

Kompendium Messtechnik

Online-Messgrößen in Brauerei, Mälzerei und Getränkeindustrie

Hans-J. Manger

2. aktualisierte Auflage



Im Verlag der VLB Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über:
portal.dnb.de abrufbar.

Kontaktadresse:

Dr. Hans-J. Manger
Pflaumenallee 14
15234 Frankfurt (Oder)
Email: hans.manger@t-online.de

2. aktualisierte Auflage 2020

ISBN 978-3-921690-92-5

© VLB Berlin, Seestraße 13, D-13353 Berlin, www.vlb-berlin.org

Titelfoto: Adobe Stock #217012919

Alle Rechte, insbesondere die Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil des Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen in Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form.

Herstellung: VLB Berlin, PR- und Verlagsabteilung
Druck: CPI buchbücher.de GmbH, Birkach

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	10
Vorwort	11
1. Einleitung	12
2. Begriffe und Grundlagen der Messtechnik	15
3. Physikalisch-technische Einheiten in der Brau-, Malz- und Getränkeindustrie	20
4. Das Messen physikalischer Größen und die Bewertung der Messergebnisse	21
5. Die Angabe eines Messergebnisses	25
6. Anforderungen an die Messtechnik in Brauerei und Mälzerei	26
6.1 Anforderungen an die Messunsicherheit	26
6.2 Anforderungen des Einbauortes und der Reinigung/Desinfektion	27
6.2.1 Werkstoffe	28
6.2.2 Werkstoff-Oberflächen	28
6.2.3 Dichtungswerkstoffe	28
6.2.4 Einbau von Sensoren zur Onlinemessung von Prozessgrößen	28
6.2.5 Anschluss und Austauschbarkeit der Sensoren	32
6.2.6 Eignung für die CIP-Reinigung und Desinfektion bzw. SIP-Sterilisation	33
6.3 Anforderungen an die Gestaltung von Rohrleitungen und Anlagen im Hinblick auf kontaminationsfreies Arbeiten	35
6.4 Anforderungen der Betriebssicherheit und Anlagensicherheit	38
6.5 Anforderungen der Wartung und Instandhaltung	39
6.6 Kalibrierung der Sensoren, Eichung	39
7. Werkstoffe für Sensoren, Armaturen, Rohrleitungen und Dichtungen	41
7.1 Metallische Werkstoffe	41
7.1.1 Kennzeichnung mit dem Kurznamen	41
7.1.2 Korrosionsarten	43
7.1.3 Das Schweißen	44
7.1.4 Reinigung/Desinfektion und Pflege des Edelstahl	46
7.1.5 Oberflächenzustand	47
7.2 Kunststoffe	48
7.3 Dichtungswerkstoffe in der Getränkeindustrie	49
7.3.1 Eigenschaften der Dichtungswerkstoffe	50

7.3.2 Unterscheidungsmöglichkeiten für Elastomere	51
7.3.3 Dichtungswerkstoffe	51
7.3.4 Hinweise zur Beständigkeit der Dichtungswerkstoffe	52
7.3.5 Schmierstoffe für Dichtungen	53
7.3.6 Form der Dichtungen	54
7.3.6.1 Form-Dichtungen	54
7.3.6.2 Flachdichtungen	54
7.3.7 Haltbarkeit von Dichtungen	55
8. Die Darstellung der erforderlichen Messtechnik in R+I-Fließschemata	56
9. Wichtige Messgrößen in Brauerei und Mälzerei und ihre technische Realisierung	60
9.1 Temperatur-Messung	60
9.2 Druck-Messung	63
9.3 Durchflussmengen- und Massenstrom-Messung	66
9.3.1 Volumen- und Volumenstrom-Messung	66
9.3.1.1 Woltman-Zähler	67
9.3.1.2 Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte (MID)	67
9.3.1.3 Wirbel-Messgeräte	68
9.3.1.4 Schwebekörper-Messgeräte	69
9.3.1.5 Ultraschall-Durchflussmessung	70
9.3.1.6 Sonstige Durchflussmessgeräte	70
9.3.1.7 Anemometer	70
9.3.1.8 Durchflussanzeiger	70
9.3.2 Massen- und Massenstrom-Messung	71
9.3.3 Strömungswächter	72
9.3.3.1 Mechanische Prinzipien	73
9.3.3.2 Erfassung von Temperaturänderungen	73
9.3.3.3 Druckänderungen	73
9.3.3.4 Frequenzänderungen	73
9.3.3.5 US-Sensoren	73
9.3.4 Durchflussmessung auf thermischer Grundlage	73
9.3.5 Laser-Doppler-Verfahren	74
9.4 Füllstands-Messung	74
9.4.1 Füllstandsmessung bei Schüttgütern	74
9.4.2 Füllstandsmessung bei Flüssigkeiten	74
9.4.2.1 Messung mit Standglas	75
9.4.2.2 Hydrostatische Messung	75
9.4.2.2 Kapazitive Messung	76
9.4.2.3 Indirekte Messung	76
9.4.2.4 Echolot-Technik und Ultraschall-Sensoren	77
9.4.3 Grenzwertsonden für die Füllhöhe	77
9.4.3.1 Grenzwertbildung	78
9.4.3.2 Vibrationssonden	78

9.4.3.3	Konduktive Sonden	78
9.4.3.4	Ultraschallsonden	78
9.4.3.5	Drehmelder	79
9.4.3.6	Schwimmer-Schalter	79
9.5	Leitfähigkeits-Messung	79
9.5.1	Grundlagen der Leitfähigkeitsmessung	79
9.5.2	Messung der Leitfähigkeit in der Praxis	81
9.5.2.1	Konduktiven Messung	81
9.5.2.2	Induktive Leitfähigkeitsmessung	81
9.5.3	Temperatureinfluss auf die Messgröße	82
9.5.4	Einfluss der Konzentration auf die Messgröße	83
9.5.5	Spezifische Leitfähigkeit von Reinigungsmitteln	84
9.5.6	Spezifische Leitfähigkeit von Wasser	85
9.5.6.1	Trennung der Reinigungsmedien im CIP-Rücklauf	86
9.5.6.2	Trennung von Produkt und Wasser	87
9.6	Bestimmung der Masse	87
9.6.1	Selbsttätige Schüttwaagen	88
9.6.2	Kontinuierliche Waagen	90
9.7	Dichte-Messung	91
10.	Optische Messverfahren und Sensoren	92
10.1	Überblick zu optischen Sensoren und Messverfahren	92
10.2	Einsatzorte für optische Sensoren und Anforderungen	94
10.3	Prinzipieller Aufbau eines optischen Sensors	94
10.4	Messprinzipien bei optischen Sensoren	96
10.5	Grundlagen der optischen Messtechnik	97
10.5.1	Lichtabsorption	97
10.5.2	Streulichtmessung	100
10.5.3	Messwellenlänge	102
10.5.4	Einheiten der optischen Strahlung	103
10.5.5	Werkstoffe für optische Sensoren	103
10.6	Vorteile optischer Sensoren	103
10.7	Anwendungsbeispiele für den Einsatz optischer Sensoren	104
10.7.1	Transmissionsmessung	104
10.7.2	Trübungsmessung	105
10.7.3	Farbmessung	112
10.7.4	Refraktionsmessung (Refraktometrie)	113
10.7.5	Polarisationsmessung (Polarimetrie)	115
10.7.6	NIR-Messverfahren	116
10.7.7	Faseroptik	116
10.7.8	Fluoreszenzmessung	116
10.7.9	Trennung mischbarer Medien	117
10.7.10	Trennung nicht miteinander mischbarer Medien	117

