



**Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)**

**P M 1 0 -  
U m r e c h n u n g s m o d e l l e f ü r  
T e o m - u n d B e t a m e t e r -  
M e s s r e i h e n**

**PM10-Verlgeichsmessungen,  
Kooperation von Luftreinhalte-Fachstellen der  
Kantone AG, GR, LU, ZH,  
Stadt ZH  
EMPA Dübendorf**

**Kurzfassung des Hauptberichts**

**Jürg Heldstab INFRAS, Zürich  
Marx Stampfli, stampfli MATHEMATICS, Bern**

12.10.01 b1050b01/JH/PM10-Kurzfassung.doc



**INFRAS**

Gerechtigkeitsgasse 20, Postfach, CH-8039 Zürich, Tel. +41 1 205 95 95, Fax +41 1 205 95 99, E-Mail [zuerich@infr.ch](mailto:zuerich@infr.ch)  
Mühlemattstrasse 45, CH-3007 Bern, Tel. +41 31 370 19 19, Fax +41 31 370 19 10, E-Mail [bern@infr.ch](mailto:bern@infr.ch)  
**stampfli MATHEMATICS**

Berner Technopark, Morgenstrasse 129, 3018 Bern, Tel. 031 998 45 55, E-Mail [m\\_stampfli@yahoo.com](mailto:m_stampfli@yahoo.com)

**Zertifiziert nach ISO 9001/14001**

# Inhalt

1.	Einleitung.....	1
2.	Messprogramm, Vorgehen und Qualitätssicherung.....	2
3.	Umrechnungsmodelle für Teom-Messreihen.....	4
4.	Umrechnungsmodelle für Betameter-Messreihen .....	7
5.	Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick .....	10
5.1.	Schlussfolgerungen.....	10
5.2.	Empfehlungen zur Modellwahl .....	10
5.3.	Weitere Empfehlungen .....	12
5.4.	Ausblick.....	15
	Anhang .....	16
A.1	Messwerte: Geräteeinstellungen und Normbedingungen .....	16
A.2	Hinweise zur Statistik .....	16
A.3	Details zu den Modellresultaten .....	17
A.4	Optimale Modelle für die Referenzstationen.....	17
A.5	Ringversuch Filterwägungen .....	17
	Abkürzungen .....	18
	Literatur .....	19

## Projektgruppe

### Vertreter der Luftreinhalte-Fachstellen

Hugo Amacker, Auftraggeber  
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Robert Gehrig  
Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)

Hans-Peter Lötscher und Rinaldo Balestra,  
Amt für Umwelt Kanton GR (AfU GR)

Markus Meier und Roy Eugster  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Kanton ZH (AWEL ZH)

Peter Böhler und Markus Schenk  
Baudepartement Kanton AG, Abteilung Umweltschutz (AUS AG)

Susanne Schlatter  
Umwelt- und Gesundheitsschutz der Stadt ZH (UGZ Zürich)

Thomas Zünd  
Amt für Umweltschutz Kanton LU (AfU LU) / in -LUFT

### Autoren

Jürg Heldstab, INFRAS, Zürich

Marx Stampfli, stampfli MATHEMATICS, Bern

### Danksagung

Wir danken Dr. Werner Stahel, Seminar für Statistik der ETH Zürich für die sachlichen Anregungen (Kapitel Empfehlungen und Ausblick) und die kritische Durchsicht des Manuskripts. Wir danken auch René Locher, Departement Physik und Mathematik der Zürcher Hochschule Winterthur, der in der Anfangsphase fachliche Unterstützung beigetragen hat.

# 1. Einleitung

**PM10-Immissionsgrenzwerte:** Seit 1998 sind in der schweizerischen Luftreinhalte-Verordnung Immissionsgrenzwerte für Feinstaub PM10 (feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10  $\mu\text{m}$ ) verankert (LRV 1998). Seither wird die PM10-Immission an zahlreichen Standorten in der Schweiz gemessen.

**Messmethoden:** Für die Betreiber von Messnetzen sind verschiedene Messgeräte auf dem Markt erhältlich, die teilweise mit unterschiedlichen Methoden arbeiten. In der Schweiz werden hauptsächlich High Volume Samplers (HVS), Teom- und Betameter-Geräte eingesetzt. Die manuell gravimetrisch arbeitenden HVS entsprechen dem Referenzverfahren, das vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) vor kurzem in der Norm EN 12341 festgelegt wurde (CEN 1999). Teom- und Betameter-Geräte messen kontinuierlich; ihre Methoden entsprechen nicht dem Referenzverfahren. Für sie gilt es, Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren nachzuweisen respektive die Messreihen in geeigneter Weise umzurechnen. In der kalten Jahreszeit sind Teom-Messwerte systematisch tiefer als parallel mit einem HVS gemessene Konzentrationen. Beim Betameter werden sowohl höhere als auch tiefere als beim HVS Messwerte gefunden.

**Vergleichsmessungen:** Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft hat 1999 die damals in der Schweiz durchgeführten Vergleichsmessungen in einem Bericht zusammengetragen und so weit als möglich interpretiert (BUWAL 1999). Es zeigte sich, dass systematische Differenzen insbesondere beim Vergleich HVS und Teom wie in anderen Ländern auftraten, dass aber die Datenlage noch ungenügend war, um schon auf generelle Umrechnungsfunktionen schliessen zu können. Die Fachstellen, welche weiterführende Vergleichsmessungen planten, beschlossen damals, ihre Messversuche zu koordinieren, die Messresultate in einer Datenbank zu speichern und sie gemeinsam auszuwerten. Ziel der Vergleichsmessungen war es, Umrechnungsvorschriften für Tagesmittelwerte aus Teom- und Betameter-Geräten zu gewinnen, um Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren zu erreichen, oder zumindest gute Übereinstimmung auf dem Niveau der LRV-Parameter zwischen Teom- respektive Betameter-Messreihen und HVS-Messdaten. Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis dieser Zusammenarbeit.

## 2. Messprogramm, Vorgehen und Qualitätssicherung

**Standorte, PM10-Geräte, Messgrößen:** An 7 schweizerischen Luftmessstationen im Mittelland und in den Alpen wurden PM10-Immissionen mit verschiedenen Geräten parallel gemessen (Vergleichsmessungen). An jeder Station befand sich ein HVS-Gerät (DHA 80, Digital Elektronik AG) und mindestens ein Teom- (1400AB Rev. B, Rupprecht & Patashnik Co ) oder ein Betameter-Gerät (Eberline-Betastaubmeter FH62 I-R). Neben dem PM10 wurden weitere gasförmige Schadstoffe und meteorologische Parameter gemessen, welche für die Modellentwicklung zur Verfügung standen. Die Messperiode erstreckte sich über Juni 1999 bis April 2001. Es wurden einheitliche Geräteeinstellungen abgesprochen, alle gültigen Messdaten auf dieselben Bezugsbedingungen umgerechnet ( $T = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$  bzw.  $282\text{ K}$  und  $p = 950\text{ hPa}$ ) und auf einer Datenbank gespeichert.

