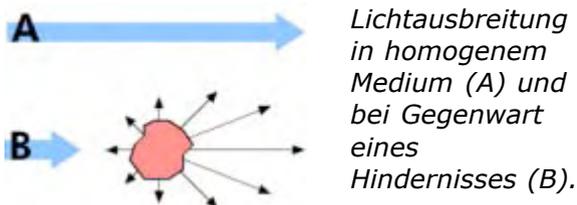


Streulicht

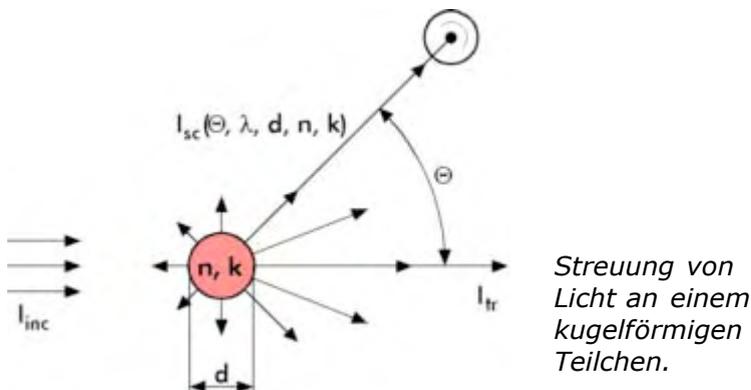
In einem optisch homogenen Medium (Brechungsindex und Absorption konstant) bewegt sich das Licht geradlinig fort. Streng genommen ist dies nur im Vakuum der Fall. Jede Änderung der optischen Eigenschaften durch ein Hindernis lenkt den Lichtstrahl von seiner Bahn ab. Diesen physikalischen Prozess nennt man Streuung von Licht an Teilchen. Lichtstreuung ist die Ursache für das Phänomen Trübung.



Sie beschränkt sich jedoch nicht auf die von Auge oder im Mikroskop sichtbaren Teilchen. Selbst in reiner Luft oder reinem Wasser wird das Licht an den Molekülen gestreut. Diese Molekularstreuung ist zwar extrem klein, aber nicht vernachlässigbar: das Blau des Himmels beispielsweise ist eine Folge der Streuung des Sonnenlichts an den Molekülen der Luft.

Die Prozesse, welche sich bei der Streuung abspielen, sind erstens die Beugung und zweitens die Anregung von Strahlung. Beugung beruht auf der Wellennatur des Lichts: passiert eine Welle ein Hindernis in unmittelbarer Nähe, so wird sie von ihrer Richtung abgelenkt. Der Ablenkwinkel ist vom Verhältnis aus Wellenlänge und Grösse des Hindernisses abhängig. Anregung von Strahlung beruht darauf, dass die Atome angeregt werden, das eingestrahlte Licht wieder abstrahlen. Je nach Art und Beschaffenheit des Partikels wird dieses Licht gemäss den Gesetzen der Lichtbrechung, der Reflexion oder der Dipolstrahlung in verschiedene Richtungen emittiert (die Reflexion eines Spiegels ist ein Spezialfall davon).

Die Kriterien, welche die Intensität des Streulichts beeinflussen, sind in der folgenden Abbildung dargestellt:



Der einfallende Lichtstrahl mit der Intensität I_{inc} und der Wellenlänge λ treffe auf ein kugelförmiges Teilchen. Die Intensität I_{sc} des Streulichts ist eine Funktion des

Streuwinkels, der Korngrösse, der Wellenlänge und der optischen Eigenschaften des Teilchens und des Mediums. Man kann also symbolisch schreiben:

$$I_{sc} = I_{sc}(Q, l, d, n)$$

wobei Q den Streuwinkel, d den Partikeldurchmesser, l die Wellenlänge und n den Brechungsindex relativ zum Medium bezeichnet.

Die explizite Formulierung dieser Gleichung ist Gegenstand der Streutheorie. Die allgemeine Lösung für beliebige Werte der Parameter liefert bei kugelförmigen Partikeln die Mie-Theorie. Die Rayleigh-Theorie (Rayleigh-Streuung) ist als Spezialfall für sehr kleine Teilchen ($<0.05 \mu\text{m}$) in dieser enthalten. Die Gleichung hat eine komplexe mathematische Struktur und kann mit Computern gelöst werden.

Eine praktische Anwendung der Streulichtmessung ist die Bestimmung des Trübungswerts, der Angaben über den Gehalt an Feststoffen in flüssigen und gasförmigen Medien liefert.

Knochenasche	1.60 .. 1.66
Formazin	1.85
Al ₂ O ₃	1.76
CaSO ₄	1.57
Hefe	1.49 .. 1.53
Polystyrol-Latex	1.59
Paraffinöl	1.48
PbO, Pb ₃ O ₄ , PbO ₂	2.3 .. 2.7
TiO ₂	2.6 .. 2.9
ZnO	2.0

In der Praxis ist das Trägermedium meist Luft (1) oder Wasser (1.33), und deren Brechungsindex geht in die Kalibrierung des Trübungsmessgerätes ein. Der Einfluss des Brechungsindex auf die Messung wird nur dann fühlbar, wenn die gemessene Substanz stark vom Kalibrierprodukt abweicht.

Absorptionskoeffizient, bezogener spektraler

$k(l)$

Früher als "Extinktionskoeffizient e_l " bezeichnet.

Quotient aus dem spektralen [Absorptionskoeffizienten](#) $a(l)$ einer Lösung und der Konzentration c des darin gelösten Stoffes:

$$k(l) = a(l)/c$$

k ist also die Stoffkonstante, welche es gestattet, aus dem spektralen [Absorptionsmass](#) A die Konzentration des gelösten Stoffes gemäss dem [Lambert-Beer'schen Gesetz](#) zu berechnen. Er ist eine Funktion der [Wellenlänge](#) und wird durch die Absorptionsspektralanalyse bestimmt.

Absorptionsmass, spektrales

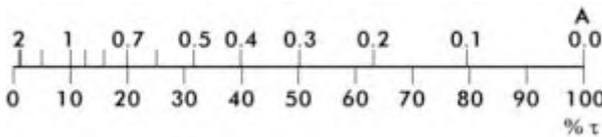
A(I)

Früher als "Extinktion E_I " bezeichnet.

Das dekadische spektrale Absorptionsmass ist der dekadische Logarithmus des Kehrwertes des spektralen Reintransmissionsgrades $t_i(I)$.

$$A(I) = \lg (I/t_i) = \lg (f_{I_{in}} / f_{I_{ex}})$$

Die Anzeige der handelsüblichen Photometer liefert allgemein das Absorptionsmass als Messgrösse, da dieses gemäss dem Lambert-Beer'schen Gesetz zur Konzentration proportional ist. Es gilt aber zu bedenken, dass das Photometer messtechnisch den Transmissionsgrad erfasst. Bei der Umwandlung durch Logarithmierung entsteht eine unterschiedlich hohe Auflösung des Absorptionsmasses für verschiedene Transmissionswerte, wie die folgende Skala in zeigt:



Absorptionsmass und Transmissionswerte

Im Bereich hoher Transmissionen ist die Auflösung besonders gut. Praktisch wird deshalb bevorzugt der Bereich von 0..0.6A (100..25%t) genutzt. Der niedrigste mit Sigrist-Photometern ausgewertete Bereich ist 0..0.3 A.

Substitutionsmethode

Absorptionskoeffizient, spektraler

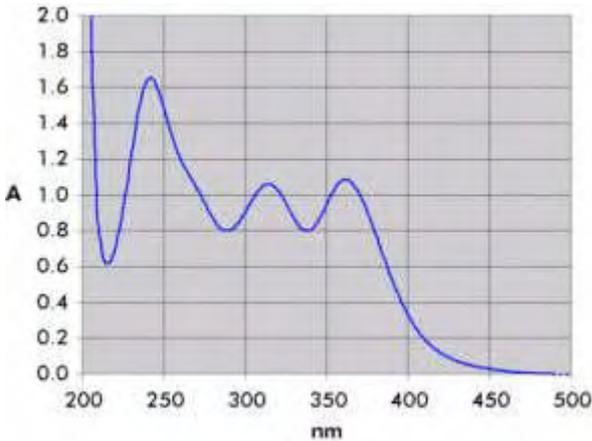
$a(\lambda)$

Früher als "Extinktionsmodul m_l " bezeichnet.

