

Zur Grobabschätzung von Schwebstaubkonzentrationen aus Sichtweitenbeobachtungen

Wolfgang von Hoyningen-Huene

Zusammenfassung:

Ein Weg zur Abschätzung von Schwebstaubkonzentrationen aus Sichtweitenbeobachtungen in einer belasteten Atmosphäre auf der Basis der Sichtweitentheorie nach Koschmieder, 1925 unter Berücksichtigung der Feuchtigkeit wird beschrieben.

Summary:

An approach for the estimation of concentrations of particulate matter in a polluted atmosphere has been described basing on the view range by the Koschmieder formula under consideration of the relative humidity.

1. Einführung

In manchen Fällen, wenn keine oder keine zuverlässigen Meßgeräte zur Verfügung stehen oder wenn Zweifel an angegebenen Meßwerten bestehen, kann die Sichtweite zu einer Grobabschätzung von Schwebstaubkonzentrationen und zur groben Bewertung von Belastungssituationen herangezogen werden. Dabei sollte man sich im Klaren sein, daß die Sichtweite selbst eine subjektive Größe ist, wenn sie aus einer visuellen Beobachtung stammt. Ebenso ist die Sichtweite Ausdruck des Feuchteinflusses auf das atmosphärische Aerosol.

Eine solche Situation tritt dann auf, wenn z.B., wie in den Waldbrandgebieten Südostasiens, Bewertungen der Umweltsituation anzufertigen sind, jedoch keine oder nur unvollkommene Meßdaten verfügbar sind, bzw. es auch nicht möglich ist, entsprechende Meßgeräte an Ort und Stelle zu bringen.

Die hier vorgestellte Methode zur Grobeinschätzung von Schwebstaubkonzentrationen setzt sich aus verschiedenen Teilschritten zusammen, die zu einer Gesamtaussage vereint worden sind:

1. Sichtweitentheorie nach KOSCHMIEDER, 1925 und der darauf aufbauenden Bestimmung des aktuellen Extinktionskoeffizienten der Luft,
2. Korrektur des Feuchteinflusses auf den Extinktionskoeffizienten, d.h. Berechnung eines feuchtenormierten Extinktionskoeffizienten,
3. Anwendung von empirischen Korrelationsbeziehungen zwischen feuchtenormierten Extinktionskoeffizienten und Schwebstaubkonzentrationen.

Während für unsere Untersuchungen im Rahmen des SANA-Projekts (SANA = Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern) der Extinktionskoeffizient mit Hilfe einer LASER-Transmissionsstrecke in Leipzig bestimmt wurde und damit eine objektivere Grundlage hatte als eine Sichtweitenbeobachtung, ist aber generell

das Vorgehen analog, vgl. UHLIG & von HOYNINGEN-HUENE, 1993, UHLIG et al., 1994, von HOYNINGEN-HUENE, 1996, STETTLER & von HOYNINGEN-HUENE, 1994. Ein ähnliches Vorgehen ist auch zu empfehlen, wenn Daten eines Sichtweitenmeßgeräts z.B. an einem Flughafen zur Verfügung stehen, die gerade wenn geringe Sichtweiten vorliegen zuverlässiger sind als die visuelle Beobachtung.

2. Darstellung der Methodik

Im folgenden sollen die 3 Teilschritte dargestellt und kommentiert werden, damit eine individuelle Einschätzung der Toleranzbereiche für die Gesamtaussage möglich wird.

a) Bestimmung des Extinktionskoeffizienten der Luft aus der Sichtweite

Entsprechend der Sichtweitentheorie nach KOSCHMIEDER, 1925 ergibt sich der Extinktionskoeffizient der Luft a_{ext} aus der Horizontalsichtweite VV als:

$$a_{\text{ext}} [1/\text{km}] = 3,912 / \text{VV} [\text{km}]. \quad (1)$$

Dabei ist der Faktor 3,912 von Koschmieder für eine Kontrastschwelle des menschlichen Auges von 0,02 ermittelt worden. Koschmieder definierte die Sicht als die Entfernung in der ein schwarzes Objekt mit der angegebenen Kontrastschwelle gerade noch vom grauen Hintergrund des Himmelslichts (am Horizont) sichtbar ist. Da man aber im Bereich der Technik (vor allem im Luft- und Straßenverkehr) eine größere Sicherheit bei der individuellen Erkennbarkeit von Objekten bevorzugt (ILO-Standard), wird für diese Zwecke eine Kontrastschwelle von 0.05 verwendet und die Beziehung von Koschmieder modifiziert sich zu

