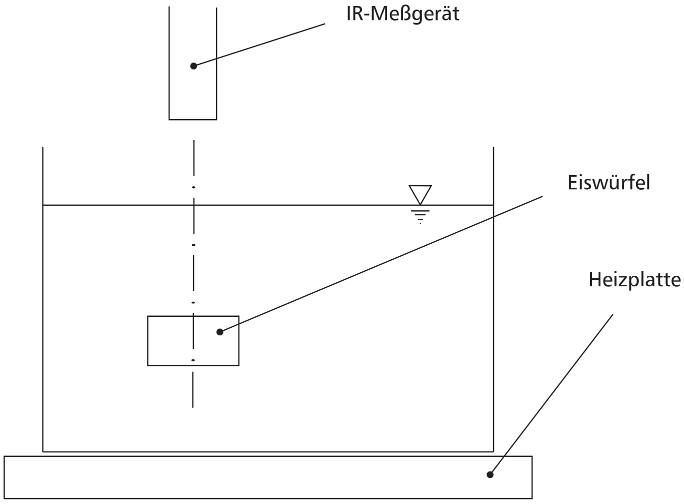


Abbildung 4: Aufbau eines Vorversuchs zur Tauglichkeitsüberprüfung von Infrarotmeßgeräten

200 °C“ der Firma Techmark. Bei Abschätzen und Einstellen des Emissionsgrades von Wasser auf $\varepsilon_{\mathrm{Wasser}} = 0,96$ (nach [21], S. Ka4) kann bei diesem Strahlungspyrometer von der Strahlungsdichte auf die Objekttemperatur geschlossen werden.

Die Hintergrundstrahlung der heißeren Heizplatte unter dem Wassergefäß beeinflußte das Meßergebnis nicht. Das heißt für den vorliegenden Anwendungsfall, daß tatsächlich die Fluidtemperatur gemessen wird und der befürchtete Störeinfluß der Rohrwandungen vernachlässigt werden kann. Mit dem Meßgerät konnte jedoch nur die Wasseroberflächentemperatur, nicht aber die Temperatur des Eiswürfels gemessen werden. Eine Fokussiermöglichkeit am Meßgerät besteht nicht. Es kommt hinzu, daß dieses Meßgerät nicht der Grundanforderung an die maximale Ansprechzeit genügt, und außerdem der Meßstrahl selbst am kleinsten Querschnitt noch eine zu große Fläche besitzt. Letztgenanntes war aber zunächst für unsere grundsätzlichen qualitativen Betrachtungen bedeutungslos.

Obwohl ein berührungsloses Temperaturmeßverfahren aus Gründen möglichst geringer thermischer Trägheit für diesen Anwendungsfall wünschenswert wäre, zeigt dieser Versuch, daß — sollen nicht nur Oberflächentemperaturen bestimmt werden — die IR-Messung nicht zum Erfolg führt.

3.2.2 Temperaturmeßvorrichtung mit Thermoelement

Basierend auf den vorangegangenen Vorüberlegungen und den durchgeführten Vorversuchen (siehe Kapitel 3.2.1) soll eine Temperaturmeßvorrichtung mit Thermoelement zur Bestimmung der Fluidtemperatur an der durchströmten Armatur konstruiert werden. Damit Aussagen über die Abhängigkeit des Siedeverzugs vom Rohrradius — und damit über die Qualität der Dampf-Flüssigkeits-Verteilung über den Rohrquerschnitt — gemacht werden können, wurde eine Verstellvorrichtung gemäß Abbildung 5 entwickelt.

Da die auf die Armatur aufgeschweißte Gewindemuffe von der Länge her nicht den gesamten Verstellhub aufnehmen kann, ist eine fest eingeschraubte Aufnahmehülse für den Einstellkolben vorgesehen, die eine Innengewindelänge beinhaltet, die mindestens dem erforderlichen Hub, also dem halben Rohrdurchmesser, entspricht.

Nach Lösen der Kontermutter ist es möglich, den Einstellkolben — und damit auch das mit ihm fest vergossene Thermoelement samt Schutzrohr — innerhalb der Aufnahmehülse zu verstellen. Die für diese Verstellung gewählte Gewindesteigung von 1,5 mm ermöglicht einerseits eine ausreichend genaue Positionierung der Meßspitze in der Armatur, läßt aber andererseits trotzdem ein genügend schnelles Zurücklegen größerer Verstellwege zu. Nach Festdrehen der Kontermutter wird der Einstellkolben in seiner Position wieder fixiert, und die Messungen können vorgenommen werden. Ist die Verstelleinheit in der Aufnahmehülse festgekontert, so kann der Abstand zwischen dem Einstellkolbendrehgriff und der Kontermutter — gemessen mit einem Meßschieber — als Maß für die Position der Meßspitze in der Armatur dienen. Dieser Verstellmechanismus sowie die Dichtungssituation ermöglichen es, auch während des Betriebes einen neuen Rohrradius anzufahren, um dann dort einen weiteren zeitlichen Temperaturverlauf aufzunehmen.

Bei der Konstruktion finden die für den Betrieb charakteristischen Druck- ($1 \ldots 10$ bar) und Temperaturbereiche ($90 \ldots 130$ °C) besondere Berücksichtigung. Aufmerksamkeit sind hier vor allem auf die Dichtungen und das Vergußmaterial zu richten. Für die Dichtungen sind spezielle Werkstoffe vorgesehen (O-Ring: 70 EPDM 281; Gewindedichtung in Schweißmuffe: PTFE-Klebeband), die ausreichende Dichtigkeit gewährleisten, aber trotz der hohen Betriebstemperaturen nicht versagen. Auch das Vergußmaterial muß den hohen Betriebstemperaturen standhalten. Damit sind schon die meisten Zwei-Komponenten-Kleber auf Epoxidharzbasis ausgeschlossen. Für diesen Anwendungsfall kämen theoretisch noch Zwei-Komponenten-Klebstoffe mit Metallhärterpulver in Frage, die grundsätzlich höhere Betriebstemperaturen zulassen. In dieser Anwendung muß aber zusätzlich der Wärmeleiteinfluß berücksichtigt werden: Es dürfen nicht zu große Wärmemengen über die Aufnahmehülse an die Umgebung abgeleitet werden, da das Meßergebnis sonst verfälscht wird. Die Metallkomponente des Klebstoffes steigert jedoch den Wärmeleitkoeffizienten in unzulässig hohe Wertebereiche. Einkomponentenklebstoffe auf Epoxidharzbasis, wie z. B. der von der Fa. Henkel angebotene Klebstoff „Metallon E 2711 W“, eignen sich zwar für unseren Temperaturbereich, sind im Handel aber in den hier benötigten geringen Mengen nicht erwerbbar. Unter besonderer Berücksichtigung der vorstehend erläuterten Problematik wurde der Klebstoff „UHU plus endfest 300“ ausgewählt. Dieser Zwei-Komponenten-Klebstoff ist laut Merkblatt [7] bei Abweichen vom üblichen Komponentenmischungsverhältnis (100:50 statt normalerweise 100:80 oder 100:100) noch in unserem Temperaturbereich im Dauerbetrieb einsetzbar. Der gewählte Klebstoff zeichnet sich neben der guten Temperaturbeständigkeit auch durch einen niedrigen Wärmeleitkoeffizienten aus: $\lambda = 0,195 \, \frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{mh\,°C}} = 0,227 \, \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$ liegt nur

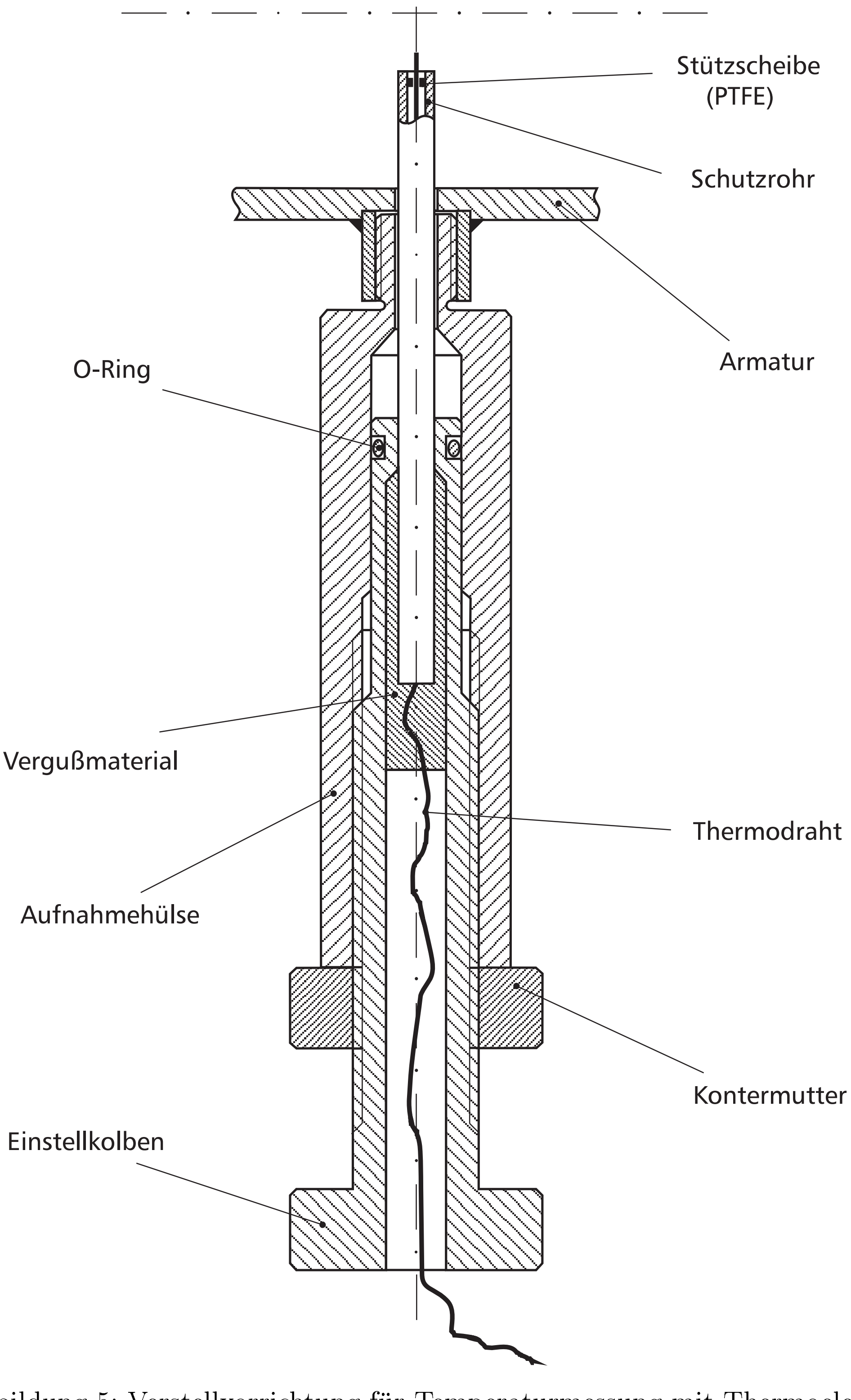


Abbildung 5: Verstellvorrichtung für Temperaturmessung mit Thermoelement

etwas über der Wärmeleitfähigkeit von Asbestplatten ([3], S. D44, Tab. 1). Eine weitere Garantie dafür, daß wirklich die Meßspitzentemperatur und nicht die Gehäusetemperatur aufgenommen wird, ist die Tatsache, daß die Gewindemuffe aufgrund seiner kleinen wärmeübertragenden Fläche nur geringe die eigentliche Meßtemperatur verfälschende Wärmeströme zuläßt. Da die Thermodrahtisolation im allgemeinen nicht wasserdicht ist (der hier verwendete Thermodraht ist mit Glasseide umsponnen und wurde anschließend mit Lack getränkt), ist auf besonders sorgfältiges Vergießen der Meßspitze zu achten, um Wasserdurchsatz durch die Isolation und damit durch die Verstellvorrichtung hindurch zu verhindern.

