



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**

Hauptbericht

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

12.10.01 b1050b01/JH/PM10-Hauptbericht.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
Mühlemattstrasse 45, CH-3007 Bern, Tel. +41 31 370 19 19, Fax +41 31 370 19 10, E-Mail bern@infr.ch
stampfli MATHEMATICS

Berner Technopark, Morgenstrasse 129, 3018 Bern, Tel. 031 998 45 55, E-Mail m_stampfli@yahoo.com

Zertifiziert nach ISO 9001/14001

Übersicht

1. Einleitung.....	1
2. Messprogramm, Vorgehen und Qualitätssicherung	3
3. Umrechnungsmodelle für Teom-Messreihen.....	7
4. Umrechnungsmodelle für Betameter-Messreihen	31
5. Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick	43
Anhang	56
A1. Messwerte: Geräteeinstellungen und Normbedingungen	57
A2. Hinweise zur Statistik	67
A3. Details zu den Modellresultaten.....	73
A4. Optimale Modelle für die Referenzstationen	75
A5. Ringversuch Filterwägungen	78
Abkürzungen	81
Literatur	82

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Hauptbericht und Kurzfassung	1
1.2.	PM10–Immissionen und –Messmethoden.....	1
1.3.	Europäisches Referenzverfahren	2
1.4.	Vergleichsmessungen	2
2.	Messprogramm, Vorgehen und Qualitätssicherung	3
2.1.	Standorte, Messdaten und Messgeräte.....	3
2.2.	Messperioden.....	4
2.3.	Methodisches Vorgehen	4
2.4.	Qualitätssicherung	6
3.	Umrechnungsmodelle für Teom-Messreihen.....	7
3.1.	Regressionsmodelle	7
3.1.1.	Nomenklatur.....	7
3.1.2.	Regressionsresultate für Teom-Geräte	8
3.2.	Periodische Modelle	19
3.2.1.	Nomenklatur.....	19
3.2.2.	Periodisches Verhalten	20
3.2.3.	Modellresultate für Teom-Geräte	22
3.3.	Modellvergleiche	25
3.3.1.	Welche Modelle werden miteinander verglichen?.....	25
3.3.2.	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen	25
3.3.3.	Vergleiche auf der Basis der LRV-Parameter	26
3.4.	Interpretation Teom-Umrechnungsmodelle.....	27
3.5.	Internationale Vergleichsmessungen und Umrechnungsmodelle.....	28
3.5.1.	Vergleichsmessungen der EC Working Group on Particulate Matter	28
3.5.2.	Vergleichsmessungen Teom/KleinfILTERGERÄT in Essen und Hattingen (Deutschland)	29
3.5.3.	Vergleichsmessungen Teom/Partisol in London (England).....	29
3.5.4.	Vergleichsmessungen Teom / KleinfILTERGERÄTE / HVS in Berlin (Deutschland)	30
4.	Umrechnungsmodelle für Betameter-Messreihen	31

4.1.	Regressionsmodelle	31
4.1.1.	Nomenklatur.....	31
4.1.2.	Regressionsresultate für Betameter-Geräte	31
4.2.	Periodische Modelle	36
4.2.1.	Nomenklatur.....	36
4.2.2.	Periodisches Verhalten.....	37
4.2.3.	Modellresultate für Betameter-Geräte.....	38
4.3.	Modellvergleiche	39
4.4.	Interpretation Betameter-Umrechnungsmodelle.....	40
4.5.	Internationale Vergleichsmessungen Betameter/HVS.....	40
4.5.1.	Vergleichsmessungen der EC Working Group on Particulate Matter	40
4.5.2.	Vergleichsmessungen Betameter / Kleinfiltergeräte / HVS in Berlin (Deutschland)	41
5.	Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick	43
5.1.	Schlussfolgerungen.....	43
5.1.1.	Generelle Folgerungen	43
5.1.2.	Folgerungen für Teom-Messungen	44
5.1.3.	Betameter	44
5.2.	Empfehlungen zur Modellwahl	45
5.2.1.	Referenzstationen	45
5.2.2.	Geräteeinstellungen.....	45
5.2.3.	Stationen mit Teom-Geräten	45
5.2.4.	Stationen mit Betameter-Geräten	48
5.3.	Weitere Empfehlungen	50
5.4.	Ausblick.....	54
	Anhang	56
A1.	Messwerte: Geräteeinstellungen und Normbedingungen	57
A1.1	Geräteeinstellungen	57
A1.1.1	High Volume Sampler DHA 80, Digitel Elektronik AG	57
A1.1.2	Teom 1400AB (Rev. B), Rupprecht & Patashnick Co.....	57
A1.1.3	Eberline Betastaubmeter FH62 I-R	60
A1.2	Bezugsbedingungen.....	64
A1.2.1	Schweizerische und europäische Bezugsbedingungen.....	64
A1.2.2	Umrechnung der HVS-Daten	65
A2.	Hinweise zur Statistik	67

A3. Details zu den Modellresultaten.....	73
A4. Optimale Modelle für die Referenzstationen.....	75
Davos-Matta (AfU GR)	75
Härkingen (NABEL)	75
Luzern Museggstrasse (in-LUFT)	76
Roveredo Municipio (AfU GR).....	76
Suhr Bärenmatte (AUS AG).....	76
Wallisellen Dietlikerstrasse (AWEL)	77
Zürich Stampfenbachstrasse (UGZ ZH)	77
A5. Ringversuch Filterwägungen	78
A5.1 Durchführung des Versuchs	78
A5.2 Resultate	78
Abkürzungen	81
Literatur	82

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

1.1. Hauptbericht und Kurzfassung

Das vorliegende Dokument ist der **Hauptbericht** zu PM10-Umrechnungsmodellen für Teom-/Betameter-Messreihen. Es enthält alle Ergebnisse aus den Vergleichsversuchen, Modellempfehlungen sowie Geräteeinstellungen. Diese Kenntnisse erlauben es Messnetzbetreibern, eigene Teom- oder Betameter-Messreihen umzurechnen, um sie Referenzmessreihen so weit anzunähern, wie es dem heutigen Verständnis der Unterschiede zwischen Teom-/Betametergeräten und High Volume Samplers entspricht.

Zum Hauptbericht gibt es eine separate, ca. 20 Seiten umfassende **Kurzfassung**.

1.2. PM10–Immissionen und –Messmethoden

Seit 1998 sind in der Luftreinhalte-Verordnung Immissionsgrenzwerte für Feinstaub PM10 (feindisperse Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 μm) verankert. Seither wird die PM10-Immission an zahlreichen Standorten in der Schweiz gemessen. Für die Betreiber von Messnetzen sind verschiedene Messgeräte auf dem Markt erhältlich, die teilweise mit unterschiedlichen Methoden arbeiten.

Manuelle gravimetrische Methoden (Volume Samplers mit niedrigen, hohen und super-hohen Volumenströmen, abgekürzt LVS, HVS und WRAC sowie Impaktoren) beruhen auf dem Prinzip der Filtration eines bestimmten Luftvolumens mit anschließender Wägung des Filters. Die Methode erlaubt die nachträgliche Bestimmung von PM10-Komponenten (Spurenanalytik).

Kontinuierliche Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Resonanzfrequenzänderung wie beim Teom-Geräte oder auf der Absorption von β -Strahlen, Betameter-Geräte. Diese Methoden gestatten zeitlich hochaufgelöste Messungen und online-Resultate.

Parallelmessungen zeigen, dass die Messwerte verschiedener Geräte voneinander abweichen können. So sind Messwerte aus High Volume Samplers in der kalten Jahreszeit systematisch höher als Messwerte aus Teom-Geräten. In der warmen Jahreszeit jedoch stimmen sie weitgehend überein. Dieser Unterschied lässt sich auf Grund der unterschiedlichen Messmethoden qualitativ verstehen. Ob es aber einfache, standort-unabhängige Umrechnungsfunktionen gibt, welche die Differenzen auch quantitativ richtig wiedergeben, war aus den bisherigen Parallelmessungen nicht ersichtlich.

1.3. Europäisches Referenzverfahren

Das Europäische Komitee für Normung hat kürzlich eine Norm herausgegeben, welche die manuelle, gravimetrische Methode als Referenzverfahren für die Messung von PM10 festlegt, drei Referenzgeräte bezeichnet (LVS, HVS, WRAC) und die Anforderungen für die Gleichwertigkeit mit einem Referenzgerät spezifiziert (CEN 1999).

Für die kontinuierliche Überwachung der PM10-Immission ist das Referenzverfahren relativ aufwendig, seine zeitliche Auflösung (24 Std.) ist gering im Vergleich mit der Variabilität der PM10-Konzentration in der Aussenluft und die Resultate sind nicht online verfügbar. Zudem sind selbst unter Referenzgeräten Differenzen beobachtet worden (erstens ist die Messung technisch sehr anspruchsvoll, und zweitens lässt die Norm Spielräume offen, welche das Resultat offensichtlich beeinflussen können). Aus all diesen Gründen ziehen Messnetzbetreiber automatische und höher auflösende Messmethoden dem Referenzverfahren vor, was sie aber dazu zwingt, ihre Messreihen auf Gleichwertigkeit zu prüfen und wenn nötig Umrechnungsfunktionen zu suchen.

1.4. 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. Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis dieser Zusammenarbeit.

Im Kapitel 2 wird das Programm der Vergleichsmessungen und das Vorgehen vorgestellt. Kapitel 3 und 4 dokumentieren die Umrechnungsmodelle für Teom- respektive für Betametergeräte. Im Kapitel 5 stehen Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick. Mehrere Anhänge enthalten technische Hinweise zu den Messungen und zur Statistik sowie Einzelheiten zu den Modellresultaten. Auch ein Ringversuch mit Filterwägungen ist beschrieben.

2. Messprogramm, Vorgehen und Qualitätssicherung

2.1. Standorte, Messdaten und Messgeräte

Am Versuch PM10-Vergleichsmessungen waren mehrere Institutionen beteiligt und folgende Messstandorte involviert:

Betreiber	Messstandorte	Charakterisierung
AUS AG	Suhr Bärenmatte	Agglomeration, verkehrsreiche Strasse
AWEL ZH	Wallisellen Dietlikerstrasse	Agglomeration, Grünzone
AfU GR	Davos-Matta	alpine Agglomeration, Wohnquartier
AfU GR	Roveredo Municipio	ländlich-alpin, verkehrsreiche Strasse
in-LUFT	Luzern Museggstrasse	Stadtzentrum, Wohnquartier
NABEL	Härkingen A1	ländlich, verkehrsreiche Strasse
UGZ ZH	Zürich Stampfenbachstrasse	Stadtzentrum, verkehrsreiches Wohnquartier

Tabelle 1: Messnetzbetreiber und –standorte.

Bei den Messstandorten handelt es sich um Plätze, die zum Messnetz für die Langzeitüberwachung der Luftqualität gehören, also nicht eigens für den Vergleichsversuch ausgewählt wurden. Neben dem PM10 wurden auch weitere gasförmige Schadstoffe und meteorologische Parameter gemessen, welche für die Regressionsanalysen zur Verfügung standen.

In den Messstationen werden für die Referenzmessung von PM10 High Volume Samplers (HVS) von Digitel Elektronik AG (DHA 80) benutzt. Die Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH (UMEG) hat für diesen Gerätetyp die Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren nachgewiesen (UMEG 1999). Parallelmessungen wurden mit Teom 1400a Rev. B von Rupprecht & Patashnik Co. und mit Eberline-Betastaubmeter FH62 I-R durchgeführt.

- c) Plausibilisierung der Rohdaten, Eliminierung von ungültigen Daten.
- d) Umrechnen der Messdaten auf Bezugsbedingungen: $T = 9 \text{ }^\circ\text{C}$ (282 K) und $p = 950 \text{ hPa}$ (950 mbar). Siehe dazu Anhang A1.2
- e) Aufnahme der Daten in eine Datenbank (MS Access 97)
- f) Statistische Auswertungen (S+, MS Excel) und Interpretation
- g) Berichterstattung, Dokumentation.

Zwischen- und Schlussergebnisse wurden an mehreren Besprechungen der Projektgruppe diskutiert. Das Vorgehen für die statistischen Analysen wurde mit Vertretern des statistischen Seminars der ETH Zürich an einer Sitzung vorbesprochen (Dr. W. Stahel, R. Locher), die Resultate im Schlussbericht von W. Stahel begutachtet. Seine Anregungen haben das Kapitel 5.4 wesentlich bereichert.

Als Messdaten standen (wie üblich) 24-h-Mittelwerte von 00h00 bis 24h00 der HVS-Geräte und ½-h-Mittelwerte, jeweils ab der vollen Minute der übrigen Beobachtungsgrössen zur Verfügung.

Ziel der Analyse war es, Umrechnungsvorschriften für 24-h-Mittelwerte aus Teom- und Betameter-Geräten zu gewinnen, um Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren gemäss europäischer Norm EN 12341 zu erreichen, oder zumindest gute Übereinstimmung auf dem Niveau der LRV-Parameter zwischen Teom- respektive Betameter-Messreihen mit HVS-Messdaten. Das soll heissen, dass erstens der Mittelwert einer modifizierten Teom- oder Betameter-Reihe mit dem Mittelwert der HVS-Reihe gut übereinstimmt und dass auch die Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gut übereinstimmt. (Ein quantitatives Kriterium für die „zumindest gute Übereinstimmung“ wurde nicht festgelegt¹.) Dazu ist allerdings anzumerken, dass die Zahl der Überschreitungen statistisch gesehen kein optimales Kriterium darstellt, weil es die Modellqualität extrem einseitig im hohen Konzentrationsbereich in Anspruch nimmt. Ein grosser Zufallsfehler führt zu einer grösseren Zahl von Überschreitungen. Im Interesse der Luftqualitätsbeurteilung wird das Kriterium trotzdem verwendet (siehe Erweiterungen im Kapitel 5.3).