10.7.11 Partikelzähler (Hefe)	117
10.7.12 Bestimmung von Peressigsäure	118
10.7.13 Staubgehaltsmessung/Streulicht	118
10.7.14 Lichtschranken	119
10.7.15 Erfassung von Biofilmen	119
10.7.16 Absorptionsmessung	124
11. Die Messung des Sauerstoffgehaltes	125
11.1 Bedeutung des Sauerstoffgehaltes und der Sauerstoffmessung	125
11.2 Messung des Sauerstoffs in Flüssigkeiten und Gasen	126
11.3 Allgemeine Funktionsweise amperometrischer O ₂ -Sensoren	127
11.3.1 Prinzipieller Aufbau von O ₂ -Elektroden nach dem <i>Clark</i> -Prinzip	128
11.3.2 Aufbau von O ₂ -Sensoren mit Schutzkathode	128
11.3.4 Einflussgrößen auf den Elektrodenstrom	130
11.3.5 Messbereiche und Einsatzgrenzen	134
11.3.6 Elektrolyt- und Membranwechsel	134
11.3.7 Kalibrierung eines O ₂ -Sensors	134
11.3.8 Handhabung, Einbauvarianten und Zubehör für Sauerstoffsensoren und Messwertauswertung	135
11.3.9 Sauerstoff-Sensoren von Orbisphere	139
11.3.10 Werkstoffe	142
11.3.11 Elektrodenreinigung und Wartung	142
11.4 Potentiostatische Sensoren	143
11.4.1 Messprinzip der potentiostatischen Sauerstoffmessung	143
11.4.2 Messgerät zur potentiostatischen Sauerstoffmessung	144
11.4.3 Kalibrieren des Sensors	146
11.5 Sensor mit Festelektrolyt	146
11.6 Optische Sensoren	149
12. Die Messung des CO ₂ -Gehaltes	155
12.1 Einführung	155
12.2 Kohlensäure als Messobjekt	156
12.3 Bestimmung der CO ₂ -Konzentration in der Raumluft	156
12.4 Messung der CO ₂ -Konzentration in der Gasphase	157
12.5 Ermittlung der Reinheit des Kohlendioxides	158
12.6 Bestimmung des CO ₂ -Gehaltes in Getränken	159
12.6.1 Bestimmung des CO ₂ -Gehaltes durch Titration	160
12.6.2 Bestimmung des CO ₂ -Gehaltes durch Messung des CO ₂ -Partialdruckes in der Gasphase	161
12.6.3 Bestimmung des CO ₂ -Gehaltes durch Messung des CO ₂ -Partialdruckes in der flüssigen Phase	163
12.6.4 Bestimmung des CO ₂ -Gehaltes mittels Membransensoren	170
12.6.5 Berechnung des CO ₂ -Gehaltes aus den Parametern Druck und Temperatur	173

12.6.6	Berechnungsgleichungen für verschiedene Getränke	176
12.6.7	Kalibrierung	177
12.6.8	Optische CO ₂ -Sensoren	177
12.6.9	Zusammenfassung	180
13.	Messung des pH-Wertes	181
13.1	Einführung zum pH-Wert	181
13.2	Bedeutung des pH-Wertes	182
13.3	Messung des pH-Wertes mit Glaselektroden	182
13.3.1	Möglichkeiten zur Messung des pH-Wertes	183
13.3.2	Messelektrode	184
13.3.3	Bezugselektrode	185
13.3.4	Einstabmessketten	185
13.3.5	Messverstärker	186
13.4	Abhängigkeiten des gemessenen pH-Wertes	187
13.5	Kalibrierung eines Messsystems	187
13.6	Messen des pH-Wertes	187
13.7	pH-Wert-Onlinemessung	188
13.8	Glaslose Elektroden	190
13.8.1	Messprinzip der glaslosen Elektrode für die pH-Wert-Messung	190
13.8.2	Vorteile der ISFET-Technologie	191
13.8.3	Besonderheiten von ISFET-pH-Elektroden	191
13.8.4	Vergleichbarkeit von Messwerten	191
13.8.5	Hygienischer Einsatz von Messsystemen	193
13.8.6	Hinweise für den Einsatz in der Brauerei	193
14.	Messung der Feuchte	194
14.1	Die Zustandsgleichung eines idealen Gases lautet:	194
14.2	Enthalpie der Luft:	197
14.3	Das h,x-Diagramm für feuchte Luft	197
14.4	Messgeräte für die Bestimmung der Feuchte	200
15.	Die Chlordioxid- und Chlorit-Messung	202
15.1	Chlordioxid - ein wirkungsvolles Desinfektionsmittel	202
15.2	Anwendungen in der Gärungs- und Getränkeindustrie	202
15.3	Konzentrationsermittlung bei Chlordioxid-Lösungen	204
15.4	Onlinemessung von Chlordioxid	205
15.5	Onlinemessung von Chlorit	210
16.	Die PES-Messung	212
16.1	Peressigsäure – ein wirkungsvolles Desinfektionsmittel	212
16.2	Die Konzentrationsermittlung bei PES-Lösungen	213
16.2.1	Messmöglichkeiten für eine Onlinemessung	214
16.2.2	PES-Sensor	215