$$a_{\text{ext}} [1/\text{km}] = 2,97 / \text{VV} [\text{km}]. \quad (2)$$

Die Beziehung (2) liefert kleinere Extinktionskoeffizienten, die aber besser mit denen unserer Laser-Transmissionsstrecke in Leipzig übereinstimmen und auch mit den Angaben von Sichtweitenmeßgeräten konform gehen sollten, da diese auch den ILO-Standard verwenden.

Dieser Extinktionskoeffizient bezieht sich auf die aktuelle relative Feuchte und ist daher sehr variabel. Um den Extinktionskoeffizienten des Aerosols zu erhalten müßte, theoretisch von diesem Wert der Extinktionskoeffizient der Luftmoleküle (Rayleighstreuung) abgezogen werden. Dieser Wert ist für Normaldruck und eine Wellenlänge von 550 nm

$$a_{\text{ext-Rayleigh}} = 0,012 [1/\text{km}]$$

und ist daher nur bei großen Sichtweiten zu berücksichtigen.

$$a_{\text{ext_Aerosol}} = a_{\text{ext}} - a_{\text{ext_Rayleigh}} \quad (3)$$

b) Bestimmung des feuchtenormierten Extinktionskoeffizienten

Um den gemessenen oder aus Beobachtungen abgeleiteten Extinktionskoeffizienten vom variablen Einfluß der relativen Feuchte f zu befreien, wurden von uns erfolgreich die Beziehungen von HÄNEL, 1976, 1984 für den Feuchteeinfluß verwendet. Vor allem die Parametrisierungen für 'urban' Aerosol in der Arbeit von 1984 ließen den Feuchteeinfluß in den Meßreihen aus

Leipzig nahezu verschwinden und waren daher für eine Feuchtekorrektur in Leipzig geeignet, vgl. UHLIG et al. 1994. Der feuchtenormierte Extinktionskoeffizient für das 'urban' Modell ergibt sich nach HÄNEL als

$$a_{\text{ext}}(f=0) = B (1-f)^{-A} a_{\text{ext_Aerosol}} \quad (4 \text{ a})$$

für relative Feuchten $0,7 < f < 0,99$. Dabei sind für das 'urban' Modell folgende Koeffizienten für A und B angegeben worden: $A = 0,7585$, $B = 0,6648$. Diese Potenzbeziehung beschreibt den starken nichtlinearen Anstieg der Extinktion mit der Feuchte bei hohen Luftfechtigkeiten.

Für relative Feuchten $f < 0,7$ wird die folgende Beziehung verwendet:

$$a_{\text{ext}}(f=0) = D (1-f)^{-C} * a_{\text{ext_Aerosol}} \quad (4 \text{ b})$$

Der Koeffizient C ergibt sich aus A und B als $C = A - \ln(B/0,3)$. D ist nicht in den Modellen von HÄNEL enthalten und ist aus unseren empirischen Befunden und aus Kontinuitätsgründen bei der Feuchte $f = 0,7$ bestimmt worden: $D = 1,735$.

Mit dieser Feuchtekorrektur ließen sich Extinktionskoeffizienten von der Laser-Transmissionsstrecke und von Aerosol-Filterproben vergleichen und gestatteten dann Beziehungen zwischen Schwebstaubkonzentrationen und Extinktionskoeffizienten abzuleiten.

c) Schwebstaubkonzentration und Extinktionskoeffizient

Eine theoretische Ableitung einer solchen Beziehung zwischen Extinktionskoeffizient und Schwebstaubkonzentration M ist prinzipiell über die Zugrundelegung der Lichtstreuungstheorie (Mie-Theorie) bei Kenntnis der Aerosolgrößenverteilung und des mittleren effektiven Brechungsindex durch Lösung der Fredholm'schen Integralgleichung möglich. Jedoch in Fällen, wie sie in der Einführung beschrieben sind, fehlen die benötigten Angaben. Daher sind empirisch aus Experimenten abgeleitet Korrelationsbeziehungen günstiger, wenn auch sie sich auf bestimmte Aerosoltypen beziehen, unter denen die Experimente durchgeführt wurden.