Für die statistischen Analysen gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten:

- Aus den ½-h-Mittelwerten (PM10 aus Teom- und Betametermessungen, gasförmige Schadstoffe, Meteodaten) werden 24-h-Mittelwerte berechnet, welche zusammen mit den 24-h-Mittelwerten der HVS-Geräte die statistische Grundgesamtheit bilden. **Dieses Vorge-**

1 Die Festlegung eines solchen Kriteriums muss sich auf die Messunsicherheiten der HVS-Geräte bezüglich der LRV-Parameter beziehen.

hen wurde für die im folgenden vorgestellten Resultate gewählt. Als Kriterium für die Gültigkeit eines 24-h-Mittelwerts wurde festgesetzt, dass mindestens 24 (von 48 möglichen) gültige ½-h-Mittelwerte für den betreffenden Tag vorliegen mussten.

- Die Regressionen könnten auch zuerst auf der Stufe ½-h-Mittelwerten ausgeführt werden, um modifizierte ½-h-Mittelwerte für Teom- und Betameter-Geräte zu bestimmen. Aus den modifizierten PM10-Daten werden anschliessend 24-h-Mittelwerte berechnet und diese auf Gleichwertigkeit mit den HVS-Daten untersucht². **Diese Methode wurde im vorliegenden Vergleichsversuch nicht angewendet.** in-LUFT hat soeben eine entsprechende Untersuchung in Auftrag gegeben, Resultate liegen allerdings noch nicht vor.

2.4. Qualitätssicherung

Der Ringversuch 2000 des Cercl'Air in Basel hat gezeigt, dass für PM10-Messungen mit HVS die Vergleichsstandardabweichung respektive die Standardabweichung zwischen den Messlabors noch sehr gross ist (Cercl' Air 2001). Offenbar lässt die Norm EN 12341 Spielräume für Labo-ranalytik, 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 (s. Kap 5.3 - 5.4).

Für den Vergleichsversuch wurden deshalb einheitliche Geräteeinstellungen vereinbart und Bezugsbedingungen festgelegt. Siehe dazu Kap. 2.4 und detaillierte Ausführungen im Anhang A1.

2 Solange nur lineare Modelle untersucht werden, liefert diese zweite Methode keine besseren Korrelationen. Im Falle von nicht-linearen Modellen, z.B. mit logarithmischen Ansätzen, könnten evtl. bessere Korrelationen gewonnen werden.

3. Umrechnungsmodelle für Teom-Messreihen

3.1. Regressionsmodelle

3.1.1. Nomenklatur

Für die im Bericht benutzten Formeln werden einige Bezeichnungen eingeführt. Die PM10-Messwerte des HVS (Symbol Y) sind die zu erklärende Grösse, die übrigen Messwerte, primär natürlich die PM10-Messwerte der Teom- und Betameter-Geräte sind die erklärenden Grössen. Die aus den Teom-/Betameter-Messungen umgerechneten und mit Y zu vergleichenden Modellwerte werden mit Y_{Mod} bezeichnet, wo Mod ein Index bedeutet, der das Modell kennzeichnet: $Mod = RG0, RG1, RG2, \dots, Per$ (Namen siehe unten).

Symbol	Einheit	Bedeutung	Faktor
Y	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10: Messwerte HVS	---
Y_{Mod}	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 Modellwerte aus Teom/Betameter-Messwerten	---
X	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10: Messwerte TEOM / Betameter	a_1
T	$^{\circ}\text{C}$	Aussentemperatur-Messwerte	a_2
N	ppb	Messwerte NO_x	a_3
--	--	(Konstante)	a_0

Tabelle 3: Symbole für die statistischen Analysen. Faktor: Aus Regressionsanalysen zu bestimmen.

Im Bericht werden einige Regressionsmodelle vorgestellt (siehe folgende Tabelle). Weitere Regressionsmodelle mit anderen Schadstoffen und mit transformierten Grössen (z.B. logarithmierte Schadstoffkonzentrationen) sowie Meteo-Parametern (Druck, Feuchte) wurden untersucht, aber als nicht tauglich wieder verworfen.

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 4: Modelle: Typen und Gleichungen

3.1.2. Regressionsresultate für Teom-Geräte

a) Standort-spezifische Regressionsmodelle

In der Tabelle sind pro Kästchen die Regressionsresultate für jeden Standort respektive für jedes Teom-Gerät enthalten: Werte der Regressionsfaktoren inklusive Standardfehler (st. err.), das Bestimmtheitsmass R^2 und die Zahl der gültigen Wertepaare N.

Luzern Teom o.Naf.(T50) N = 286					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	0.103	1.016	0.680
	PM10-T50	a_1	1.284	0.052	
RG2	Konstante	a_0	5.766	0.884	0.810
	PM10-T50	a_1	1.362	0.041	
	Temperatur	a_2	-0.610	0.044	
RG3	Konstante	a_0	-2.363	0.999	0.729
	PM10-T50	a_1	1.099	0.055	
	NOx	a_3	0.160	0.022	
RG4	Konstante	a_0	5.886	1.126	0.810
	PM10-T50	a_1	1.368	0.052	
	NOx	a_3	-0.004	0.024	
	Temperatur	a_2	-0.616	0.056	
RG0	PM10-T50	a_1	1.289	0.021	0.932

Luzern Teom m.Naf. (T30) N = 284					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	-0.076	0.856	0.757
	PM10-T30	a_1	1.178	0.040	
RG2	Konstante	a_0	5.037	0.850	0.832
	PM10-T30	a_1	1.188	0.033	
	Temperatur	a_2	-0.457	0.041	
RG3	Konstante	a_0	-1.534	0.873	0.777
	PM10-T30	a_1	1.058	0.045	
	NOx	a_3	0.106	0.021	
RG4	Konstante	a_0	5.676	1.068	0.832
	PM10-T30	a_1	1.215	0.043	
	NOx	a_3	-0.023	0.023	
	Temperatur	a_2	-0.487	0.051	
RG0	PM10-T30	a_1	1.175	0.016	0.948

Wallisellen Teom o.Naf. (T50) N = 210					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	-0.715	0.880	0.782
	PM10-T50	a_1	1.302	0.048	
RG2	Konstante	a_0	3.570	0.742	0.878
	PM10-T50	a_1	1.361	0.036	
	Temperatur	a_2	-0.553	0.044	
RG3	Konstante	a_0	-1.425	0.794	0.828
	PM10-T50	a_1	1.116	0.049	
	NOx	a_3	0.180	0.024	
RG4	Konstante	a_0	2.806	0.795	0.881
	PM10-T50	a_1	1.298	0.045	
	NOx	a_3	0.057	0.024	
	Temperatur	a_2	-0.491	0.051	
RG0	PM10-T50	a_1	1.267	0.021	0.946

Wallisellen Teom m.Naf. (T30) N = 172					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	-0.331	0.864	0.809
	PM10-T30	a_1	1.160	0.043	
RG2	Konstante	a_0	4.019	0.731	0.897
	PM10-T30	a_1	1.221	0.032	
	Temperatur	a_2	-0.511	0.042	
RG3	Konstante	a_0	-1.151	0.780	0.851
	PM10-T30	a_1	1.022	0.043	
	NOx	a_3	0.161	0.023	
RG4	Konstante	a_0	3.287	0.811	0.899
	PM10-T30	a_1	1.177	0.040	
	NOx	a_3	0.046	0.023	
	Temperatur	a_2	-0.458	0.051	
RG0	PM10-T30	a_1	1.146	0.019	0.955

Suhr Teom o. Naf. (T50) N = 478					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	-3.357	0.662	0.841
	PM10-T50	a_1	1.421	0.028	
RG2	Konstante	a_0	3.049	0.549	0.922
	PM10-T50	a_1	1.384	0.020	
	Temperatur	a_2	-0.618	0.028	
RG3	Konstante	a_0	-4.064	0.670	0.849
	PM10-T50	a_1	1.322	0.037	
	NOx	a_3	0.056	0.013	
RG4	Konstante	a_0	3.894	0.598	0.924
	PM10-T50	a_1	1.448	0.027	
	NOx	a_3	-0.035	0.010	
	Temperatur	a_2	-0.661	0.030	
RG0	PM10-T50	a_1	1.290	0.012	0.962

Härkingen o. Naf. (T50) N = 312					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	1.306	1.142	0.634
	PM10-T50	a_1	1.146	0.050	
RG2	Konstante	a_0	8.780	1.137	0.749
	PM10-T50	a_1	1.184	0.041	
	Temperatur	a_2	-0.650	0.055	
RG3	Konstante	a_0	-1.398	1.133	0.683
	PM10-T50	a_1	0.998	0.051	
	NOx	a_3	0.079	0.011	
RG4	Konstante	a_0	6.398	1.253	0.762
	PM10-T50	a_1	1.099	0.045	
	NOx	a_3	0.043	0.011	
	Temperatur	a_2	-0.570	0.057	
RG0	PM10-T50	a_1	1.198	0.020	0.922

Tabelle 5: Standort-spezifische Regressionsanalysen für Teom-Geräte

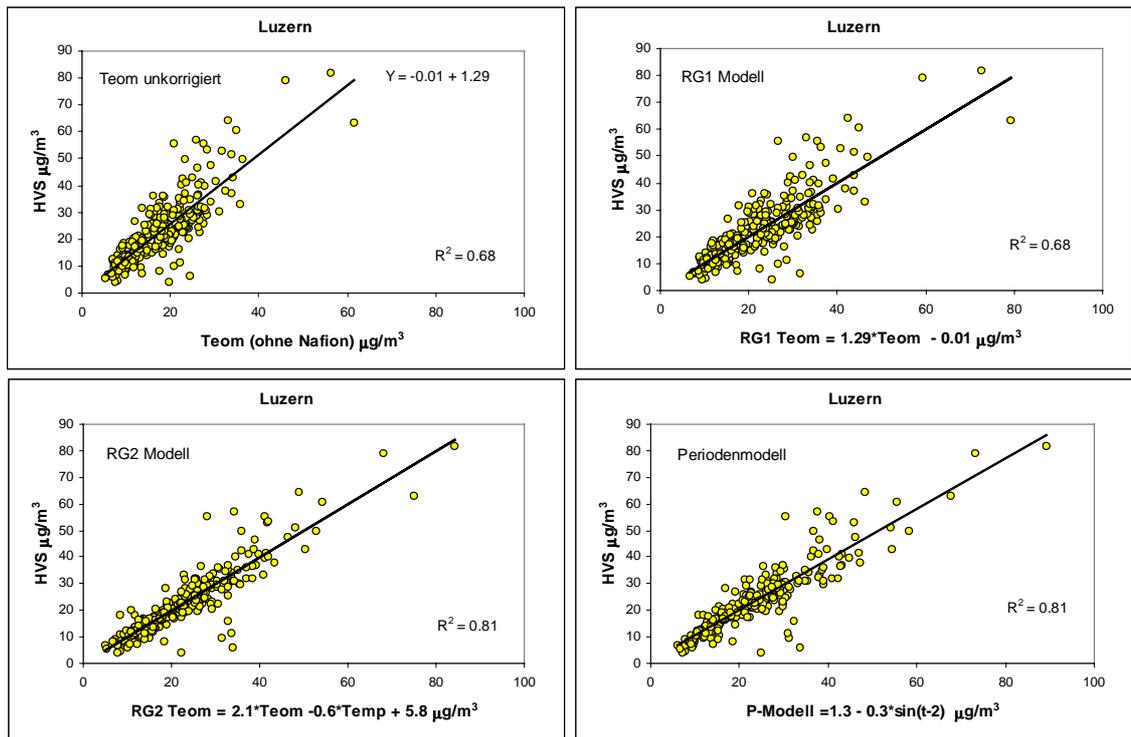
Grundsätzliche Bemerkungen

- Voraussetzungen für eine Regressionsanalyse sind die Normalverteilung und Unabhängigkeit der Residuen. Eine Untersuchung der Voraussetzungen ist im Anhang A2. angegeben. Es zeigt sich, dass die Residuen nicht generell normalverteilt sind. Zwar kann mit dem Chi-Quadrat-Test in den meisten Fällen die Null-Hypothese akzeptiert werden, die Verteilungen zeigen bei genauer Betrachtung jedoch Schiefe und schmale Gipfel. Zudem weisen die Residuen mehr oder weniger Autokorrelationen auf, sind also nicht unabhängig. Die Unabhängigkeit wird besser beim Schritt von den RG1- zu den RG2-Modellen. Weitere Einzelheiten sind im Anhang angegeben. Aus Sicht der Statistik sind deshalb die Fehler (standard error) der Koeffizienten unzuverlässig. Um diesen Mangel zu beheben, müssten robuste Methoden und autoregressive Modelle eingesetzt werden. Eventuell könnte schon bei einer erweiterten Regressionsanalyse (errors in variables, geometric mean regression, siehe Ausblick) Normalverteilung und Unabhängigkeit der Residuen verbessert werden. Der Projektrahmen erlaubte solche Erweiterungen allerdings nicht (s. Empfehlungen).
- Zusätzlich zu den in der Tabelle enthaltenen Modellen wurden weitere Kombinationen von erklärenden Grössen (auch mit O₃, SO₂, relativer Feuchte und Druck) durchgerechnet und wieder verworfen, weil keine besonderen Verbesserungen der Korrelationskoeffizienten erzielt werden konnten.
- Grundsätzlich lässt sich in jeder Regressionsanalyse die Korrelation verbessern, wenn weitere erklärende Grössen eingeführt werden. Der Gewinn auf der Seite der Korrelation wird allerdings mit einem hohen Preis erkaufte, weil jede zusätzliche Grösse erstens beobachtet werden muss, und bei jedem Ausfall eines Messdatums die Umrechnung nicht ausgeführt werden kann. Mit wachsender Zahl von erklärenden Grössen verkleinert sich die Grundgesamtheit deshalb rasch. Im Weiteren ist aus Gründen der Praktikabilität erwünscht, dass die Zahl erklärender Grössen möglichst klein gehalten wird, damit das Modell an möglichst vielen, evtl. nicht gleich hoch ausgerüsteten Stationen benutzt werden kann.
- Für alle Modelle ist das Bestimmtheitsmass R^2 angegeben. Die Norm EN 12341 stellt für die Gleichwertigkeit mit einer Referenzmessung die Bedingung $R^2 \geq 0.95$. Die Ergebnisse für die Modell RG1–RG4 können daraufhin geprüft werden. Für das Modell RG0 gilt diese Prüfung nicht, denn dort wird in der Analyse die Regressionsgerade durch den Nullpunkt gezwungen. Zwar ist dann die Minimierungsbedingung für die Summe der Residuenquadrate noch immer erfüllt. Hingegen muss die Nebenbedingung „Summe der Residuen = 0“ zugunsten der Nullpunktsbedingung fallengelassen werden. Was dann als R^2 berechnet wird, kann wohl noch mit den anderen RG0-Modellen verglichen werden, hat aber nicht