Die Standorte werden im Bericht als **Referenzstationen** betrachtet (später können auch weitere Referenzstationen dazukommen, siehe dazu Empfehlungen), welche die Bedingungen erfüllen: 1) Parallelmessungen über mindestens ein volles Jahr, 2) Geräteeinstellungen entsprechend dem bisherigen PM10-Vergleichsversuch. Die Referenzstationen überwachen die Gültigkeit der Umrechnungsmodelle. Sie vergleichen die Resultate mit andern Referenzstationen und stellen ihre Daten für die Optimierung der Modelle zur Verfügung.

### Messperioden:

Teom o. Nafion	1999												2000												2001		
	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz					
Härkingen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
Suhr																											
Luzern																											
Wallisellen																											

Teom mit Nafion	1999												2000												2001		
	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz					
Luzern																											
Wallisellen																											

Betameter	1999												2000											
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Davos	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Roveredo																								
Zürich																								
Härkingen																								

Genügend Daten
  Wenig Daten
  Keine Daten

Figur 1 Übersicht über Messperioden und Datenverfügbarkeit.

**Vorgehen:** Festlegung einheitlicher Geräteeinstellungen und Laboranalytik, Aufzeichnung der Messdaten, Plausibilisierung, Umrechnung der Messdaten auf  $T = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $282\text{ K}$ ) und  $p = 950\text{ hPa}$ , Aufnahme in einer Datenbank, gemeinsame Auswertung und Interpretation.

**Nomenklatur für Umrechnungsmodelle:** Die PM10-Messwerte des HVS (Symbol  $Y$ ) sind die zu erklärende Grösse. Sie wird mit Regressions- und periodischen Modellen (Symbol  $Y_{Mod}$ ,  $Mod$  ist ein Index für den Modelltyp) angenähert. Weitere Messwerte, primär natürlich die PM10-Messwerte der Teom- und Betameter-Geräte sind die erklärenden Grössen (Symbole  $X$ : PM10 Teom/Betameter,  $T$ : Temperatur,  $N$ :  $\text{NO}_x$ ).

**Umrechnungsmodelle:** In der Auswertung wurden etliche Regressions- und periodische Modelle untersucht. Nur die erfolgreichen sind im Bericht dokumentiert. *Dies darf nicht so verstanden werden, als wäre die Modellentwicklung mit dem vorliegenden Bericht abgeschlossen.* Unter jenen Modellen, die zwar analysiert aber nicht dokumentiert werden, befinden sich solche, die weitere Schadstoffe und Meteo-Parameter (Druck, Feuchte) enthalten und die auch mit transformierten Grössen arbeiteten (z.B. logarithmierte Schadstoffkonzentrationen). Alle erklärenden Grössen gehen als *Tagesmittelwerte*<sup>1</sup> in die Modellierung ein.

Abk.(Index $Mod$ )	Modelltyp	Modellgleichung $Y_{Mod}$
RG1	lineare Regression	$Y_{RG1} = a_0 + a_1 * X$
RG2	lineare Regression	$Y_{RG2} = a_0 + a_1 * X + a_2 * T$
RG3	lineare Regression	$Y_{RG3} = a_0 + a_1 * X + a_3 * N$
RG4	lineare Regression	$Y_{RG4} = a_0 + a_1 * X + a_2 * T + a_3 * N$
RG0	lineare Regression	$Y_{RG0} = a_1 * X$
Per (periodisch)	nicht-lineare Regression	$Y_{Per} = \{A + B * \sin[2 * \pi * (t - t_0 - C) / 365]\} * X$

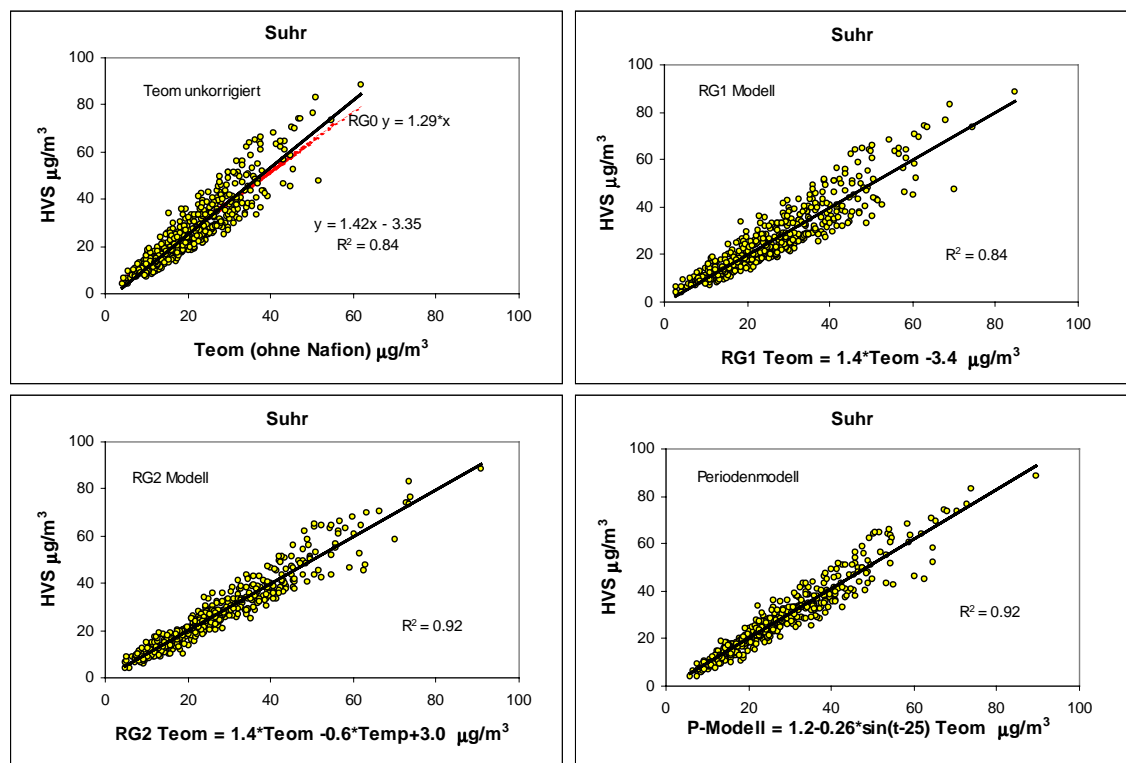
Tabelle 1: Modelle: Typen und Gleichungen.