M ist hier als Total Particulate Matter TPM zu verstehen.

Eine solche Beziehung ist z.B. von GRIGGS, 1975, 1979 für marines Aerosol für die Bestimmung von Aerosolkonzentrationen aus Satellitendaten über dem Ozean aus Konzentrationsmessungen und den optischen Dicken abgeleitet worden. Dabei wurde das Aerosolmodell 'maritime' von ELTERMANN, 1970 verwendet:

$$M [\mu\text{g}/\text{m}^3] = 420 [(\mu\text{g} * \text{km})/\text{m}^3] * a_{\text{ext}}(f=0) [1/\text{km}]. \quad (5\text{a})$$

Generell ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Extinktionskoeffizient und Aerosolmasse der Kehrwert der spezifischen Extinktion E.

$$M [\mu\text{g}/\text{m}^3] = a_{\text{ext}}(f=0) [1/\text{km}] / E [\text{m}^3 / (\mu\text{g} * \text{km})]. \quad (5)$$

Für eine adäquate Verwendung dieser Beziehung ist die zutreffende spezifische Extinktion E für den vorherrschenden Belastungsfall erforderlich. Da die Beziehung von GRIGGS in erster Linie für maritimes Aerosol entwickelt wurde und daher die spezifische Extinktion für diesen Fall verwendet, ist sie nicht unbedingt die günstigste für den Fall des Waldbrand-Haze.

Bei den experimentellen Untersuchungen mit Hilfe der Laser-Transmissionsstrecke in Leipzig wurden direkt Korrelationsbeziehungen zwischen Schwebstaubkonzentrationen als TPM und dem feuchtenormierten Extinktionskoeffizienten in einer belasteten Atmosphäre abgeleitet. Die TPM-Werte stammten dort aus β -Absorptionsmessungen, die vom Umweltfachamt Leipzig durchgeführt wurden, die feuchtenormierten Extinktionskoeffizienten von der Laser-Transmissionsstrecke, die während des SANA-Projekts in Leipzig betrieben wurde.

Dabei konnte eine Veränderung der spezifischen Extinktion im Zeitraum von 1991 bis 1995 beobachtet werden. 1995 hatte sich die Situation an Verhältnisse angenähert, wie sie z.B. in Berlin-Dahlem gemessen wurden, 1991 und 1992 waren signifikant kleinere Werte vorherrschend.

Aus den Leipziger Messungen ergaben sich folgende spezifische Extinktionen E bez. Proportionalitätsfaktoren 1/E:

Tabelle 1: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Extinktion und des daraus resultierenden Proportionalitätsfaktors zwischen feuchtenormiertem Extinktionskoeffizienten und der Schwebstaubkonzentration

Jahr	E [m ² /g]	1/E [µg*km / m ³]
1991	3,33	300
1992	3,50	285
1993	2,37	422
1994	2,81	356
1995	2,42	413
Berlin	2,35	425

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, daß große spezifische Extinktionen (kleine Proportionalitätsfaktoren) für solche Gebiete gefunden wurden, in denen ein hoher Rußanteil im Aerosol vorhanden ist, wie in den neuen Bundesländern in den Jahren 1991 und 1992. Ähnliches wird auch in den Arbeiten von TRIER & HORVATH, 1993 bestätigt. Daher ist die Beziehung von GRIGGS (5a) mehr für remote conditions zutreffend und nicht für den Waldbrand-Haze. Hierfür sind Werte aus den Leipziger Messungen der Jahre 1991 und 1992 besser geeignet, da sie für höhere Trübungszustände und auch für einen höheren Rußgehalt im Aerosol zutreffend sind.