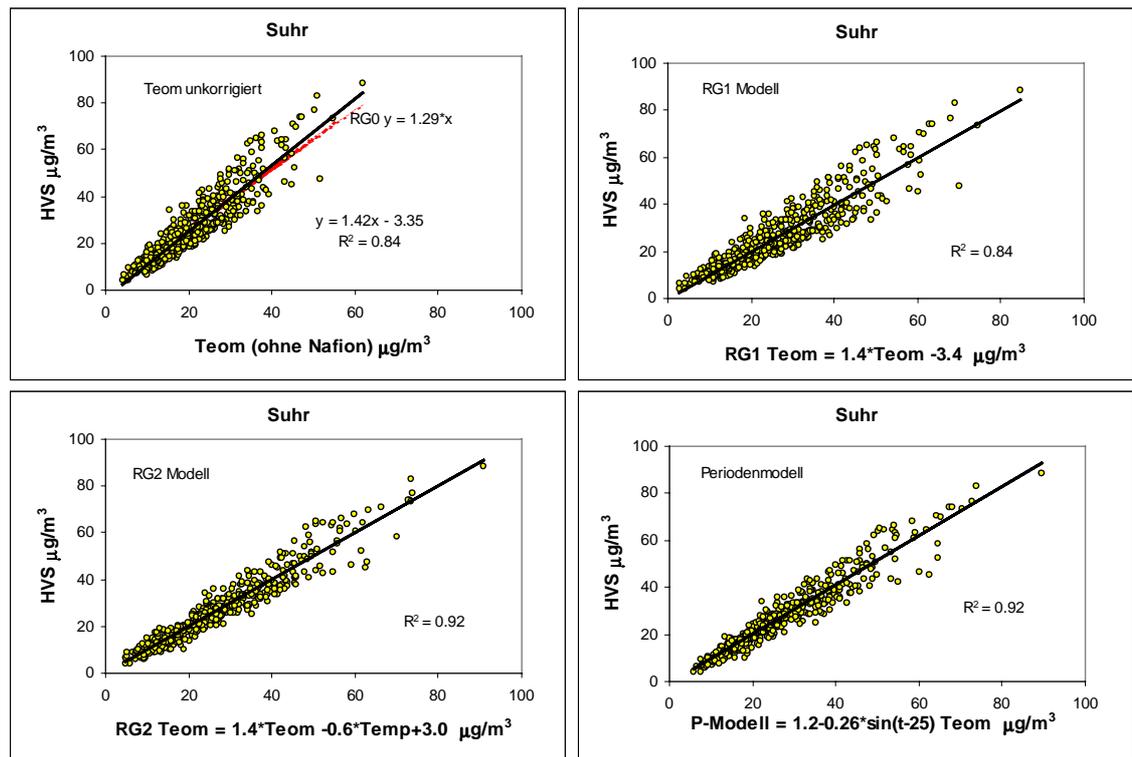
mehr die Bedeutung des Bestimmtheitsmasses.

Spezifische Bemerkungen:

- **Keines der Modelle RG1–RG4 erfüllt die Bedingung der EN 12341 $R^2 \geq 0.95$.** Die berechneten Werte liegen im Bereich 0.634–0.924.
- Die Werte der **Regressionsfaktoren** zeichnen für die verschiedenen Standorte und für die verschiedenen Modelle ein qualitativ ähnliches Bild. Die Vorzeichen der Faktoren sind immer oder fast immer dieselben, die Temperatur z.B. kommt überall mit negativem Vorzeichen vor, und auch die Beträge der Faktoren sind ähnlich.
- Die **PM10-Messung Teom** ist selbstverständlich die wichtigste erklärende Grösse für die HVS-PM10-Messung. Die Faktoren a_1 liegen für alle Teom-Geräte ohne Nafion im Intervall 1.10–1.45, mit Nafion 1.02–1.22. Dies rechtfertigt, dass Standort-unabhängige Modelle definiert und auf ihre Tauglichkeit hin überprüft werden (siehe unten Mittelland-Modelle).
- Der Einbezug der **Temperatur** als erklärende Grösse im Modell RG2 bringt eine wesentliche Verbesserung der Korrelation gegenüber RG1. Während im Modell RG1 das mittlere Bestimmtheitsmass bei 0.75 liegt, springt es durch Einbezug der Temperatur auf 0.88 an. Siehe dazu Figur 2 und Figur 3: .
- Hingegen ist **NO_x** als erklärende Grösse nicht von Bedeutung. Zwangsläufig wird das Bestimmtheitsmass mit Berücksichtigung von NO_x grösser, allerdings springt es von 0.75 (RG0) auf lediglich 0.81 (RG3) an. Zudem ändert sich sogar das Vorzeichen des NO_x-Faktors bei verschiedenen Stationen.
- Auch die weiteren gasförmigen Schadstoffe **CO, O₃ und SO₂** sowie die Meteo-Parameter **Druck** und **relative Feuchte** sind als erklärende Grössen nicht von Bedeutung.
- Vergleich **Teom ohne respektive mit Nafion**: Mit Nafion rückt der Faktor a_1 näher an 1 und das Bestimmtheitsmass wird in allen Modellen grösser. In den meisten Modellen wird auch die Konstante a_0 dem Betrag nach kleiner. **Das heisst, dass die Messwirklichkeit des Teoms mit Nafion näher beim HVS liegt als ohne Nafion.**



Figur 2 *Resultate der Regressionsanalysen für Luzern: Teom-Werte unkorrigiert (oben links), mit dem RG1- und RG2-Modell korrigiert (oben rechts und unten links). Das RG0-Modell fällt im Bild oben links mit der Regressionsgeraden praktisch zusammen. Unten rechts ist für den späteren Vergleich die Umrechnung mit Hilfe des Periodenmodells dargestellt.*



Figur 3: Resultate der Regressionsanalysen für Suhr analog Figur 2.

b) LRV-Auswertungen für die standort-spezifischen Modelle

Mit den standort-spezifischen Modellen werden die beiden Parameter berechnet, die für die Beurteilung der PM₁₀-Immission nach LRV vorgeschrieben sind: Mittelwert und Zahl der Tage mit Überschreitung des 24-h-Mittels von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für alle Stationen sind die beiden Parameter für die HVS- und die unkorrigierten Teom-Messreihen in der Tabelle in den linken Spalten angegeben und rechts davon die mit RG1 und RG2 umgerechneten Modellwerte. Gemittelt wird pro Station über die maximal verfügbare Zahl der Tage, an denen gültige HVS-, Teom-, Temperatur- und NO_x-Messwerte vorhanden sind. Diese Zahl entspricht für keine Station einem kompletten Jahr. Die Werte können deshalb von eventuell publizierten Jahresmittelwerten der betreffenden Stationen abweichen.

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Modellwerte		
		HVS Y	Teom X	RG0 $a_1 \cdot X$	RG 1 $a_0 + a_1 X$	RG 2 $a_0 + a_1 X + a_2 T$
Luzern OHNE Naf.	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.9	22.9	22.8
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	3	4	8
Luzern MIT Naf.	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	19.6	23.1	23.0	23.0
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	3	5	7	8
Wallisellen OHNE Naf. jeden 2. Tag jeden Tag	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	16.4	20.7	20.6	20.8
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	0		3	5
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	(>5)	0		5	9
Wallisellen MIT Naf. jeden 2. Tag jeden Tag	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	17.8	20.4	20.3	20.5
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	4	1		2	4
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	(>4)	2		4	6
Suhr	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	21.4	27.7	27.1	27.1
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	39	5	21	28	33
Härkingen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	21.1	25.3	25.5	25.5
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	3		7	14

Tabelle 6: Auswertungen der Mess- und Modellreihen (RG0, RG1, RG2) nach LRV: Mittelwerte und Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Bemerkungen:

- Messwerte: HVS-Daten sind sowohl im Mittelwert wie auch in der Zahl der Tage mit Überschreitungen von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ systematisch höher als Teom-Daten, ausgeprägt natürlich bei der Zahl der Überschreitungen.
- Teom-Messwerte ohne/mit Nafion: In Luzern und Wallisellen, wo sowohl Teom-Geräte ohne wie mit Nafion verfügbar waren, liefern die Geräte mit Nafion höhere Werte als ohne. Allerdings ist die Differenz zum HVS auch beim Teom mit Nafion noch beträchtlich.
- Modellerte Mittelwerte: Die aus den Teom-Werten mit RG0, RG1 und RG2 umgerechneten Mittelwerte entsprechen für alle drei Modelle sehr gut den HVS-Mittelwerten.
- Modellerte Überschreitungen (RG1, RG0): Bei der Zahl der Überschreitungen liefert das Modell RG1 bereits eine grössere Zahl als die Teom-Messreihe, in vier Fällen etwa doppelt so viele, aber immer noch deutlich weniger als beim HVS. RG0 Resultate liegen zwischen dem unkorrigierten Teom und dem RG1-Modell.
- Modellerte Überschreitungen (RG2): Mit dem Modell RG2 wird die Zahl der Überschreitungen noch höher und trifft in Wallisellen sogar die Zahlen des HVS exakt. In den anderen Fällen bleiben die RG2-Zahlen aber immer noch etwas unter jenen des HVS.

- Spezialfall Wallisellen: Dort gilt es zu beachten, dass das HVS nur jeden 2. Tag misst, das Teom aber dauernd in Betrieb steht. Die erste Auswertung bezieht sich nur auf solche Tage, an denen HVS-Daten vorhanden sind (Zeile „jeden 2. Tag“). Nur auf dieser Zeile dürfen die Modellwerte mit den HVS-Werten verglichen werden. In der zweiten Zeile („jeden Tag“) wurden die Teom-Daten aller Tage ausgewertet und dafür auch die Modellwerte berechnet. Die Zahl der Überschreitungen wird damit grösser und verdoppelt sich ungefähr, was aber nicht mehr mit dem HVS verglichen werden kann.
- **Fazit: Für die Beurteilung der PM10-Immission gemäss LRV können die lokalen Regressionsmodelle RG0, RG1 und RG2 die aus den Teom-Messungen umgerechneten Mittelwerte sehr gut an den Referenz-Mittelwert des HVS heranführen. Bei der Zahl der Überschreitungen liefert das RG1-Modell zwar schon bessere Werte als die unkorrigierten Teom-Daten, aber das RG2-Modell ist dort wesentlich stärker als RG1 und noch stärker als RG0.**

c) Mittelland-Modelle

Wie oben erwähnt, zeigen die Regressionsanalysen der vier Stationen Härkingen, Luzern, Suhr und Zürich ein qualitativ sehr ähnliches Bild, wenn auch die Regressionskoeffizienten untereinander etwas streuen. Die Ähnlichkeit legt nahe, ein Mittelland-Modell zu definieren. Dies kann entweder durch Mittelwertbildung der Regressionskoeffizienten geschehen oder durch Zusammenlegen aller Messpunkte zu einer einzigen statistischen Gesamtheit, für die das Modell dann durch Regression bestimmt wird. An den einzelnen Stationen, aus denen das Modell abgeleitet wird, wird die Modellgenauigkeit gegenüber dem lokal optimierten Modell etwas abnehmen, hingegen liegt **der grosse Vorteil eines Mittelland-Modells darin, dass ein solches für andere Stationen benützt werden kann, an denen keine Parallelmessungen mit einem HVS-Gerät durchgeführt werden.**

Um ein Mittelland-Modell zu bestimmen, wird wie folgt vorgegangen:

1. Kalibration des Modells: Aus den vier Mittelland-Stationen mit Teom-Geräten (ohne Nation) werden drei ausgewählt und aus ihren Vergleichsdaten ein Mittelland-Modell berechnet (Mittelwert der Regressionskoeffizienten).
2. Validierung des Modells: Das so bestimmte Modell wird auf die vierte Station angewendet und daraus die LRV-Parameter (Mittelwert, Anzahl Überschreitungen von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) berechnet. Diese Parameter werden mit jenen verglichen, welche sich aus der HVS-Messreihe ergeben.

3. Aus den vier Stationen werden auch die drei weiteren Kombinationen dreier Stationen gebildet und auch daraus Mittelland-Modelle gebildet, welche wiederum mit der jeweils vierten Station validiert werden.
4. Wenn die Validierungen befriedigende Resultate zeigen, wird schliesslich ein Mittelland-Modell aus allen vier Stationen bestimmt, welches zur Benutzung im Mittelland empfohlen werden kann.