**Qualitätssicherung:** Der Ringversuch 2000 des Cercl'Air in Basel hat gezeigt, dass für PM10-Messungen mit HVS die Vergleichstandardabweichung respektive die Standardabweichung zwischen den Messlabors noch sehr gross ist (Cercl'Air 2001). Offenbar lässt die Norm EN 12341 Spielräume für Laboranalytik, Geräteeinstellung und -aufstellung offen, die das Messresultat beeinflussen können. Deshalb ist es eine vordringliche Aufgabe, weitergehende Empfehlungen zur Durchführung der Messungen und zur Qualitätssicherung zu definieren.

<sup>1</sup> Bedingung für die Gültigkeit eines Tagesmittelwerts sind mindestens 24 gültige ½-Std.-Werte am betreffenden Tag.

### 3. Umrechnungsmodelle für Teom-Messreihen

Figur 2 zeigt Scatterplots für die Station Suhr Bärenmatte (verkehrs-exponiert) im Mittelland. Im Bild oben links sind die unkorrigierten Teom- (ohne Nafion) gegen die HVS-Messwerte aufgetragen. Im Bild oben rechts werden die Teom-Werte mit dem Regressionsmodell RG1 umgerechnet, d.h. mit PM10 als einziger Regressionsgrösse. Im Bild unten links wird die Temperatur als weitere erklärende Grösse hinzugefügt (RG2), was die Korrelation respektive das Bestimmtheitsmass  $R^2$  von 0.84 auf 0.92 verbessert. Das Bild unten rechts zeigt ein periodisches Modell, in dem die Abweichung zwischen HVS und Teom als Sinus-Schwingung mit einer Jahresperiode approximiert wird.



Figur 2 Resultate der Regressionsanalysen für Suhr Bärenmatte (Messperiode Dez. 99 bis März 2001,  $N=478$ ). Die gestrichelte Gerade im Bild oben links entspricht dem RG0-Modell.

Die Resultate sind typisch für alle Teom-Messreihen. Folgende Charakteristiken treffen für alle Stationen mit Teom-Geräten zu:

- Die **PM10**-Messung Teom ist selbstverständlich die wichtigste erklärende Grösse für die HVS-PM10-Messung. Der Einbezug der **Temperatur** bringt aber noch eine wesentliche Verbesserung der Korrelation. Hingegen ist **NO<sub>x</sub>** nicht von Bedeutung. Auch die weiteren gasförmigen Schadstoffe **CO, O<sub>3</sub> und SO<sub>2</sub>** sowie die Meteo-Parameter **Druck** und **relative Feuchte** sind als erklärende Grössen nicht von Bedeutung.
- Vergleich Teom **ohne respektive mit Nafion**: Alle Resultate zeigen, dass die Messdaten des Teoms mit Nafion näher beim HVS liegen als diejenigen ohne Nafion. Für einzelne Tageswerte braucht die Aussage nicht zu stimmen; sie gilt aber für alle betrachteten Gesamtheiten.
- Keines der untersuchten Modelle erfüllt die Anforderung der **EN 12341  $R^2 \geq 0.95$** . Die berechneten Werte liegen im Bereich 0.63–0.92
- Trotzdem sind die Modelle für die Umrechnung der Teom-Daten auf LRV-Parameter geeignet. Alle Modelle ergeben *Mittelwerte*, die sehr gut mit den HVS-Mittelwerten übereinstimmen. Bei der Berechnung der *Zahl von Tagen, an den der 24-Mittelwert von 50 µg/m<sup>3</sup> überschritten* ist, zeigen die Modelle spezifische Unterschiede. Am besten vermag das *Periodenmodell* die Zahl der Tage mit Überschreitungen zu modellieren.
- Die Modellparameter variieren nur wenig zwischen den verschiedenen Standorten, sodass *standort-unabhängige Mittelland-Modelle* definiert werden können (weil Parallelmessungen Teom/HVS bis jetzt nur im Mittelland durchgeführt worden sind, ist nicht bekannt, wie weit die Modelle auch für alpine Stationen und die Alpensüdseite geeignet sind).

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswertung der Mittelland-Modelle für die LRV-Parameter. Eingetragen sind die Mittelwerte und die Zahl der Tage  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für HVS und Teom-Geräte (Spalte „Messwerte“), die modellierten Werte (Spalte „Modellwerte“) und die Abweichungen der Modellwerte zum HVS (Spalte „Abweichungen HVS“). Während beim Mittelwert alle Modelle sehr gut funktionieren, findet man bei der Zahl der Tage  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bedeutende Unterschiede. Das Periodenmodell ergibt die kleinsten Abweichungen. RWTÜV ist ein RG1-Modell aus einer deutschen Vergleichsmessung, welches in der Schweiz gelegentlich schon benutzt worden ist.



LRV-Statistik	Parameter	Messwerte Y		Modellwerte Y <sub>Mod</sub>					Abweichungen HVS				
		HVS	Teom	Per	RG0	RG1	RWTÜV	RG2	Per	RG0	RG1	RWTÜV	RG2
Luzern	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.5	22.4	22.2	21.5	21.7	-0.4	-0.5	-0.7	-1.5	-1.3
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	9	3	4	4	7	-2	-8	-7	-7	-4
Suhr	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	21.4	28.6	27.1	27.0	26.6	28.1	1.5	0.0	-0.1	-0.4	1.0
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	39	5	42	20	20	23	33	3	-19	-19	-16	-6
Härkingen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	21.1	25.2	26.7	26.5	26.2	25.5	-0.3	1.2	1.1	0.7	0.0
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	3	18	12	12	15	16	-2	-8	-8	-5	-4
Wallisellen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	16.4	21.1	20.7	20.5	19.5	21.3	0.3	-0.1	-0.3	-1.3	0.5
	jeden 2. Tag $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	0	6	2	2	4	5	1	-3	-3	-1	0
alle	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Wurzel aus Summe d. Abweichungsquadrate =							1.6	1.3	1.4	2.2	1.8
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	Wurzel aus Summe d. Abweichungsquadrate =							4	22	22	18	8

Tabelle 2: Vergleich der Mittelland-Modelle für Teom-Geräte ohne Nafion.