16.2.3 Elektrodenreaktionen	216
16.2.4 Titrationsvorschrift zur Bestimmung der PES-Konzentration	217
17. Zellkonzentrationsmessungen	219
17.1 Die Dosierung der Anstellhefe und ihre Kontrollverfahren	219
17.2 Dosierung nach Volumen	219
17.3 Dosierung nach Masse	221
17.4 Onlinebestimmung der Zellmenge	221
17.4.1 Dosierung durch Differenz-Trübungsmessung	221
17.4.2 Dosierung durch Erfassung der Teilchenzahl in der angestellten Würze	222
17.4.3 Vitalität der Anstellhefe	224
18. Messungen im Kessel- und Maschinenhaus	225
18.1 Kesselhaus	225
18.2 Maschinenhaus	229
19. Messungen im Abwasser	230
20. Sonstige Messungen	232
20.1 Stammwürze-Messung	232
20.2 Ethanol-Messung	233
20.3 Diacetyl-Messung	236
20.4 Analysenautomaten für Bier und Getränke	235
20.5 Viskosität	236
20.6 Ammoniak-Konzentration	237
20.7 Gase in Gär- und Lagerkellern und Schankanlagen	237
20.8 Überwachung der Raumluft auf Chemikalien	238
20.9 Fremdstoffinspektion im MW-Leergut	238
20.9.1 Allgemeine Bemerkungen	238
20.9.2 Analyse der Behälterrestflüssigkeit	239
20.9.3 Erkennung von aromatischen Verbindungen	239
20.9.4 Erkennung von Kohlenwasserstoffen	239
20.9.5 Erkennung von organischen Verbindungen	239
20.10 Sensoren für Ozon, Stickstoff und Wasserstoff	239
20.11 Onlinemessungen im Betrieb und an Füllanlagen	241
20.12 Stickstoff	241
21. Das Zählen in der Brauerei und Getränkeindustrie	243
22. Die Registrierung von Messwerten und Messwert-Fernübertragung	244
23. Die Verwendung korrekter Bezeichnungen und Schreibweisen	246
23.1 Probleme beim Umgang mit physikalischen Größen	246
23.2 Probleme beim Gebrauch des Begriffes Leistung	248
23.3 Probleme beim Gebrauch des Begriffes Masse	248
23.4 Gebrauch von Vorsätzen	249
23.5 Sonstige Begriffe	250

23.6 Eichen, Kalibrieren und Justieren	252
23.7 Schreibweise von Prozentangaben	253
23.8 Verbesserung der Lesbarkeit von großen Zahlen, Telefonnummern und ähnlichem	253
Anhang physikalisch-technische Messgrößen und ihre Umrechnung	256
Länge	256
Fläche	256
Volumen	256
Masse	258
Kraft	258
Druck	258
Arbeit/Energie/Wärmemenge	259
Leistung	259
volumetrische Kälteleistung	260
spezifische Wärme	260
spezifische Enthalpie	260
Wärmeleitfähigkeit	260
Wärmeübergangskoeffizient, Wärmedurchgangskoeffizient	260
Wärmestromdichte	260
dynamische Viskosität	261
kinematische Viskosität	261
Oberflächenspannung	261
Geschwindigkeit	261
ebener Winkel	261
Winkelgeschwindigkeit	262
Temperatur	262
Wasserhärte	262
Sonstige Einheiten	262
Weiterführende Literatur	263
Stichwortverzeichnis	265
Quellennachweis	273

Kompendium Messtechnik

Online-Messgrößen in Brauerei, Mälzerei und Getränkeindustrie

Hans-J. Manger

2. aktualisierte Auflage



Im Verlag der VLB Berlin

10. Optische Messverfahren und Sensoren

Optische Sensoren sind als Online-Prozessmessgeräte wichtige Elemente der Automatisierungstechnik. Sie wandeln Prozessgrößen in elektrische Signale um, die von einer Steuerung zur Beeinflussung des Prozesses verwendet werden können oder die nur der Information des Bedienungspersonals dienen.

10.1 Überblick zu optischen Sensoren und Messverfahren

Optische Sensoren lassen sich sehr vielseitig einsetzen. Der Einsatz optischer Sensoren wird teilweise auch unter dem Begriff Prozessphotometrie zusammengefasst. Dabei wird unter Fotometrie die Messung der Veränderung von Lichtintensitäten verstanden.

Ihre Verbreitung und Praxistauglichkeit wurde erst durch die Fortschritte der Mikroelektronik ermöglicht.

Beispiele für den Einsatz optischer Sensoren sind:

- Messung der optischen Dichte bzw. die Konzentrationsmessung;
- Trübungsmessung;
- Farbmessung;
- Fluoreszenzmessung;
- Messung der Refraktionszahl (Refraktometrie);
- Messung der Drehebene bei polarisiertem Licht (Polarimetrie)
- Partikelmessung;
- NIR-Messung.

Aus der Sicht der Messsignalgewinnung lassen sich unterscheiden:

- Messung der Lichtabsorption beim Durchtritt des Lichtes durch die Probe;
- Messung des Streulichtes, dass von Partikeln infolge Reflexion ausgesandt wird;
- Messung des reflektierten Lichtes;
- Messung der Strahlung, die von fluoreszierenden Substanzen ausgesandt wird;
- Messung der Licht-Brechung bzw. -Drehung;
- Messung der Unterbrechung eines Lichtstrahles (Lichtschrankenprinzip).

Die vorstehend genannten Effekte sind in der Regel an in Fluiden gelöste Stoffe oder suspendierte Teilchen (Synonym: Partikel) gebunden. Die Teilchen sind dreidimensional und haben einen anderen Brechungsindex als das umgebende Medium.

Einige der Effekte lassen sich auch in Gasen nutzen, zum Teil auch an Festkörpern.

Beispiele für in der Brau- und Getränkeindustrie eingesetzte optische Sensoren sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Die relativ „jungen“ optischen nicht-invasiven Messverfahren für Sauerstoff und Kohlendioxid werden in Kapitel 11.6 bzw. 12.6.8 behandelt.

Tabelle 16 Anwendungsfälle für optische Sensoren in der Brau- und Malzindustrie sowie Getränkeindustrie

lfd. Nr.	Messaufgabe	Messgut	Messprinzip
1	Phasentrennung von mischbaren flüssigen Phasen	Bier/Wasser Getränk/Wasser CIP-Lösung/Wasser Getränk 1/Getränk 2	Lichtabsorption
2	Phasentrennung flüssig/fest	Hefe/Bier Würze/Trübstoffe Hefe/Wasser Filterhilfsmittelsuspension/Wasser	Lichtabsorption
3	Phasentrennung von 2 nicht mischbaren Phasen	Öl/Wasser Brüdenkondensat/Wasser	Lichtabsorption
4	Trübung	Würze Bier beliebige Getränke Wasser Abwasser	Streulichtmessung, Lichtabsorption
5	Staubgehalt in Gasen	Luft	Streulichtmessung, Lichtabsorption
6	Hefedosierung	Hefe in Würze Hefe in Bier	Lichtabsorption
7	Zellzahlbestimmung	Würze, Bier Fermentationsmedien	Lichtabsorption, Unterbrechung eines Lichtstrahles
8	Farbbestimmung	Würze/Bier Wasser Abwasser	Lichtabsorption
	Regelung der Bier- oder Würzefarbe durch Röstmalzbierdosierung	Würze Bier	Differenzmessung der Lichtabsorption
9	Lichtschanke	Luft	Lichtabsorption, Unterbrechung eines Lichtstrahles
10	Konzentrationsbestimmung	Würze Bier AfG	Refraktion Polarisation
11	Zusammensetzung	Gerste, Weizen Malz	NIR-Reflexionsmessung
12	Chemische Analytik	Brauereilaboratorium, eine Übersicht gibt [66]	Lichtabsorption
13	Mikrobiolog. Schnellnachweis	Brauereilaboratorium	Fluoreszenzmessung
14	Sauerstoffgehaltsmessung	s.a. Kapitel 11.5	
15	CO ₂ -Gehalt in Getränken	s.a. Kapitel 12.6.8	

10.2 Einsatzorte für optische Sensoren und Anforderungen

Optische Sensoren werden verwendet:

- als Onlinemessgeräte und
- als Offlinemessgeräte.