Quotient aus dem dekadischen Absorptionsmass $A(\lambda)$ und der Schichtdicke d des durchquerten Mediums. Die Einheit ist m^{-1} . Diese materialspezifische Grösse, welche auch als SAK bezeichnet wird, erübrigt die Spezifikation der verwendeten Schichtdicke.

Absorptionsspektalanalyse

Weit verbreitete physikalisch-chemische Analysenmethode zum Nachweis und zur Konzentrationsbestimmung organischer und anorganischer Stoffe, bei der die absorbierte Wellenlänge sowie die Stärke der Absorption gemessen wird.



*Absorptionsspektrum
einer salzsauren
Fe³⁺-Lösung
(Konzentration
50ppm, Schichtdicke
2mm)*

Die Aufnahme des Absorptionsspektrums ([Absorptionsmass](#) in Funktion der [Wellenlänge](#)) gestattet die Bestimmung der [Wellenlänge](#), bei der die betreffende Substanz die Lichtenergie absorbiert. Das Ausmass der Absorption dient zur Berechnung der Konzentration des Stoffes gemäss dem [Lambert-Beer'schen Gesetz](#).

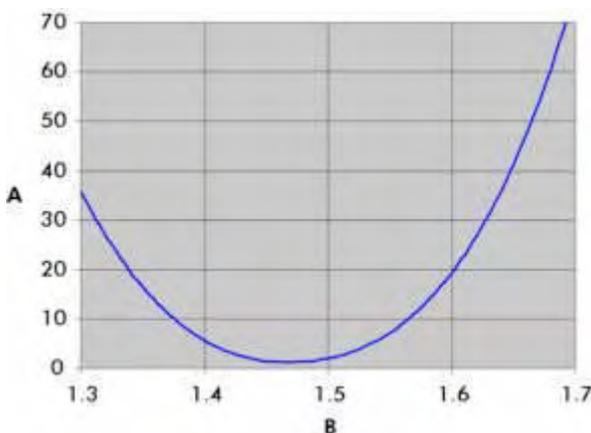
Spektrum

Brechungsindex

Der Brechungsindex gibt an, wie stark ein Lichtstrahl beim Übergang vom Vakuum in das betreffende Material abgelenkt wird.

Der Zusammenhang zwischen dem Trübungswert und der Feststoffkonzentration einer Suspension wird von den Streueigenschaften der Feststoffteilchen merklich beeinflusst. Die Streulichtmenge hängt nicht nur von der Konzentration ab, sondern auch von der Korngrösse und dem Brechungsindexverhältnis zwischen den Partikeln und dem Medium.

Je stärker sich die Partikel vom Medium unterscheiden (d.h. je grösser die Differenz der Brechungsindizes ist), umso mehr streuen sie das Licht. Ist kein Unterschied vorhanden, so gibt es auch keine Lichtstreuung. Dies kann durch einen Versuch illustriert werden. SiO_2 wurde in Flüssigkeiten unterschiedlicher Brechungsindizes suspendiert und die resultierenden Streulichtintensitäten gegen den Brechungsindex aufgetragen:



*Streulichtintensität A
(relative Einheit) von
 SiO_2 in
Methanol/Benzothiazol-
Gemischen mit
unterschiedlichen
Brechungsindizes B.*

Am Minimum der Kurve ist praktisch kein Streulicht mehr vorhanden; die Suspension erscheint nicht mehr trübe. Hier sind die Brechungsindizes des Mediums und des suspendierten SiO_2 gleich gross (1.47). Diese Methode erlaubt die Bestimmung des Brechungsindex von suspendierten Teilchen.

Die nachstehende Tabelle zeigt die Werte einiger Substanzen:

Substanz	Brechungsindex
a- SiO_2	1.45 .. 1.47
Methanol	1.329
Wasser	1.333
Quarz (nat. SiO_2)	1.55
c- SiO_2	1.48
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1.60 .. 1.66
CaCO_3	1.5 .. 1.7

Beugung

Auch Diffraction genannt. Allgemein jede Ablenkung eines Wellenvorgangs (Wasserwelle, Schallwelle, Lichtwelle) in der Nähe eines Hindernisses.

Streulicht

Durchlässigkeit

Auch Transparenz genannt. Eigenschaft von flüssigen, festen oder gasförmigen Substanzen, Lichtstrahlung ganz oder teilweise passieren zu lassen. Der **Transmissionsgrad** ist das Verhältnis der durchgelassenen zur auffallenden Strahlungsleistung.

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den **Webmaster**.

Extinktion

E_1

Frühere Bezeichnung für spektrales [Absorptionsmass \$A\(\lambda\)\$](#) .
Abschwächung der Strahlung durch [Absorption](#) und
Streuung ([Streulicht](#)) beim Durchgang durch Materie.

m_1

Frühere Bezeichnung für [spektraler Absorptionskoeffizient](#).

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den [Webmaster](#).

ϵ_l

Frühere Bezeichnung für [bezogener, spektraler Absorptionskoeffizient](#).

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den [Webmaster](#).

Farbe

Als Farbe oder Färbung von Flüssigkeiten im Sinne der photometrischen Analysetechnik bezeichnet man ihre optische Eigenschaft, die spektrale Zusammensetzung des sichtbaren [Lichts](#) zu verändern. Infolge der [Absorption](#) bestimmter Wellenlängen des durchscheinenden Lichts weist die Flüssigkeit die entsprechende Komplementärfarbe auf.

Bei der Spektralanalyse interessiert vor allem die durch gelöste Stoffe hervorgerufene Färbung. Ungelöste feindisperse Stoffe können aber infolge des Streulichts ebenfalls eine Färbung verursachen.

[Spektrum](#)
[Trübuna](#)
[Streulicht](#)

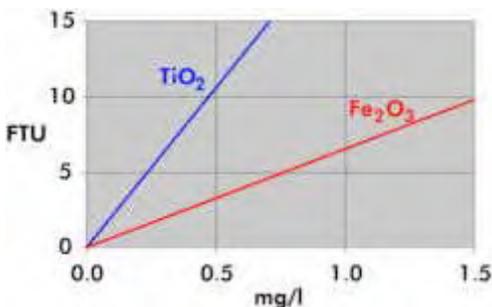
Feststoffkonzentration

Die Bestimmung der Feststoffkonzentration in Flüssigkeiten und Gasen erfolgt gemäss den normierten Methoden mittels Filtration oder Zentrifugation. Der Feststoffanteil wird also abgetrennt, getrocknet und gewogen. Diese Labormethoden haben den Nachteil, dass sie mehrere Stunden beanspruchen und kaum automatisiert werden können.

Die **Trübung** hingegen, welche die Feststoffteilchen verursachen, eignet sich als optische Erscheinung bestens zur *kontinuierlichen* Messung. Die Bestimmung des **Trübungswerts** erfolgt durch die Erfassung des **Streulichts**, entweder als Abschwächung des transmittierten Lichts (Streukoeffizient) oder als Streulichtintensität unter einem bestimmten seitlichen Winkel.

Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem **Trübungswert** und der Feststoffkonzentration einer Suspension, wenn die Eigenschaften der Teilchen, ihr **Brechungsindex** und vor allem ihre **Korngrösse** konstant sind. Die für die Kalibrierung benutzte Standardsuspension Formazin ist ein gutes Beispiel dafür.

Die folgende Kurve zeigt als anderes Beispiel den Zusammenhang zwischen dem **Trübungswert** in FTU und Aufschlämungen von Titanoxid und Eisenoxid (Rost).