Bei dem Thermoelement samt Schutzrohrausführung kann nicht auf fertige Herstellerprodukte (z. B. Thermoelement-Schutzrohr-Kombinationen oder Mantelthermoelemente) zurückgegriffen werden. Sie alle besitzen für diesen Anwendungsfall zu große Ansprechzeiten bzw. zu geringe mechanische Festigkeit. Der Vorversuch zur Gestaltung der Meßspitze (siehe Kapitel 3.2.1) hat gezeigt, daß hier aus Zeitgründen nur eine offene Schutzrohrausführung erfolgversprechend ist. Verwendet wurde in dieser Konstruktion zur Erzielung möglichst kleiner Ansprechzeiten der feinste auf dem Markt erhältliche NiCr-Ni-Thermodraht mit einem Durchmesser von 0,1 mm. Die Abmessungen des Schutzrohres betragen hierbei $d_a = 6$ mm und $d_i = 4$ mm. Bei den Thermodrähten ist — um die Bildung eines weiteren Thermopaares an den Kontaktstellen zu vermeiden — auf sorgfältige Verbindungen zu achten: An der Meßspitze sind die beiden Drähte ohne Zusatzwerkstoff verschweißt, auf der Steckerseite sind die Anschlußenden verschraubt. Verlöten wäre hier unzulässig. Um das freie Thermodrahtende gegen das Schutzrohr zu isolieren, wird es mit einer PTFE-Scheibe abgestützt bzw. einfach mit einer Schrumpfschlauchummantelung isoliert.

Die gemessene Thermospannung wird mit einem Verstärker, der wegen entsprechender innerer Dämpfung für die niedrigen Ansprechzeiten ausgelegt ist, verstärkt. Das Ausgangssignal des Meßverstärkers kann nun bei Kenntnis der entsprechenden Kalibrierkurve über eine Computerschnittstelle mit Hilfe eines Meßdatenerfassungsprogramms softwaretechnisch ausgewertet werden.

Kalibriert wurden die Thermoelemente an zwei Fixpunkten von Wasser: bei 0 °C und bei 100 °C. Es zeigte sich, daß für andere Temperaturen bei Verwendung dieser Stützstellen in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Thermospannung angenommen werden kann.

3.2.3 Infrarotmeßvorrichtung

Zum Erreichen niedrigerer Ansprechzeiten als bei der Berührungsthermometrie soll im folgenden eine Konstruktion mit strahlungspyrometrischer, d. h. berührungsloser, Temperaturaufnahme angedacht werden. Hierzu sind aber zunächst grundlegende Fragen auf Funktionsfähigkeit und erforderliche konstruktive Gestaltung der Meßvorrichtung zu klären.

Als Problem bei pyrometrischen Temperaturmessungen erweist sich gerade für diesen Anwendungsfall, daß die direkte Temperaturmessung von Flüssigkeiten schwierig, die von Gasen (Wasserdampf) mit diesem Verfahren unmöglich ist. Die Temperatur könnte *indirekt*, also z. B. durch Einbringen eines schwarzen Plättchens geringer Wärmekapazität, gemessen werden: Über ein dem Mediendruck standhaltendes Sichtfenster in der Rohrwand[2], das für den entsprechenden Wellenlängenbereich[3] „durchsichtig“ ist, kann die Strahlung, die das die Mediumstemperatur annehmende Plättchen aussendet, aufgenommen werden. Da bei Pyrometermessungen prinzipbedingt nur Oberflächentemperaturen erfaßt werden, kann man auch davon ausgehen, daß das Plättchen schnell die zu messende Mediumstemperatur annimmt und das System somit nahezu trägheitslos arbeitet. Es ist hierbei jedoch zu befürchten, daß das umgebende Medium zwischen Plättchen und Sichtfenster die Meßstrahlung verfälscht. Es ist noch zu klären, ob die dampfförmige Phase nicht als „Nebel“ auf die Meßstrahlung wirkt und damit für das aufzunehmende Meßsignal undurchsichtig ist. Weitere Probleme könnte die Hintergrundstrahlung der Rohrwand bereiten. Um hierzu genauere Aussagen treffen zu können, sind in jedem Fall eigene Messungen an einfachen Versuchsständen erforderlich, da die Meßgeräteanbieter im allgemeinen gar keine bzw. nur sehr wenig Erfahrung mit der berührungslosen Temperaturaufnahme flüssiger bzw. dampfförmiger Medien haben.

Ein wesentliches Problem der *direkten* berührungslosen Temperaturmessung stellt die Tatsache dar, daß für den Infrarotsensor auf unterschiedlicher Tiefe flüssiges und dampfförmiges Wasser die Armatur durchströmt. Da nicht auf einen bestimmten Rohrradius fokussiert, also beispielsweise nicht durch vordere Wasserbereiche hindurchgesehen werden kann, wird immer eine Mischtemperatur aller auf Meßachse liegender strahlender Materie gemessen werden. Eine Überlegung, dieses Problem zu lösen, liegt darin, die Strömung durch einen Spalt, der einen Plattenabstand von der Größenordnung der Dampfblasen hat, zu führen. So kann garantiert werden, daß zu einem Zeitpunkt tatsächlich nur flüssiges bzw. nur dampfförmiges Wasser die Meßachse durchströmt. Wird die Rückwand gekühlt, so könnte deren Strahlungseinfluß aufgrund der niedrigeren Temperatur evtl. vernachlässigbar klein werden. In Bezug auf diesen Versuchsaufbau sind folgende Anmerkungen bzw. weitere Problematiken zu nennen:

- Strahlungspyrometer sind im allgemeinen gerade darauf ausgelegt, durch Gase hindurchzusehen (Messung in „athmosphärischen Fenstern“, siehe Kapitel B.1). Somit wäre ein Meßgerät zur Bestimmung der Dampftemperatur eine völlige Sonderkonstruktion und wird aus diesem Grund derzeit auch nicht angeboten. Hilfe könnte hier evtl. von Firmen erwartet werden, die beispielsweise Verbrennungsprozesse strahlungspyrometrisch untersuchen und hierbei auch auf die Nutzung der CO_2- oder H_2O-Strahlungsbanden angewiesen sind.

[2] Nach Herstellerangaben eignen sich für diesen Temperaturbereich Fenstermaterialen wie Zinkselenid, Zinksulfid oder Silizium.

[3] Der Wellenlängenbereich ergibt sich aus dem Temperaturbereich nach dem „Wienschen Verschiebungsgesetz“: $\lambda_{\max} = \frac{2900}{T}$ Kμm mit der Temperatur T und der Wellenlänge für maximale Strahlungsintensität $\lambda_{\max}$.

- Es ist zu klären, ob Dampf für den entsprechenden Wellenlängenbereich „durchsichtig“ ist oder nicht. Wird die Dampfblase vom Meßgerät gar nicht „gesehen“, so ist die Kühlung nicht sinnvoll, da unabhängig vom Temperaturniveau die Rückwandtemperatur gemessen wird. Die Strahlung kann jedoch in jedem Fall durch Minderung des Emissionsgrades ε gesenkt werden, z. B. durch Verwendung von hochpoliertem VA-Stahl als Rohrwandmaterial.

- Es muß garantiert werden, daß die Glasscheibe zu keinem Zeitpunkt mit flüssigem Wasser benetzt ist, da in dem Fall dann wahrscheinlich selbst bei sehr dünner Filmdicke trotz durchströmender Dampfblase die Flüssigkeitstemperatur gemessen wird.

- Anstatt die Rückwand zu kühlen, könnte auch auf dieser Seite ein Fenster angebracht werden. So wäre nach Anbringen eines Referenzstrahlers (schwarzer Strahler) auf der dem Meßgerät gegenüberliegenden Rohrseite die „Rückwandtemperatur“ genau bekannt. Fraglich ist jedoch, ob die Meßergebnisse reproduzierbar sind oder ob nicht Größen wie z. B. die Dampfmenge, -konzentration oder die Fluidgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluß auf das Temperaturmeßergebnis haben. Ein anderer Ansatz zur Lösung des Teilproblems der unbekannten Rückwandstrahlung wäre die Regelung der Rohrwandtemperatur. Der dann bekannte Einfluß der Strahlung könnte einfach vom Meßwert abgezogen werden.

- Ein Problem der pyrometrischen Temperaturmessung in diesem Anwendungsfall ist weiterhin, daß aus den niedrigen Temperaturen auch geringe Strahlungsenergien resultieren, was die Frage nach niedrigen Ansprechzeiten noch schwieriger gestaltet.

Obwohl grundsätzlich vom physikalischen Standpunkt aus eine berührungslose Temperaturmessung der flüssigen Phase möglich ist und auch Meßgeräte mit gefordert niedrigen Ansprechzeiten geliefert werden können, wird von den Meßtechnikherstellern kein Gerät angeboten, mit dem definitiv die Temperatur der flüssigen Phase und nicht ein Mittelwert aus Temperaturen von Flüssigkeit, gasförmiger Phase und Rohrwandungen gemessen wird. Aus diesem Grund sollen die folgenden Messungen ausschließlich mit Thermoelementen durchgeführt werden.

4 Konstruktion der Modellarmaturen

Zur Simulation von Drosselorganen werden Modellarmaturen mit definierten Strömungsverhältnissen konstruiert. Die Kenntnis des engsten Querschnitts wird gewährleistet durch eine Strömungsführung durch eine ideale Düse und eine anschließende plötzliche, einen irreversiblen Druckabfall bewirkende, Erweiterung. Die Armaturen werden zur Erfassung der Meßgrößen Temperatur und Druck mit entsprechenden Sensoren ausgestattet. Hierbei sollen Temperatur und Druck an folgenden charakteristischen Querschnitten bestimmt werden:

- im Ein- und Austrittsquerschnitt
- im engsten Strömungsquerschnitt (Düsenquerschnitt)
- direkt nach der Übergangsstelle zur plötzlichen Erweiterung

Die Modellarmaturen sollen die gleiche Länge wie die Standardarmaturen haben und für Rohrleitungen mit DN 50 ausgelegt sein. Konstruiert wurden Modellarmaturen mit gleichem größtem Querschnitt (= Rohrquerschnitt der Meßstrecke ø 54,5 mm) aber unterschiedlichem engstem Querschnitt (ø 32,7 mm, ø 22,3 mm bzw. ø 17,4 mm). Die genauen Abmessungen können den Konstruktionszeichnungen in Anhang C.1 entnommen werden.