Als Onlinemessgerät liefert der Sensor das Messergebnis unmittelbar aus dem Prozess. Deshalb muss er in eine Rohrleitung oder einen Behälter integriert werden; er wird „inline“ im Hauptstrom des Messmediums eingesetzt. Eine Inlinemessung ist also immer eine Onlinemessung (deshalb ist der Begriff Inlinemessung entbehrlich).

Die mögliche Signalgewinnung im Bypass liefert das Signal etwas zeitverzögert. Vorzugsweise wird deshalb auf die direkte Messung im Hauptstrom orientiert.

Bei der Offlinemessung wird dem Prozess eine Probe entnommen und unmittelbar anschließend oder zeitverzögert in einem Messgerät untersucht, beispielsweise in einem Laboratorium. Das Messergebnis steht also erst nach einer mehr oder weniger langen Zeitspanne zur Verfügung.

Onlinemessgeräte bzw. -sensoren müssen als Prozessmessgeräte (Synonym: Feldmessgeräte) für den dauerhaften, robusten Betrieb ausgelegt sein und ein von verfälschenden Einflüssen (zum Beispiel der Alterung von Lichtquellen, der Belagbildung auf optischen Fenstern, von Trübungspartikeln u.a.) unabhängiges Signal liefern. Günstig ist es, wenn die Sensoren über Möglichkeiten des Selbstabgleiches bzw. der Selbstkalibrierung verfügen und möglichst wartungsfrei bzw. -arm sind.

10.3 Prinzipieller Aufbau eines optischen Sensors

Der schematische Aufbau eines optischen Sensors ist aus Abbildung 28 ersichtlich.

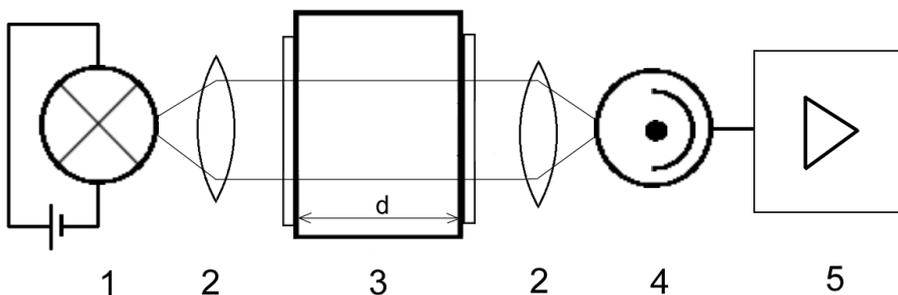


Abbildung 28 Schematischer Aufbau eines optischen Sensors

1 Lichtquelle 2 optisches System 3 Kuvette/optisches Fensterpaar mit der Probe

4 Lichtempfänger 5 Messwandler mit Anzeige/Messwertausgabe

d = Schichtdicke der Kuvette = Länge der Messstrecke (des „optischen Pfades“)

Die zu untersuchende Probe wird in einer transparenten Messzelle bereitgestellt. Diese kann durch eine Kuvette gebildet werden, in die die Probe manuell eingefüllt wird, oder es wird eine Durchflussmesszelle eingesetzt oder der Sensor wird in die Probe eingetaucht oder von dieser umspült.

Die Messung mit einer Kuvette wird beispielsweise im Laboratorium vorgenommen. Im Laboratorium werden im Allgemeinen SpektralFotometer eingesetzt ($\lambda = 190... 1100 \text{ nm}$) [66]. Mit diesen Geräten lassen sich auch Spektrogramme für beliebige zu

untersuchende Lösungen oder Suspensionen aufnehmen. Eine Küvette nimmt die Probe auf und verfügt über zwei oder 4 parallele Fenster, die einen genau definierten Abstand zueinander haben. Dieser Abstand entspricht der Länge des optischen Pfades bzw. der Schichtdicke der zu untersuchenden Probe.

Der Gebrauch einer Durchflussmesszelle liefert unmittelbar das Messergebnis. Diese Variante wird deshalb auch als Onlinemessung bezeichnet (s.o.).

Durchflussmesszellen werden in der Regel durch planparallele optische Fenster gebildet, die in die Rohrleitung oder einen Behälter integriert sind oder die als Teil des Sensors vom Messgut umströmt werden. Der Abstand der Fenster entspricht auch hier der optischen Pfadlänge.

Als optische Fenster werden Spezialgläser (Quarzglas, Borsilicatglas) oder Saphir-Scheiben eingesetzt. Saphir als Werkstoff ist auch im alkalischen Milieu korrosionsbeständig, widersteht abrasiven Einflüssen (z. B. Kieselgur, Perlite) und neigt wenig oder gar nicht zur Belagbildung. Diese Eigenschaft ist sehr wichtig für Sensoren mit driftfreiem Messsignalausgang.

Die Außenseite der optischen Fenster muss auch bei niedrigen Temperaturen beschlagfrei bleiben. Der Sensorinnenraum muss deshalb hermetisch abgeschlossen oder mit Druckluft mit einem niedrigen Drucktaupunkt („Instrumentenluft“ mit einem Drucktaupunkt ≤ -30 °C) gespült werden.

Günstig ist dabei der Einsatz von speziellen Messgehäusen, die mit austauschbaren Anschlüssen die Messzelle bilden (Beispiele sind das Varinline[®]-System der Fa. GEA-Tuchenhagen, das APV[®]-Gehäuse der Fa. APV/Invensys, der sogenannte Ingold[®]-Stutzen [$\varnothing = 25$ mm] oder ein Tri-Clamp[®]-Anschluss 1 1/2" oder 2"). Diese Sensorträger werden in die Rohrleitung eingeschweißt oder mit Flanschen oder äquivalenten Rohrverbindungen verbunden. In die Abschlusscheiben des Messgehäuses werden die/der Sensor(en) eingesetzt, s.a. Abbildung 29. Der Sensor kann auch direkt als einbaufertiges Bauelement für Rohrleitungen gefertigt sein.