Die Resultate der Modellbildung stehen in der folgenden Tabelle 7. In der Spalte Methode sind die Modelle mit dem Kennwort „Mittel“ bezeichnet. Zusätzlich wird auch noch das Modell mit dem Kennwort „**Gesamtheit**“ angegeben, in dem nicht die Regressionskoeffizienten gemittelt werden, sondern für das zuerst die Messdaten der vier Stationen **zu einer statistischen Gesamtheit vereint** werden und daraus das Modell durch Regression bestimmt wird. Die Differenz der beiden Methoden „Mittel“ und „Gesamtheit“ ist sehr gering. Schliesslich sind auch noch die Koeffizienten des RWTÜV-Modells angegeben, welches mit der Methode „Mittel“ aus vier einzelnen Funktionen bestimmt wurde (RWTÜV 1999). Siehe dazu den folgenden Abschnitt d.

Kalibrierstationen	Methode	RG0	RG1		RG2			Periodenmodell		
		PM1 a ₁	Konst. a ₀	PM10 a ₁	Konst. a ₀	PM10 a ₁	Temp. a ₂	<k(t)> A	Amplitude B	Phase C
Luzern, Suhr, Wallisellen	Mittel	1.28	-1.32	1.34	4.13	1.37	-0.59	1.24	-0.28	12.6
Härkingen, Suhr, Wallisellen	Mittel	1.25	-0.92	1.29	5.13	1.31	-0.61	1.26	-0.29	9.83
Härkingen, Luzern, Wallisellen	Mittel	1.25	0.23	1.24	6.04	1.30	-0.60	1.29	-0.31	2.14
Härkingen, Luzern, Suhr	Mittel	1.26	-0.65	1.28	5.86	1.31	-0.63	1.28	-0.31	6.73
Härkingen, Luzern, Suhr, Wallisellen	Mittel	1.26	-0.67	1.29	5.29	1.32	-0.61	1.27	-0.30	7.82
Härkingen, Luzern, Suhr, Wallisellen	Gesamth.		-0.89	1.30	5.15	1.31	-0.60	---	---	---
RWTÜV (Deutschland)	Mittel	---	-3.54	1.41	---	---	---	---	---	---

Tabelle 7: Mittelland-Modelle RG1 und RG2 für Teom-Geräte (ohne Nafion) für alle Kombinationen von Mittelland-Stationen. In der untersten Zeile sind die Koeffizienten des RWTÜV-Modells (RG1) angegeben.

Wie unten gezeigt wird, können Mittelland-Modelle die HVS-Messreihen respektive die LRV-Parameter in guter Weise reproduzieren. Besser als das RG0- und das RG1-Modell sind aber das RG2- und das RG4-Modell. Deshalb werden an dieser Stelle auch die entsprechenden Modellgleichungen vorgestellt, und zwar für Teom-Geräte ohne und mit Nafion. Was für die lokalen Modelle gilt, zeigt sich auch für die Mittelland-Modelle: Generell kommen die Messwerte aus Teom-Geräten mit Nafion näher an die HVS-Messreihen heran (höhere R^2 , a_1 -Koeffizienten näher bei 1). RG2-Modelle sind besser als RG1-Modelle, das heisst die Temperatur als erklärende Grösse ist wichtig. Mit dem Einbezug weiterer Parameter kann darüber hinaus keine wesentliche Verbesserung mehr erzielt werden.

MittellandTeom o. Naf. (T50) N = 1287						Mittelland m. Naf. (T30) N = 456					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R ²	Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R ²
RG1	Konstante	a ₀	-0.894	0.450	0.754	RG1	Konstante	a ₀	-0.222	0.619	0.778
	PM10-T50	a ₁	1.300	0.021	PM10-T30		a ₁	1.175	0.030		
RG2	Konstante	a ₀	5.151	0.408	0.851	RG2	Konstante	a ₀	4.509	0.587	0.854
	PM10-T50	a ₁	1.314	0.016	PM10-T30		a ₁	1.204	0.024		
	Temperatur	a ₂	-0.597	0.021	Temperatur		a ₂	-0.470	0.030		
RG3	Konstante	a ₀	5.151	0.445	0.767	RG3	Konstante	a ₀	-1.253	0.601	0.802
	PM10-T50	a ₁	1.201	0.024	PM10-T30		a ₁	1.052	0.032		
	NOx	a ₃	0.052	0.006	NOx		a ₃	0.111	0.015		
RG4	Konstante	a ₀	4.837	0.424	0.852	RG4	Konstante	a ₀	4.134	0.667	0.854
	PM10-T50	a ₁	1.290	0.019	PM10-T30		a ₁	1.184	0.030		
	NOx	a ₃	0.013	0.005	NOx		a ₃	0.017	0.015		
	Temperatur	a ₂	-0.583	0.022	Temperatur		a ₂	-0.450	0.035		
RG0	PM10-T50	a ₁	1.262	0.009	0.943	RG0	PM10-T30	a ₁	1.165	0.013	0.950

Tabelle 8: Mittelland-Regressionsmodelle für Teom OHNE Nafion (Tabelle links) bzw. MIT Nafion (Tabelle rechts).

In Formelschreibweise lauten die Mittelland-Modelle wie folgt.

Modell	Mittelland-Modelle		
	für Teom ohne Nafion	für Teom mit Nafion	Bemerkung
RG0	$Y_{RG0} = 1.26 * X$	$Y_{RG0} = 1.16 * X$	Nur für Schätzung Jahresmittel aus gemessenem Jahresmittel
RG1	$Y_{RG1} = -0.89 + 1.30 * X$	$Y_{RG1} = -0.22 + 1.17 * X$	Für Schätzung Jahresmittel aus Tagesmitteln
RG2	$Y_{RG2} = 5.2 + 1.31 * X - 0.60 * T$	$Y_{RG2} = 4.5 + 1.20 * X - 0.47 * T$	Für Schätzung Jahresmittel und Überschreitungen 50 µg/m ³ aus Tagesmitteln

Tabelle 9 Regressionsresultate: Mittelland-Modelle Y_{Mod} für Teom-Messreihen X .

d) LRV-Auswertungen für die Mittelland-Modelle (Teom ohne Nafion)

LRV-Statistik, Teom o.Naf. Station (Kalibrierstationen)	Parameter	Messwerte		Modellwerte		
		HVS Y	Teom X	RG0 $a_1 \cdot X$	RG 1 $a_0 + a_1 X$	RG 2 $a_0 + a_1 X + a_2 T$
Luzern (standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.9	22.9	22.8
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	3	4	8
Luzern (Härk., Suhr, Wall.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.2	22.0	21.3
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	3	4	7
Luzern (Mittelland)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.4	22.2	21.7
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	3	4	7
Suhr (standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	21.4	27.7	27.1	27.1
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	39	5	21	28	33
Suhr (Mittelland)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	21.4	27.1	27.0	28.1
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	39	5	20	20	33
Härkingen (standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	21.1	25.3	25.5	25.5
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	3		7	14
Härkingen (Mittelland)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	21.1	26.7	26.5	25.5
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	3	12	12	16
Wallisellen (Mittelland)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	16.4	20.7	20.5	21.3
	jeden 2. Tag Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	0		2	5
	jeden Tag Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	(>5)	0		4	9

Tabelle 10: Auswertungen der Mess- und Modellreihen (RG1, RG2) nach LRV: Mittelwerte und Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ analog Tabelle 6, und zwar für standort-spezifische und Mittelland-Modelle.

Bemerkungen:

- Die Ergebnisse für die Messreihen HVS und Teom sind identisch mit Tabelle 6. Neu sind die Modellresultate, die mit Mittelland-Modellen berechnet werden.
- Validierung Luzern: Für die Teom-Messwerte ist zuoberst das Ergebnis mit dem standort-spezifischen Luzerner Modell angegeben. Anschliessend wird das Mittelland-Modell auf Luzern angewendet, welches aus den drei übrigen Stationen Härkingen, Suhr und Wallisellen kalibriert wird. Schliesslich werden Mittelwert und Überschreitungstage noch mit dem Mittelland-Modell berechnet, welches aus allen vier Stationen kalibriert ist. Selbstverständlich zeigt das standort-spezifische Modell die besten Ergebnisse (gemessen am HVS). Bemerkenswert ist, dass aber die Mittelland-Modelle praktisch ebenso gute Resultate liefern wie das standort-spezifische Modell. **Das rechtfertigt den Gebrauch des Mittelland-Modells und zeigt auch, dass die Kalibration sowohl mit drei wie auch mit vier Stationen fast dieselben Ergebnisse zu erzeugen vermag. In Bezug auf die Ausgestaltung**

des Modells ist das RG2- dem RG1-Modell überlegen, weil es die Zahl der Überschreitungen wesentlich besser approximiert. Auch RG0 ist für die Mittelwertberechnung gut, aber weniger geeignet für die Zahl der Überschreitungen als RG1 und erst recht weniger als RG2.

- Für Suhr ergeben sich nur leichte Unterschiede zu Luzern. Der Übergang vom standort-spezifischen zum Mittelland-Modell ergibt etwas grössere Änderung als in Luzern. Auch hier ist das RG2-Modell besser als RG1 und RG0.
- In Härkingen ist das RG2-Modell deutlicher die bessere Variante als RG1, gibt es doch in der standort-spezifischen und in der Mittelland-Version beide Parameter besser wider als das RG1-Modell und RG0.
- Auch für Wallisellen gelten die oben gemachten Aussagen. Da das HVS nur jeden 2. Tag betrieben wird und dabei in der Messperiode 5 Tage mit Überschreitungen detektiert, ist zu erwarten, dass die effektive Zahl der Überschreitungen grösser ist. Das Mittelland-RG1-Modell findet nur 2 Tage (jeden 2. Tag) respektive 4 Tage (jeden Tag), das RG2-Modell jedoch 5 (für jeden 2. Tag wie das HVS) und 9 Tage (jeden Tag). **Mit dem RG2-Modell steht für Wallisellen somit ein Werkzeug zur Verfügung, um die Zahl der Überschreitungen aus der unvollständigen HVS-Messreihe zu extrapolieren.**

e) RWTÜV-Modell

Das Modell, das auf einen Vergleichsversuch in Deutschland zurückgeht, wurde gelegentlich in der Schweiz schon für Umrechnungen benutzt, weshalb in dieser Studie näher darauf eingegangen wird. Siehe Ausführungen im Kapitel 3.5.2. Das RWTÜV-Modell entspricht einem RG1-Modell (Regressionskoeffizienten siehe Tabelle 7). Im Intervall $15\text{--}30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, das heisst im Bereich der heutigen Belastung in der Schweiz (inklusive Grenzwert), stimmen die beiden Modelle sehr gut überein (Abweichungen absolut $< 1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Bei niedrigeren und höheren PM10-Werten werden die Abweichungen grösser. Auf das Modell und seine Bedeutung wird im Kap. 3.3 eingegangen. Als Besonderheit sei bemerkt, dass die Regressionskoeffizienten des RWTÜV-Modells zufällig sehr genau mit jenen des standortspezifischen RG1-Modells für Suhr übereinstimmen: $a_0=-3.36$ (RWTÜV -3.54), $a_1=1.42$ (RWTÜV 1.41).

3.2. Periodische Modelle

3.2.1. Nomenklatur

Alternativ zu den Regressionsmodellen wurden die Messdaten einer einfachen Zeitreihenanalyse unterworfen. Bei den Schadstoffen und den Meteodaten sind die jahreszeitlichen Schwankungen wohlbekannt. Nun weist aber auch das Verhältnis der PM10-Konzentrationen HVS/Teom, im Folgenden als k-Faktor bezeichnet $k := Y/X$, bei allen Stationen eine mehr oder weniger ausgeprägte jahreszeitliche Periode auf (wie die Temperaturabhängigkeit der Abweichungen zwischen Teom und HVS ja auch vermuten lassen). Dementsprechend kann man durch die Messpunkte eine optimierte saisonale Schwankung $k_{per}(t)$ mit Jahresperiode gemäss folgender Gleichung legen. Modelle dieser Art werden in dieser Untersuchung als Periodenmodelle bezeichnet

$$k_{per}(t) := A + B * \sin\left(2 * \pi * \frac{t - t_0 - C}{365}\right)$$

A , B und C sind Modellparameter, die aus einer nicht-linearen Regressionsanalyse zu bestimmen sind³. A entspricht dem Mittelwert⁴ von $k_{per}(t)$, B der Amplitude von $k_{per}(t)$ und bezeichnet somit die max. Abweichung vom Mittelwert. C ist Phase von $k_{per}(t)$ und legt das Datum fest, an dem $k_{per}(t)$ maximal ist. t_0 ist ein Datum, das einmalig und willkürlich festzulegen ist und das zur Kalibrierung auf das Startdatum einer Messreihe dient (in den unten folgenden Modellen wird jeweils der 21.März des Messjahres gewählt.)

Wenn es gelingt, die Teom-Messdaten (oder Betameter-Messdaten) mit Hilfe eines Periodenmodells in gute Übereinstimmung mit den HVS-Daten zu bringen, so wäre viel gewonnen. Damit stünde ein Modell zur Verfügung, in welches A-priori-Wissen einfließt, nämlich die Periodizität des k-Faktors, und dessen Parameter in Beziehung zu interpretierbaren Grössen stehen: $A = \langle k(t) \rangle$ etc. Bei den Regressionsmodellen ist dies nicht der Fall, die Regressionsfaktoren a_0 , a_1 etc. enthalten keine deutbaren Informationen.

Selbstverständlich wären noch weitere periodische Anteile in den Messdaten vorhanden. Diese zu bestimmen und auszuwerten entspräche einer harmonischen Analyse (Fourieranalyse). Darauf soll aber in dieser Untersuchung verzichtet werden.