Fazit:

- Für Teom-Geräte lassen sich gute Umrechnungsmodelle finden und angeben. Für die Berechnung der Jahresmittelwerte sind bereits die einfachsten linearen Modelle RG0 und RG1 gut geeignet. Für die Berechnung der Anzahl Tage mit Überschreitung von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ergeben die RG0- und RG1-Modelle zwar schon eine Verbesserung, die allerdings mit einem RG2-Modell, welches neben dem Teom-Messwert auch noch die Temperatur berücksichtigt, wesentlich gesteigert werden kann. Am besten ist für diesen Parameter jedoch das Periodenmodell geeignet, welches die saisonal beobachtbaren Unterschiede zwischen Teom und HVS berücksichtigt. Wenn für eine Messstation eine Jahresmessreihe mit parallelen Teom- und HVS-Geräten vorhanden ist, kann daraus ein zuverlässiges, lokales Umrechnungsmodell abgeleitet werden.
- Es zeigt sich, dass zumindest im Mittelland die Unterschiede zwischen den lokalen Umrechnungsmodellen gering sind. Deshalb werden mit den jetzt vorhandenen Daten auch standort-unabhängige Modelle angegeben, die für Stationen ohne Parallelmessungen übernommen werden können.
- Teom-Geräte, die mit dem Nafion-Dryer System ausgerüstet sind, liegen mit ihren Messwerten näher am HVS als ohne Nafion. Allerdings sind die Unterschiede immer noch so gross, dass auf eine Umrechnung nicht verzichtet werden kann. Es können dieselben Umrechnungsmodelle wie für Teom ohne Nafion benutzt werden, allerdings mit anderen Werten für die Regressionskoeffizienten.

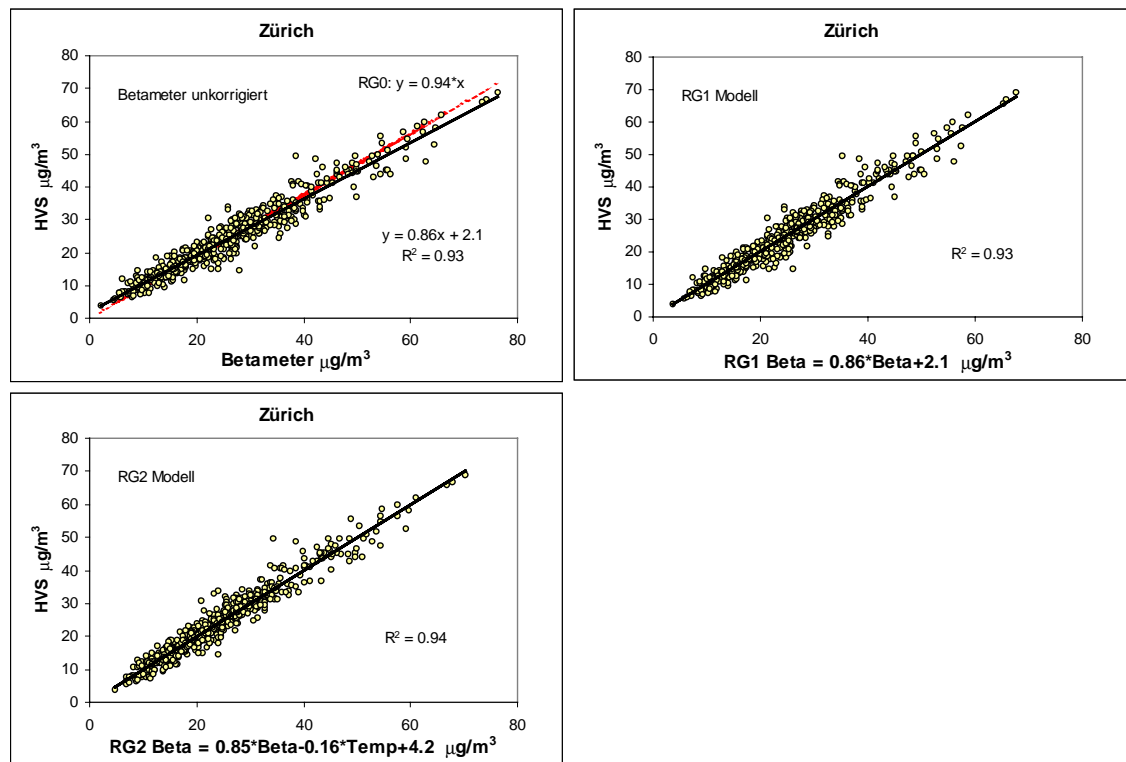
Auch im Ausland wurden in den letzten Jahren Vergleichsmessungen durchgeführt (EC PM 2001, Green 2001, Sen Stadt 2001). Die Resultate sind kompatibel mit den schweizerischen Beobachtungen. Bei der Modellbildung wurden im Ausland bisher keine multiplen Regressionen dokumentiert, das heisst, es wurden nur lineare und nicht-lineare Regressionen mit PM10-

Werten als einzige erklärende Grösse analysiert. Um die jahreszeitlichen Schwankungen zu modellieren, wurden saisonal gestaffelte Modellansätze eingeführt, welche als Approximation an die in der Schweiz untersuchten periodischen oder RG2-Modellen (Temperatur als zusätzliche erklärende Grösse) verstanden werden können. Es wird auch dokumentiert, dass nicht nur zwischen Teom und Referenzgeräten, sondern auch zwischen Referenzgeräten selber signifikante und nicht erklärbare Unterschiede beobachtet werden.

## 4. Umrechnungsmodelle für Betameter-Messreihen

Während Teom-Messwerte generell niedriger als HVS-Werte sind, zeigen Betameter-Werte sowohl höhere als auch niedrigere Messwerte, teilweise stimmen sie sehr gut mit dem HVS überein. Die Differenz zwischen Betameter und HVS schwankt an einzelnen Standorten periodisch im Laufe eines Jahres wie beim Teom, an anderen jedoch nicht. Damit wird eine Frage aufgeworfen, die nach den vorliegenden Analysen offen bleibt und die zur Folge hat, dass die gefundenen Umrechnungsmodelle für Betameter-Geräte nicht im selben Mass standortunabhängig sind wie beim Teom.