5 Meßtechnische Überprüfung

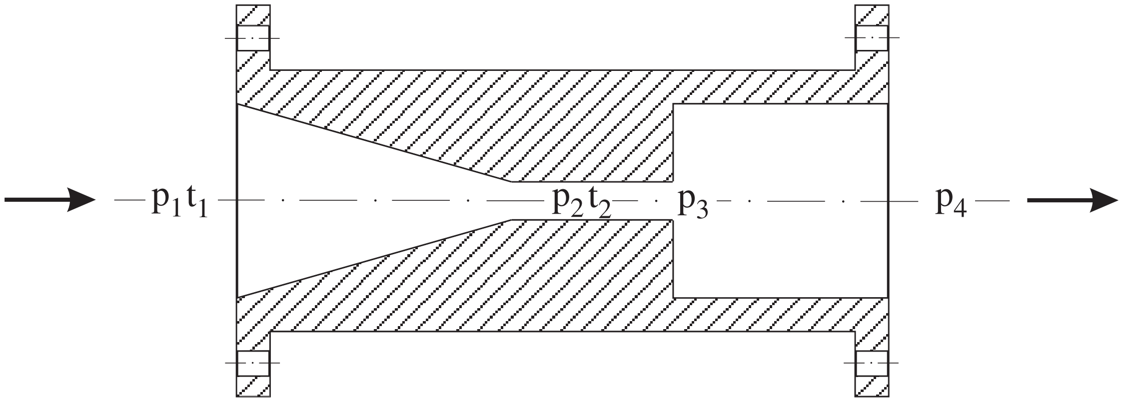


Abbildung 6: Meßstellen an der Modellarmatur

Die Drücke und die Temperaturen werden an den in Abbildung 6 dargestellten Meßstellen an der Modellarmatur aufgenommen: Vordruck (p_1) und Temperatur vor der Armatur (t_1) und Druck (p_2) und Temperatur (t_2) im engsten Querschnitt. Die Drücke werden als über den jeweiligen Querschnitt konstant angenommen. Die Temperatur im Zulauf der Armatur ließ keine deutlichen Abweichungen über den Rohrquerschnitt erkennen, aus diesem Grund wurde bei den Messungen von einer über den Querschnitt gemittelten Temperatur t_1 ausgegangen. Ein typisches gemessenes Temperaturprofil im engsten Armaturquerschnitt ist in Abbildung 7 dargestellt, hier hängt der Temperaturmeßwert deutlich vom Meßradius ab (In Tabelle 5 ist jeweils der über den Querschnitt gemittelte Temperaturwert aufgeführt.). Aufgetragen ist die Temperaturdifferenz $t_1 - t_2$ über dem Abstand von der Rohrmittellinie. Der erwartete, für den Wärmetransport von der Rohrmitte zur Rohrwand erforderliche Temperaturabfall ist hier deutlich erkennbar.

Aus der Durchsatzcharakteristik sind exemplarisch zwei stationäre Betriebszustände herausgegriffen. Die gemessenen Temperaturen und Drücke und die zugehörigen Siededrücke bzw. -temperaturen können der Tabelle 5 entnommen werden.

Es ist erkennbar, daß der Effekt der Flüssigkeitüberhitzung über die dem Druck zugeordnete Siedetemperatur hinaus nur bei großen Massenströmen und damit auch hohen Geschwindigkeiten im engsten Querschnitt auftritt: Während beim Massenstrom von 1,08 kg/s im Betriebspunkt 1 nahezu thermodynamisches Gleichgewicht vorliegt, tritt beim mehr als doppelt so großen Massenstrom von 2,35 kg/s im Betriebspunkt 2 schon eine Überhitzung von 2,0 °C auf. Dies entspricht auch den Erwartungen: Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten bleibt genügend Zeit für den Wärmeübergang zwischen den Phasen zur Ausbildung eines thermodynamischen Gleichgewichts — bei großer Fluidgeschwindigkeit ist dies nicht der Fall; es stellt sich ein thermodynamisches Ungleichgewicht ein. Bei größeren Massenströmen sind noch höhere Überhitzungen zu erwarten. Problematisch ist, daß das verwendete Wasser durch kaum zu vermeidende Verunreinigun-

Abbildung 7: Typischer Verlauf der Temperaturdifferenz $t_1 - t_2$ über den engsten Armaturquerschnitt

Nr.	Meßgröße	Meßstelle	Dimension	Betriebspunkt 1	Betriebspunkt 2
1	Differenzdruck	Blendenmeßstrecke (27,54 mm)	bar	0,045	0,209
	Massenstrom		kg/s	1,08	2,35
	Geschwindigkeit im engsten Armaturquerschnitt		m/s	4,54	9,89
2	Querschnittsgemittelte Temperatur	vor Armatur t_1	°C	139,1	127,3
	zugeh. Siededruck $p_s(t_1)$		bar	3,52	2,49
3	Querschnittsgemittelte Temperatur	engster Armaturquerschnitt t_2	°C	134,2	125,8
	zugeh. Siededruck $p_s(t_2)$		bar	3,06	2,38
4	Druck	vor Armatur p_1	bar	3,55	2,81
	zugeh. Siedetemperatur $t_s(p_1)$		°C	139,4	131,2
5	Druck	engster Armaturquerschnitt p_2	bar	3,09	2,24
	zugeh. Siedetemperatur $t_s(p_2)$		°C	134,5	123,8
	Siedeverzug $t_2 - t_s(p_2)$		°C	$-0,3$	2,0

Tabelle 5: Meßergebnisse

gen Siedekeime bereitstellt — sie unterstützen die Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichts.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kenntnis der Durchsatzcharakteristik von Stell- oder Sicherheitsventilen ist für deren exakte Auslegung unerläßlich. Bei mehrphasigen Medien tritt bei Druckabfall im Ventil unter Umständen ein Siedeverzug mit erheblichem Einfluß auf das Massendurchsatzverhalten auf, dessen Bestimmung die Messung von Druck und Temperatur in den charakteristischen Ventilquerschnitten erfordert. Zur Modellierung realer Ventile wurden Armaturen konstruiert, die, mit entsprechender Temperatur- und Drucksensorik bestückt, die nachgebildete Ventildurchströmung meßtechnisch beschreibbar machen. Eine speziell konstruierte Verstellvorrichtung erlaubte hier die Erfassung von Temperaturprofilen über den Strömungsquerschnitt.

Soll der gebildete Dampfmassenstrom mit Hilfe einer Energiebilanz exakt bestimmt werden, so ist neben der Kenntnis der Flüssigkeitstemperatur auch die der dampfförmigen Phase erforderlich. Es zeigte sich jedoch, daß konventionelle Berührungstemperaturmeßverfahren zu große Ansprechzeiten für eine exakte Bestimmung der Dampftemperatur von Mehrphasenströmungen aufweisen — sowohl in der einschlägigen Literatur als auch in einer Marktübersicht werden deutlich größere Zeiten als für deren Erfassung erforderlich genannt. Eine Alternative der schnellen Temperaturmessung stellen hierzu die strahlungpyrometrischen Meßgeräte aufgrund fehlender thermischer Trägheit dar, die aber zur Zeit nur für die Temperaturbestimmung von Feststoffen angeboten werden. Nach Gesprächen mit Meßtechnikanbietern konnten Anforderungen und Problematiken solcher Meßsysteme für diesen Anwendungsfall aufgezeigt werden. Die direkte berührungsfreie Temperaturbestimmung der einzelnen Phasen strömender Fluide bedarf noch weiterer Vorüberlegungen und Konstruktionen, die Realisierbarkeit kann trotz momentan erheblicher Schwierigkeiten noch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Gemessen wurde schließlich mit sehr dünnen Thermoelementen. Die erwartete Überhitzung konnte hiermit bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten nachgewiesen und quantifiziert werden. Die Abhängigkeit der Überhitzung von der Strömungsgeschwindigkeit wurde aufgezeigt, hier sind noch deutlichere Effekte bei erhöhtem Massendurchsatz und entsprechend gesteigerter Heizleistung bzw. kleinerem engstem Ventilquerschnitt zu erwarten. Auch das gemessene Temperaturprofil im engsten Strömungsquerschnitt befriedigte vorherige Vermutungen.

7 Literaturverzeichnis

Literatur

[1] Bonfig, Karl-Walter: *Temperatursensoren.* 1. Aufl. Renningen-Malmsheim : Expert Verlag, 1995. – ISBN 3-81691261-3.

[2] Buxmann, Joachim: Vorlesungsskript Wärmeübertragung / TU Hamburg-Harburg. 1989.

[3] Czichos, Horst (Hrsg.): *Hütte — Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften.* 29. Aufl. Berlin : Springer-Verlag, 1991. – ISBN 3-540-19077-5.

[4] Eder, Franz Xaver: *Arbeitsmethoden der Thermodynamik, Band 1: Temperaturmessung.* 1. Aufl. Berlin : Springer-Verlag, 1981. – ISBN 3-540-10443-7.

[5] Fa. MST Aerospace GmbH: Simultane Geschwindigkeits- und Temperaturfeldmessung von Flüssigkeitsströmungen mit Flüssigkristallpartikeln. T18 (Transferkatalog).

[6] Fa. Techmark: Datenblatt zu Temperaturmeßgerät Vanguard II.

[7] Fa. Uhu Vertriebs GmbH: Merkblatt UHU plus endfest 300.

[8] Gaussorgues, Gilbert: *Infrared Thermography.* 1. Aufl. London : Chapman & Hall, 1994. – ISBN 0-412-47900-1.

[9] Henning, Friedrich: *Temperaturmessung.* 3. Aufl. Berlin : Springer-Verlag, 1977. – ISBN 3-540-08229-8.

[10] Hofmann, Dietrich: *Dynamische Temperaturmessung.* 1. Aufl. Berlin : VEB Verlag Technik, 1976.

[11] Israel, Helmut: *Messen und Orten mit Infrarot.* 1. Aufl. München : Franzis-Verlag, 1988. – ISBN 3-7723-9801-4.

[12] Lieneweg, Fritz: *Handbuch der technischen Temperaturmessung.* 1. Aufl. Braunschweig : Friedr. Vieweg & Sohn, 1976. – ISBN 3-528-08358-1.

[13] Lindorf, Heinrich: *Technische Temperaturmessungen.* 4. Aufl. Essen : Verlag W. Girardet, 1970.

[14] McGee, Thomas D.: *Principles and Methods of Temperature Measurement.* 1. Aufl. New York : John Wiley & Sons, 1988.

[15] Norm DIN 43771, Dezember 1989. *Elektrische Temperaturaufnehmer (Thermometer mit kurzer Ansprechzeit).*

[16] Norm VDI/VDE 3511, Blatt 4, Januar 1995. *Technische Temperaturmessungen (Strahlungsthermometrie).*

[17] Norm VDI/VDE 3522, Juni 1987. *Zeitverhalten von Berührungsthermometern.*

[18] Obendrauf, Walter ; Kukla, Christian ; Langecker, Günter R.: Schnelle Temperaturmessung mit IR-Fühlern. In: *Kunststoffe* 83 (1993), Nr. 12, S. 971–974.

[19] Profos, Paul ; Pfeifer, Tilo (Hrsg.): *Handbuch der industriellen Meßtechnik.* 6. Aufl. München : R. Oldenbourg Verlag, 1994. – ISBN 3-486-22592-8.

[20] Schmidt, Jürgen: *Berechnung und Messung der Druckänderungen über scharfkantige plötzliche Rohrerweiterungen und -verengungen bei Gas/Dampf-Flüssigkeitsströmung.* Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1992.

[21] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas — Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.* 7. Aufl. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1994. – ISBN 3-18-401362-6.

[22] von Körtvelyessy, Laszlo: *Thermoelement-Praxis.* 2. Aufl. Essen : Vulkan-Verlag, 1987. – ISBN 3-8027-2140-3.

[23] Weichert, Lothar: *Temperaturmessung in der Technik.* 5. Aufl. Ehningen bei Böblingen : Expert Verlag, 1992. – ISBN 3-8169-0853-5.

[24] Zehl, Klaus-Peter: *Untersuchung des Durchflußverhaltens von Stellventilen bei Nachverdampfung.* Technische Universität Hamburg-Harburg, Diplomarbeit, 1995.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

9 Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Anhang

A Kenngrößen dynamischer Messungen

Im folgenden werden charakteristische Zeitkennwerte, die den Temperaturverlauf näher beschreiben, definiert und für Berührungsthermometer abgeschätzt.

Die Zeitkonstante τ für Berührungsthermometer wird bei exponentiellem Temperatur-Zeit-Verlauf mit folgender Gleichung berechnet[4] ([19], S. 861):

$$\tau = \frac{m \cdot c_p}{\alpha \cdot A} \tag{4}$$

Hierbei bezeichnen m die Masse des Fühlers, A dessen Oberfläche, c_p seine massenspezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck und α den Wärmeübergangskoeffizienten. Damit setzt sich die Zeitkonstante, die für unseren Anwendungsfall möglichst klein gehalten werden soll, aus zwei Anteilen zusammen:

- Thermometertyp $(m, A, c_p) \Rightarrow$ Für eine kleine Zeitkonstante sind also bei gegebenem Werkstoff eine kleine Wärmekapazität und eine große Oberfläche erforderlich.
- Einbauverhältnisse (α; Art der Anströmung, Stoffeigenschaften des Fluids).