Trübungswert in Funktion der Konzentration bei 620nm (Sigrist KTL).

Aber auch weniger homogene Medien wie Oberflächen- oder Grundwasser zeigen eine sehr gute Übereinstimmung ihres Feststoffgehalts mit dem Streulicht. Insbesondere haben verfahrenstechnische Trennverfahren (Filtration, Sedimentation, Zentrifugation, Gaswäsche usw.) die Tendenz, das Korngrössenspektrum einzuengen, was der Reproduzierbarkeit zugute kommt.

In der Abgasaufbereitung beispielsweise ergibt die Streulichtmessung nach Elektrofiltern und Gaswaschanlagen gut reproduzierbare Werte zur Messung der Staubkonzentration.

In jedem Fall, selbst bei stark wechselnder Zusammensetzung wie z.B. in gewissen Industrieabwässern, liefert die kontinuierliche Trübungsmessung ein zuverlässiges Mittel zur Meldung von Konzentrationsstössen.

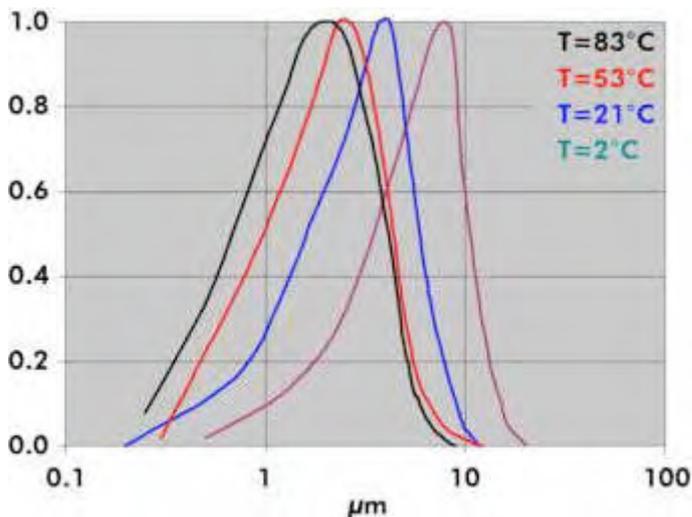
Staubmessung
Rauchgasmessung

Formazin

Die Anzeige der Trübungsmessgeräte erfolgt nicht in Form der gemessenen Lichtintensität, sondern als Konzentration einer Bezugssuspension. Die Genauigkeit dieser Kalibrierlösung bestimmt diejenige der Trübungsmessung und ist deshalb von entscheidender Bedeutung.

Der international festgelegte Trübungsstandard für die Kalibrierung ist Formazin. Dieser Standard kann aus kommerziell erhältlichen Chemikalien gemäss Rezept aus der Norm ISO 7027 (Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Trübung) jederzeit reproduziert werden.

Die Einhaltung der Herstelltemperatur ist dabei von grosser Wichtigkeit, da sie die **Korngrösse** der entstehenden Formazinpartikel fühlbar beeinflusst, wie die folgende Abbildung zeigt. Der daraus resultierende Fehler beträgt $1..2\%K^{-1}$. Aus diesem Grund wird bei Sigrist die Herstelltemperatur auf $\pm 1^{\circ}C$ konstant gehalten.



Korngrössenverteilungen von Formazin für verschiedene Herstellungstemperaturen.

Ein massgebendes Kriterium ist auch die Reinheit des verwendeten Wassers. Vorschriftsmässig filtriertes Wasser weist erfahrungsgemäss noch eine Reststreuung von ca. 0.02 FTU = 20 mFTU auf (Grundaufhellung). Dies ist bei der Kalibrierung und der Messung von sehr kleinen Trübungswerten zu berücksichtigen.

FTU

Abkürzung für "Formazine Turbidity Unit". In der Wasseraufbereitung verwendete Kalibriereinheit auf [Formazin](#)-Basis für Trübungsmessungen im Streulichtverfahren.

[Kalibrierung \(Trübung\)](#)

ail

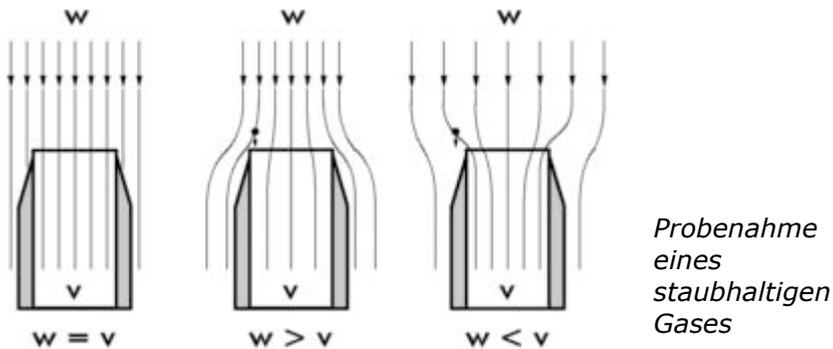
© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu dieser Site richten Sie bitte an den [Webmaster](#).

Isokinetik

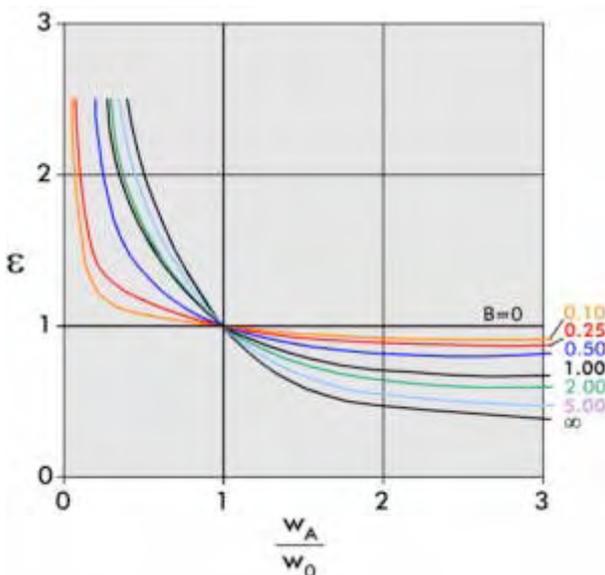
Geschwindigkeitsgleichheit bei der Probenahme eines Gases zur [Staubmessung](#).

Um eine von der Partikelgrösse unabhängige, repräsentative Probenahme sicherzustellen, ist es notwendig, den Teilstrom isokinetisch, also mit gleicher Geschwindigkeit wie der Hauptstrom, zu entnehmen. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Stromlinien in der Nähe einer dünnwandigen Absaugsonde:



Im isokinetischen Fall ($w=v$) werden alle Partikel, die im Bereich des Öffnungsquerschnitts anströmen, auch gesammelt. Im Falle einer zu langsamen Absaugung ($w>v$), können träge Partikel in die Sonde gelangen, obwohl die Stromlinie, auf der sie sich befanden, an der Sonde vorbeigeht. Dadurch werden zu viele grosse (träge) Partikel gesammelt. Ist die Absaugung zu schnell ($w<v$), so können träge Partikel auch hier den Stromlinien nicht mehr folgen und fliegen dadurch an der Sonde vorbei. Dies führt dazu, dass zuwenig grosse Partikel gesammelt werden. Der Fehler, der bei *unterisokinetischer* Entnahme (Mitte) entsteht, ist um ein Vielfaches grösser als im umgekehrten Fall.

Die folgende Abbildung zeigt den relativen Staubgehalt ϵ in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis Teilstrom/Hauptstrom (w_A/w_0) und der Kenngrösse B , welche die Teilchensinkgeschwindigkeit und den Sondendurchmesser enthält.



Fehler bei verschiedenen Geschwindigkeitsverhältnissen

Wie man sieht, ist der Fehler bei gleichen Geschwindigkeiten (Isokinetik) gleich Null und steigt bei kleineren Absauggeschwindigkeiten steil an. Im Bereich der höheren Teilstromgeschwindigkeiten hingegen ist der Fehler kleiner und vor allem ab $w_A/w_0 = 1.5$ praktisch konstant.