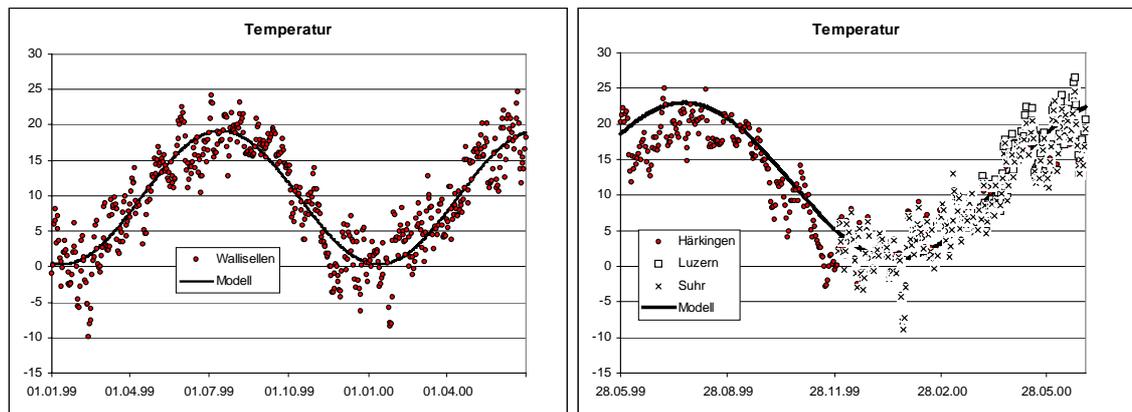
3 Wie in einer linearen Regressionsanalyse werden die Koeffizienten unter den Nebenbedingungen bestimmt: 1) Summe der Residuen gleich Null, 2) Summe der quadrierten Residuen minimal.

4 Für jeden Tag mit gültigem Teom-Tagesmittelwert X und HVS Tageswert Y gibt es ein zugehöriges Verhältnis $k = Y/X$; der Parameter A entspricht dem Mittelwert aller k .

3.2.2. Periodisches Verhalten

a) Temperatur

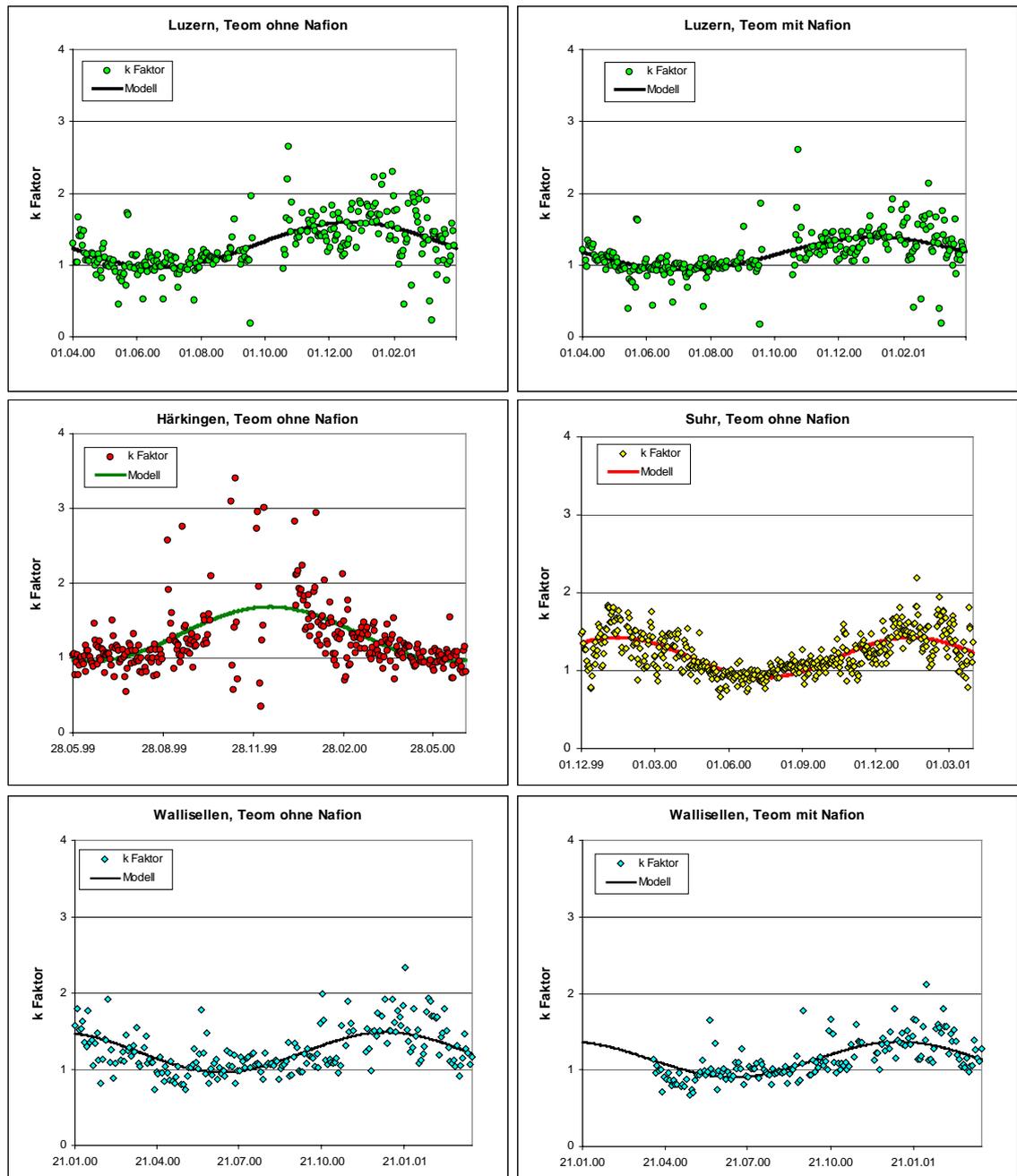
Die folgenden Figuren zeigen exemplarisch das periodische Verhalten der Temperaturmessungen. Zwischen den Mittelland-Stationen zeigen sich kaum Unterschiede.



Figur 4: Temperaturkurven Wallisellen, Härkingen, Luzern und Suhr. Ausgezogene Linien: Periodenmodell für die Temperatur. .

b) k-Faktor

Wie die Temperatur, so zeigt auch der k-Faktor eine jahreszeitliche Schwankung, wobei dessen Streuung im Winter sehr gross wird. Die Figuren zeigen die $k(t)$ -Werte in Funktion der Zeit (Tage), alle mit identischer Ordinate. Der Funktionswert = 1 bedeutet, dass Teom- und HVS-Geräte denselben PM10-Tagesmittelwert messen. In den Figuren ist auch die Modellfunktion $k_{Per}(t)$ eingetragen. Während die Schwingungen der Temperatur vom Standort kaum abhängig sind, findet man beim k-Faktor einige Unterschiede (siehe nächstes Kapitel).



Figur 5: Schwingungen des k -Faktors Teom [$k(t)=Y/X_{Teom}$] für Aarau, Härkingen, Wallisellen, Suhr. Ausgezogene Linien: Periodenmodell $k_{Per}(t)$ mit standort-spezifisch optimierten Parametern A, B, C .

3.2.3. Modellresultate für Teom-Geräte

a) Standort-spezifische und Mittelland-Modelle

Aus dem zeitlichen Verlauf des k-Faktors [$k(t) = Y(t)/X(t)$] werden die freien Parameter durch nicht-lineare Optimierung bestimmt. Um daraus Mittelland-Modelle zu bilden, werden die Parameter gemittelt. Die standort-spezifischen und das Mittelland-Modell für Teom ohne Nafion sind in Figur 6 eingetragen mit Beginn der Zeitachse am 21.06., die Formeln fürs Mittellandmodell stehen in Tabelle 12.

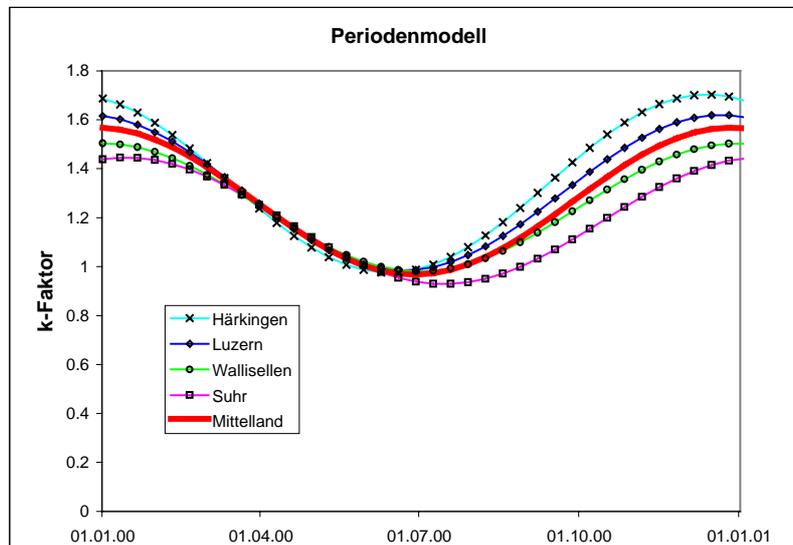
Periodenmodell für Teom	A $\langle k_{Per}(t) \rangle$ ---	B Amplitude ---	C Phase Tage
Stationen ohne Nafion			
Luzern	1.30	-0.32	1.8
Wallisellen	1.24	-0.26	11.1
Suhr	1.19	-0.26	24.9
Härkingen	1.34	-0.36	-6.5
Mittelwert Teom ohne Nafion	1.27	-0.30	7.82
Standardabweichung	0.07	0.05	13.4
Stationen mit Nafion			
Luzern	1.18	-0.23	15.6
Wallisellen	1.16	-0.23	15.0
Mittelwert Teom mit Nafion	1.17	-0.23	15.3
Standardabweichung	0.02	0.00	0.46

Tabelle 11: Parameterwerte für standort-spezifische Periodenmodelle.

Kommentare:

- Der Mittelwert $A = \langle k_{Per}(t) \rangle$ und die Amplitude B streuen nur wenig, für die beiden Teom-Geräte mit Nafion ist A näher bei 1 ($k=1$ bedeutet Übereinstimmung zwischen Teom und HVS) als für die 4 Teom-Geräte ohne Nafion. Auch die Amplitude B ist für die Teom mit Nafion niedriger als ohne Nafion.
- Die Phasen verhalten sich unterschiedlich: Für die Teom-Geräte ohne Nafion streuen sie in einem weiten Bereich, in Härkingen eilt die Phase sogar der Temperatur-Phase voraus (negatives Vorzeichen).
- Die Teom-Geräte mit Nafion haben (zufällig?) dieselbe Phase, die aber nicht dieselbe ist wie bei den Geräten ohne Nafion am selben Standort.
- Die gute Übereinstimmung zwischen A und B an den verschiedenen Standorten begründet die Definition eines Mittelland-Periodenmodells. Abweichungen in den Phasen bis ca. 20

Tage sind, wie sich unten zeigen wird, nicht sensitiv für die Auswertungen.



Figur 6: $k_{per}(t)$: Standort-spezifische Modelle und das Mittelland-Modell (dick ausgezogene Linie).

Modell	Mittelland-Periodenmodelle
für Teom ohne Nafion	$Y_{per}(t) := X(t) * \left[1.27 - 0.30 * \sin\left(2 * \pi * \frac{t - t_0 - 7.8d}{365}\right)\right]$
für Teom mit Nafion	$Y_{per}(t) := X(t) * \left[1.17 - 0.23 * \sin\left(2 * \pi * \frac{t - t_0 - 15.3d}{365}\right)\right]$

Tabelle 12 Mittelland-Periodenmodelle Y_{per} für Teom-Messreihen X .

b) Modellresultate, LRV-Auswertungen

Als Beispiele standort-spezifischer Auswertung für das Periodenmodell sei auf Figur 2 und Figur 3: verwiesen, wo sich in den Teilfiguren (unten rechts) die Scatterplots fürs Periodenmodell befinden. Für die Teom-Gerät ohne Nafion ergibt sich nach Umrechnung der Messdaten mit den standort-spezifischen Periodenmodellen eine Verbesserung des Bestimmtheitsmass R^2 von 0.68 auf 0.81 (Luzern) respektive von 0.84 auf 0.92 (Suhr). Ähnliche Resultate werden auch an den anderen Standorten erreicht. Die Gleichwertigkeitskriterium der EN 12341 ($R^2 > 0.95$) kann aber auch mit dem Periodenmodell an keiner Station erfüllt werden.

Ergebnisse für die LRV-Parameter:

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Modellwerte Y_{Per} Perioden $A+Bsin(t+C)$
		HVS Y	Teom X	
Luzern ohne Naf. (Luz. standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	23.2
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	10
Luzern ohne Naf. (Härk., Suhr, Wall.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.3
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	9
Luzern ohne Naf. (Härk., Luz., Suhr, Wall.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	17.8	22.5
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	2	9
Luzern mit Naf. (Luz. standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	19.6	23.3
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	3	13
Luzern mit Naf. (Luzern, Suhr)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	19.6	
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	11	3	
Wallisellen ohne Naf. (Wall. standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	16.4	20.7
	jeden 2. Tag $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	0	3
Wallisellen ohne Nafion (Härk., Luz., Suhr, Wall.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	16.4	21.1
	jeden 2. Tag $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	0	6
	jeden Tag $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	(>5)	0	10
Suhr (Suhr standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	21.4	26.8
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	39	5	29
Suhr (Härk., Luz., Suhr, Wall.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	21.4	28.6
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	39	5	42
Härkingen (Härk. standort-spez.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	21.1	26.1
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	3	21
Härkingen (Härk., Luz., Suhr, Wall.)	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	21.1	25.2
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	3	18

Tabelle 13: Auswertungen nach LRV für das Periodenmodell: Mittelwerte und Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (analog zu Tabelle 10). Weitere Erläuterungen siehe Text.