Idealisiert man den Temperaturfühler zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens durch einen einseitig fest eingespannten Träger mit Vollkreisquerschnitt unter Annahme eines über den Rohrquerschnitt konstanten c_w-Wertes und rohrradiusunabhängiger Strömungsgeschwindigkeit, so liefert die Strömung eine konstante Streckenlast q, die dem Thermoelementaußendurchmesser d_a proportional ist:

$$q \sim d_a \tag{5}$$

Für die maximale Biegespannung an der Einspannstelle $\sigma_{B,E}$ gilt dann wegen

$$\sigma_{B,E} = \frac{M_E}{W} \tag{6}$$

mit dem Einspannmoment

$$M_E \sim q \sim d_a \tag{7}$$

und dem Widerstandsmoment

$$W \sim d_a^3 \tag{8}$$

folgende Abhängigkeit der Biegespannung $\sigma_{B,E}$ vom Rohraußendurchmesser d_a:

$$\sigma_{B,E} \sim 1/d_a^2 \tag{9}$$

[4] Die Proportionalität $\tau \sim \frac{1}{\alpha}$ gilt strenggenommen nur für Temperatursensoren ohne Schutzrohr ([13], S. 96), da bei Ausführung mit Schutzrohr der Einfluß der Wärmeleitung — vor allem im Luftzwischenraum — nicht mehr vernachlässigbar wäre.

Da die kleinen Abmaße, die ein gutes Zeitverhalten begünstigen, im Gegensatz zur mechanischen Festigkeit stehen, ist hier ein Kompromiß erforderlich.

Neben der Zeitkonstante τ ($\widehat{=}\, t_{63,2\%}$) stellen bestimmte Zeitabschnitte aus der Sprungantwort charakteristische Thermometerkenngrößen dar:

- Halbwertzeit $t_{0,5}$,
- 9/10-Wertzeit $t_{0,9}$ und
- 99/100-Wertzeit $t_{0,99}$ bzw. t_{99},

wobei die Halbwertzeit $t_{0,5}$ bei Herstellerangaben erfahrungsgemäß bevorzugt als charakteristische Kenngröße angegeben wird, da sie den kleinsten Zahlenwert beinhaltet.

Abbildung 8: Exponentielles Temperatur-Zeit-Verhalten bei Fühlererwärmung für $\vartheta_u = 20\,°\mathrm{C}$ und $\vartheta_o = 50\,°\mathrm{C}$ ($\tau = 1$ s)

Nimmt man einen von der Zeit exponentiell abhängigen Temperaturverlauf gemäß Abbildung 8 an, so ergibt sich bei Fühlererwärmung die Fühlertemperatur

$$\vartheta_{\mathrm{F}}(t) = \vartheta_u + (\vartheta_o - \vartheta_u)(1 - e^{-t/\tau}) \tag{10}$$

als Lösung der Differentialgleichung

$$\vartheta_{\mathrm{F}}(t) + \tau \cdot \frac{d\vartheta_{\mathrm{F}}(t)}{dt} = \vartheta_o \tag{11}$$

mit den Randbedingungen $\vartheta_{\mathrm{F}}(t = 0) = \vartheta_u$ und $\vartheta_{\mathrm{F}}(t \to \infty) = \vartheta_o$. Die Annahme ist zulässig, wenn der innere Wärmedurchgangskoeffizient k_i des Thermometers groß gegenüber dem Wärmeübergangskoeffizienten α ist ([17], S. 4). Hierbei bezeichnen ϑ_u das untere (und damit die anfängliche Fühlertemperatur) und ϑ_o das obere Temperaturniveau (identisch der realen Fluidtemperatur).

Die charakteristischen Zeiten lassen sich folgendermaßen ineinander umrechnen:

$$\begin{aligned} \tau &= \tfrac{1}{\ln 2} \cdot t_{0,5} = \tfrac{1}{\ln 10} \cdot t_{0,9} = \tfrac{1}{\ln 100} \cdot t_{0,99} = \tfrac{1}{\ln\left(\frac{1}{1-x}\right)} \cdot t_x \\ &= \tfrac{1}{0{,}693} \cdot t_{0,5} = \tfrac{1}{2{,}303} \cdot t_{0,9} = \tfrac{1}{4{,}605} \cdot t_{0,99} \end{aligned} \tag{12}$$

x bezeichnet in diesem Fall den bereits erreichten Anteil an der Gesamttemperaturdifferenz: $x = \frac{\vartheta_F - \vartheta_u}{\vartheta_o - \vartheta_u}$. Das Verhältnis $t_{0,9}/t_{0,5}$, das im exponentiellen Fall den Wert

$$\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}} = \frac{\ln 10}{\ln 2} = \frac{2,303}{0,693} = 3,322 \tag{13}$$

annimmt, stellt — genauso wie die sog. „Verzugszeit“— ein Maß für die Güte der Näherung durch eine Exponentialfunktion dar. Man spricht bei $t_{0,9}/t_{0,5} < 3{,}322$ von „Nacheilung“ (die das dynamische Verhalten bestimmende Stelle liegt im Fühlerinneren), bei $t_{0,9}/t_{0,5} > 3{,}322$ von „Voreilung“ (die Fühleroberfläche bestimmt das dynamische Verhalten). Bei Thermometern mit Nacheilung setzt die Anzeigenänderung langsamer, bei Thermometern mit Voreilung schneller ein als bei Thermometern mit exponentieller Übergangsfunktion. Je größer das Verhältnis α/k_i aus Wärmeübergangskoeffizient und innerem Wärmedurchgangskoeffizienten ist, um so kleiner wird $t_{0,9}/t_{0,5}$, umso stärker eilt das Thermometer also nach ([17], S. 4f).

Die Herstellerangaben über Ansprechzeiten von Meßsystemen werden unter Normbedingungen (Wasser: $v = 0,2$ m/s; Luft: $v = 1$ m/s; [17], S. 23f) ermittelt. Da in unserem Anwendungsfall aber deutlich höhere Geschwindigkeiten — und damit auch wesentlich größere Wärmeübergangskoeffizienten α — vorliegen, ist zu erwarten, daß die Ansprechzeiten hier spürbar kleiner als von Herstellern angegeben ausfallen werden. Läßt man alle Größen konstant und variiert lediglich die Strömungsgeschwindigkeit, so ergibt sich nach Gleichung (4) bei zwei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 ein Zeitkonstantenverhältnis von

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}. \tag{14}$$

Die Wärmeübergangskoeffizienten können aus folgender Nusseltbeziehung für umströmte Einzelrohre unter Annahme turbulenter Strömung ermittelt werden ([2], S. 34 bzw. [23], S. 22f):

$$\mathrm{Nu} = 1,11 \cdot C_2 \cdot \mathrm{Re}^{C_1} \cdot \mathrm{Pr}^{0,31} = \frac{\alpha \cdot d_a}{\lambda}, \tag{15}$$

wobei die dimensionslosen Konstanten C_1 und C_2 vom Re-Zahl-Bereich abhängig sind. Hier bezeichnen Nu die Nusseltzahl, Re die Reynoldszahl, Pr die Prandtlzahl,

α den Wärmeübergangskoeffizienten, d_a den Fühleraußendurchmesser und λ den Wärmeleitkoeffizienten des Fühlermaterials. Die Werte für die Konstante C_1 sowie die Zeitkonstantenverhältnisse können für verschiedene Re-Zahl-Bereiche der Tabelle 6 entnommen werden. Nimmt die Strömung statt der Wasser-Normgeschwindigkeit von $v_1 = 0,2$ m/s z. B. den fünfzigmal höheren Wert von $v_2 = 10$ m/s an, so ergeben sich die in der rechten Spalte angegebenen Zahlenwerte für die Zeitkonstantenänderung.

Re	C_1	τ_1/τ_2	τ_1/τ_2 für $v_2 = 50 \cdot v_1$
0,4…4	0,330	$(\mathrm{Re}_2/\mathrm{Re}_1)^{0,330} = (v_2/v_1)^{0,330}$	3,64
4…40	0,385	$(v_2/v_1)^{0,385}$	4,51
40…4 000	0,466	$(v_2/v_1)^{0,466}$	6,19
4 000…40 000	0,618	$(v_2/v_1)^{0,618}$	11,22
40 000…400 000	0,805	$(v_2/v_1)^{0,805}$	23,32

Tabelle 6: Abhängigkeit der Zeitkonstante von der Mediumsgeschwindigkeit

Für große Re-Zahlen wird die Zeitkonstante τ gegenüber den Normangaben also durchaus um eine Zehnerpotenz vermindert.

B Vergleich verschiedener Temperaturmeßverfahren

B.1 Grundlegendes zu den verschiedenen Temperaturmeßverfahren

Man unterscheidet bei der Thermometrie zwischen Messung mit Berührungsthermometern und berührungsfreier Temperaturaufnahme. Hierfür sollen neben Darstellung von Vor- und Nachteilen zunächst kurz die Funktionsprinzipien einzelner Verfahren erläutert werden, um im Anschluß daran in einer Literaturübersicht tabellarisch die grundsätzliche Tauglichkeit für den in Kapitel 1 geschilderten Anwendungsfall aufzuzeigen.

Berührungsthermometrie

Bei der Berührungsthermometrie wird der Temperaturfühler direkt in das zu messende Medium eingebracht. Die Wärme wird in diesem Fall durch Wärmeleitung und durch konvektiven Wärmeübergang übertragen. Ein grundsätzliches Problem ist hierbei, daß die Wärmeübertragung materiegebunden und damit träge ist.

In der elektrischen Berührungsthermometrie werden im wesentlichen Widerstandsthermometer und Thermoelemente eingesetzt.

Widerstandsthermometer Man macht sich zur Temperaturmessung die Temperaturabhängigkeit elektrischer Widerstände zunutze, wobei der Widerstand im allgemeinen linear von der Temperatur abhängig ist. Es gilt:

$$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + \alpha_\mathrm{R} \cdot \vartheta) \tag{16}$$

R_0 bezeichnet hierbei den elektrischen Widerstand bei 0 °C, α_R den linearen Temperaturkoeffizienten (z. B. Platin: $\alpha_\mathrm{R} = 3,85 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\mathrm{K}}$; [23], S. 112) und ϑ die Temperatur in Grad Celsius. Als Materialien werden z. B. Platin oder Nickel wegen ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit eingesetzt.

Neben den Temperaturfühlern aus metallischem Leitermaterial verwendet man auch Halbleiter-Widerstandselemente, die — je nach Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten — in Heißleiter ($\alpha_\mathrm{R} < 0$; „Thermistor“) und Kaltleiter ($\alpha_\mathrm{R} > 0$) unterteilt werden. Deren Vor- und Nachteile und typische Anwendungsgebiete sind in Tabelle 7 gegenübergestellt.

Das Widerstands-Temperatur-Verhalten von Halbleitern ist nicht linear, sondern gehorcht folgendem Gesetz:

$$R(T_1) = R(T_2) \cdot e^b \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \tag{17}$$

Hierbei bezeichnen $R(T_1)$ und $R(T_2)$ die Widerstände bei den absoluten Temperaturen T_1 bzw. T_2 in K, wobei man üblicherweise als Bezugstemperatur $T_1 = 273,15$ K wählt. b ist eine Materialkonstante. Aufgrund der deutlichen Nichtlinearität erhält man stark variierende Temperaturkoeffizienten α_R, die aber im Gegensatz zu Koeffizienten von

Widerstand	Vorteile	Nachteile	Anwendung
NTC (Heißleiter)	kleine Abmessungen möglich gutes Zeitverhalten	Abgleich nur auf 1...2 °C möglich; sonst müßten zu große Verluste bezüglich des Temperaturkoeffizienten in Kauf genommen werden ([13], S. 40) Materialkonstante stark abhängig vom Herstellungsprozeß $\Rightarrow$ aufwendiger Abgleich relativ große Drift (schlechte Langzeitkonstanz)	einfache, robuste, transportable Geräte
PTC (Kaltleiter)	Widerstandsänderung um mehrere Zehnerpotenzen	eigentlicher Meßbereich nur ca. 20 K z. T. ungenügende Reproduzierbarkeit und Stabilität	nur in Temperaturüberwachungssystemen

Tabelle 7: Vergleich von NTC- und PTC-Widerstand

Leitern große Werte annehmen. Obwohl die Halbleiter aufgrund ihrer möglichen kleinen Abmessungen besseres dynamisches Verhalten als Leiter aufweisen, kommen sie für diesen Anwendungsfall wegen der unzureichenden Genauigkeit nicht in Frage.