Diese Tatsache wird in den Sigrist-Staubmessanlagen ausgenützt, um die

aufwendige isokinetische Probenahme zu vermeiden. Die Entnahme erfolgt immer bei Geschwindigkeiten, welche mindestens das 1.5-fache derjenigen des Hauptstroms betragen. Der absolute Fehler geht dabei in die Kalibrierung des Geräts ein, welche mit dem Messgas vor Ort stattfindet. Rauchgasmessung

Die Teilchensinkgeschwindigkeit (B) beinhaltet auch die **Korngrösse** der Staubpartikel. Je einheitlicher die Korngrößenverteilung ist, desto kleiner wird der entstehende Fehler. Die in der Rauchgasaufbereitung eingesetzten Verfahren (Elektrofilter, Gaswäscher usw.) engen das Korngrössenspektrum ein, was der Reproduzierbarkeit sowohl der Kalibrierung (Feststoffkonzentration vs. Streulicht) als auch der Entnahme zugute kommt.

Kalibrierung (Trübung)

Zur praktischen Interpretation des **Trübungswerts** werden die Trübungsmessgeräte mit einer Standardsuspension kalibriert. Die Anzeige erfolgt somit nicht in Form der gemessenen Lichtintensität, sondern als Konzentration der Kalibriersuspension. Bei der Messung einer beliebigen Suspension bedeutet also die Anzeige, dass die betreffende Flüssigkeit die gleiche Lichtstreuung verursacht wie die Standardsuspension der angezeigten Konzentration.

Der international festgelegte Trübungsstandard ist **Formazin**. Die geläufigsten Einheiten sind:

- **ASBC** - "American Society of Brewing Chemists".
In der Brauerei angewandte amerikanische Einheit.
- **EBC** - "European Brewery Convention".
In der Brauerei angewandte europäische Einheit.
- **FAU** - "Formazine Attenuation Units".
In der Wasseraufbereitung verwendete Einheit für die Durchlichtmessung (Winkel 0°) gemäss den Vorschriften der Norm ISO 7027.
- **FNU** - "Formazine Nephelometric Units".
In der Wasseraufbereitung verwendete Einheit für die Messung bei 90° gemäss den Vorschriften der Norm ISO 7027.
- **FTU** - "Formazine Turbidity Unit".
In der Wasseraufbereitung verwendete Einheit.
- **NTU** - "Nephelometric Turbidity Unit".
In der Wasseraufbereitung verwendete Einheit für die Messung bei 90° gemäss den Vorschriften der US-EPA (Environmental Protection Agency)
- **TE/F** - "Trübungseinheit/Formazin".
Deutsche Einheit, die in der Wasseraufbereitung verwendet wird.

Umrechnungstabelle für die auf Formazin basierenden Einheiten:

1 EBC	1 FNU 1 NTU 1 FTU	1 ASBC	
1	0.25	0.014	EBC
4	1	0.057	FNU NTU FTU
70	17.5	1	ASBC

Eine andere, heute kaum mehr verwendete Kalibriersuspension ist die Aufschlammung von Kieselgur (Einheit "ppm SiO₂"). Die Reproduzierbarkeit ihrer Streulichteigenschaften erfüllt die Anforderungen nicht, welche an eine Standardsuspension gestellt werden

müssen, da die Korngrößenverteilung nicht normiert ist. Kieselgur hat hingegen den Vorteil, dass ihre optischen Eigenschaften denjenigen der natürlichen Trübstoffe im Wasser nahe kommen.

Die Messwerte können nicht direkt mit denjenigen des Formazins verglichen werden. Unter Berücksichtigung des Messwinkels stellen die nachstehenden Umrechnungsfaktoren aber eine gute Annäherung dar.

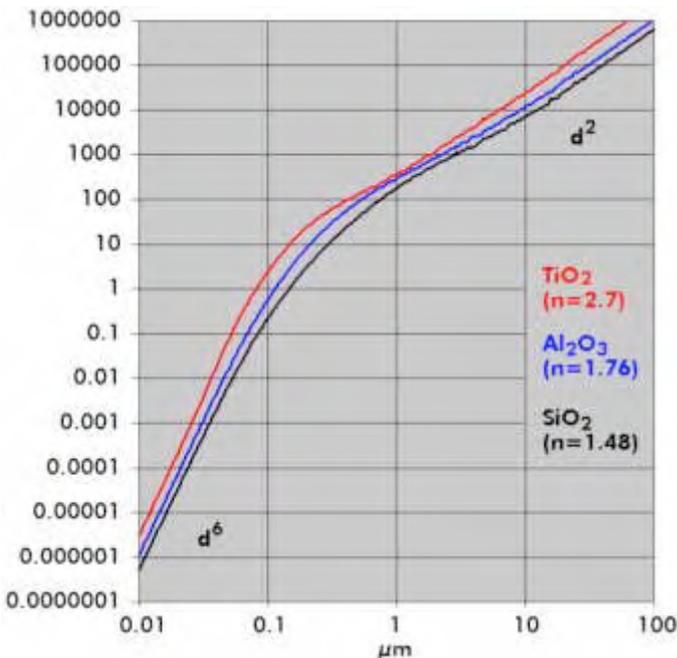
Messwinkel	1 FTU	
25°	2.25	ppm SiO₂
90°	3.25	ppm SiO₂
135°	7.5	ppm SiO₂

Korngrösse

Das **Streulicht** eines Teilchens und damit die **Trübung** einer Suspension hängt stark von der Korngrösse ab.

Verändert sich in einer Suspension die Korngrösse, so kann dies bei konstanter Teilchenzahl oder bei konstantem Teilchengesamtvolumen geschehen. Die erste Situation liegt vor bei Kristallwachstum oder Anlagerung von Wasser (Zahl der Partikel konstant) und die zweite bei Zerfall oder Zusammenballung (Materialmenge konstant). Die Unterscheidung ist wichtig, da die Auswirkung auf die Streuintensität vollständig verschieden ist.

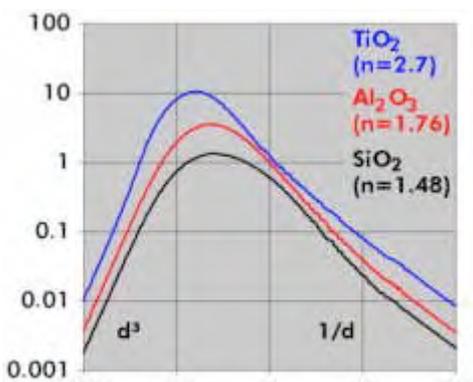
Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Streuintensität verschiedener Materialien vom Teilchendurchmesser bei konstanter Teilchenzahl. Oberhalb $0.3\mu\text{m}$ nimmt das Streulicht proportional zum Querschnitt (Wirkungsquerschnitt) der Partikel zu, also mit dem Quadrat des Durchmessers. Bei extrem kleinen Teilchen von weniger als $0.3\mu\text{m}$ nimmt die Streuintensität mit dem Quadrat des Volumens, also mit der 6. Potenz des Durchmessers zu (Dipolstrahlung).



*Streuintensität bei konstanter Anzahlkonzentration.
 n =Brechungsindex*

- Wellenlänge 550nm
- 90° -Winkel
- Korngrössenverteilung log. normal
- $s = 0.6$

Vollkommen anders wird das Bild bei konstanter Materialmenge (Abbildung unten). Oberhalb des Maximums bei $0.3\mu\text{m}$ nimmt die Streuintensität mit $1/d$ ab, da der Querschnitt der einzelnen Teilchen zwar im Quadrat zu-, die Anzahl aber in der 3. Potenz abnimmt. Unterhalb von $0.3\mu\text{m}$ nimmt die Streuintensität mit der 3. Potenz von d zu.