Bemerkungen:

- Luzern, Teom ohne Nafion: Das Periodenmodell schätzt Mittelwert und Zahl der Überschreitungen sehr gut. In der standort-spezifischen Version wiederum etwas besser als in den beiden Mittelland-Versionen (10 statt 9 Tage, HVS 11 Tage). Zwischen den beiden Mittelland-Versionen (die erste ohne Stationen Luzern kalibriert, die zweite mit allen vier Stationen inkl. Luzern kalibriert) gibt es nur einen minimalen Unterschied im Mittelwert (22.3 und $22.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), die Überschreitungstage sind gleich.
- Luzern, Teom mit Nafion: Das standort-spezifische Periodenmodell schätzt den Mittelwert ebenfalls sehr gut und überschätzt die Überschreitungstage (13 statt 11).

- Für Wallisellen und Härkingen ergibt sich ein ähnliches Bild wie für Luzern: Sehr gute Nachbildung des Mittelwerts, geringe Überschätzung des Mittelwerts mit dem standort-spezifischen und dem Mittelland-Modell. Wird das Periodenmodell in Wallisellen auf alle Tage angewendet (nicht nur jeden 2. Tag wie HVS), so findet man damit 10 Überschreitungstage, doppelt so viele wie das HVS an jedem 2. Tag detektiert.
- Für die Station Suhr ist das Mittelland-Modell sogar besser als standort-spezifische Periodenmodell.

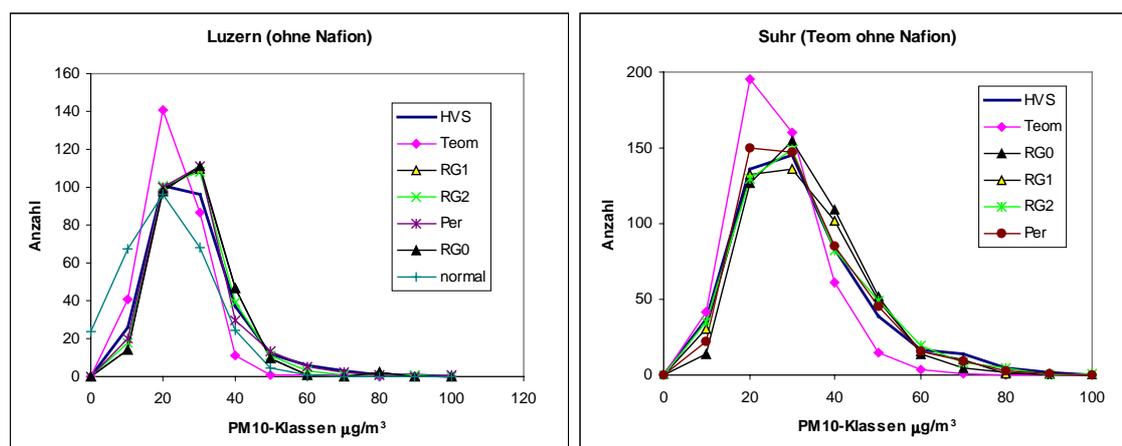
3.3. Modellvergleiche

3.3.1. Welche Modelle werden miteinander verglichen?

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Modelle für Teom-Geräte untereinander verglichen und an Hand der HVS-Messungen beurteilt. Allerdings werden, um die Übersichtlichkeit des Texts nicht zu sehr zu strapazieren, nicht alle mit allen Modellen verglichen, sondern primär jene beiden, welche sich bisher als die besten erwiesen haben, nämlich das RG2-Mittelland- und das Mittelland-Periodenmodell im Unterschied zum RG1-Mittelland- und dem RWTÜV-Modell. Das RG3-Modell schneidet schlechter ab als RG2 und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt. Das Modell RG4 ist zwar theoretisch noch besser als RG2, jedoch dürfte es in der Praxis weniger geeignet sein als RG2, weil es eine erklärende Grösse mehr enthält, was die Zahl der Tage mit gültigen Messdaten (alle erklärenden Grössen müssen gleichzeitig vorhanden sein) einschränkt.

3.3.2. Vergleich der Häufigkeitsverteilungen

Figur 7 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der beiden Messgeräte HVS und Teom im Vergleich mit den Häufigkeitsverteilungen, welche durch die Umrechnung der Teom-Daten mit den verschiedenen Modellen entstehen. Folgende Merkmale sind sichtbar: Alle Verteilungen weichen beträchtlich von Normalverteilungen ab (die Normalverteilung der HVS-Werte ist in der Figur eingetragen), sind steiler gewölbt (schmalgipflig, leptokurtisch) mit langem Ende rechts. Teom-Messwerte haben ein höheres Maximum als die HVS-Messwerte und zwar bei niedrigerer PM10-Konzentration. Dies entspricht vollständig den Erwartungen. Die Häufigkeitsverteilungen der Umrechnungsmodelle gruppieren sich um das HVS und sind stellenweise auf der Grafik kaum auseinanderzuhalten. Erst eine feiner aufgelöste Grafik bei hohen PM10-Werten zeigt, dass die RG2- und vor allem die Periodenmodelle den RG0- und RG1-Modellen deswegen überlegen sind, weil sie die das lange Ende besser zu modellieren vermögen.



Figur 7 Häufigkeitsverteilungen der Mess- und Modellwerte für die Stationen Luzern und Suhr.

3.3.3. Vergleiche auf der Basis der LRV-Parameter

Wie schon erwähnt, findet sich unter allen untersuchten Modellen keines, welches den Anforderungen der EN 12341 genügt, weil die Bestimmtheitsmasse der Modellwerte unter der geforderten Grenze $R^2 > 0.95$ bleiben. Als Kriterium für die Modellqualität wird deshalb die Übereinstimmung mit den **LRV-Parametern** herangezogen.

In der folgenden Tabelle werden nur die Mittelland-Modelle aber keine lokalen Modelle miteinander verglichen.

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte Y	Modellwerte Y_{Mod}					Abweichungen HVS				
			HVS	Per	RG0	RG1	RWTÜV	RG2	Per	RG0	RG1	RWTÜV
Luzern	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23.0	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	9	3	4	4	7	-2	-8	-7	-7	-4
Suhr	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.1	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	42	20	20	23	33	3	-19	-19	-16	-6
Härkingen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.4	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	18	12	12	15	16	-2	-8	-8	-5	-4
Wallisellen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20.8	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	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 14: Vergleich der Mittelland-Modelle für Teom-Geräte ohne Nafion.

Das Fazit stellt als **das wichtigste Ergebnis aus dem Vergleichsversuch für die Teom-Geräte** dar:

Unter den Mittelland-Modellen, angewendet auf alle vier Stationen Luzern, Suhr, Härkingen und Wallisellen, erweist sich das Periodenmodell als das stärkste. Werden die Abweichungen des Mittelwerts zum HVS betrachtet (definiert als Wurzel aus der Summe der Abweichungsquadrate), so sind zwar RG0 und RG1 knapp besser als RG2 und das Periodenmodell. Die Abweichungen aller Modelle sind aber sehr klein und liegen an den vier Stationen zwischen - 5.7% und 5.5% (Ausnahme RWTÜV -6.6% bis 2.9%). Bei der Berechnung der Zahl von Tagen mit Überschreitung des Grenzwerts $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ besitzt jedoch das Periodenmodell klar die geringsten Abweichungen zum HVS (4 Tage). Das RG2-Modell hat bereits eine grössere Abweichung (8 Tage). RG0-, RG1- und RWTÜV-Modell fallen demgegenüber stark ab (RG0 >21, RG1 22, RWTÜV 18 Tage).

3.4. Interpretation Teom-Umrechnungsmodelle

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. Gut bedeutet in diesem Fall, dass der Jahresmittelwert der korrigierten Reihe sehr nahe beim Mittelwert der HVS-Messreihe (Referenzverfahren!) liegt. 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 am besten verarbeiten kann. 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, sodass mit den jetzt vorhandenen Daten auch standort-unabhängige Modelle angegeben werden können, die für Stationen übernommen werden können, auch wenn dort bisher keine Parallelmessungen durchgeführt wurden.

Noch ungewiss ist, wie gut sich die Umrechnungsmodelle für alpine Stationen eignen, weil bisher noch keine Vergleichsmessungen Teom/HVS durchgeführt worden sind.

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.

Die Datenreihen, die mit Hilfe der Umrechnungsmodelle generiert werden, genügen den Anforderungen der CEN-Norm 12341 für die Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren im Allgemeinen nicht, das Bestimmtheitsmass R^2 erreicht den geforderten Minimalwert von 0.95 nicht. Wie eine genauere Analyse der Unterschiede zwischen Teom und HVS zeigt, kann ein standortabhängiges Hysterese-Verhalten beobachtet werden. Die Phase des k-Faktors kann gegenüber der Phase der Tagestemperatur verschoben sein. Das hat zur Folge, dass der Regressionskoeffizient a_1 im Fall von saisonalen Modellen im Frühling und im Herbst trotz gleicher Tagestemperatur unterschiedliche Werte annimmt. In einem Jahresmodell drückt sich dieser Umstand als grösserer Fehler für a_1 aus. Für die linearen Regressionsmodelle RG0 und RG1 bedeutet dieses Phänomen eine generelle Beschränkung der maximal erreichbaren Korrelation zwischen Teom und HVS. Das Modell RG2 nimmt immerhin schon die möglichen Schwankungen von HVS/Teom in Form von Temperaturschwankungen auf. Die Korrelation wird deutlich verbessert. Nur das Periodenmodell vermag aber das Hysterese-Verhalten zu berücksichtigen. Allerdings ist der Korrelationskoeffizient des Periodenmodells im Vergleich mit dem RG2-Modell nur noch wenig verbessert.

3.5. Internationale Vergleichsmessungen und Umrechnungsmodelle

3.5.1. Vergleichsmessungen der EC Working Group on Particulate Matter

Soeben sind Resultate ausgedehnter Vergleichsmessungen in mehreren Ländern Europas veröffentlicht worden (EC PM 2001). Die Vergleichsmessungen Teom/HVS liefern dasselbe Bild wie in der Schweiz. Entsprechend werden auch sehr ähnliche Umrechnungsmodelle benutzt und empfohlen. Weil der EC-Bericht ausführliche Empfehlungen enthält, folgt weiterer Text im Kap. 5.3.

3.5.2. Vergleichsmessungen Teom/KleinfILTERGERÄT in Essen und Hattingen (Deutschland)

Wie im Kapitel 3.1.2 c) erwähnt, wurden in Deutschland zwischen November 1997 und September 1998 in Essen und Hattingen vier Vergleichsversuche mit vier verschiedenen Teom 1400 A Rev. B und einem KleinfILTERGERÄT GS 050/3-C (Low Volume Sampler) ausgeführt. Pro Versuch wurden zwischen 15 und 25 Wertepaaren ermittelt und je eine Analysenfunktion (Umrechnungsmodell) vom Typ RG1 bestimmt. Die Koeffizienten a_1 (Steigungen) lagen alle im Intervall 1.31 bis 1.46, die Konstanten a_0 (Achsenabschnitte) zwischen -2.0 und -4.2 . Die Bestimmtheitsmasse R^2 lagen alle über dem Wert 0.95, wie er in der Norm EN 12341 gefordert wird. Damit erfüllten die Teom als Testgeräte die Mindestanforderungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit dem Referenzverfahren.

Das positive Ergebnis aus Deutschland kann mit den schweizerischen Messresultaten nicht reproduziert werden. Der Grund dafür liegt im Umstand, dass die Messungen in Deutschland pro Standort maximal über zwei Monate verteilt waren und sich nicht wie in der Schweiz über mindestens ein Jahr erstreckten. Die saisonale Abhängigkeit der Unterschiede zwischen Teom und gravimetrischen Methoden ist aber essentiell und wird mit derart kurzen Messperioden ausgeblendet.

3.5.3. Vergleichsmessungen Teom/Partisol in London (England)

In England wurde ein nationales Monitor-Programm zur Überprüfung der Gleichwertigkeit von Teom-Geräten mit dem Referenzverfahren gestartet. Die nationale Behörde hat empfohlen, Teom-Messwerte mit dem konstanten Korrekturfaktor 1.3 zu multiplizieren, solange die Resultate des Monitor-Programms noch nicht vorliegen. Von einer Messstation in Central London an einer verkehrsreichen Strasse wurden Parallelmessungen mit einem Teom 1400 AB ohne Nasion (Rupprecht&Patashnick Co) und einem Partisol (Starnet System, Rupprecht&Patashnick Co) in der Zeit zwischen Juni 1997 und Januar 2000 durchgeführt (Green 2001). Die Messwerte beider Geräte wurden auf Bezugsbedingungen 25°C , 1 atm (US EPA STP) umgerechnet und auf ihre Zusammenhänge untersucht. Verschiedene Umrechnungsmodelle wurden getestet, sowohl lineare wie auch nicht-lineare. Als Beurteilungskriterien der Modelle wurden genau wie in der vorliegenden Studie die Übereinstimmung zwischen Periodenmittel und der Zahl der Tage mit Überschreitung des Tagesmittel von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ benutzt. Ergebnisse:

- Der pauschale Umrechnungsfaktor 1.3, der einem RG0-Modell entspricht, überschätzt sowohl das Periodenmittel (113% des Partisol-Werts) als auch die Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (150% des Partisol-Werts).
- Das mit linearer Regression ermittelte RG1-Modell
$$Y_{RG0} = 1.33 * X - 5.14 \quad , N= 430, R^2 = 0.83$$
liefert Jahresmittelwerte 1998 und 1999, die je um nur $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ von jenen des Partisol abweichen (38 und $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Zahl der Tage mit Mittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ beträgt beim unkorrigierten Teom 28 Tage, korrigiert 71 Tage, während das Partisol 81 Tage findet.
- Ein saisonal gestaffeltes Modell mit je einem optimierten Sommer- und Winter-Modell vom Typ RG1 liefert dieselben Jahresmittel wie das einfache RG1-Modell, aber mit 75 Tagen eine etwas bessere Zahl der Überschreitungen.
- Nicht-lineare Modelle mit Polynomen und Potenzen zeigen keine Verbesserung gegenüber linearen Modellen.