Mit Widerstandsthermometern läßt sich im Vergleich zu allen anderen Temperaturmeßverfahren grundsätzlich die höchste Genauigkeit erreichen ([13], S. 54). Nach [14], S. 506 kann für einen gegebenen Thermometerdurchmesser die zugehörige Zeitkonstante abgeschätzt werden:

$$\tau = \frac{d \cdot \varrho \cdot c_p}{4 \cdot \alpha} \tag{18}$$

Hierbei bezeichnen d den Fühlerdurchmesser, ϱ die Dichte des Fühlermaterials, c_p dessen massenspezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck und α den Wärmeübergangskoeffizienten.

Thermoelement Die Temperaturmessung mit dem Thermoelement beruht auf dem „Thermoelektrischen Effekt“ oder „Seebeck-Effekt“: Verbindet man zwei verschiedene Metalle elektrisch leitend an zwei Berührungspunkten unterschiedlichen Temperaturniveaus, so fließt ein kleiner Strom (bzw. entsteht eine „Thermospannung“), der von der Temperaturdifferenz abhängt. Für kleine Temperaturänderungen ist die Thermospannung ΔE in guter Näherung proportional der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ an den beiden Kontaktstellen:

$$\Delta E = k \cdot \Delta\vartheta \tag{19}$$

Den noch vom Temperaturniveau abhängigen Faktor k bezeichnet man als Thermospannungskoeffizienten. Er nimmt beispielsweise im Temperaturbereich -200 ... 1000 °C für die Materialpaarung NiCr-Ni Werte von 0,041 ... 0,036 mV/K an ([23], S. 88). Neben NiCr-Ni („Chromel-Alumel“) verwendet man als typische Metallpaarungen (Thermopaare) Cu-Konst oder Pt10Rh-Pt. Bei zu großer mechanischer Beanspruchung führt man die

Thermoelemente auch ummantelt aus (Mantelthermoelement). Durch die Ummantelung müssen dann aber gegenüber den nackten Thermodrähten ca. 50% größere Ansprechzeiten in Kauf genommen werden ([22], S. 95). Eine kleinere Zeitkonstante als beim einfachen Thermodrahtpaar kann noch erzielt werden, wenn man statt der Verwendung von zwei Thermodrähten vier Drähte verschweißt: Wird die Grenze für den minimalen Drahtdurchmesser durch die mechanische Beanspruchung bzw. die Mindeststeifigkeit festgelegt, so können die Thermodrähte jetzt durch die erhöhte Stabilität dünner — und damit mit geringerer thermischer Trägheit — ausgeführt werden ([22], S. 99).

Nach McGee ([14], S. 515) kann für einen gegebenen Thermometerdurchmesser die zugehörige Zeitkonstante iterativ abgeschätzt werden:

$$\tau = 3,5 \cdot 10^3 \cdot \varrho \cdot c_p \cdot d^{5/4} \cdot G^{15,8 \cdot \sqrt{\tau}} \tag{20}$$

Beschreibt ϱ die Dichte des Thermoelementmaterials in g/cm^3, c_p die spezifische Wärmekapazität in cal/g °C, d den Fühlerdurchmesser in cm und G den Massendurchfluß in lb/ft^2 s, so gibt τ die Fühlerzeitkonstante in s an.

Mit Widerstandsthermometern werden ca. 10...25% größere Übergangszeiten als mit vergleichbar gebauten Thermoelementen erzielt ([17], S. 27).

Hitzdraht Ein vom zu messenden Medium umströmter sehr dünner Draht wird durch einen elektrischen Strom aufgeheizt. Die Größe des zum Erreichen eines konstanten Drahtwiderstands — und damit auch konstanter Drahttemperatur — erforderlichen Aufheizstroms ist einerseits von der Medientemperatur und andererseits vom Wärmeübergang und damit zusätzlich von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Verschaltet man zwei Hitzdrähte, so kann durch Division der beiden Ausgangssignale der Geschwindigkeitseinfluß eliminiert werden — es wird nur noch die Temperatur des strömenden Mediums gemessen ([19], S. 859f).

Obwohl der Hitzdraht für unsere Messungen ein sehr günstiges dynamisches Verhalten aufweist, treten bei diesem Meßverfahren folgende grundsätzliche Probleme auf:

- Nach Herstellerangaben ist mit einer Meßungenauigkeit von mehreren Grad Celsius zu rechnen.
- Der Draht ist mechanisch sehr empfindlich (Fa. TSI: Hitzdraht: $d = 4 \ldots 12,7$ μm; Heißfilm: $d = 25 \ldots 152$ μm; Geschwindigkeitsbereich: 0,15...350 m/s). Das heißt, es ist auf höchste Medienreinheit zu achten.
- Der Meßbereich ist sehr klein ([19], S. 860).
- Die elektrische Beschaltung ist sehr kostenintensiv.

- Die Hitzdrahttemperatur muß prinzipbedingt über der Medientemperatur liegen. Damit kann aber das unerwünschte Phänomen auftreten, daß durch die Wärmezufuhr zusätzliche Flüssigkeit verdampft und sich evtl. um den Draht ein reiner Dampffilm ausbildet.

Berührungsfreie Temperaturmessung

Die berührungslose Messung besitzt einige Vorteile gegenüber der Berührungsthermometrie:

- Statt Wärmeleitung und Konvektion wird hier die Wärmestrahlung zur Wärmeübertragung ausgenutzt. Da die Wärmeübertragung in diesem Fall nicht materiegebunden und damit trägheitslos ist, sind deutlich niedrigere Ansprechzeiten erreichbar („Wärmeübertragung in Lichtgeschwindigkeit").
- Es können sehr hohe Temperaturen gemessen werden (kein Verschleiß!).
- Man kann in aggressiven Medien und zum Teil an schwer zugänglichen Stellen messen.
- Das Meßverfahren ist rückwirkungsfrei.

Strahlungspyrometer In der Strahlungspyrometrie wird zur Temperaturmessung die Strahlung ausgenutzt, die jeder Körper aussendet, der eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes besitzt. Bei Kenntnis des Emissionsgrades ε kann von der Strahlung auf die Temperatur geschlossen werden[5]. Hier steckt auch bereits die größte Fehlerquelle: Der Emissionsgrad ist unter Umständen nur ungenau bestimmbar: $\varepsilon = f(T, \lambda, \text{Material, Oberflächenstruktur})$. Er wird sogar häufig für den entsprechenden Werkstoff einfach aus Tabellenwerken entnommen. Außerdem trifft oftmals störende, nur schwer quantifizierbare Nebenstrahlung auf den Empfänger auf. Da die Wärmeübertragung durch Strahlung an sich trägheitslos erfolgt, ist die Hauptursache für Zeitverzögerungen in der Trägheit des wichtigsten Elements, des Detektors — der aber im Gegensatz zu Sensoren bei Berührungsthermometern deutlich kleiner ausgeführt werden kann — zu suchen. Man verwendet als Strahlungsempfänger

- Thermoelemente,
- Widerstandselemente und
- Elemente auf fotoelektrischer Basis (schnellste Empfänger [„einige Mikro- bis zu wenigen Millisekunden", [19], S. 872]).

Es sind hier im Gegensatz zur Messung mit Berührungsthermometern keine trägen Schutzrohre erforderlich, da der Temperatursensor nicht direkt der Strömung ausgesetzt

[5] Die Temperatur kann sowohl aus der Strahldichte als auch aus der spektralen Verteilung ermittelt werden.

wird.

Neben der in Kapitel 3.2.3 angesprochenen Problematik der Gastemperaturerfassung stellt eine weitere Schwierigkeit dar, daß sich Meßgenauigkeit und zeitliche Auflösefrequenz gegensätzlich verhalten: Die Temperaturauflösung steigt mit länger werdender Meßzeit ([16], S. 77).

Wegen ihres günstigen dynamischen Verhaltens werden Pyrometer beispielsweise für die Beobachtung von Erwärmungs- und Abkühlungsvorgängen eingesetzt.

Infrarotempfänger Die Temperaturbestimmung mit Infrarotmeßgeräten funktioniert prinzipiell wie die Strahlungspyrometrie. Anstelle punktueller Messung ist hier jedoch die bildliche Darstellung von Temperaturverteilungen auf ausgedehnten Oberflächen von Interesse. IR-Kameras messen Temperaturen meist nicht absolut. Gibt es aber eine Referenzstelle, von der Temperatur und Emissionsgrad bekannt sind (z. B. strahlungspyrometrisch ermittelt), so kann auf die absolute Temperatur des Meßobjektes geschlossen werden.

Die zu messende Infrarotstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von $0,75\ \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1$ mm. Man spricht je nach Entfernung vom sichtbaren Spektrum ($0,4 \ldots 0,77\ \mu$m) von „nahem“ bzw. „entferntem“ Infrarot. IR-Kameras arbeiten meist in einem von drei „atmosphärischen Fenstern“, also Wellenlängenbereichen, in denen aufgrund fehlenden Absorptionsvermögens atmosphärischer Luft nahezu entfernungsunabhängig gemessen werden kann:

I. 2…2,5 μm,

II. 3,5…4,2 μm,

III. 8…14 μm („großes thermisches Fenster“).

Man unterscheidet „passive“ und „aktive“ Geräte. Während bei den passiven Geräten die eigene Strahlung ausgenutzt wird, ist bei den aktiven Geräten eine Szenenbeleuchtung erforderlich. Hier wird nur der reflektierte Strahl aufgenommen. Als Detektoren werden viele auch sonst in der Thermometrie eingesetzte Temperaturaufnehmer verwendet:

- Thermische Detektoren (die absorbierte Strahlung äußert sich in einer Temperaturdifferenz zur Umgebung),
  - Bolometer (Widerstandsänderung; meist durch eine Brückenschaltung quantifiziert),
  - Thermoelement (Thermospannung) und
  - Thermosäule (mehrere in Reihe geschaltete Thermoelemente, die eine größere Thermospannung erzielen).

- Quantendetektoren (= „Photonendetektoren“; eigentlicher Detektormechanismus findet direkt zwischen Photonen und Elektronen statt, nicht über Erwärmung),
  - Fotowiderstand,
  - Fotodiode und
  - Fotoelement.
- Pyroelektrische Detektoren.

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Detektoren sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Detektortyp	Vorteile	Nachteile
Thermische Detektoren	gesamter IR-Wellenlängenbereich	größere Zeitkonstanten
Quantendetektoren	sehr schnell, da Auslösemechanismus im atomaren Bereich	arbeiten meist nur im kurzwelligen IR-Bereich ($\leq 5\mu$m) meist Kühlung erforderlich höchste Detektivität
Pyroelektr. Detektoren	robust, billig, geringer Schaltungsaufwand	reagieren nur auf Strahlungswechselsignale

Tabelle 8: Vor- und Nachteile verschiedener Infrarotdetektoren

In IR-Kameras werden meist Quantendetektoren verwendet, da für einen schnellen Bildaufbau niedrige Ansprechzeiten erforderlich sind. Um eine Rauschspannung durch überlagerte Störeffekte aufgrund Erwärmung zu vermeiden, ist im allgemeinen eine Kühlung erforderlich.