*Streuintensität bei konstanter Volumenkonzentration.
 n =Brechungsindex*

- Wellenlänge 550nm
- 90° -Winkel
- Korngrössenverteilung log. normal

$$s = 0.6$$

In der Praxis kommen kaum Suspensionen vor, die nur eine Korngrösse enthalten (monodispers). Meistens liegt eine Verteilung von Korngrössen vor (polydispers). Das in den obigen Figuren gezeigte prinzipielle Verhalten bleibt aber im Wesentlichen erhalten.

Lambert-Beer'sches Gesetz

Nach den beiden Wissenschaftlern Johann Heinrich Lambert (1728-1777) und August Beer (1825-1863) benannter Zusammenhang zwischen dem **Absorptionsmass** A , der durchquerten Schichtdicke und der Konzentration des absorbierenden Stoffes:

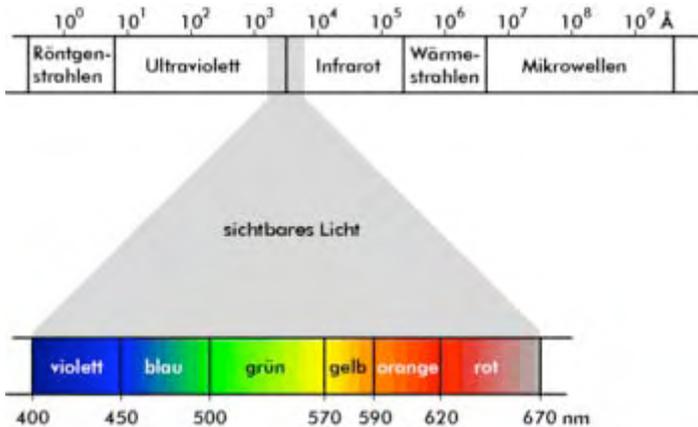
$$A = k \cdot c \cdot d$$

wobei die Konzentration c in Mol/l und die Schichtdicke d in cm eingesetzt werden. Der Proportionalitätsfaktor heisst bezogener, spektraler Absorptionskoeffizient k und ist eine stoffspezifische Funktion der Wellenlänge.

Im geeigneten Konzentrationsbereich und bei Verwendung von monochromatischem Licht ist das Lambert-Beer'sche Gesetz mit hoher Genauigkeit erfüllt. Damit kann durch Messung des Absorptionsmasses A die Konzentration eines gelösten Stoffes in Flüssigkeiten und Gasen bestimmt werden.

Licht

In der Physik betrachtet man das Licht als elektromagnetische Welle, die sich (im Vakuum) mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Befindet sich die Welle in einem Medium, so wird die Ausbreitung durch eine Materialkonstante (den komplexen **Brechungsindex**) bestimmt. Zwei Grössen charakterisieren die elektromagnetische Welle: die Wellenlänge, sie bestimmt die Farbe des Lichts, und die Strahlungsleistung, sie bestimmt die Leistung, die pro Flächeneinheit von der Welle transportiert wird. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts reicht von 400nm (violett) bis 700nm (rot). Mit normalen Photodetektoren wird meist ein grösserer Bereich erfasst (250..800nm).



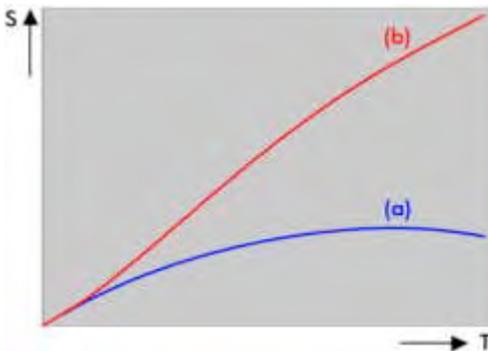
*Spektrum der
elektromagnetischen
Wellen von $1 \cdot 10^9$
Å.*

Licht, welches nur eine Wellenlänge enthält, nennt man monochromatisch (Monochromasie). Polychromatisches Licht besteht aus mehreren Wellenlängen (Polychromasie).

Mehrfachstreuung

Störfaktor bei der Messung des [Trübungswerts](#).

Die einfache Streulichtintensitätsmessung ohne Farbkompensation zeigt bei hohen Trübungswerten vorerst eine Verminderung der Empfindlichkeit und, nach dem Durchlaufen eines Maximums, ein Absinken des Messwerts bei steigender Konzentration (Kurve a). Dies ist auf das Phänomen der Mehrfachstreuung zurückzuführen: einerseits schirmen die der Lichtquelle näher liegenden Partikel das einfallende Licht ab, und andererseits kann sich das Streulicht nicht mehr frei ausbreiten..



*Streulichtverhalten
bei hohen
Trübungen.*

Durchqueren aber zwei Strahlen das Medium, so werden beide durch die Mehrfachstreuung abgeschwächt und es findet keine Umkehrung der Kennlinie statt (Kurve b). Dies hat den Vorteil, dass die Kurve eindeutig bleibt, und somit keine niedrigen Anzeigen für hohe Konzentrationen auftreten.

Mie-Theorie

Nach dem deutschen Physiker Gustav Mie (1868-1957) benannte Theorie der Lichtstreuung an kugelförmigen Teilchen.

Streulicht

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den [Webmaster](#).

Molekularstreuung

Streulicht, das auch in vollständig partikelfreien Gasen und Flüssigkeiten aufgrund der molekularen Unordnung auftritt. Im Falle von Flüssigkeit verursacht diese Dichteschwankungen, welche sich wie Partikel auswirken, an denen das Licht gestreut wird.

Die Molekularstreuung von Wasser beträgt bei einer Wellenlänge von 550nm 16 ± 2 mFTU. Dieser Wert stellt eine theoretische untere Grenze für die durch Filtration erreichbare Trübung dar und hat den Rang einer "Naturkonstanten".

Grundaufhellung
Farbkompensation

ail

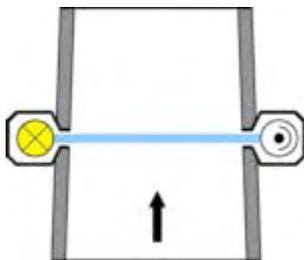
© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den [Webmaster](#).

Rauchgasmessung

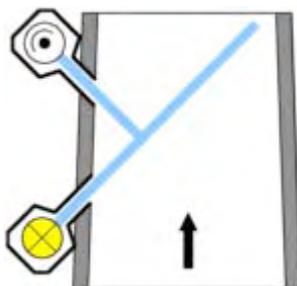
Eine der ältesten Anwendungen der Prozessphotometrie ist die Überwachung des Russgehalts in Kaminen zur Kontrolle der Feuerung.

Das dabei angewandte Prinzip der Transmissionsmessung (Streukoeffizient) beschränkt jedoch den Einsatz dieser sogenannten Opazimeter auf relativ hohe Konzentrationen.



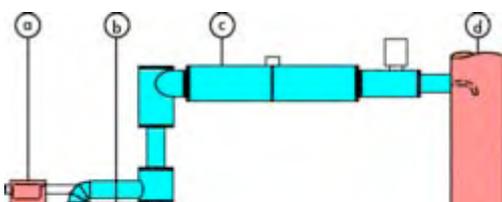
*Durchlichtmessung
(Opazität)*

Moderne Filteranlagen, welche umweltschädliche Stoffe zurückhalten, erfordern aber zur Überwachung der verbleibenden Staubkonzentration Messgeräte höherer Empfindlichkeit. Wesentlich niedrigere Ansprechschwellen als die Durchlichtmethode liefert das Prinzip der Streulichtmessung (**Streulicht**). Diese Erfassung des seitlich gestreuten anstelle des durchgehenden Lichts kann direkt im Kamin, "in situ", oder ausserhalb, "extraktiv", stattfinden. Im ersten Fall befindet sich der Messort nahe an der Kaminwandung, in einer Zone also, wo die Staubkonzentration aus strömungstechnischen Gründen oft nicht repräsentativ ist für den gesamten Kaminquerschnitt. Beim extraktiven Verfahren hingegen erfolgt die Entnahme im Zentrum des Kamins, wo erfahrungsgemäss die besten Voraussetzungen bezüglich der Repräsentativität der Probe bestehen.