Figur 3 zeigt analog zur Figur 2 Scatterplots für Betameter und HVS in Zürich an der Stampfenbachstrasse. Bereits die unkorrigierten Messwerte sind sehr hoch mit dem HVS korreliert ( $R^2=0.93$ ), höher als die mit dem Periodenmodell korrigierten Teom-Messwerte in Suhr! Mit einem RG2-Modell kann die Korrelation noch leicht verbessert werden ( $R^2=0.94$ ) und erreicht nur ganz knapp die Anforderungen der EN12341 nicht. Mittelwert und Anzahl Tage  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  werden in Zürich vom Betameter gegenüber dem HVS überschätzt. Mit Hilfe eines Umrechnungsmodells (RG1, RG2) können beide Parameter aber sehr nahe an jene des HVS herangeführt werden. An den übrigen Standorten mit Betameter-Geräten ist die Situation allerdings nicht so einfach wie in Zürich, insbesondere sind die Abweichungen uneinheitlich.



Figur 3 Resultate der Regressionsanalysen für Zürich Stampfenbachstrasse (Messperiode Dez. 99 bis März 2001,  $N=478$ ). Die gestrichelte Linie im Bild oben links entspricht dem RG0-Modell.

Fazit aus den Analysen für 4 Betameter-Stationen (Zürich, Härkingen, Davos, Roveredo): Im Mittelland sind die unkorrigierten Betameter-Daten näher am HVS als im Fall des Teoms. Mit standort-spezifischen Modellen kann eine weitere Verbesserung erzielt werden. Für die Beurteilung der PM10-Immission gemäss LRV können die lokalen Regressionsmodelle RG1 und RG2 die aus den Betameter-Messungen umgerechneten Mittelwerte beide sehr gut an den Referenz-Mittelwert des HVS heranführen. Bei der Zahl der Überschreitungen hingegen ist die Leistung der Modelle etwas schwächer als beim Teom. Trotzdem wird die Zahl mit Hilfe der Modelle besser approximiert als ohne Korrektur. Eine Ausnahme stellt die Station Härkingen dar, wo die Regressionsmodelle zwar den Mittelwert verbessern, die Zahl der Überschreitungen jedoch verschlechtern. Härkingen stellt in dieser Beziehung eine Ausnahme dar, denn es tritt dort eine klare Jahresperiode im Verhältnis HVS/Betameter auf; entsprechend bringt das Periodenmodell die besten Resultate, was für die anderen drei Standorte nicht gilt. Auf Grund der bis jetzt verfügbaren Messresultate lässt sich immerhin eine Verwandtschaft zwischen den beiden Mittelland-Standorten Zürich und Härkingen erkennen, ebenso zwischen den beiden alpinen Standorten Davos und Roveredo. Deshalb wurden Mittelland- und alpine Modelle definiert (aus

je zwei Standorten ermittelt), allerdings statistisch auf einer schwächeren Basis als beim Teom (wo das Mittelland aus vier Standorten ermittelt werden konnte).

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswertung der Mittelland- und alpinen Modelle für die LRV-Parameter analog zur Tabelle 2. Eingetragen sind die Mittelwerte und die Zahl der Tage  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für HVS und Betameter-Geräte sowie die modellierten Werte.

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Mittelland-Modelle			
		HVS	Betameter	RG0	RG 1	RG 2	Perioden
Zürich	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.1	25.6	24.1	24.4	24.3	25.0
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	15	28	24	21	24	33
Härkingen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26.3	27.3	25.6	25.8	25.8	26.6
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	29	21	16	14	16	24

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Alpen-Modelle		
		HVS	Betameter	RG0	RG 1	RG 2
Roveredo	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.9	21.7	28.1	26.6	26.1
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	14	7	25	9	10
Davos	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13.7	7.9	10.2	12.6	13.2
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	2	1	1

*Tabelle 3: Betameter: Vergleich Mess- und Mittelwerte für die Mittellandmodelle, angewendet auf die Standorte Zürich und Härkingen. Dasselbe für die alpinen Modelle, angewendet auf Roveredo und Davos.*

In der Literatur finden sich zur Zeit noch wesentlich weniger Auswertungen von Betameter/HVS als von Teom/HVS. In einem Versuch in Berlin (Sen Stadt 2001) änderte sich das Verhältnis der HVS- zur Betametermessung wesentlich bei verschiedenen Filterstandzeiten (ist nicht Thema von Betameter/HVS-Vergleichsmessungen, sondern vom Vergleich unter Betametern selber). In den schweizerischen Vergleichsmessungen wurde dieser Parameter nicht standardisiert und war bei den einzelnen Messnetzbetreibern unterschiedlich eingestellt.

## 5. Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

### 5.1. Schlussfolgerungen

In einer früheren Dokumentation des BUWAL über PM10-Vergleichsmessungen konnten noch keine Umrechnungsmodelle hergeleitet werden. Die koordinierten Vergleichsversuche der beiden letzten Jahre bedeuten demgegenüber einen grossen Fortschritt: Inzwischen lassen sich **sehr gute standort-spezifische Umrechnungsmodelle für Teom- und gute Modelle für Betameter-Geräte** gewinnen, mit denen die LRV-Parameter gemäss Referenzverfahren approximiert werden können. Im Fall des Teom-Geräts liegen jetzt sogar **standort-unabhängige** Modelle vor, zumindest für das Mittelland. Auch für Betameter-Geräte werden standort-unabhängige Modelle vorgeschlagen, allerdings stehen sie noch auf einer relativ schwachen, statistischen Basis.

### 5.2. Empfehlungen zur Modellwahl

**Die im Folgenden empfohlenen Modelle sind in dieser Parametrisierung nur zu verwenden, wenn die Geräteeinstellungen mit jenen der Referenzstationen übereinstimmen (Anhang A1). Für andere Einstellungen sind die angegebenen Parameterwerte nicht optimal.**

**Teom-Messwerte:** Grundsätzlich wird das periodische Modell empfohlen:

- Vorteile: Gute Schätzung des Jahresmittelwertes, sehr gute Abschätzung der Anzahl Tage  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , unabhängig von der Wahl der Bezugsgrössen, physikalisch begründbar, deutbare Parameter, gute statistische Qualität (Bestimmtheitsmass), vereinfachbar zu RG0 für Jahresmittelwertberechnung.
- Nachteile: Wahl eines Referenzdatums (21.03.XX) des Messjahres, Berechnung etwas komplizierter als bei einfacher Regression (Einbezug des Datums in die Formel).