Charakterisierende Detektorparameter sind neben der Zeitkonstante τ:

- Empfindlichkeit $R = \frac{U_{\mathrm{S}}}{\Phi_{\mathrm{S}}}$,
- äquivalenter Strahlfluß NEP $= \frac{U_{\mathrm{RN}} \cdot \Phi_{\mathrm{S}}}{U_{\mathrm{S}}}$ (berücksichtigt neben der Empfindlichkeit R auch das Rauschen),
- Detektivität $\mathrm{D} = \frac{1}{\mathrm{NEP}}$ (Gütemaß für den Detektor; „Nachweisvermögen“),
- spezifische Detektivität $\mathrm{D}^* = \mathrm{D} \cdot \sqrt{\mathrm{A_E}}$ (berücksichtigt auch die Sensorfläche) und die
- Grenz-Wellenlänge λ_c (langwellige Grenze, bei der die Empfindlichkeit R nur noch die Hälfte des Maximalwerts annimmt; charakterisiert spektrale Empfindlichkeit).

Hierbei bezeichnen U_{S} die Signalspannung, U_{R} die Rauschspannung, $U_{\mathrm{RN}} = U_{\mathrm{R}}/U_{\mathrm{S}}$ die normierte Rauschspannung und Φ_{S} den Strahlfluß.

Soll nicht nur die Temperatur eines bestimmten Punktes dargestellt werden, sondern ist die Temperaturverteilung über eine Fläche von Interesse (Thermogramm), so gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese aufzunehmen:

- Mit Hilfe einer mechanischen x,y-Ablenkeinrichtung kann eine Ebene abgetastet werden.
- Man verschaltet mehrere Detektoren zu einer Detektorzeile. Jetzt ist eine Strahlumlenkung nur noch in einer Ebenenrichtung erforderlich. Dem erheblich verringerten mechanischen Aufwand steht entgegen, daß jetzt für jedes Zeilenelement ein eigener (abgleichbarer) Verstärkerkanal erforderlich ist.
- Die Detektoren werden zu einer Detektormatrix angeordnet. Hier entfällt die Ablenkvorrichtung vollständig. Der elektronische Aufwand steigt zwar, dafür sind aber die kleinsten Ansprechzeiten zu erwarten.

Die verstärkte Signalspannung kann abschließend mit Hilfe einer Elektronenstrahlröhre oder einem schreibenden Gerät ausgewertet werden.

Obwohl es wünschenswert wäre, ein Thermogramm über den gesamten Rohrquerschnitt aufzunehmen, stößt man schnell auf Realisierungsschwierigkeiten (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.2.3).

Typische Einsatzgebiete für IR-Kameras sind der Militärbereich, die Humanmedizin, die Wärmeisolationsprüfung oder industrielle Fertigungs- und Verarbeitungsprozesse.

Messung mit Flüssigkristallpartikeln Eine weitere Möglichkeit der berührungslosen Temperaturmessung ist die Darstellung eines Flüssigkeitstemperaturprofils mit Hilfe einer Farbaufnahme von temperaturabhängig gefärbten Flüssigkristallpartikeln (Kugeln mit ca. 12 μm Durchmesser). Als problematisch erweist sich neben den hohen Kosten[6] auch hier die Ermittlung der Temperatur der dampfförmigen Phase. Ein weiterer klarer Nachteil, der dieses Meßprinzip für diesen Anwendungsfall ausschließt, ist die Tatsache, daß wiederum nur Oberflächentemperaturen bestimmt werden, nicht aber ein Temperaturprofil über den Rohrquerschnitt aufgenommen werden kann. Erschwerend kommt hinzu, daß durch das Einbringen der Flüssigkristallpartikel die geforderte Medienreinheit nicht mehr gewährleistet ist: Durch diese zusätzlichen Siedekeime wird das Aufrechterhalten des thermodynamischen Ungleichgewichts beeinträchtigt.

[6] Derzeit kosten die Flüssigkristallpartikel nach [5] rund 6000 DM/kg.

B.2 Literaturübersicht über Ansprechzeiten und Genauigkeiten der verschiedenen Temperaturmeßverfahren

An dieser Stelle soll eine Literaturübersicht über die verschiedenen Meßverfahren dargestellt werden. Eine Marktübersicht kann dem Anhang B.3 entnommen werden.

In Tabelle 9 sind einige der Literatur entnommene Daten über Ansprechzeiten und Meßgenauigkeiten, die die Hauptkriterien für die Thermometerauswahl darstellen, der verschiedenen Meßverfahren gegenübergestellt.

Meßverfahren	minimale Ansprechzeit (Wasser)	Meßgenauigkeit	Literaturverweis
Widerstandsth.	$t_{0,5} = 0,1 \ldots 1$ s (blanker Meßdraht)		[23], S. 132
	$t_{0,5} = 0,05$ s (Schichtmeßwiderstand)		[23], S. 132
	$t_{0,5} = 5$ s (in Meßeinsatz)		[23], S. 132
	$t_{0,5} = 40$ s (in Schutzrohr)		[23], S. 132
		$F_{\text{rel}} = 0,1 \ldots$ 1% (NTC)	[19], S. 850
		± 0,001 K (0…100°C)	[13], S. 54
		± 0,1 K (…1000°C)	[13], S. 54
Thermoelement	$t_{0,5} = 10$ ms (Mantelth. $d = 0,25$ mm)		[12], S. 80
	$t_{0,5} = 700$ ms (Mantelth. $d = 3$ mm)		[12], S. 80
	$t_{0,5} = 80$ ms ($d = 0,5$ mm)		[1], S. 73
		± 0,1…1 K	[4], S. 69
		± 0,1%	[13], S. 86
Strahlungspyrom.	μs, ms-Bereich	± 0,1…10 K	[19], S. 870, 872
IR-Empfänger	< 1 s	± 0,1…1 K	[19], S. 873
	Quantendet.: „wenige ns – μs“	$< 0,1$ K	[1], S. 144f
	Therm. Det.: „im ms-Bereich“	0,1…1 K	[1], S. 144f
	Bolometer: $0,001 \ldots 0,1$ s		[8], S. 274
	Photocond.: $\tau \approx 10^{-5}$ s		[8], S. 294
	Photovolt.: $\tau < 10^{-6}$ s		[8], S. 294
Hitzdraht	f_{Grenz} =„mehrere 100 Hz bis einige kHz“		[19], S. 860

Tabelle 9: Ansprechzeiten und Meßgenauigkeiten verschiedener Meßverfahren (Literaturübersicht)

B.3 Marktübersicht über verschiedene Temperaturmeßgeräte

In Tabelle 10 sind von Herstellern gemachte Angaben über ihre jeweiligen Thermometeransprechzeiten aufgelistet. Ein Vergleich der Daten ist mit Vorsicht durchzuführen, da verschiedene Kennwerte angegeben sind (Zeitkonstante, Halbwertzeit bzw. Neunzehntelwertzeit).

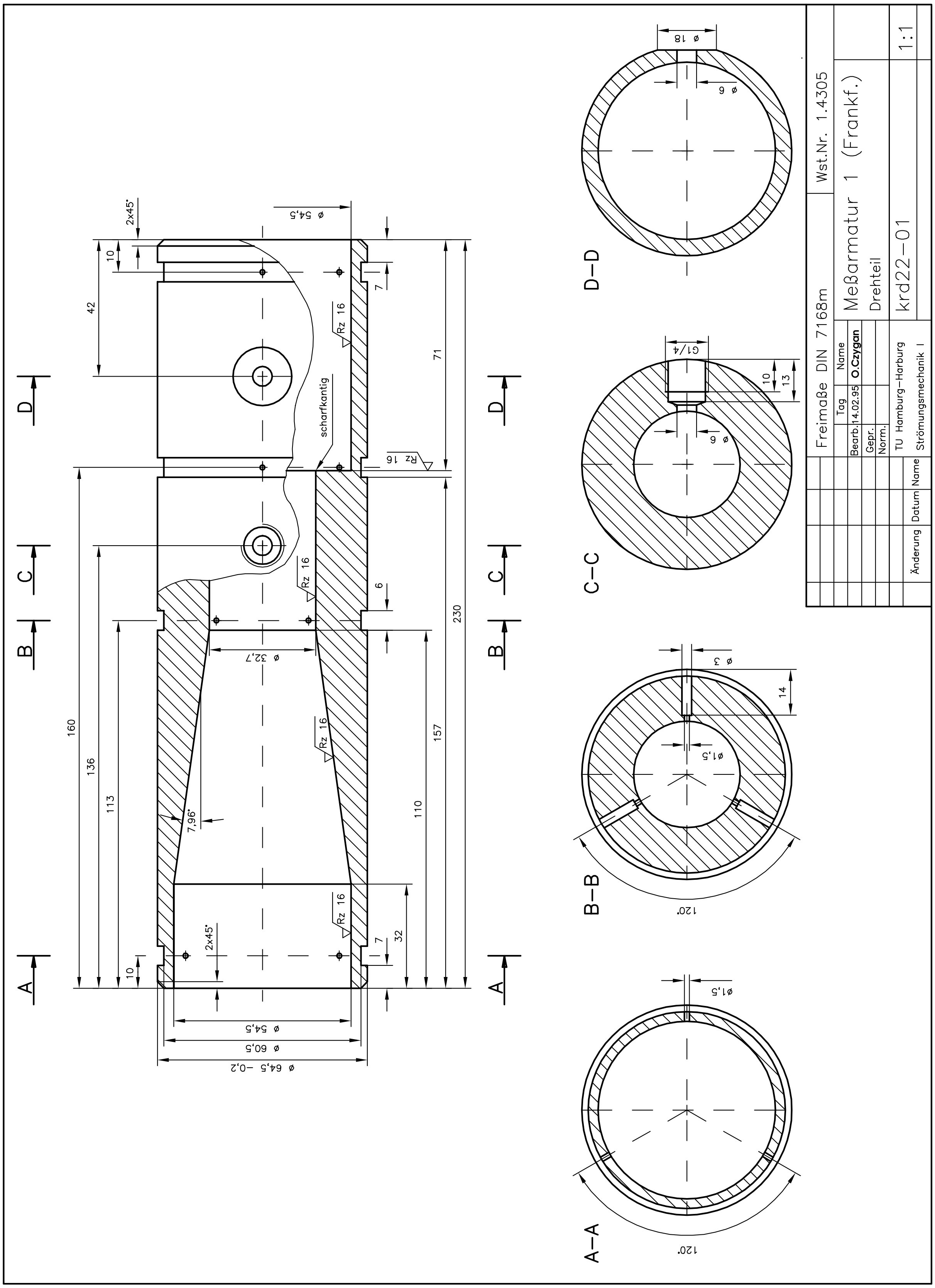
Anbieter	Meßprinzip	Bezeichnung, Durchmesser	keine bzw. unübliche Indexangabe	τ [s]	$t_{0,5}$ [s]	$t_{0,9}$ [s]	$t_{0,99}$ [s]
Agema	Infrarot	TP 200–300	$t_{0,95}$ =80 ms	0,027	0,019	0,061	0,123
Armatherm	Thermoel.			0,434	0,301	1,000	2
AST	Strahlungspyr.		0,5 s				
Bender GmbH	Strahlungspyr.	GIM 1840	0,5 s				
Burster Präz.MT	Widerstandsth.			0,869	0,602	2	4,000
Celect	fiberoptisch		50 ms				
Conatex	Thermoel.		0,15 s				
Esters Elektr.	Thermoel.		100 ms				
Heimann	Strahlungspyr.	KT19		0,013	0,009	0,03	0,060
Herth	Mantelthermoel.	ø 0,5 mm		0,043	0,03	0,10	0,199
Jumo	Mantelthermoel.	ø 0,5 mm (0,4 m/s)		0,216	0,15	0,498	0,997
Kane-May	Strahlungspyr.			0,1	0,069	0,230	0,461
Keller GmbH	Strahlungspyr.	Cellatemp PS		0,043	0,030	0,1	0,200
Kleiber	Strahlungspyr.	Typ 260, Typ 202	0,3 ms				
Dr. Maurer	Strahlungspyr.		10…100 ms				
Measurements Gr.	Folienwid.	ETG, WTG	„vernachläs.bar“				
Newport	Strahlungspyr.		10 ms				
novasens	Strahlungspyr.	novasens 2050/1G	13 ms				
Optron MT	Strahlungspyr.		80 ms				
Parker Hannifin	Widerstandsth.			3,040	2,107	7	14,000
Polytec	faseroptisch		250 ms				
Raytek	Strahlungspyr.	Thermalert MP4, TX	100 …165 ms				
Reckmann	Mantelthermoel.	ø 0,5 mm		0,043	0,03	0,10	0,199
Rössel MT	Widerstandsth.	FS 432		0,216	0,15	0,498	0,997
Rössel MT	Folienthermoel.	FT-03-B-K		0,003 …0,005	0,002 …0,003	0,007 …0,012	0,014 …0,023
Rüster	Mantelthermoel.		0,5 s				
Schramm	Thermoel.			0,721	0,5	1,661	3,322
Sensotherm	Platinsensor		„einige 1/100 s“				
Sika	Thermoel.		10 s				
Testo	Thermoel.	testo 452 (ø 1,5 mm)		0,217	0,151	0,500	1
tmg	Mantelthermoel.		1 s				
TSI	Hitzdraht		300 kHz				
Ultrakust	Strahlungspyr.		„im ms-Bereich“				