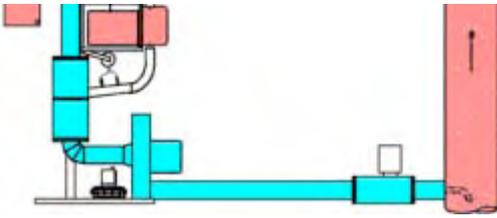
*Streulichtmessung,
in situ*

Die Anwendung aller in situ-Verfahren (Transmission und Streulicht) ist auf trockene Gase beschränkt. Nun werden aber zur Einhaltung der heute geforderten tiefen Emissionsgrenzwerte oft Gaswäscher eingesetzt, welche die Gase abkühlen und mit Feuchtigkeit sättigen. Dadurch sind die Abgase mit feinen Wassertröpfchen durchsetzt, welche die **Staubmessung** verfälschen. Hier kann deshalb nur das extraktive Verfahren angewandt werden. Das Entnahmesystem ist mit Heizern ausgerüstet, welche vor der eigentlichen Messung die Wassertröpfchen durch Verdampfen eliminieren.



*Streulichtmessung
extraktiv mit Aufheizung
des Rauchgases.*

Steuerung



*Ringleitung mit
Heizung*

Abgaskamin

Isokinetik
Russzahl

Rayleigh-Streuung

Theorie der Lichtstreuung für sehr kleine Teilchen ($<0.05\mu\text{m}$).

Streulicht

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den [Webmaster](#).

Reintransmissionsgrad, spektraler

$t_i(\lambda)$

Der spektrale Reintransmissionsgrad $t_i(\lambda)$ ist das Verhältnis der Lichtintensitäten am Austritt $(F_{\lambda})_{\text{ex}}$ und am Eintritt $(F_{\lambda})_{\text{in}}$ in der Messzelle.

$$t_i(\lambda) = (F_{\lambda})_{\text{ex}} / (F_{\lambda})_{\text{in}}$$



Im Gegensatz zum Transmissionsgrad müssen hier die an den Messzellenfenstern auftretenden Reflexionsverluste eliminiert werden. Dies geschieht in der Praxis durch Vergleich mit einer Messung des Trägermediums ohne absorbierendes Produkt.

Reproduzierbarkeit

Genauigkeit der Übereinstimmung zweier Messungen an der gleichen Messsubstanz unter verschiedenen Bedingungen (Messgerät, Ort, Bedienungsart, Zeit). Die ISO-Norm lässt die Wahl dieser Bedingungen frei. Aus diesem Grund hat die Angabe der Reproduzierbarkeit nur dann einen Sinn, wenn die Bedingungen angegeben sind.

ISO im Web

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu dieser Site richten Sie bitte an den [Webmaster](#).

Russzahl

Messeinheit des Schwärzungsgrades gemäss DIN 51402 (Teil 1).

Der Russgehalt von Rauchgas wird bei Einzelmessung durch quantitative Abscheidung auf einem Filter aus Quarzfasermaterial und Messung der Reflexionszahl bestimmt. Durch Umrechnung gemäss VDI 2066, Blatt 8, erhält man die Russzahl.

Die TA Luft schreibt vor, dass leichtölgefeuerte Anlagen im Leistungsbereich von 5 bis 25 MW mit einer kontinuierlichen Messeinrichtung ausgerüstet sein müssen. Diese soll die Einhaltung der Russzahl 1 mit ausreichender Sicherheit erkennen lassen. Dafür wird allgemein die Streulichtmessung angewandt ([Streulicht](#)), sei es direkt im Kamin oder extraktiv, mit Probenahme. Das letztere Verfahren schützt das Photometer vor der Wärme und der Korrosion durch das Rauchgas.

[Staubmessung](#)
Rauchaasmessung
DIN im Web

SAK

Abkürzung für "[spektraler Absorptionskoeffizient](#)". Die DIN 38404 beschreibt die Messung des SAK für die Bestimmung von Färbung und - bei 254 nm - der organischen Belastung eines Gewässers. Wird als Summenparameter in der Trinkwasseraufbereitung und der Abwasserbehandlung eingesetzt.

DIN im Web

ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu dieser Site richten Sie bitte an den [Webmaster](#).

Spektrum

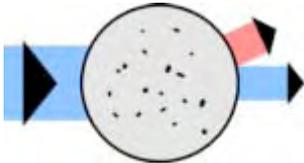
Verteilung der Intensität einer elektromagnetischen Strahlung über der Wellenlänge. Der für die industrielle Photometrie interessierende Bereich umfasst die Lichtwellen, d.h. das sichtbare, das ultraviolette und das infrarote [Licht](#). Mit Prismen oder Gitter erzeugte Spektren machen die Spektralfarben des verwendeten Lichts sichtbar, beginnend beim kurzwelligigen Violett über Blau, Grün, Gelb, Orange bis zum langwelligen Rot.

[Absorptionsspektralanalyse](#)

Staubmessung

Bestimmung der **Feststoffkonzentration** in Gasen mittels Streulichtmessung. **Streulicht**

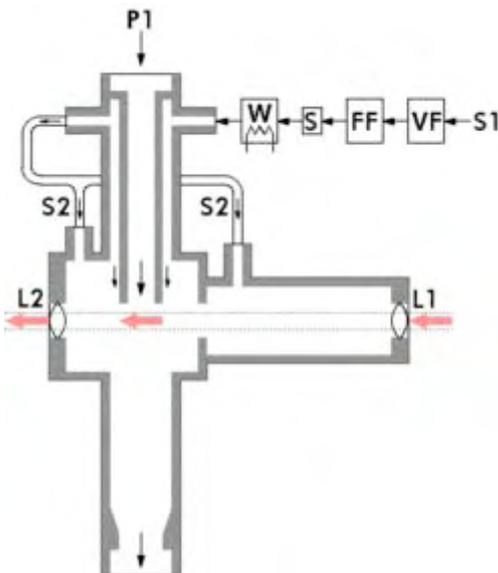
Die Erfassung der Streulichtintensität gestattet die Messung niedriger Staubkonzentrationen in Luft. Sie findet in der Praxis Anwendung für die Rauchgasmessung, die Bestimmung der Sichtweite in Strassentunnels, die Überwachung von Filteranlagen für umweltschädliche Stoffe (Insektizide, Farbstoffe, Chemikalien) aus Fabrikationsprozessen. Aber auch Aerosole von Flüssigkeiten wie Schwefelsäurenebel in Abgasen und Önebel in Maschinenräumen von Schiffen werden auf diese Weise gemessen.



*Staubmessung
mit 15°-
Streuwinkel*

Das Sigrist-Staubmessgerät misst unter einem **Streuwinkel** von 15° und deckt einen Messumfang von 0..0.1 bis 0..1000 mg/m³ PLA ab. PLA steht für Polystyrol-Latex-Aerosol und bezeichnet das für die Werkskalibrierung verwendete Aerosol (kugelförmige Partikel mit einem Durchmesser von 1µm).

Die Geräte werden vor Ort mit der zu messenden Abluft kalibriert. Es ist hier interessant festzustellen, dass auch schwarze Teilchen das Licht streuen. Elementarer Kohlenstoff in den verschiedensten Formen wie z.B. Russ, Graphit oder Aktivkohle erzeugt Streulichtintensitäten von der gleichen Grössenordnung wie die weisse Kieselgur. Teilchenfarbe



*Messzelle mit
Spüllufteinrichtung
für die
Staubmessung*

Die Probenahme erfolgt extraktiv; die Messung findet also ausserhalb des Prozesses statt, vor Wärme, Korrosion und Verschmutzung geschützt. Die Messzelle ist mit einer Spüllufteinrichtung ausgerüstet, welche die Ablagerung von Staub an den optischen Teilen verhindert, wie obige Abbildung zeigt. Das Gebläse saugt gleichzeitig mit der Probe Umgebungsluft an, die, filtriert und erwärmt, den Probenstrom

mit einem schützenden Mantel umgibt. Sie wird auch bei S2 eingeführt, und bildet so eine bevorzugte Strömung in Richtung des Austritts der Messzelle.