Modell	Mittelland-Periodenmodelle	RG0-Approximation
Teom <b>ohne</b> Nafion-Dryer	$Y_{per}(t) := X(t) * \left[ 1.27 - 0.30 * \sin\left( 2 * \pi * \frac{t - t_0 - 7.8d}{365} \right) \right]$	$Y_{RG0} = 1.27 * X$
Teom <b>mit</b> Nafion-Dryer	$Y_{per}(t) := X(t) * \left[ 1.17 - 0.23 * \sin\left( 2 * \pi * \frac{t - t_0 - 15.3d}{365} \right) \right]$	$Y_{RG0} = 1.17 * X$
Eignung	Für Schätzung Jahresmittel und Zahl der Überschreitungen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aus Teom-Tagesmittelwerten $X(t)$	Nur für Schätzung Jahresmittel aus gemessenem Jahresmittel Teom X
Bemerkung	Symbole: $t$ = Datum, $t_0$ = 21. März d. Messjahres, ( $d$ =Tag)	

*Tabelle 4: Empfohlene Mittelland Periodenmodelle für Teom-Messgeräte. Alle empfohlenen Modelle sind unabhängig von Bezugsgrößen, sie gelten für die bisherigen ( $T = 9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 950 \text{ hPa}$ ) wie auch für die zukünftigen ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 1013 \text{ hPa}$ ).*

**Betameter-Messwerte:** Für Mittelland und Alpen werden unterschiedliche Umrechnungsmodelle empfohlen:

Mittelland: RG0-Modell

- Vorteile: Gute Abschätzung des Jahresmittelwertes, sehr einfaches Modell, unabhängig von der Wahl der Bezugsgrößen, deutbare Parameter.
- Nachteile: Mässig gute Abschätzung der Anzahl Tage  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , keine physikalische Deutung, mässig gute statistische Eigenschaften.

Alpen: RG2-Modell

- Vorteile: Gute Abschätzung des Jahresmittelwertes, statistisch gesehen die stärkste aller Alternativen
- Nachteile: Abhängig von der Wahl der Bezugsgrößen, nur brauchbar, wenn Betameter- und Temperaturmessung vorhanden

Modell	Mittelland	Alpen
Betameter bisherige Bezugsgrößen <b>9°C, 950 hPa</b>	$Y_{RG0} = 0.938 * X$	$Y_{RG2} = 1.041 * X - 0.161 * T + 5.451$
Betameter zukünftige Bezugsgrößen <b>20°C, 1013 hPa</b>	$Y_{RG0} = 0.938 * X$	$Y_{RG2} = 1.041 * X - 0.165 * T + 5.493$
Eignung	Für Jahresmittel und Zahl der Tage > 50 µg/m <sup>3</sup>	Für Jahresmittel und Zahl der Tage > 50 µg/m <sup>3</sup>
Bemerkung	RG0-Modelle sind unabhängig von den Bezugsbedin- gungen	Die RG2-Modelle sind von den Bezugs- bedingungen abhängig, die Regressi- onskoeffizienten $a_0$ und $a_2$ sind deshalb unterschiedlich

Tabelle 5: *Empfohlene Mittelland- resp. Alpen-Modelle für Betameter-Geräte. Im Mittelland ist das RG0-Modell für alle Bezugsgrößen dasselbe, in den Alpen muss unterschieden werden.*

### 5.3. Weitere Empfehlungen

#### Verifikation der Umrechnungsmodelle

Die empfohlenen Modelle wurden aus den Messdaten **aller** Referenzstationen gewonnen. Wären mehr Daten zur Verfügung gestanden, hätte der Datensatz vor der Regressionsanalyse geteilt werden können, um mit der ersten Hälfte die Modellparameter zu ermitteln und mit der zweiten Hälfte die Modelle zu verifizieren. Im Fall des Teom ohne Nafion, für das am meisten Messreihen vorlagen, konnte ein solches Verfahren bei der Ermittlung der Mittelland-Modelle gewählt werden. Eine weitergehende Verifikation der Modelle steht aber noch aus und sollte mit zukünftigen Daten der Referenzstationen, oder noch besser mit Vergleichsdaten anderer Stationen durchgeführt werden.

#### HVS

Vergleichsversuche wie der Ringversuch in Basel oder die Vergleichsserie in Berlin haben gezeigt, dass selbst unter Referenzgeräten die erwarteten, hohen Korrelationen nicht ohne Weiteres gefunden werden können. Weitere Standardisierungen für Flusskalibrierung und die Labordanalytik/Filterhandhabung sind deshalb nötig. Mit den Standardarbeitsanweisungen der EMPA, in-LUFT, OSTLUFT wurden die ersten Schritte in diese Richtung unternommen (alle Standardarbeitsanweisungen sind auf Anfrage erhältlich).

Wichtig wäre auch, die Messunsicherheiten der Referenzmethode zu quantifizieren. Dies gäbe die Möglichkeit, die Qualität eines Umrechnungsmodells zu beurteilen (ein Umrechnungsmodell ist optimal, wenn seine Abweichungen zum HVS kleiner sind als dessen Messunsicherheit).

### **Teom**

In Zukunft werden vermutlich immer mehr Teom-Geräte mit Nafion-Dryern ausgerüstet werden. Da dieses System erst im Laufe der vorliegenden Untersuchung auf den Markt gekommen ist, konnten nur zwei Stationen damit ausgerüstet werden. Um die Zuverlässigkeit der vorgeschlagenen, standort-unabhängigen Modelle zu erhöhen, wären deshalb Daten von weiteren Standorten erwünscht. Auch aus dem Alpenraum sind keine Vergleichsmessungen mit Teom-Geräten (ohne und mit Nafion-Dryer) vorhanden, sodass für solche Standorte überhaupt keine Aussagen möglich sind.

Alle Resultate, die in diesem Bericht vorgestellt werden, basieren auf einer Auswertung von Tagesmittelwerten. Alternativ wäre aber auch denkbar, Regressionsanalysen mit ½h-Werten durchzuführen<sup>2</sup>. Gerade für Teom-Messwerte könnte dieser Ansatz lohnend sein, weil schon die Schwankungen der Temperatur-Tagesmittel einen grossen Teil der Abweichungen Teom/HVS erklären können. Die Temperaturschwankungen im Laufe des Tages sind aber selber schon sehr gross und werden mit der hier benutzten Methode vernachlässigt.

### **Betameter**

Wie weit die Charakteristiken der Bündner Messdaten auf andere alpine Standorte übertragbar sind, ist nicht bekannt. Erst weitere Vergleichsmessungen in den Alpen könnten dies zeigen. Die Frage nach der Abhängigkeit der Messwerte von der Filterstandzeit sollte für ein bis zwei Standorte in der Schweiz überprüft werden.