Daher wird für die Abschätzung von Schwebstaubkonzentrationen aus dem Waldbrand-Haze die folgende Relation vorgeschlagen:

$$M [\mu\text{g}/\text{m}^3] = 300 a_{\text{ext}} (f = 0) [1/\text{km}]. \quad (5b)$$

Die Daten des Jahres 1992 weisen darauf hin, daß noch kleinere Proportionalitätsfaktoren gefunden wurden. Leider liegen keine verlässlichen mittleren Angaben zur spezifischen Extinktion für den Zeitraum vor 1991 vor, so daß vorgeschlagen wird, den Wert von 300 zu verwenden anstatt der 420, wie in der GRIGGS'schen Beziehung, sofern keine bessere Datenbasis zur Verfügung steht.

3. Zusammengefaßte Schwebstaubabschätzung aus der Sichtweite unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses

Fassen wir die Betrachtungen von 2 a - c zusammen, so erhält man folgende Relation, die den Feuchteinfluß in Rechnung stellt:

$$M = 300 * 2.97 / VV / (B * (1 - f)^{-A}) \quad \text{für } 0,99 > f > 0,7 \quad (6a)$$

und

$$M = 300 * 2.97 / VV / (D * (1 - f)^{-C}) \quad \text{für } f < 0,7. \quad (6b)$$

Die Einheiten sind, wenn die Koeffizienten wie vorstehend verwendet werden, M - die Aerosolmasse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, VV - die Sichtweite in km und f - die relative Feuchte als Mischungsverhältnis (< 1).

4. Diskussion von Ergebnissen

Die folgenden Ergebnisse sind Berechnungen für die resultierende Schwebstaubkonzentration bei verschiedenen relativen Feuchten f und für verschiedene Sichtweite VV. Sie zeigen, daß der Feuchteinfluß einen großen Einfluß hat und eine ungenügende Kenntnis der Feuchte, vor allem im Bereich $f > 0,8$ zu erheblichen Fehlern von mehr als 100 % für die abzuschätzende Schwebstaubkonzentration führt. Dieser Effekt setzt sich fort für Feuchten $f > 0,98$.

Eine Erweiterung für noch kleinere Sichtweiten ist formal möglich. Dann sollte aber die Sichtweite mit einem Sichtweitenmeßgerät bestimmt werden, weil die subjektive Bewertung zu großen Unterschieden in der angegebenen Sichtweite mit Konsequenzen für die Konzentrationsabschätzung führt.

Tabelle 2: Berechnete Schwebstaubkonzentrationen für gegebene Sichtweiten und verschiedene relative Feuchten unter Zugrundelegung von Gleichung 6a und 6b.

f =	M $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$									
	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,98	
VV [km]										
10	51	53	53	54	40	32	23	14	7	
5	103	106	107	108	79	64	47	28	14	
4	129	132	133	134	99	80	58	35	17	
3	172	176	177	179	132	106	78	46	23	
2,5	206	211	213	215	158	127	94	55	28	
2	257	269	266	269	198	159	116	69	35	
1,5	343	352	355	359	264	212	156	92	46	
1	514	528	532	538	395	318	234	138	69	
0,7	735	754	760	768	565	454	334	197	99	
0,5	1.029	1.056	1.065	1.076	791	636	467	276	138	
0,4	1.286	1.320	1.331	1.344	989	795	584	345	172	
0,3	1.715	1.760	1.774	1.793	1.318	1.060	779	461	230	
0,2	2.572	2.639	2.661	2.689	1.977	1.589	1.169	691	345	
0,1	5.144	5.279	5.323	5.378	3.954	3.179	2.337	1.382	690	
0,05	10.289	10.558	10.646	10.755	7.908	6.357	4.674	2.763	1.379	

Immerhin werden aus den direkt betroffenen Stationen Jambi und Palangkaraya auf Sumatra und Borneo Schwebstaubkonzentrationen von 2000 bis 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemeldet, die nach den angestellten Betrachtungen im Zusammenhang mit Sichtweitenbewertung auch über diesen Weg zu realistischeren Grobabschätzungen führen können.