Isokinetik
Russzahl

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

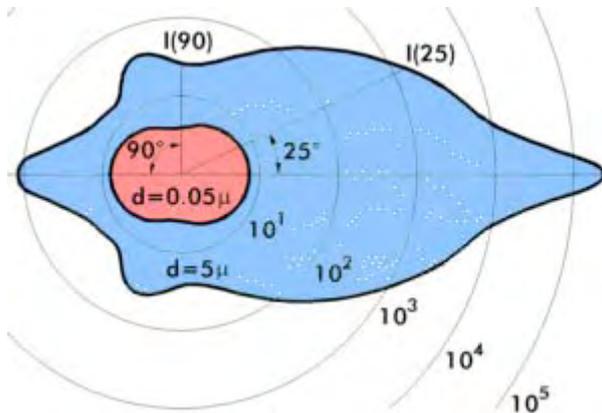
Fragen und Kommentare zu dieser Site richten Sie bitte an den [Webmaster](#).

Streuwinkel

Der Streuwinkel bezeichnet den Winkel zwischen der beobachteten Streurichtung und der Austrittsachse des Durchlichts:



Das Polardiagramm in der folgenden Abbildung zeigt die Winkelabhängigkeit der Streuintensität für zwei Partikeldurchmesser:



Winkelabhängigkeit der Streulichtintensität für polydisperse Suspensionen von SiO₂ in Wasser. Die gesamte Massenkonzentration ist in beiden Fällen gleich. Wellenlänge: 550 nm.

Wie man sieht, streuen sehr kleine Partikel in allen Richtungen annähernd gleich stark. Bei wachsendem Durchmesser nimmt die Streuintensität nicht nur global zu, sondern verstärkt sich wesentlich mit abnehmendem Streuwinkel.

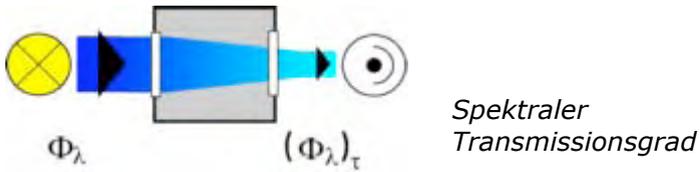
Diese Erscheinung wird im Aufbau von Trübungsmessgeräten zur Erhöhung der Empfindlichkeit genutzt: je kleiner der Messwinkel, umso grösser die verfügbare Lichtmenge. Die Grenze ist durch das Auftreten des sogenannten Störlichts gesetzt, welches in der Nähe des transmittierten Strahls stark zunimmt.

Durch die Messung des Streulichts unter zwei verschiedenen Winkeln (z.B. 90° und 25°) kann durch Verhältnisbildung eine Aussage über die Korngrösse gemacht werden. Eine praktische Anwendung dieser Zweiwinkelmessung ist die Überwachung der Bierfiltration.

Transmissionsgrad, spektraler

Verhältnis des durchgelassenen spektralen Strahlungsflusses $(F_l)_t$ zum auffallenden spektralen Strahlungsfluss F_l .

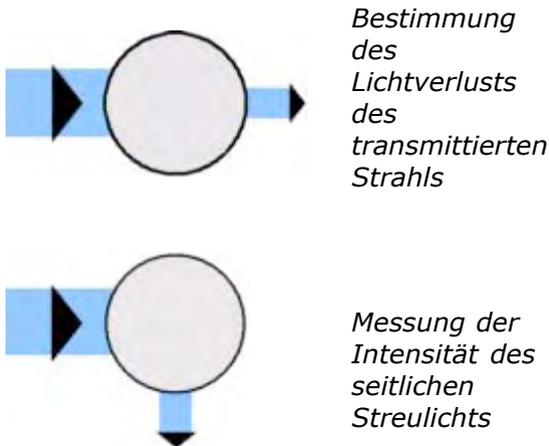
$$t(l) = (F_l)_t / F_l$$



Der Transmissionsgrad wird vielfach neben dem spektralen [Absorptionsmass](#) (früher Extinktion) an den Photometern angezeigt.

Trübungswert

Mit dem Trübungswert wird das qualitative Phänomen der **Trübung** quantitativ erfasst. Das Ziel der Trübungsmessung ist es, Aussagen über den Gehalt an streuenden Partikeln zu erhalten (Feststoffkonzentration). Dies kann durch zwei grundsätzlich verschiedene Messmethoden erreicht werden: die Bestimmung des Lichtverlusts des transmittierten Strahls (Streukoeffizient) und die Messung der Intensität des seitlichen Streulichts. Der Streukoeffizient entspricht der Gesamtheit des Streulichts, das dem einfallenden Strahl entzogen wurde, während die Streuintensität angibt, wieviel **Streulicht** unter einem bestimmten Winkel abgelenkt wird.



*Bestimmung
des
Lichtverlusts
des
transmittierten
Strahls*

*Messung der
Intensität des
seitlichen
Streulichts*

Beide Größen sind proportional zur Konzentration der Partikel und damit zur Trübungsmessung geeignet. Sie unterscheiden sich durch ihre Anwendbarkeit in verschiedenen Konzentrationsbereichen. Die Messung der Streuintensität gestattet die Erfassung kleiner Konzentrationen, während die Transmissionsmessung den hohen Konzentrationen vorbehalten ist. Der Grund hierfür ist das Phänomen der Mehrfachstreuung: bei kleinen Konzentrationen kann sich das gestreute **Licht** jedes einzelnen Teilchens frei fortsetzen (Einfachstreuung); bei höheren Konzentrationen hingegen schirmen einerseits die der Lichtquelle näher liegenden Partikel das einfallende Licht ab, und andererseits kann sich das Streulicht nicht mehr frei ausbreiten. Somit nimmt die Streuintensität nicht mehr proportional zur Konzentration zu.

Die Grenze der Einfachstreuung liegt bei ca. 10 FTU. Praktisch wird jedoch die Streuintensitätsmessung dank elektronischer Linearisierung für wesentlich höhere Messbereiche (bis zu 2000 FTU) angewandt. Der niedrigste messbare Wert hängt vom Störlicht ab.

Die Messung des Lichtverlustes des transmittierten Strahls gestattet die Erfassung hoher Konzentrationen, ist aber gegen unten beschränkt, da eine messtechnisch erfassbare Verminderung des Durchlichts eine grosse Anzahl Partikel erfordert. In der Praxis deckt die Transmissionsmessung einen Bereich von 50 bis 20,000 FTU ab.

Zur praktischen Interpretation des Trübungswerts dient der

Vergleich mit einer Standardsuspension, d.h. die Trübungsmessgeräte werden mit einer Vergleichslösung (meist Formazin) kalibriert. Ein mit Formazin kalibriertes Instrument misst jede Formazinkonzentration korrekt. Bei anderen trüben Medien kann man aus dem Trübungswert nicht direkt auf die Feststoffkonzentration schliessen, da der Messwert auch von der [Korngrösse](#) und dem [Brechungsindex](#) der Partikel gegenüber dem Medium beeinflusst wird.

Sollen Messwerte verschiedener Geräte miteinander verglichen werden, so ist das nur dann zulässig, wenn diese die gleichen Eigenschaften aufweisen bezüglich der [Wellenlänge](#) des Lichts, des [Streuwinkels](#), der optischen Anordnung, der Kalibrierung und der Farbkompensation. Für kontinuierliche Messungen in industriellen Prozessen ist ausserdem das angewandte Messverfahren (Photometer) wegen der Ansprüche an die Stabilität von grosser Wichtigkeit.