Die Lichtquelle muss einen konstanten Lichtstrom mit einer definierten Wellenlänge λ liefern. Je nach Messaufgabe kann sichtbares („weißes“) Licht ($\lambda = 380...780$ nm), selektives sichtbares Licht mit einer definierten Wellenlänge, ultraviolettes Licht (UV-Licht; $\lambda = < 380...100$ nm, in der Regel mit einer spezifischen Wellenlänge) oder infrarotes Licht (IR-Licht; $\lambda = > 780$ nm) verwendet werden.

Als Lichtquellen werden Glühlampen, Spektrallampen (Na-Dampflampe, Hg-Dampflampe, Wasserstoff-Strahler) und vorzugsweise Leuchtdioden (LED) oder Laserdioden benutzt. Die Alterung der Lichtquelle kann durch Betrieb mit geregelter Unterspannung (Glühlampen) bzw. durch selbsttätige Kalibrierung kompensiert werden. Die Lichtquelle muss natürlich unter sehr konstanten Bedingungen betrieben werden, um Einflüsse auf das Messergebnis auszuschalten. Die Funktion der Lichtquelle bzw. ein Lichtquellenausfall sollte selbsttätig überwacht werden.

Der Lichtempfänger ist ein optoelektronischer Empfänger, beispielsweise eine lichtempfindliche Diode.

Das optische System enthält Bauelemente zur Fokussierung des Lichtstrahles (beispielsweise Linsen), zur Auswahl der Wellenlänge (optische Filter) und zur Beeinflussung der Intensität (einstellbare Blenden).

Der Messwandler wandelt das Messsignal des Lichtempfängers in ein normiertes Signal um, das mit Anzeigegeräten (z. B. Ziffernanzeige, Zeigerinstrument) ausgegeben oder einer Steuerung zur Auswertung zugeführt werden kann (beispielsweise als proportionaler Strom 4...20 mA). Günstig ist die Ausgabe des Signals an eine Steuerung (z. B. SPS) über einen Feldbus, um den Installationsaufwand zu reduzieren.

Das normierte Signal ist zu dem gesuchten Messwert proportional. Im Allgemeinen müssen optische Sensoren mit einem Standardmedium kalibriert werden. Das Standardmedium kann eine definierte Vergleichslösung oder -suspension sein oder es werden Fixwerte aus einer elektronischen Medien-Bibliothek übernommen.

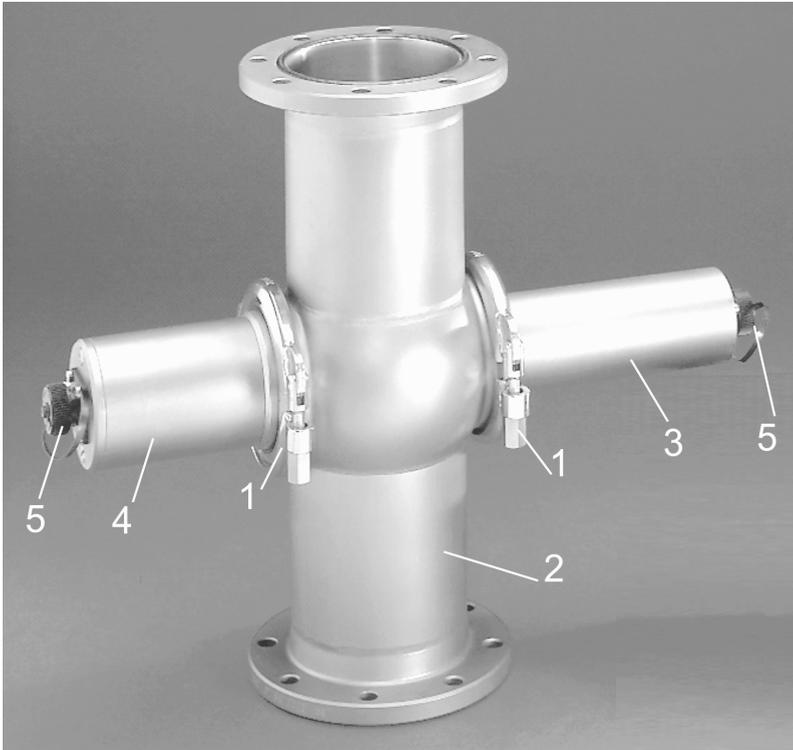


Abbildung 29 Optischer Sensor der Fa. optek-Danulat (Zweiwinkel-Trübungssensor), eingesetzt in ein Varinline®-Gehäuse (nach Fa. GEA-Tuchenhagen)
1 Spannring-Verbindung 2 Varinline®-Gehäuse mit Flanschanschlüssen 3 Lichtquelle
4 Auswerteeinheit 5 Sensor-Anschluss

10.4 Messprinzipien bei optischen Sensoren

Optische Messsysteme nutzen die Wechselwirkung des Lichtes, das eine elektromagnetische Welle ist, mit dem zu messenden Medium. Der auf einen Körper treffende Lichtstrom kann zum Teil reflektiert (*Reflexion*) und zum Teil absorbiert werden (*Absorption*) und zum Teil durch den Körper hindurchgehen (*Transmission*).

Wie bereits o.g. werden vor allem folgende Messprinzipien genutzt:

- Absorption des Lichtes durch die Probe;
- Messung des Streulichtes, das von den Partikeln der Probe ausgeht.

Der Einfluss der Medieneigenschaften auf das Messergebnis kann in der Regel durch eine Differenzmessung mit zwei Sensoren oder eine Zweikanalmessung ausgeschaltet werden.

Bei dem „Lichtschranken“-Sensor wird die Unterbrechung eines Lichtstrahles erfasst, es resultiert also nur eine ja/nein-Aussage.

10.5 Grundlagen der optischen Messtechnik

10.5.1 Lichtabsorption

Wird eine transparente, trübstofffreie Probe von Licht einer geeigneten Wellenlänge durchstrahlt, so wird ein Teil der Lichtenergie vom Medium absorbiert, s.a. Abbildung 30 und Abbildung 38.