Ein Fehler in der Sichtweitenbestimmung von 10 m bei einer Sichtweite von 50 m liefert ungefähr 30 % Abweichung im Resultat bezüglich der Schwebstaubkonzentration. Noch größer ist die Abweichung bei der relativen Feuchte im Bereich hoher Feuchten. Ein Fehler von 0,01 in der relativen Feuchte bringt bei $f = 0,98$ 35 % Abweichung in der Schwebstaubkonzentration. Daher ist gerade im Fall geringer Sichtweiten und hoher relativer Feuchten mit einem Gesamtfehler von nahezu 100 % zu rechnen. Dieser Fehler nimmt ab mit zunehmender Sichtweite und sinkender relativer Feuchte.

Weiterhin ist es denkbar, daß in den Waldbrandgebieten von Indonesien noch größere spezifische Extinktionen (kleinere Proportionalitätsfaktoren) anzusetzen sind, als sie sich aus den Leipziger Untersuchungen mit der Laser-Transmissionsstrecke ergeben haben. Selbst hier ist in Leipzig 1992 ein Mittelwert von $E = 3,50 \text{ m}^2/\text{g}$ ($285 \mu\text{g}\cdot\text{km}/\text{m}^3$) gefunden worden. Jedoch sind die 5 % derzeit nicht der Hauptfehler. Ein Weg zu Präzisierung der spezifischen Extinktion wären simultane Messungen von Schwebstaubkonzentrationen und spektraler Transmission in der atmosphärischen Grundschicht, die der experimentellen Bestimmung des Extinktionskoeffizienten dient, analog der in Leipzig bei SANA praktizierte Herangehensweise.

Dank

Dem BMBF und den Mitarbeitern der Deutschen Botschaften von Kuala Lumpur und Jakarta möchte ich für die schnelle Unterstützung bei der Realisierung der ad-hoc Effect-Finding Mission in Südostasien danken, den Mitarbeitern der GTZ Jakarta, insbesondere Herrn Auge, Frau Ellen Kramer, Herrn Dieterle und Herrn H. Hanke für die Diskussion und Anregung, eine solche Problemstellung anzugehen.

Literatur:

Eltermann, L.: Vertical Attenuation Model with eight surface meteorological ranges 2 to 13 kilometers. AFCRL-70-0200, AD 70 7088, 1970.

Griggs, M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data. Air Pollution Control Ass. Journal 25 (1975) 622-626.

Griggs, M.: Satellite observations of atmospheric aerosols during the EOMET cruise. Atmosph. Sci. 36 (1979) 695-698.

Hänel, G.: The properties of atmospheric aerosol particles as functions of relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air. Adv. Geophys. 19 (1976) 73-188.

Hänel, G.: Parametrization of the influence of relative humidity on optical aerosol properties. In: Aerosols and their climatic effects. A. Deepak Publ. Hampton 1984, 117-122.

Koschmieder, H.: Theorie der horizontalen Sichtweite. Beitr. Phys. Atmosph. 12 (1925) 33-557.

Settler, M., von Hoyningen-Huene, W.: Three years of aerosol extinction measurements with a He-Ne-Laser in the urban boundary layer of Leipzig, Germany. Beitr. Phys. Atmosph. 67 (1994) 169-180.

Trier, A., Horvath, H.: A study of the aerosol of Santiago de Chile. - 2. Mass extinction coefficients, visibilities and Angström exponents. Atmospheric Environment 27A (1993) 385-395.

Uhlig, E.-M., von Hoyningen-Huene, W.: Correlation of atmospheric extinction coefficient with the concentration of particulate matter in a polluted urban area. Atmospheric Research 30 (1993) 181-195.

Uhlig, E.-M., Stettler M., von Hoyningen-Huene, W.: Experimental studies on the variability of the extinction coefficient by different air masses. Atmospheric Environment 28 (1994) 811-814.

von Hoyningen-Huene, W.: Erfassung des atmosphärischen Trübungszustands und seiner zeitlichen Veränderung infolge von Emissionsabnahmen auf Grund sich vollziehender Strukturänderungen in Mitteldeutschland. (Abschlußbericht zum SANA-Teilprojekt B 1.6) In: Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern - Abschlußbericht - Band , BMBF - GSF PT Umwelt und Klima 1996.

Korrespondenz bitte an:

Dr. habil. Wolfgang von Hoyningen-Huene
Universidade de Evora
Dept. Fisica
R. Romero Ramalha 59
P-7000 Evora
Portugal