Fazit: Die Vergleichsmessungen in England wurden methodisch sehr ähnlich wie hier in der Schweiz durchgeführt, mit gleichen oder ähnlichen statistischen Methoden ausgewertet und führten auch zu qualitativ gleichen Ergebnissen. Der Einbezug weiterer Messgrößen wie Temperatur oder gasförmige Schadstoffe wurde nicht geprüft, ebensowenig ein Periodenmodell (wobei man das saisonal gestaffelte Modell als eine gewisse Approximation an das Periodenmodell betrachten kann).

3.5.4. Vergleichsmessungen Teom / Kleinfiltergeräte / HVS in Berlin (Deutschland)

In Berlin wurden an drei städtischen Standorten Vergleichsmessungen in den Jahren 2000/2001 durchgeführt. Es standen mehrere Gerätetypen im Einsatz, unter anderem wurden auch Teom mit Daten aus Kleinfiltergeräten verglichen (Sen Stadt 2001). Das Hauptgewicht der Untersuchung lag jedoch im Vergleich von Betameter- mit den gravimetrischen Geräten (Kleinfiltergerät und HVS), weil die PM10-Konzentration mit den automatischen Betameter-Geräten überwacht wird und deshalb deren Übereinstimmung mit den Referenzverfahren interessierte. Siehe dazu die Ergebnisse im Kapitel 4.5.

Als Resultate der Vergleichsmessungen mit dem Teom-Gerät (Rupprecht & Patashnick) wird nur auf den Minderbefund des Teom gegenüber Betameter und Kleinfiltergerät von ca. 20% bei einer Rohrheizung von 40°C hingewiesen. In einem RG0-Modell werden die Teom-Daten an das Kleinfiltergerät angenähert mit $Y_{RG0} = 1.24 * X$, $R^2 = 0.85$ (wobei ein Tagesmittelwert aus $N=20$ eliminiert worden war)

4. Umrechnungsmodelle für Betameter-Messreihen

4.1. Regressionsmodelle

4.1.1. Nomenklatur

Es gelten die Bezeichnungen der Tabelle 3 (gleich wie Teom) sowohl für Regressionsanalysen wie auch für das Periodenmodell.

4.1.2. Regressionsresultate für Betameter-Geräte

a) Standort-spezifische Resultate

In der Tabelle sind pro Kästchen die Regressionsresultate für jeden Standort enthalten: Werte der Regressionsfaktoren inklusive Standardfehler (st. err.), das Bestimmtheitsmass R^2 und die Zahl der gültigen Wertepaare N.

Zürich Betameter					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	2.082	0.282	0.934
	PM10Beta	a_1	0.860	0.010	
RG2	Konstante	a_0	4.176	0.339	0.944
	PM10Beta	a_1	0.851	0.009	
	Temperatur	a_2	-0.161	0.017	
RG3	Konstante	a_0	1.749	0.280	0.938
	PM10Beta	a_1	0.813	0.012	
	NOx	a_3	0.034	0.006	
RG4	Konstante	a_0	3.758	0.361	0.945
	PM10Beta	a_1	0.827	0.012	
	NOx	a_3	0.019	0.006	
	Temperatur	a_2	-0.143	0.018	
RG0	PM10Beta	a_1	0.924	0.005	0.987

Härkingen Betameter					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	0.445	0.523	0.890
	PM10Beta	a_1	0.940	0.017	
RG2	Konstante	a_0	5.522	0.542	0.931
	PM10Beta	a_1	0.920	0.014	
	Temperatur	a_2	-0.388	0.026	
RG3	Konstante	a_0	-0.562	0.546	0.897
	PM10Beta	a_1	0.894	0.019	
	NOx	a_3	0.030	0.006	
RG4	Konstante	a_0	4.898	0.599	0.932
	PM10Beta	a_1	0.900	0.016	
	NOx	a_3	0.013	0.005	
	Temperatur	a_2	-0.372	0.027	
RG0	PM10Beta	a_1	0.952	0.008	0.976

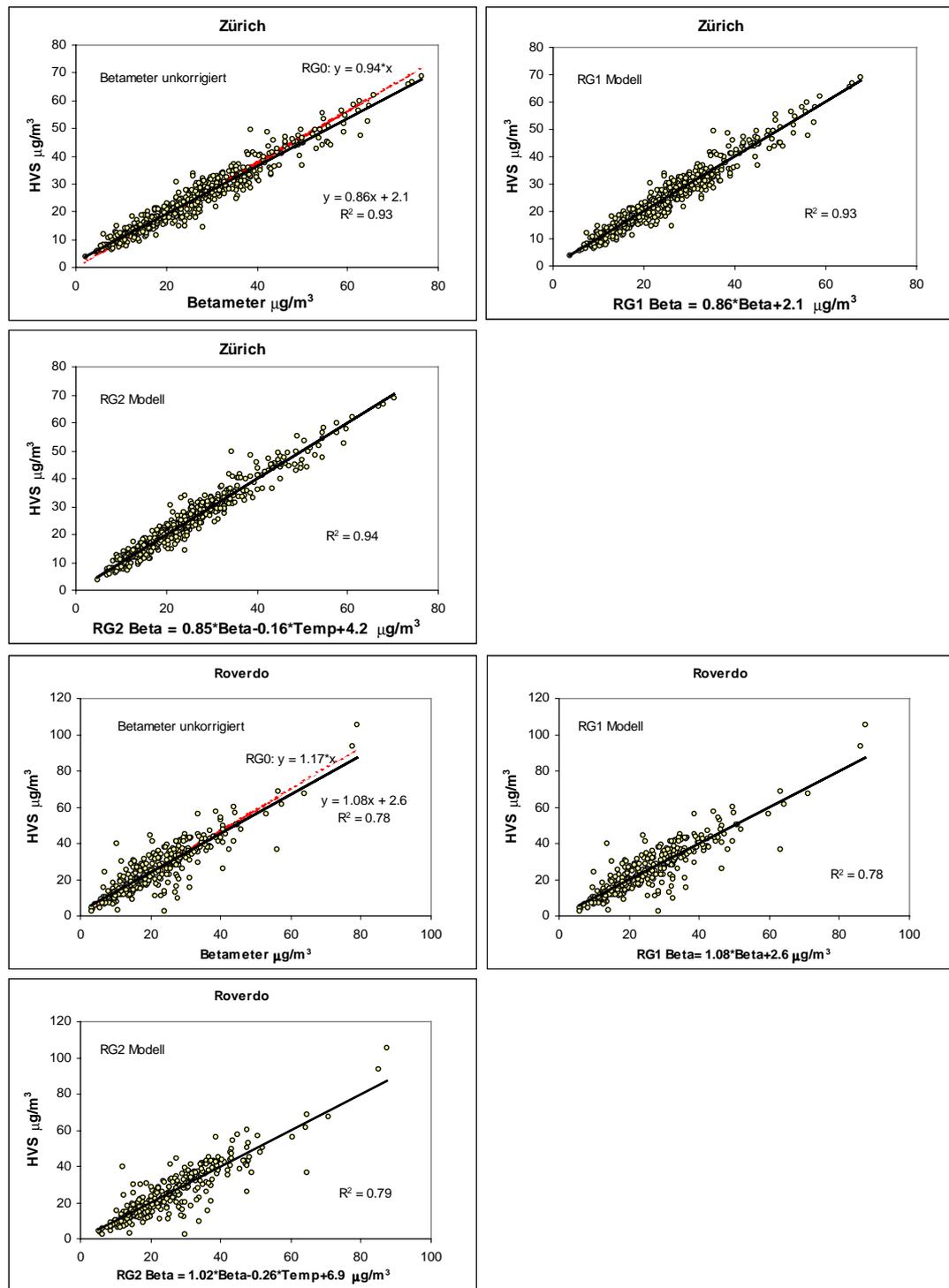
Roveredo Betameter					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	2.630	0.784	0.780
	PM10Beta	a_1	1.075	0.032	
RG2	Konstante	a_0	6.858	1.128	0.789
	PM10Beta	a_1	1.024	0.033	
	Temperatur	a_2	-0.256	0.052	
RG3	Konstante	a_0	1.768	0.796	0.787
	PM10Beta	a_1	0.981	0.037	
	NOx	a_3	0.120	0.025	
RG4	Konstante	a_0	4.614	1.556	0.790
	PM10Beta	a_1	0.989	0.037	
	NOx	a_3	0.072	0.033	
	Temperatur	a_2	-0.151	0.071	
RG0	PM10Beta	a_1	1.170	0.015	0.949

Davos Betameter					
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R^2
RG1	Konstante	a_0	5.171	0.320	
	PM10Beta	a_1	1.019	0.032	0.736
RG2	Konstante	a_0	5.252	0.314	0.749
	PM10Beta	a_1	1.052	0.032	
	Temperatur	a_2	-0.100	0.024	
RG3	Konstante	a_0	4.083	0.346	0.764
	PM10Beta	a_1	1.002	0.030	
	NOx	a_3	0.099	0.015	
RG4	Konstante	a_0	3.884	0.411	0.765
	PM10Beta	a_1	0.989	0.034	
	NOx	a_3	0.114	0.023	
	Temperatur	a_2	0.031	0.035	
RG0	PM10Beta	a_1	1.425	0.026	0.895

Tabelle 15: Standort-spezifische Regressionsanalysen für Betameter-Geräte.

Bemerkungen:

- Wie im Kapitel Teom sind auch hier die Voraussetzungen für Regressionsanalysen geprüft worden. Das Ergebnis entspricht den Teom-Messreihen: Die Residuen sind in den meisten Fällen normalverteilt, aber nicht unabhängig. Die Unabhängigkeit wird besser beim Schritt von den RG1- zu den RG2-Modellen. Aus Sicht der Statistik sind deshalb die Fehler (standard error) der Koeffizienten unzuverlässig.
- Es gelten dieselben grundsätzlichen Bemerkungen wie für die Teom-Analyse (siehe Kap. 3.1.2 a): So wurden auch weitere als die hier aufgeführten, erklärenden Grössen getestet.
- **Wie bei den Teom-Analysen gilt auch für das Betameter, dass keines der Modelle RG1–RG4 die Bedingung der EN 12341 $R^2 \geq 0.95$ erfüllt. Allerdings sind die Werte für die Station Zürich zwischen 0.934 und 0.945, das heisst ganz nahe an der geforderten Grenze. Für Härkingen werden fast ebenso hohe Werte erreicht (0.89–0.93), was hingegen an den alpinen Stationen nicht der Fall ist. Dort sind die Bestimmtheitsmasse deutlich geringer und liegen zwischen 0.73 und 0.79.**
- Alle Modelle RG0–RG4 besitzen qualitativ und quantitativ sehr ähnliche Züge, und zwar paarweise für Zürich/Härkingen und für Davos/Roveredo. Während an den Mittelland-Stationen die Faktoren des PM10-Betameterwerts a_1 durchwegs kleiner als 1 sind, sind sie bei den alpinen Stationen fast alle grösser als 1. Das heisst, dass die HVS-Werte im Mittelland unter den Betameterwerten liegen (90%-95%), während sie in Davos (143%) und in Roveredo (117%) darüber liegen.
- Die wichtigste erklärende Grösse ist auch hier selbstverständlich die Betameter-Messung. Weitere untersuchte Grössen, andere Schadstoffe und Meteo-Parameter, bringen praktisch keinen zusätzlichen Gewinn. Siehe dazu Tabelle 15 und Figur 8.



Figur 8 Resultate der Regressionsanalysen für Zürich und Roverdo: Betameter-Werte unkorrigiert, mit dem RG1- und RG2-Modell modelliert.

b) LRV-Auswertungen für die standort-spezifischen Modelle

Mit den standort-spezifischen Modellen werden die beiden Parameter berechnet, die für die Beurteilung der PM₁₀-Immission nach LRV vorgeschrieben sind: Mittelwert und Zahl der Tage mit Überschreitung des 24-h-Mittels von 50 µg/m³. Gemittelt wird pro Station über die maximal verfügbare Zahl der Tage, an denen gültige HVS-, Betameter-, Temperatur- und NO_x-Messwerte vorhanden sind. Diese Zahl entspricht für keine Station einem kompletten Jahr. Die Werte können deshalb von eventuell publizierten Jahresmittelwerten der betreffenden Stationen abweichen.

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Standort-spez. Mod.		
		HVS Y	Betameter X	RG0 a ₁ X	RG 1 a ₀ +a ₁ X	RG 2 a ₀ +a ₁ X+a ₂ T
Zürich	Mittelwert µg/m ³	24.1	25.6	23.7	24.2	24.1
	Anzahl Tage >50µg/m ³	15	28	21	15	18
Härkingen	Mittelwert µg/m ³	26.3	27.3	26.0	26.1	26.2
	Anzahl Tage >50µg/m ³	29	21	15	16	19
Roveredo	Mittelwert µg/m ³	25.9	21.7	25.4	25.9	26.0
	Anzahl Tage >50µg/m ³	14	7	13	10	10
Davos	Mittelwert µg/m ³	13.7	7.9	11.2	13.2	13.2
	Anzahl Tage >50µg/m ³	0	0	3	1	1

Tabelle 16: Auswertungen der Mess- und standort-spezifischen Modellreihen (RG0, RG1, RG2) nach LRV: Mittelwerte und Zahl der Tage mit Überschreitung von 50 µg/m³. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Bemerkungen:

- Mittelwerte der Messdaten: Die Mittelwerte aus den Betameter-Messungen überschätzen in Zürich und Härkingen die HVS-Mittelwerte. Umgekehrt unterschätzen sie die Mittelwerte in Davos und Roveredo.
- Gemessene Überschreitungen 50 µg/m³: Während das Betameter in Zürich die Zahl der Tage mit Überschreitungen vom Betameter sehr deutlich überschätzt werden, unterschätzt es die Zahl an den übrigen drei Stationen.
- Modellerte Mittelwerte: Die aus den Betameter-Werten mit RG1 und RG2 modellierten Mittelwerte entsprechen für beide Modelle sehr gut den HVS-Mittelwerten.