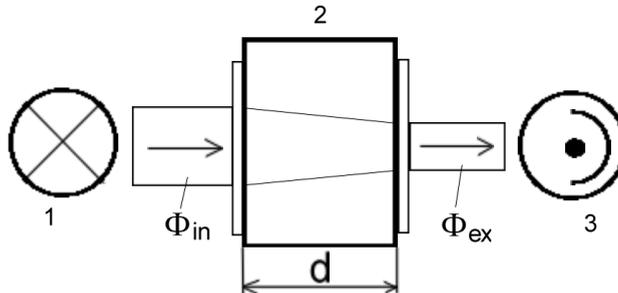


Abbildung 30 Lichtabsorption, schematisch

1 Lichtquelle 2 Messzelle 3 Lichtempfänger

d Schichtdicke der Probe Φ_{in} = Strahlungsfluss am Eintritt der Messzelle

Φ_{ex} = Strahlungsfluss am Austritt der Messzelle

Das Maß der Absorption ist proportional zur Anzahl der absorbierenden Moleküle und zur Schichtdicke d . Die Gesetzmäßigkeit wird durch das Gesetz von *Lambert-Beer* ausgedrückt (Gleichung 7):

$$\Phi_{ex} = \Phi_{in} \cdot 10^{-\kappa \cdot c \cdot d} \quad \text{Gleichung 7}$$

Φ_{ex} = Strahlungsfluss (Lichtmenge) am Austritt der Messzelle

Φ_{in} = Strahlungsfluss (Lichtmenge) am Eintritt der Messzelle

κ = bezogener Absorptionskoeffizient

der bezogene Absorptionskoeffizient wurde in der Vergangenheit als Extinktionskoeffizient bezeichnet

c = Konzentration in mol/L

d = Schichtdicke in cm

Es gelten weiter folgende Beziehungen:

$$A = \lg \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{ex}} = \lg \frac{1}{\tau} = \kappa \cdot c \cdot d$$

Gleichung 8

A = Absorptionsmaß (in der Vergangenheit war dafür der Begriff Extinktion E üblich)

κ = bezogener Absorptionskoeffizient

c = Konzentration in mol/L

d = Schichtdicke in cm bzw. m

τ = Transmissionsgrad (Gleichung 9)

$$\tau = \frac{\Phi_{ex}}{\Phi_{in}} \quad \text{Gleichung 9}$$

$$k = \frac{A}{d} = \kappa \cdot c$$

Gleichung 10

k = Absorptionskoeffizient

Der Absorptionskoeffizient k, das Absorptionsmaß A und der bezogene Absorptionskoeffizient κ sind eine Funktion der Wellenlänge des Lichtes. Sie werden deshalb auch als spektrale Koeffizienten bzw. als spektrales Maß bezeichnet. Die Messwellenlänge muss also genau eingehalten werden.

Das Absorptionsspektrum als Funktion der Wellenlänge kann für jede Lösung ermittelt werden. Abbildung 31 zeigt als Beispiel die Absorptionsspektren von Wasser, Würze und Bier.

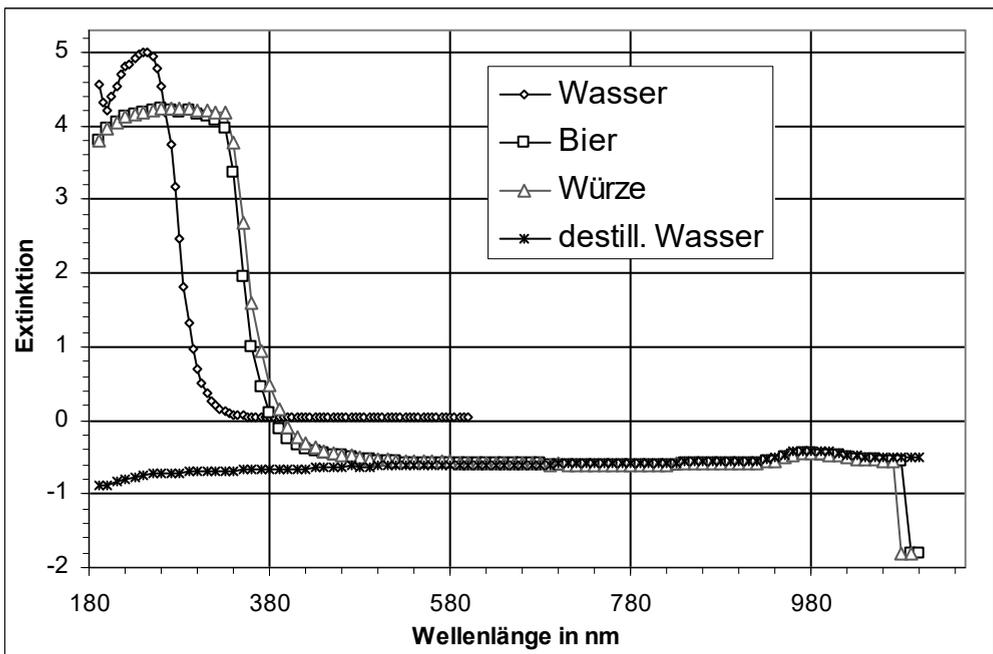


Abbildung 31 Absorptionsspektren von Wasser und Bier

Gemessen wird im Prinzip immer der Transmissionsgrad τ . Bei der Umrechnung in das Absorptionsmaß A durch Logarithmierung muss die unterschiedliche Auflösung beachtet werden, s.a. Abbildung 32.

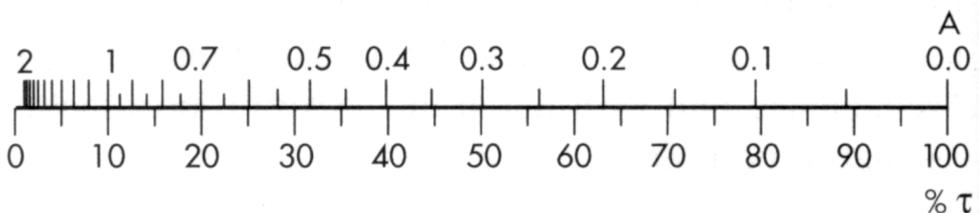


Abbildung 32 Absorptionsmaß und prozentualer Transmissionsgrad

Im Bereich hoher Transmissionswerte ist die Auflösung besonders gut. Deshalb werden Werte zwischen 100...25 % τ , entsprechend 0,0...0,6 A, bevorzugt, indem die Schichtdicke d der Messzelle so festgelegt wird, dass der Messwert im Vorzugsbereich liegt.

Die Umrechnung zwischen der Absorptionseinheit A (Synonyme: CU [Concentration Unit], AU [Absorption Unit], OD [Optical Density], Ext. [Extinktion]) und der prozentualen Transmission (% τ) kann nach Tabellen erfolgen, beispielsweise nach [67].