### **Statistik**

Die in dieser Studie verwendeten Methoden gehen wie üblich bei Referenzverfahren – und wie auch alle zitierten Analysen aus dem Ausland - davon aus, dass die Zielvariable (HVS) genau messbar ist, also keine Streuung aufweist. Deshalb werden alle Regressionsanalysen unter der Annahme durchgeführt, dass nur die Teom- oder Betametermessungen fehlerbehaftet sind. Tatsächlich sind aber auch die HVS-Messungen unsicher, wie der Ringversuch 2000 in Basel deutlich gezeigt hat (Cercl’Air 2001). Wenn aber beide Variablen einer Regression mit Zufallsfehlern behaftet sind („errors in variables“), so sind andere, steilere Regressionsgeraden optimal. Die optimale Steilheit hängt vom Verhältnis der Streuungen der Messfehler ab. Ein erster Test wurde mit den Daten der Station Luzern ausgeführt. Die Zahl der Überschreitungen nimmt in einem errors-in-variables Modell zu.

---

2 Diese Methode liefert nur dann andere Resultate, wenn nicht-lineare Modellansätze benutzt werden.



Die Zahl der Tage mit Überschreitung von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  besitzt als Kriterium zur Prüfung der Modellqualität den Nachteil, dass damit einseitig auf die hohen Konzentrationswerte fokussiert wird. In einem, statistisch gesehen verbesserten Verfahren zur Modellbeurteilung wären nicht einfach die Modellwerte  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu zählen, sondern es sollte allgemeiner mit Wahrscheinlichkeiten operiert werden: Die Modellwerte sind Zufallsvariablen mit einer zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Statt nur die Überschreitung des Mittelwerts (= Modellwert), wären auch die Überschreitungen benachbarter Werte zu zählen mit jeweils unterschiedlicher Sicherheit des Zutreffens (Wahrscheinlichkeitsaussage). Mit diesem – komplizierteren – Vorgehen könnten alle hier diskutierten Modelle differenzierter beurteilt werden. Es bleibt vorläufig offen, ob der Modellvergleich zu einem anderen „Rangfolge“ führen würde.

### **Modellentwicklung**

Weil die Vergleichsversuche an einzelnen Stationen weitergeführt werden, ergibt sich die Möglichkeit, zu einem späteren Zeitpunkt die empfohlenen Modelle zu überprüfen und gegebenenfalls zu modifizieren. Deshalb müssten die zukünftigen Daten in die bestehende Datenbank aufgenommen werden, insbesondere auch solche von neuen Vergleichsversuchen an weiteren Standorten. Selbstverständlich konnten in dieser Studie nur einige Modellansätze überprüft werden. Da die Vergleichsmessung von PM10 im In- und Ausland weitergeführt werden, wird auch das Know-how über die Unterschiede der Messmethoden zunehmen, was die Standardisierung von Modellansätzen ermöglichen wird.

### **Empfehlungen der EC Working Group on Particulate Matter**

Soeben (27. Aug. 2001) ist der Entwurf des Schlussberichts „Guidance to Member States on PM10 Monitoring and Intercomparisons with the Reference Method“ erschienen (EC PM 2001). Er enthält eine Fülle von Resultaten aus Vergleichsmessungen Teom/HVS und Betameter/HVS sowie Empfehlungen zum Vorgehen.

Die Resultate decken sich qualitativ mit den schweizerischen Resultaten. Für die Umrechnung werden RG0- und RG1-Modelle empfohlen, die saisonal bis sogar monatlich differenziert werden, sofern es die Vergleichsmessungen nahelegen. In diesem Fall entspricht das Vorgehen praktisch einem periodischen Modell. Zwischen den Regressionskoeffizienten treten in verschiedenen Ländern aber auch bedeutende Differenzen auf. Deshalb enthält der Bericht ausführliche und praktische Empfehlungen zur Durchführung von Vergleichsmessungen. Diese sollen nicht nur einmalig, sondern periodisch durchgeführt werden, um die Stabilität der Umrechnungsmodelle zu verfolgen. Solange keine eigenen Vergleichsmessungen durchgeführt werden, empfiehlt die Arbeitsgruppe einen Korrekturfaktor von 1.3 für Teom- und Betameter-Geräte. Grundsätzlich sollen aber in jedem Land bzw. jeder Region an mindestens zwei Stand-

orten Vergleichsversuche durchgeführt und lokale Umrechnungsmodelle bestimmt werden, nach denen die Teom- und Betameter-Messreihen in diesem Land korrigiert werden sollen.

Der vorgeschlagene Korrekturfaktor 1.3 ist fast identisch mit dem Faktor 1.27,<sup>3</sup> der in diesem Bericht für Teom-Messreihen (ohne Nafion) empfohlen wird (Tabelle 4). Er entspricht der RG0-Approximation für das Periodenmodell<sup>4</sup>. Auf dieser Approximationsstufe stimmen die ausländischen und die schweizerischen Resultate sehr gut überein. Der Faktor 1.3 wird von der EC Working Group aber auch für Betameter-Messreihen empfohlen. Die schweizerischen Betameter-Messreihen zeigen hingegen grosse Standortunterschiede, die Korrekturfaktoren variieren zwischen 0.9 und 1.4.

## 5.4. Ausblick

**HVS-Ringversuch:** Die Arbeitsgruppe Qualitätssicherung des Cercl' Air wird vom 24.-31. Oktober 2001 einen Ringversuch mit HVS in Dübendorf durchzuführen. Damit soll die Vergleichsstandardabweichung der Referenzmethode bestimmt werden. Gleichzeitig wird mit einem zertifizierten Rotameter auch der Volumenstrom gemessen, die Dichtigkeit des Gesamtsystems und der Filter überprüft.

**Teom:** In-LUFT klärt ab, auf welche Weise (halb)stündliche Teom-Messwerte umgerechnet werden müssen, um sie online auf dem Internet und via SMS auf mobilen Telefonie-Netzen abrufen zu können.

---

3 1.17 für Teom mit Nafion. Für Teom mit Nafion gibt die EC Working Group (noch) keine Empfehlungen.

4 Das Periodenmodell reduziert sich auf das RG0-Modell, wenn die Jahresperiode HVS/Teom vernachlässigt wird.

## Anhang

### A.1 Messwerte: Geräteeinstellungen und Normbedingungen

#### Geräteeinstellungen

Detaillierte Angaben zur Einstellung der HVS-, Teom- und Betameter-Geräte finden sich im Hauptbericht, Anhang 1. Dazu existieren auch Standard-Arbeitsanweisungen, die bei der EMPA Dübendorf, in-LUFT in Luzern und OSTLUFT in Zürich bezogen werden können.