Tabelle 10: Ansprechzeiten verschiedener Meßverfahren (Marktübersicht)

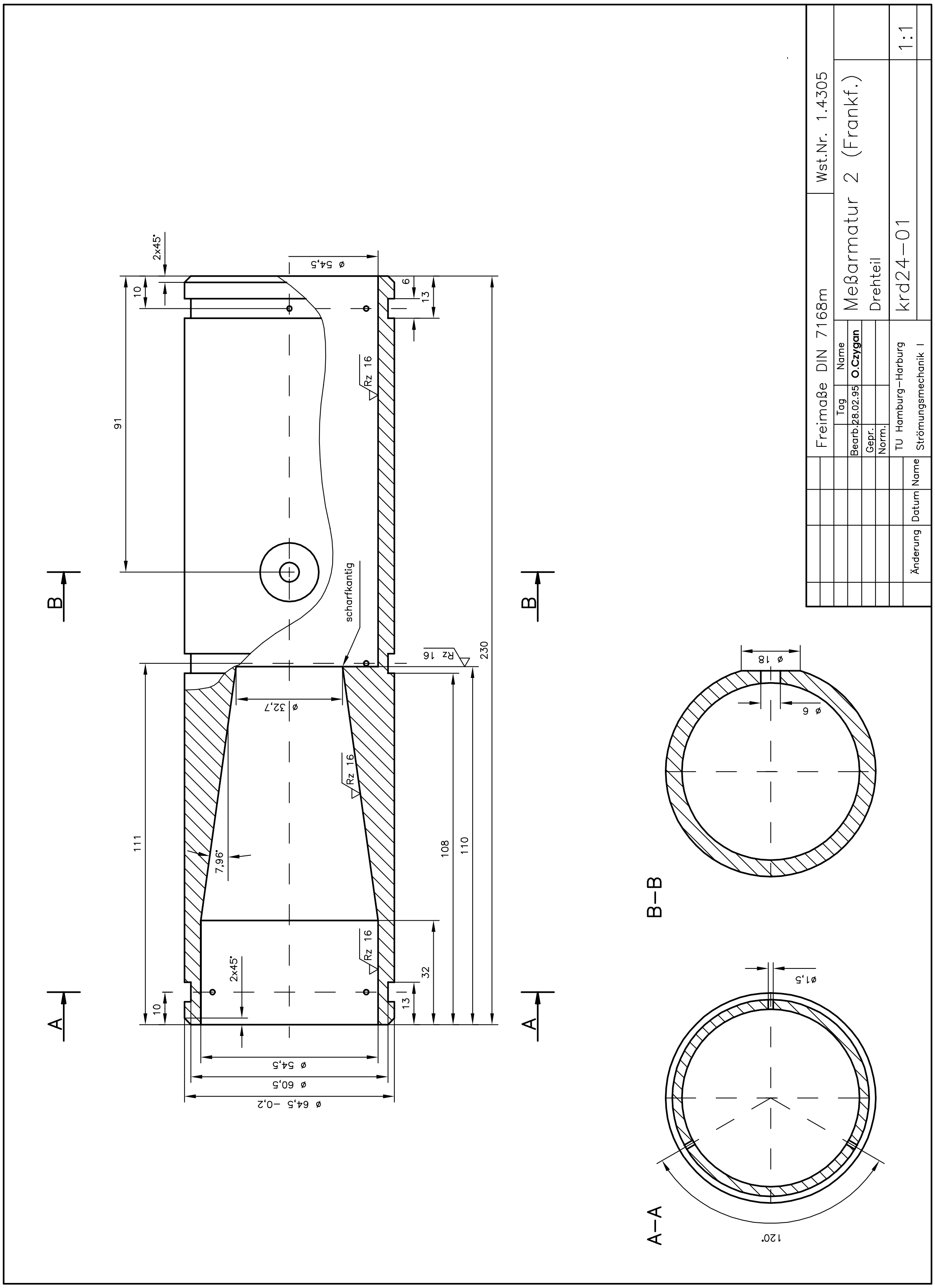
Um die Werte dennoch gegenüberstellen zu können, wurden unter Annahme eines von der Zeit exponentiell abhängigen Temperaturverlaufs aus den angegebenen Zeiten τ, $t_{0,5}$, $t_{0,9}$ bzw. $t_{0,99}$ die jeweils anderen charakteristischen Zeitgrößen ermittelt. Die Umrechnung erfolgte gemäß Gleichung (12). Im Falle mehrerer Zeitangaben durch Umrechnung sind die Anbieter-Katalog-Kennwerte unterstrichen dargestellt.