Beispiele für die Umrechnung:

Aus Gleichung 8 folgt (s.a. Abbildung 32):

$$A = -\lg \tau \text{ bzw. } \tau = 10^{-A}$$

$$50 \% \tau \hat{=} \tau = 0,5: \quad -\lg 0,5 = 0,301 \rightarrow A = 0,301$$

$$A = 0,8: \quad \tau = 10^{-0,8} = 0,158 \hat{=} \% \tau = 15,8 \%$$

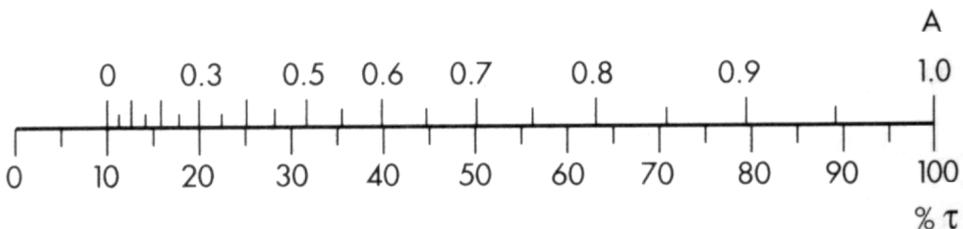


Abbildung 33 Substitutionsskala (nach Fa. Sigrüst)

Bei höheren Konzentrationen bietet es sich an, durch die Substitutionsmethode die Auflösung zu verbessern, indem auf optischem Wege die bessere Auflösung in den Bereich höherer Konzentration verschoben wird (Abbildung 33). Dazu wird ein Zweistrahlverfahren angewandt, s.a. Abbildung 35. Bei dieser Variante wird der Messstrahl durch einen Kompensator geschickt. Der Vergleichsstrahl geht durch das Messgut. Der Messwert entsteht aus dem Verhältnis der Transmissionen der Probe und des Kompensators.

Aus Gleichung 8 kann also die Konzentration einer Lösung bestimmt werden bzw. kann die Konzentrationsdifferenz zweier Medien für die messtechnische Unterscheidung benutzt werden, beispielsweise für die Medientrennung.

Durch ein Zweistrahlmessverfahren lassen sich Störeinflüsse, z. B. durch die Messzelle (Fensterverschmutzung), das Medium (Farbe) oder Streulicht, durch Kompensation eliminieren, s.a. Abbildung 34.

Dazu wird der Lichtstrahl abwechselnd durch eine Kompensationsmesszelle, die genau identisch mit der Messzelle und mit demselben Lösungsmittel gefüllt ist, und die eigentliche Messzelle geschickt.

Eine weitere Variante ist die Differenzmessung, bei der das Messgut die Mess- und die Kompensationszelle durchströmt. Die Schichtdicke von Mess- und Kompensationszelle ist unterschiedlich, sodass nur die Differenzlänge der Messzellen das Ergebnis bestimmt.

Die Differenzmessung wird zum Beispiel genutzt, wenn die Messflüssigkeit die Messzellenfenster verschmutzt.

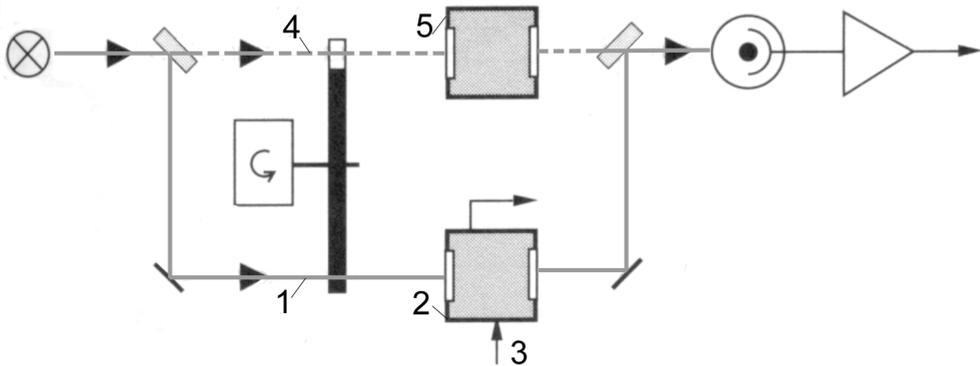


Abbildung 34 Zweistrahlmessverfahren mit Kompensationsmesszelle im Vergleichsstrahl (nach Fa. Sigrist)

1 Messstrahl 2 Messzelle 3 Messgut 4 Vergleichsstrahl 5 Kompensationszelle

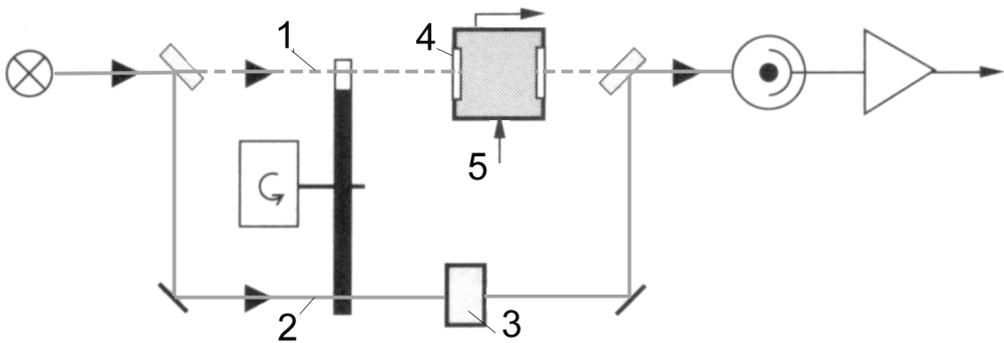


Abbildung 35 Zweistrahlmessverfahren nach der Substitutionsmethode (nach Fa. Sigrist)

1 Vergleichsstrahl 2 Messstrahl 3 Kompensator (Grauglas) 4 Messzelle 5 Messgut

Beim Zweikanalmessverfahren (Abbildung 46) wird nur ein Lichtstrahl durch die Probe geschickt. Erst nach dem Passieren der Messzelle wird der Lichtstrahl differenziert bei zwei Wellenlängen gemessen.

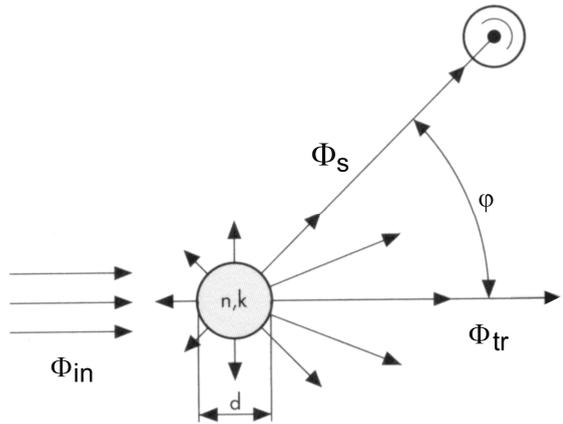
10.5.2 Streulichtmessung

Die Intensität des Streulichtes, hervorgerufen von einem kugelförmigen Teilchen, ist eine Funktion der Teilchengröße, des Streuwinkels, der Wellenlänge und der optischen Eigenschaften des Teilchens, s.a. Abbildung 36.