#### Bezugsbedingungen

Sämtliche Messdaten, die im Vergleichsversuch ausgewertet und benutzt wurden, sind auf die zur Zeit noch gültigen schweizerischen Messempfehlungen umgerechnet worden: Temperatur  $T = 9^{\circ}\text{C} = 282\text{ K}$ , Aussendruck  $p = 950\text{ hPa}$ . Die Bezugsbedingungen werden demnächst ändern und den europäischen Empfehlungen für gasförmige Luftschadstoffe angepasst ( $T = 20^{\circ}\text{C} = 293\text{ K}$ ,  $p = 1013\text{ hPa}$  gemäss Richtlinie 1999/30/EC vom 22.04.99). Für Staub sind solche noch nicht definiert<sup>5</sup>. Die Bezugsbedingungen sind deshalb wesentlich, weil sie Parametrisierung der Umrechnungsmodelle (teilweise) beeinflussen.

### A2. Hinweise zur Statistik

Die mathematisch-statistischen Voraussetzungen für Regressionsanalysen (Normalverteilung und Unabhängigkeit der Residuen) sind für die analysierten Modelle nur teilweise erfüllt: Die Residuen sind zwar glockenförmig verteilt, besitzen jedoch unterschiedliche Schiefe und schmale Gipfel. Die Normalverteilung wird mit dem Chi-Quadrat-Test in einigen Fällen akzeptiert, in anderen nicht. Zudem weisen die Residuen mehr oder weniger Autokorrelationen auf, sind also nicht unabhängig. Die Unabhängigkeit wird beim Schritt von den RG1- zu den RG2- und den periodischen Modellen besser. Konsequenz ist, dass die Fehler der Regressionskoeffizienten unzuverlässig sind. Um bessere Voraussetzungen zu erhalten, müssten robuste Methoden und autoregressive Modelle eingesetzt werden. Evtentuell könnte schon bei einer erweiterten Regressionsanalyse (errors-in-variables) Normalverteilung und Unabhängigkeit der Residuen verbessert werden.

---

5 In der EN 12341 „Ermittlung der PM10-Fraktion von Schwebestaub, Referenzmethode etc.“ sind Normbedingungen gegeben (1013 hPa, 273 K), die sich aber nur auf den Nachweis der Gleichwertigkeit von PM10-Messgeräten beziehen, nicht auf die Publikation von Messdaten und deren Vergleich mit den Grenzwerten.

### A3. Details zu den Modellresultaten

Im Hauptbericht sind im Anhang A3 weitere Resultate der statistischen Auswertungen angegeben: Die Anzahl Tage mit Überschreitungen nicht nur von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sondern von  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  etc. bis  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für alle Mess- und Modellwerte.

### A4. Optimale Modelle für die Referenzstationen

Weiter sind im Hauptbericht auch die optimalen Modelle für die Referenzstationen Davos, Härkingen, Luzern, Roveredo, Suhr, Wallisellen und Zürich aufgeführt.

### A5. Ringversuch Filterwägungen

Während des Vergleichversuchs wurde ein einfacher Ringversuch für die Filterwägung durchgeführt. Dabei wurden 10 HVS Filter (5 davon unbeladen, 5 beladen mit einer Expositionszeit von 24 Std.) in allen Labors gemessen. Aus den Wägungen wurden fiktive Staubbeladungen als Differenz zwischen beladenen und unbeladenen Filtern berechnet und dazu die Vergleichsstandardabweichungen bestimmt. Sie lagen zwischen 1.2% und 1.9% der Mittelwerte. Im Ringversuch 2000 in Basel, an dem unter anderen auch 8 HVS-Geräte teilnahmen, betrug die Vergleichsstandardabweichung 16% des Mittelwerts. Zwar sind die Anordnungen im Ringversuch in Basel und im Filterwägungsversuch nicht dieselben. Trotzdem lässt der Unterschied die Vermutung **nahe, dass die Filterwägung nur zu einem geringen Teil zur gesamten Unsicherheit einer HVS-Messung beiträgt.** Der kommende HVS-Ringversuch in Dübendorf wird präzisere Antworten auf diese Frage geben.

## Abkürzungen

AfU GR	Amt für Umwelt des Kantons Graubünden
AUS AG	Abteilung Umweltschutz des Baudepartements Kanton Aargau
AWEL ZH	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Dübendorf
HVS	High Volume Sampler
in-LUFT	Das interkantonale Luftmessnetz, Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
LVS	Low Volume Sampler
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
CO	Kohlenmonoxid
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide: Summe von NO und NO <sub>2</sub>
O <sub>3</sub>	Ozon
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
PM10	Feinstaub (feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm)
UGZ ZH	Umwelt- und Gesundheitsschutz der Stadt Zürich
WRAC	Wide Range Aerosol Classifier

## Literatur

- BUWAL 1999 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: *PM10-Vergleichsmessungen, Dokumentation aktueller schweizerischer Vergleichsmessungen*, INFRAS, Zürich, August 1999
- CEN 1999 Europäisches Komitee für Normung: *Air quality – Determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter. Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods* (EN 12341), CEN, Brüssel 1999
- Cercl'Air 2001 Cercl'Air (Schweiz. Gesellschaft der Lufthygienefachleute) in Zusammenarbeit mit: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidgenössisches Amt für Messwesen (EAM), Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA): *Ringversuch 2000 in Basel*, INFRAS, 2001
- EC PM 2001 EC Working Group on Particulate Matter, *Guidance to Member States on PM10 Monitoring and Intercomparisons with the Reference Method*, Martin Williams, Peter Bruckmann, Draft Final Report, 27.08.2001
- Green 2001 Green D., Fuller G., Baratt B.: *Evaluation of Teom correction factors for assessing the EU Stage 1 limit values for PM10*, Atmospheric Environment 35 (2001), pp. 2589–2593.
- LRV 1998 Schweizerischer Bundesrat, *Luftreinhalte-Verordnung*, SR
- Sen Stadt 2001 Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Messgruppe des Berliner Luftgütemessnetzes: *Erfahrungen bei der Vergleichbarkeit von automatischen und manuellen PM10-Staub- und Russmessungen*, Vortrag von Michaela Preuss am Messtechnischen Kolloquium Grainau, 21.-23.5.2001, Berlin
- RWTÜV 1999 RWTÜV Anlagentechnik GmbH: *Bericht über den Vergleich des Schwebstaubimmissionsmessgerätes Teom 1400a im Auftrag der Firma Rupprecht&Patashnick mit der Referenzmethode gemäss EN 12341*, Essen, 18.02.1999
- UMEG 1999 Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH (UMEG): *Prüfung des Digital-Staubsammlers DHA 80 mit PM10-Einlass nach prEN 12341*, Karlsruhe 1999