Transmission

Durchlässigkeit eines Mediums für optische Strahlung.
Bezeichnet den Anteil des einfallenden Strahlungsflusses,
welcher nach dem Durchqueren der Probe wieder austritt.

Transmissionsgrad

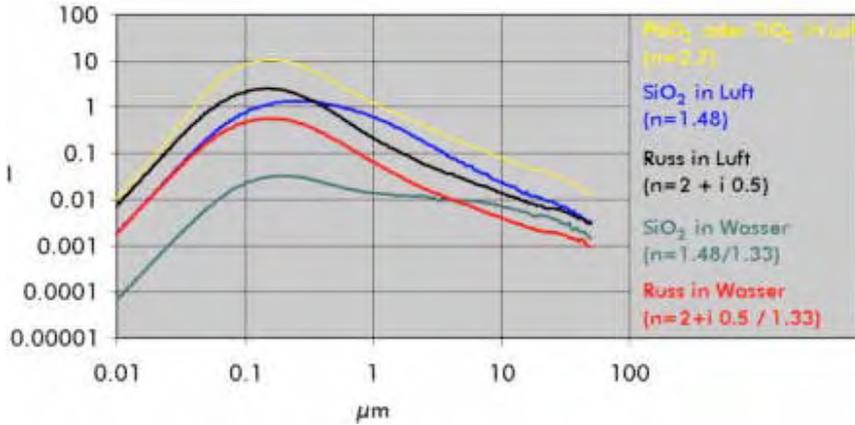
ail

© Sigrist-Photometer AG, CH-6373 Ennetbürgen
Zuletzt geändert am Freitag, 12. März 2004.

Fragen und Kommentare zu
dieser Site richten Sie bitte
an den [Webmaster](#).

Der Einfluss der Farbe der Partikel auf die Intensität des von ihnen abgestrahlten **Streulichts** wird leicht überschätzt. So stösst die Aussage, dass auch schwarze Teilchen das Licht streuen, oft auf Skepsis. Tatsächlich erzeugt aber elementarer Kohlenstoff in verschiedenen Formen (Russ, Graphit, Kohle) Streulicht von der gleichen Grössenordnung wie die weisse Kieselgur SiO_2 . **Staubmessung**

Die folgende Abbildung zeigt die Streuintensitäten von Russ und weissen Produkten verschiedener Korngrössen in Luft und Wasser:



Streuintensität verschiedener Materialien, Konzentration = 1000 ppm. n=Brechungsindex.

In unserem Haus durchgeführte Laborversuche haben ergeben, dass die nachstehenden Mengen von Kohle verschiedener Körnung in Wasser die gleiche Streulichtintensität abgeben wie 10mg/l Kieselgur SiO_2 :

Aktivkohle, grobkörnig >10 μm	20 mg/l
Kohlestaub, Körnung $\sim 1\mu\text{m}$	0.7 mg/l
Graphit, feinkörnig < 0,1 μm	5 mg/l

Die Zahlen sind ungefähre Werte und spiegeln die starke Abhängigkeit der Streuung von der Korngrösse wider.

Brechunasindex
Staubmessung

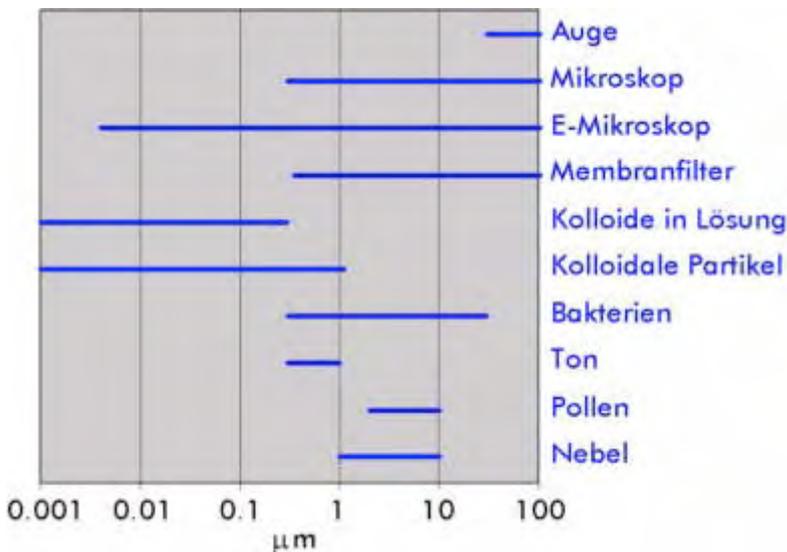
Trübung

Verminderung der Sichtweite in einem transparenten Medium durch Streustrahlung und **Absorption**, die von optisch dichteren Einlagerungen, z.B. Partikeln, verursacht wird.

Trübung ist eine alltägliche Erscheinung. Wir beschreiben sie mit Attributen wie: schlecht durchsichtig, kontrastvermindernd, seitlich leuchtend, farbgebend usw. Verantwortlich für diese Effekte ist das optische Phänomen der Lichtstreuung. Die schönsten Beispiele von **Streulicht** sind das Blau des Himmels und das Rot des Sonnenuntergangs.

Enthält ein flüssiges oder gasförmiges Trägermedium fremde Substanzen, so können diese entweder gelöst sein oder als suspendierte Teilchen auftreten. Die kleinsten Teilchen im Falle der Lösung sind Moleküle (oder Ionen) und im Falle der Suspension Partikel (meist Millionen von Molekülen). Die Unterscheidung zwischen Lösung und Suspension ist eine Frage der Teilchengrösse. Die Grenze ist fließend und variiert je nach Autor.

Für die Verfahrenstechnik ist die Unterscheidung wichtig, ob die betreffende Substanz filtrierbar ist. Nicht filtrierbare Suspensionen nennt man kolloidale Lösungen. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Grenzen der Erkennbarkeit mit verschiedenen Verfahren sowie den Korngrössenbereich einiger Substanzen. Korngrösse



*Korngrössenbereich
verschiedener
Erkennungsverfahren
und Substanzen*

Mit dem Trübungswert (Einheiten FNU, FTU, EBC usw.) wird dieses qualitative Phänomen quantitativ erfasst.

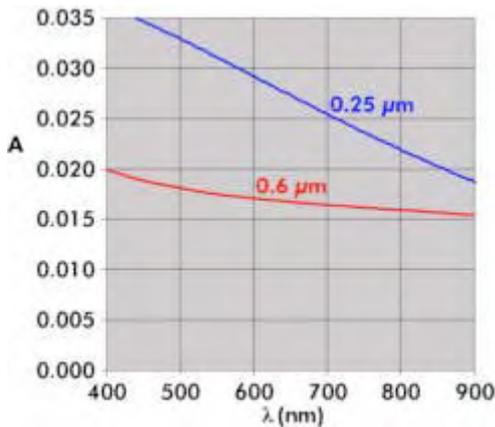
Wellenlänge (Streuung)

Bei der Bestimmung des Trübungswerts durch Messung der Streulichtintensität (**Streulicht**) hat die Wellenlänge des verwendeten **Lichts** neben der Anzahl Teilchen, deren **Korngröße** und **Brechungsindex** einen gewissen Einfluss.

Die Streuintensität hängt einerseits vom Verhältnis aus dem Durchmesser d der Partikel und der Wellenlänge ab und nimmt andererseits mit dem Quadrat der Wellenlänge zu:

$$I_{sc} = I^2 \cdot I_{sc}(d, \lambda)$$

Die Abhängigkeit von der Wellenlänge verhält sich invers zur **Korngröße** d . Der Faktor I^2 wirkt jedoch dämpfend, so dass die Streuintensität im sichtbaren Bereich nicht sehr stark von der Wellenlänge abhängt, wie folgende Abbildung zeigt:



*Streuintensität
(A) in Funktion
der Wellenlänge*

I
für 2
Korngrößen
von SiO_2 .

*(1000 ppm,
90°, $n=1.48$ in
Wasser, log.
norm.*

S
= 0.6)