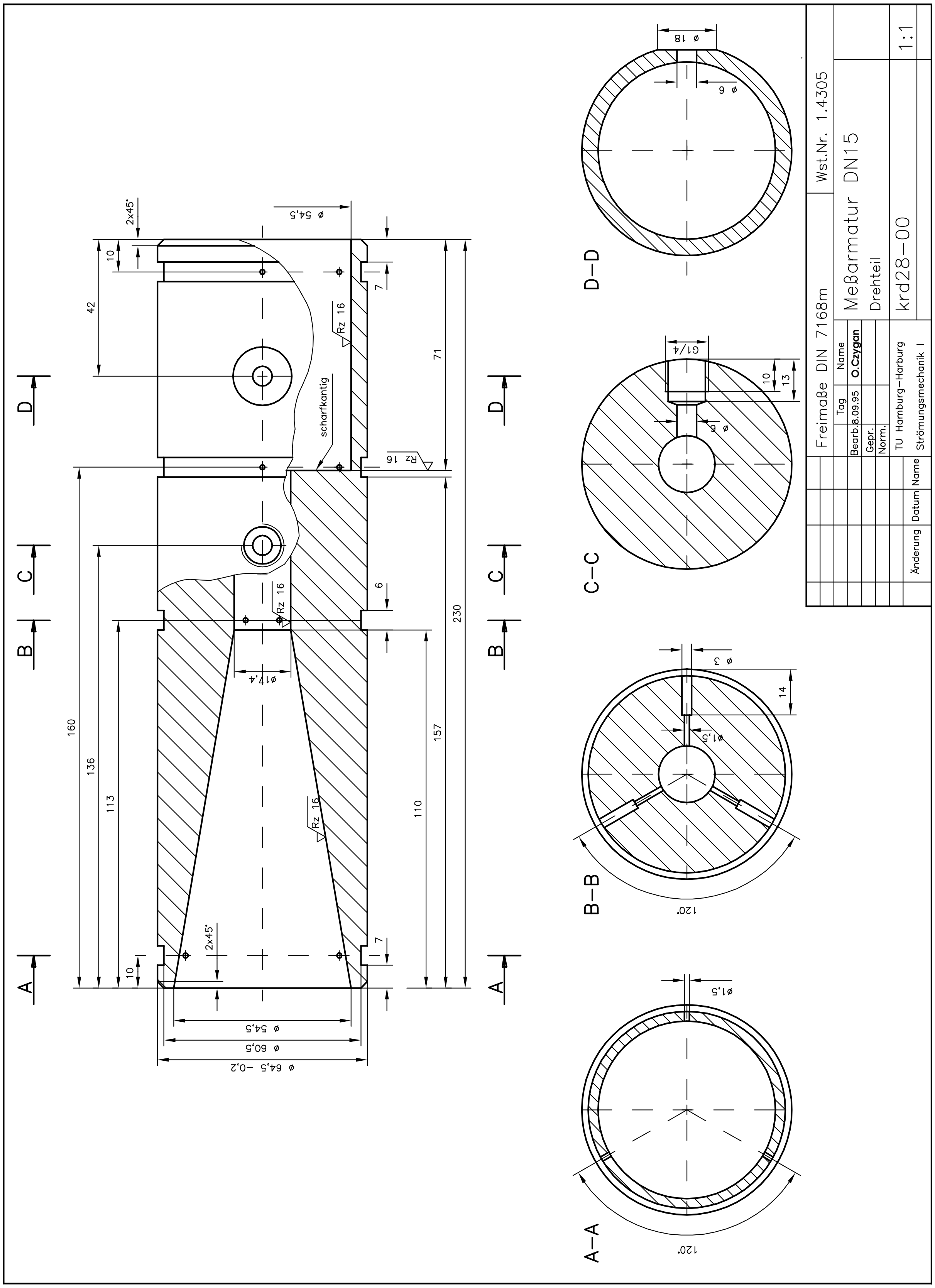
C Konstruktionszeichnungen

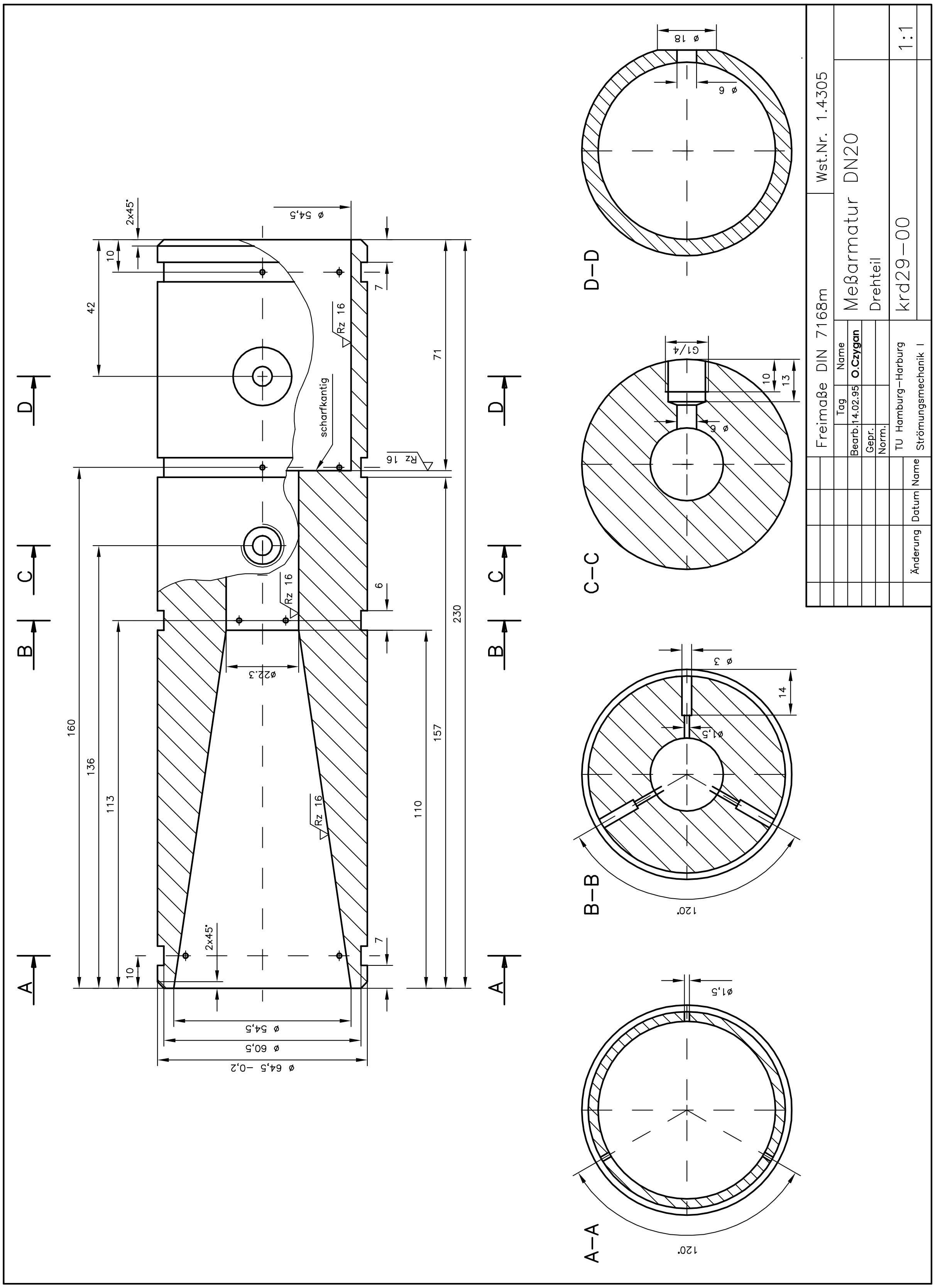
C.1 Modellarmaturen



Freimaße DIN 7168m
Wst.Nr. 1.4305
Meßarmatur 1 (Frankf.)
Drehteil
krd22-01
1:1
Tag
Name
Bearb.
14.02.95
O.Czygan
Gepr.
Norm.
TU Hamburg-Harburg
Strömungsmechanik I
Änderung
Datum
Name
A–A
B–B
C–C
D–D
scharfkantig
Rz 16
2x45°
ø 54,5
ø 60,5
ø 64,5 −0,2
ø 32,7
7,96°
G1/4
ø 18
ø 6
ø 3
ø1,5
120°
230
160
157
136
113
110
71
42
32
14
13
10
7
6


Freimaße DIN 7168m
Wst.Nr. 1.4305
Meßarmatur 2 (Frankf.)
Drehteil
krd24–01
1:1
Tag Name
Bearb. 28.02.95 O.Czygan
Gepr.
Norm.
TU Hamburg–Harburg
Strömungsmechanik I
Änderung Datum Name
scharfkantig
B–B
A–A
120°


Freimaße DIN 7168m
Wst.Nr. 1.4305
Tag
Name
Bearb.
8.09.95
O.Czygan
Gepr.
Norm.
Meßarmatur DN15
Drehteil
krd28-00
1:1
TU Hamburg-Harburg
Strömungsmechanik I
Änderung
Datum
Name
A–A
B–B
C–C
D–D
scharfkantig

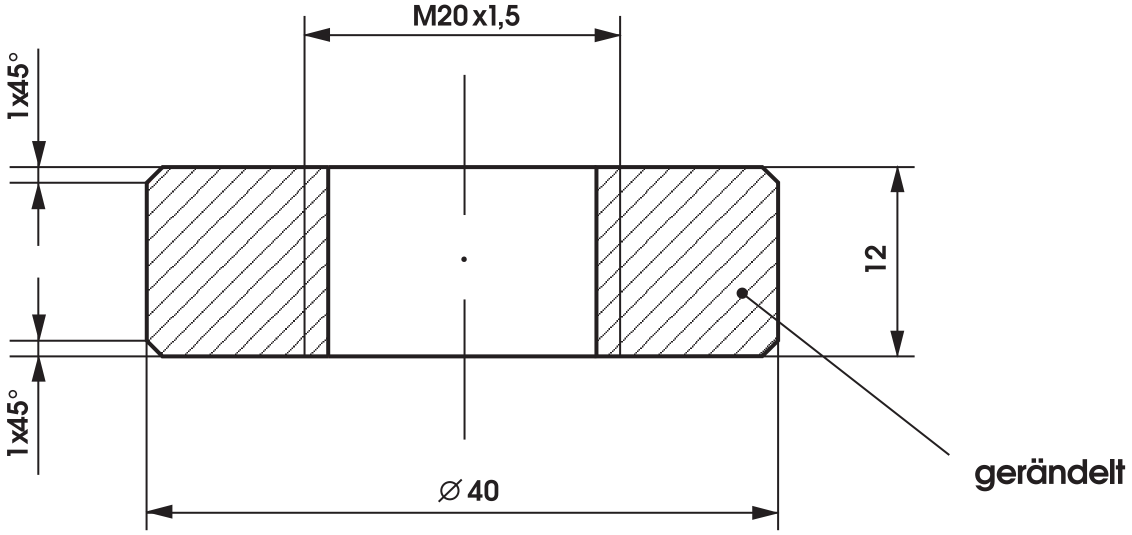

A–A
B–B
C–C
D–D
scharfkantig
Freimaße DIN 7168m
Wst.Nr. 1.4305
Meßarmatur DN20
Drehteil
krd29-00
1:1
Tag
Name
Bearb.
14.02.95
O.Czygan
Gepr.
Norm.
TU Hamburg-Harburg
Strömungsmechanik I
Änderung
Datum
Name

C.2 Verstellvorrichtung für Temperaturmessung mit Thermoelement

Aufnahmehülse

Einstellkolben

Kontermutter



D Firmenadreßverzeichnis

AGEMA Infrared Systems GmbH
Siemensstraße 20
64289 Darmstadt
Tel.: (06151) 70841
Fax: (06151) 708127

Armatherm Günthel GmbH
Postfach 260
32632 Lemgo
Tel.: (05261) 93770
Fax: (05261) 937751

AST, Angewandte Systemtechnik
Hagertshausen 7
85283 Wolnzach
Tel.: (08442) 670
Fax: (08442) 67111

Bender GmbH
Landenbergstraße 48
57258 Freudenberg
Tel.: (02734) 1231
Fax: (02734) 3857

Burster Präzisionsmeßtechnik
Talstraße 1–7
76593 Gernsbach
Tel.: (07224) 6450
Fax: (07224) 64588

Celect Electronics Ltd.
75, High Street, Wimborne
Dorset, BH21 1HS, UK
Tel.: +44(0) 202848388
Fax: +44(0) 202848168

Conatex Dipl.-Ing. L. Colbus GmbH
Postfach 1220
66606 St. Wendel
Tel.: (06851) 93390
Fax: (06851) 2076

Esters Elektronik GmbH
Otto-Hahn-Straße 2
63110 Rodgau
Tel.: (06106) 3049
Fax: (06106) 18192

Heimann Optoelectronics GmbH
Postfach 3007
65020 Wiesbaden
Tel.: (0611) 4920
Fax: (0611) 492260

Henkel KGaA
Industrieklebstoffe
Henkelstraße 67
40191 Düsseldorf
Tel.: (0211) 797-3672
Fax: (0211) 798-2358

Herth elektrische Temperaturgeber GmbH
Landwehrstraße 86–88
59368 Werne
Tel.: (02389) 95040
Fax: (02389) 950435

Hörotron GmbH
Postfach 445
25304 Elmshorn
Tel.: (04121) 62091
Fax: (04121) 62096

IPG Meßtechnik F. W. Vettermann
Postfach 1208 A
65522 Niedernhausen/Ts.
Tel.: (06127) 905222
Fax: (06127) 78630

M. K. Juchheim GmbH & Co.
Moltkestraße 13/31
36039 Fulda
Tel.: (0661) 60030
Fax: (0661) 6003500

Kane-May
B+B Thermo-Technik GmbH
Heinrich-Hertz-Straße 4
78166 Donaueschingen
Tel.: (0771) 1015
Fax: (0771) 1018

Keller GmbH
In der Garte 40
49479 Ibbenbüren-Laggenbeck
Tel.: (05451) 850
Fax: (05451) 85412

Kleiber, Heinz
Albert-Rupp-Straße 10
91052 Erlangen
Tel.: (09131) 33083
Fax: (09131) 36278

Kobold Meßring GmbH
Nordring 22–24
65719 Hofheim
Tel.: (06192) 2990
Fax: (06192) 23398

Dr. Maurer, Georg, GmbH
Optoelektronik, Industriegebiet
72664 Kohlberg
Tel.: (07025) 3031
Fax: (07025) 6053

Measurements Group Meßtechnik GmbH
Postfach 1347
82155 Gräfelfing
Tel.: (089) 851060
Fax: (089) 8542762

MST Aerospace GmbH
Eupener Straße 150
50933 Köln
Tel.: (0221) 494084
Fax: (0221) 492443

Newport Electronics GmbH
Daimlerstraße 26
75392 Deckenpfronn
Tel.: (07056) 3017
Fax: (07056) 8540

novasens sensortechnik
Otto-Brenner-Straße 13–15
21337 Lüneburg
Tel.: (04131) 51068
Fax: (04131) 56324

Optron Meßtechnik GmbH
Brüderstraße 4–6
58285 Gevelsberg
Tel.: (02333) 860012

Parker Hannifin GmbH
Geschäftsbereich ERMETO
Postfach 120206
33652 Bielefeld
Tel.: (0521) 40480
Fax: (0521) 4048280

Philips GmbH, Unternehmensbereich Elektronik für Wissenschaft und Industrie
Miramstraße 87
34123 Kassel
Tel.: (0561) 5010
Fax: (0561) 501598

Polytec GmbH
Polytec-Platz 5–7
76337 Waldbronn
Tel.: (07243) 604154

Raytek Sensorik GmbH
Arkonastraße 45–49
13189 Berlin
Tel.: (030) 4780080
Fax: (030) 4710251

Reckmann GmbH
Werkzeugstraße 23
58093 Hagen
Tel.: (02331) 35010
Fax: (02331) 350170

Rössel Meßtechnik GmbH & Co.
Lohstraße 2
59368 Werne
Tel.: (02389) 40901
Fax: (02389) 40980

Rüster, Paul, & CO
Mühlenstraße 31–33
14532 Stahnsdorf
Tel.: (03329) 612480
Fax: (03329) 612482

Schramm GmbH
Flinschstraße 18a
60388 Frankfurt
Tel.: (069) 420070
Fax: (069) 4200726

Sensotherm Temperatursensorik GmbH
Kreuzsteinstraße 1a
90441 Nürnberg
Tel.: (0911) 6200222
Fax: (0911) 6200223

Sika
Struthweg 7–9
34260 Kaufungen
Tel.: (05605) 8030
Fax: (05605) 8035460

Stemmer PC-Systeme GmbH
Gutenbergstraße 11
82178 Puchheim
Tel.: (089) 80902-0
Fax: (089) 80902-116

Techmark GmbH
Landsberger Straße 191
80687 München
Tel.: (089) 570706-0
Fax: (089) 570706-33

Temperaturmeßtechnik Geraberg GmbH (tmg)
Heydaer Straße 39
98693 Martinroda
Tel.: (03677) 79490
Fax: (03677) 794915

Testo GmbH & Co.
Postfach 1140
79849 Lenzkirch
Tel.: (07653) 6810
Fax: (07653) 681100

TSI GmbH
Zieglerstraße 1
52078 Aachen
Tel.: (0241) 523030
Fax: (0241) 5230349

UHU Vertriebs GmbH
Postfach 15 52
77813 Bühl (Baden)
Tel.: (07223) 284-0
Fax: (07223) 284-245

Ultrakust electronic gmbh
Schulstraße 30
94239 Gotteszell
Tel.: (09929) 3010
Fax: (09929) 30110