Die Messung des Streulichtes wird unter einem bestimmten Winkel, dem Streuwinkel, vorgenommen. Der benutzte Streuwinkel wird vom Messgerät vorgegeben, üblich sind Streuwinkel von 11°, 25°, 30° und 90° (die benutzten Streuwinkel werden herstellerspezifisch festgelegt). Da das Streulicht bei kleinen Winkeln in Strömungsrichtung erfasst wird, wird auch von Vorwärtsstreuung bzw. Vorwärtsstreulicht gesprochen.

Abbildung 36 Streuung von Licht an einem kugelförmigen Teilchen

- Φ_{in} Strahlungsfluss am Eintritt der Messzelle
- Φ_s Strahlungsfluss des Streulichtes
- Φ_{tr} Strahlungsfluss Transmission
- φ Streuwinkel n Brechungsindex
- k Absorptionskoeffizient
- d Teilchendurchmesser
- λ Wellenlänge des Lichtes



Zum Teil werden Trübungsmessgeräte als Zweiwinkelmessgeräte ausgeführt, z. B. für 11°/90° oder 25°/90°. Abbildung 37 zeigt schematisch ein Zweiwinkelgerät.

Die Auswahl des Streuwinkels richtet sich nach der Messaufgabe. Beispielsweise lassen sich bei 90° vor allem durch Eiweiß-Gerbstoff-Kolloide verursachte Trübungen (< 1 µm) erfassen, während sich bei 11° und 25° vor allem Hefen und Filterhilfsmittel partikel detektieren lassen.

Das 90°-Signal ist weitgehend unabhängig von der Partikelgröße und wird im Wesentlichen von der Anzahl der Partikel bestimmt.

Demgegenüber ist das Vorwärts-Streulichtsignal von der Anzahl und der Größe der Partikel abhängig, d.h., es wird das Gesamtvolumen der Partikel erfasst. Aus der Größe „Gesamtvolumen“ kann dann ggf. der Gesamtfeststoffgehalt abgeleitet werden (daher wird auch von Seiten der MEBAK der Einsatz der Vorwärts-Streulichtmessung im Sudhaus zur Erfassung der Würzetrübung empfohlen).

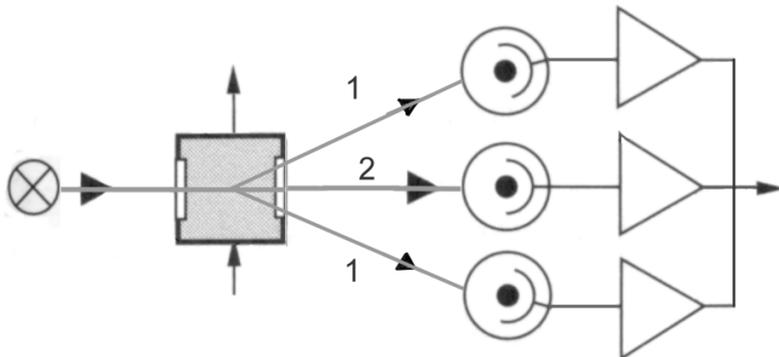


Abbildung 37 Zweiwinkel-Trübungssensor, schematisch (nach Fa. optek-Danulat, s.a. Abbildung 29)

1 Streulicht unter 11° 2 Messung des ungestreuten Lichtes zur Farbkompensation

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass 90°- und Vorwärts-Streulicht keine alternativen, sondern sich ergänzende Messverfahren sind, die unterschiedliche Informationen liefern.

Die auf der Lichtstreuung trüber Medien beruhende Erscheinung wird nach dem irischen Forscher *John Tyndall* auch als *Tyndall-Effekt* bezeichnet.

10.5.3 Messwellenlänge

Entweder wird für die optischen Messungen monochromatisches Licht eingesetzt oder es wird ein Wellenspektrum genutzt. Monochromatisches Licht wird von Spektrallampen, Leuchtdioden oder Laserdioden emittiert oder/und es werden optische Filter benutzt.

Die o.g. spektralen Koeffizienten sind eine Funktion der Wellenlänge des Messstrahles. In der Regel wird mit definierten und eng tolerierten Wellenlängen gemessen. Die Lichtfrequenz und -intensität müssen möglichst konstant sein.

In Tabelle 17 sind einige charakteristische Wellenlängen für Messungen in der Brauindustrie aufgeführt.

Tabelle 17 Charakteristische Wellenlängen für spektralfotometrische Messungen in der Brauindustrie (nach [68])

Wellenlänge λ in nm	Konzentrationsbestimmung bei der Stoffgruppe: *)
275	Isohumulongehalt in Würze und Bier
275, 325, 355	differenzierte α - und β -Säurenbestimmung in Hopfen und Hopfenprodukten
335	vicinale Diketone im Bier
450	Aldehyde im Bier
530	höhere Alkohole und Ester im Bier
455	enzym. Bestimmung von Glucose in Würze und Bier
480	Kohlenhydratfraktionen
452, 565	α -Glucanfraktion in Würze und Bier (Jod-Stärke-Komplex)
430 u. 700	Bier- und Würzefarbe
570	α -Aminostickstoff in Würze und Bier (mit Ninhydrin)
550	Anthocyanogene in Würze und Bier
600	Gesamtpolyphenole in Würze und Bier

*) zu beachten ist, dass eine Reihe der aufgeführten Bestimmungen inzwischen auch vorteilhaft mit chromatografischen Verfahren bestimmbar ist.

Tabelle 18 Einheiten der optischen Strahlung

Messgröße	Kurzzeichen	Einheit	Abkürzung	Definition
Lichtstärke	I_v	Candela	cd	$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}^{-1}$)
Leuchtdichte	L	Candela/m ²	cd/m ²	$L = I_v/A$
Lichtstrom	Φ_v	Lumen	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$
Beleuchtungsstärke	E	Lux	lx	$E = \Phi_v / A$; $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$
Lichtmenge (Lichtarbeit)	Q	Lumensekunde	lm·s	$Q = \Phi_v \cdot t$; $1 \text{ lm} \cdot \text{s} = 1 \text{ s} \cdot \text{cd} \cdot \text{sr}$

) Eine Lichtquelle hat in einer gegebenen Raumrichtung 1 cd Lichtstärke, wenn sie auf einem Sensor mit der genormten spektralen Empfindlichkeitsverteilung des menschlichen Auges dasselbe Signal erzeugt wie monochromatisches Licht der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz und der Strahlungsstärke von $1/683 \text{ W/sr}$. (sr = Raumwinkel)