- Modellerte Überschreitungen (RG1): Bei der Zahl der Überschreitungen liefert das Modell RG1 in Zürich exakt denselben Wert wie das HVS. In Härkingen und Roveredo jedoch schätzt RG1 die Überschreitungen zu tief.
- Modellerte Überschreitungen (RG2): Auch das Modell RG2 gibt kein einheitliches Bild, weil es sowohl über- wie unterschätzt.
- Modellresultate RG0: Bei der Mittelwertberechnung ist RG0 leicht schwächer als RG1/RG2, bei der Zahl der Überschreitungen in Zürich und Davos schlechter, in Roveredo besser als RG1/RG2.
- **Fazit: Im Mittelland sind die unkorrigierten Betameter-Daten bereits näher an der Messwirklichkeit als im Fall des Teoms. Mit den 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. Wie sich unten zeigen wird, stellt Härkingen in dieser Beziehung eine Ausnahme dar. Dort bringt das Periodenmodell die besten Resultate.**

c) Mittelland- und Alpen-Modelle

Wie im Fall der Teom-Messwerte werden die statistischen Gesamtheiten der beiden Mittelland- und der beiden alpinen Stationen vereint und aus weiteren Regressionsanalysen die optimalen Mittelland-Modelle RG1–RG2 ermittelt. Für die vier Standorte selber sind die Modelle wiederum keine Verbesserung, dafür sind sie **Standort-unabhängig, können also für andere Mittelland- resp. alpine Stationen eingesetzt werden, an denen keine Vergleichsmessungen durchgeführt worden sind.**

Mittelland Betameter (Zürich, Härkingen)					N = 924	
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R ²	
RG1	Konstante	a ₀	1.340	0.275	0.910	
	PM10Beta	a ₁	0.896	0.009		
RG2	Konstante	a ₀	4.666	0.313	0.931	
	PM10Beta	a ₁	0.884	0.008		
	Temperatur	a ₂	-0.255	0.015		
RG0	PM10Beta	a ₁	0.938			

Alpen Betameter (Roveredo Davos)					N = 692	
Modell	erkl. Grösse	Faktor	Wert	st.err.	R ²	
RG1	Konstante	a ₀	4.675	0.326	0.823	
	PM10Beta	a ₁	1.011	0.018		
RG2	Konstante	a ₀	5.451	0.326	0.833	
	PM10Beta	a ₁	1.041	0.018		
	Temperatur	a ₂	-0.161	0.022		
RG0	PM10Beta	a ₁	1.297			

Tabelle 17: Regressionsmodell Mittelland und Alpen für das Betameter.

Die Auswertungen der Mittelland- und Alpen-Modelle für die LRV-Parameter liefern:

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

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 18: Auswertungen der Mess- und Modellreihen (RG1, RG2) nach LRV für die Mittelland- und die Alpen-Modelle.

Bemerkung:

Wie schon die standort-spezifischen Resultate angedeutet haben, lässt sich auch mit den standort-unabhängigen Modellen kein wesentlicher Fortschritt für die Betameter-Daten gewinnen. Zwar werden die Mittelwerte mit Hilfe der RG1- und RG2-Modelle gegenüber den unkorrigierten Betameter auch mit den standort-unabhängigen Modellen verbessert, sodass sie näher bei den HVS-Mittelwerten liegen. Was jedoch die Zahl der Überschreitungen betrifft, so ist das Ergebnis nicht für alle Stationen dasselbe: Für Zürich ist das RG1-Modell das beste, für Davos und Roveredo jedoch RG2 (Härkingen siehe Periodenmodell).

4.2. Periodische Modelle

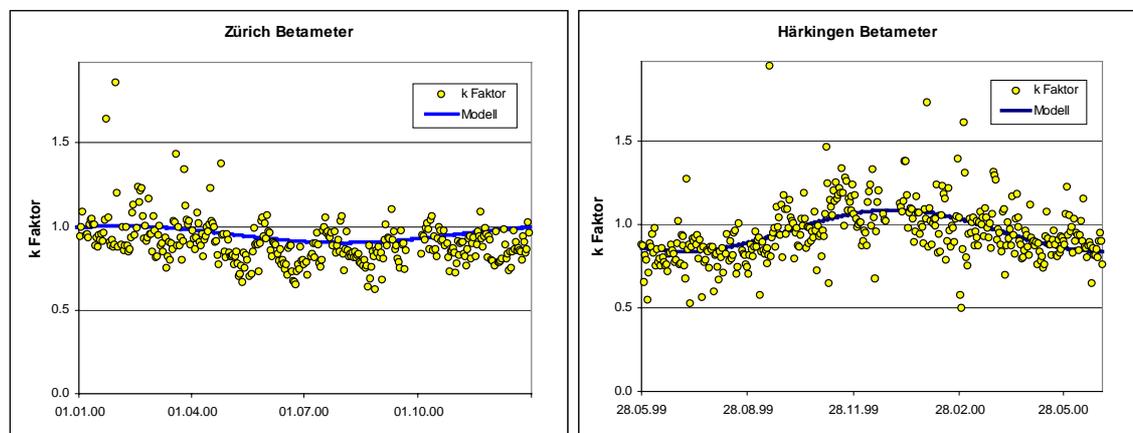
4.2.1. Nomenklatur

Es gelten die Bezeichnungen wie im Fall des Teom (siehe Kap. 3.2.1).

4.2.2. Periodisches Verhalten

Anders als bei Teom-Geräten zeigt der k-Faktor, das Verhältnis zwischen HVS- und Teom-Messwerten ($k := Y/X$), im Allgemeinen nicht das typische periodische Verhalten. Nur an der Station Härkingen ist deutliche eine Periode erkennbar (siehe Figur 6), in Roveredo nur schwach und an den übrigen Betameter-Standorten hingegen nicht. Dass in Davos keine solche Periode auftritt, könnte noch mit den niedrigen Messwerten erklärt werden. Weil diese oft im Bereich der Nachweisgrenze oder zumindest der Bestimmungsgrenze⁵ liegt, sind die Messunsicherheiten (relativ) grösser und könnten für Davos das periodische Verhalten verwischen. Aber selbst in Zürich mit hohen Messwerten tritt keine Jahresperiode auf. Das weist daraufhin, dass dort das Periodenmodell keinen typischen Unterschied HVS/Betameter zu erklären vermag.

Dass sich in Härkingen die Betameter-Daten bezüglich der Temperatur anders als an den drei übrigen Stationen verhalten, zeigt sich auch in den standort-spezifischen Regressionsanalysen. Dort stellt das RG2-Modell, welches neben der PM10-Messung des Betameters noch die Temperatur als zusätzliche erklärende Grösse benutzt, nur gerade für Härkingen eine Verbesserung gegenüber dem RG1-Modell dar (für Davos und Roveredo leistet es nicht mehr als RG1, für Zürich ist es sogar schlechter als RG1). Mit der Abhängigkeit des k-Faktors von der Temperatur bietet sich in Härkingen die Möglichkeit für den Einsatz des Periodenmodells an (siehe unten).



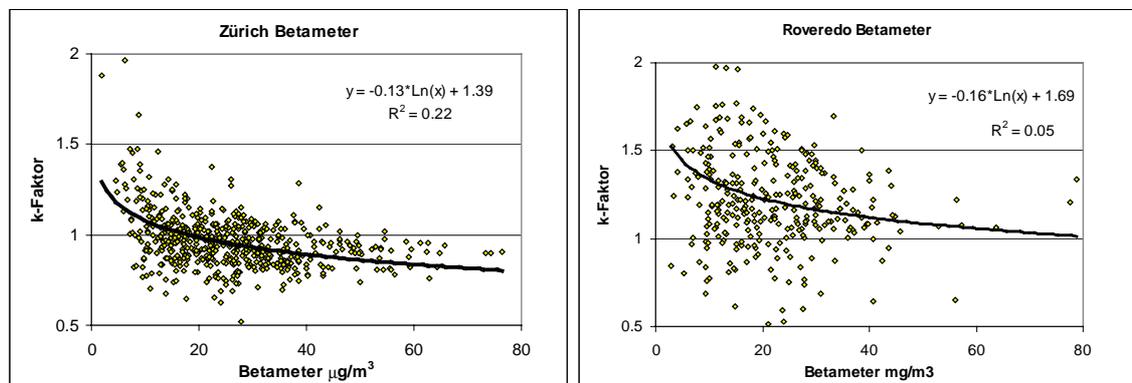
Figur 9 *Schwingungen des k-Faktors für Härkingen und Zürich (Betameter). Während in Härkingen die Schwingung deutlich auftritt, ist sie in Zürich nur schwach.*

5 Die Bestimmungsgrenze (bzw. Nachweisgrenze) ist die kleinste Schadstoffkonzentration, die qualitativ mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% von der Nachweisgrenze (bzw. vom Zustand Null) unterschieden werden kann.

Neben den Periodenmodellen wurden noch weitere Modell-Ansätze ausprobiert. Zum Beispiel zeigen die Messwerte in Davos, dass der k-Faktor nicht konstant ist bezüglich PM10-Konzentration, wie dies beim Teom der Fall ist, sondern er nimmt mit wachsender Konzentration ab. Dies weist auf einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen HVS und Betameter:

$$k = Y / X = f(X) \Rightarrow Y = X * f(X)$$

Allerdings konnte keine Funktion $f(X)$ gefunden werden, welche für alle Stationen gleichzeitig gute Resultate lieferte. Als Beispiel zeigt die folgende Figur ein logarithmisches Modell für Zürich, welches sich dann aber in Roveredo nicht bewährt.



Figur 10 *k*-Faktor in Funktion der PM10-Konzentration für Zürich und Roveredo. Ist in Zürich noch eine leichte Korrelation der Daten sichtbar, so ist sie in Roveredo kaum noch vorhanden.

4.2.3. Modellresultate für Betameter-Geräte

Periodenmodell	A	B	C
Betameter	$\langle k(t) \rangle$	Amplitude	Phase
Station	---	---	Tage
Zürich	0.97	-0.05	42.9
Härkingen	0.98	-0.13	11.6
Roveredo	1.23	-0.07	-20.2
Davos	---	---	---

Tabelle 19: Parameterwerte für das Periodenmodell Betameter.

Bemerkung: Die Modell-Parameter zeigen wie oben schon erwähnt, dass ein Periodenmodell nur für Härkingen sinnvoll ist, denn die Werte für die Amplituden sind in Zürich und Roveredo sehr klein (Amplitude = 0 bedeutet, dass kein periodisches Verhalten auftritt). Im Vergleich

dazu sind die Amplituden beim Teom dem Betrage nach 5–6 Mal grösser als in Zürich und Roveredo.

LRV-Parameter:

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Modell Perioden $A+B*\sin(t-C)$
		HVS Y	Betameter X	
Härkingen	Mittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26.3	27.3	26.6
	Anzahl Tage $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	29	21	24

Tabelle 20: Härkingen Betameter, Auswertungen nach LRV für das Periodenmodell: Mittelwert und Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (analog zu Tabelle 13).

Bemerkung: Wie bei den Teom-Geräten ergibt das Periodenmodell bessere Resultate als die unkorrigierten Betameter-Messwerte sowohl für den Mittelwert wie auch für die Zahl der Tage Überschreitungen von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.3. Modellvergleiche

Anders als bei der Analyse des Teom sind die Modellresultate für das Betameter weniger ergiebig. Die Modelle RG1 und RG2 wurden bereits oben miteinander verglichen. Eine Gegenüberstellung mit dem Periodenmodell zeigt für die Mittelland-Stationen:

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

Tabelle 21: Vergleich der Mittelland-Modelle für das Betameter.

Bemerkungen: Für Härkingen lassen sich die besten Resultate mit dem Periodenmodell gewinnen. Allerdings ist es für Zürich weniger geeignet als RG1, weil es die Zahl der Überschreitungstage noch mehr als das Betameter-Gerät überschätzt.

4.4. Interpretation Betameter-Umrechnungsmodelle

Das Betameter generiert Resultate für die LRV-Parameter, die näher beim HVS liegen als beim Teom. Allerdings sind die verbleibenden Differenzen zum HVS nicht in so generellen Weise beschreibbar wie beim Teom. Sind sie beim Teom noch wesentlich ein Temperatur/Jahreszeiten-Effekt, so bleibt die Ursache der Differenzen zwischen Betameter und HVS auch nach der Analyse noch im Unklaren.

Die Betameter-Resultate unterscheiden sich für Mittelland und alpine Stationen. Im Mittelland scheint das Betameter höhere Werte zu messen als das HVS, in den Alpen ist es gerade umgekehrt. Diese Ergebnisse sind nicht auf unterschiedliche Gerätekalibration der Betreiber zurückzuführen, denn alle 4 Geräte sind mit denselben, vom Hersteller mitgelieferten SiO₂-Folien kalibriert. Allerdings ist die Zahl der Stationen noch zu klein für eine Verallgemeinerung des Effekts.

Mit Standort-unabhängigen Modellen kann der Mittelwert generell präziser (im Sinne des HVS) berechnet werden. Wie weit sich die Aussage auch auf die Zahl der Überschreitungstage übertragen lässt, kann für neue Standorte kaum ohne Parallelmessung vorausgesagt werden.

4.5. Internationale Vergleichsmessungen Betameter/HVS

4.5.1. Vergleichsmessungen der EC Working Group on Particulate Matter

Wie im Kap. 3.5.1 erwähnt, hat die Working Group soeben Resultate ausgedehnter Vergleichsmessungen in mehreren Ländern Europas veröffentlicht worden (EC PM 2001). Die Vergleichsmessungen Betameter/HVS zeigen, dass die Betameter-Messungen generell tiefer liegen als jene des HVS und dass saisonale Schwankungen des Verhältnisses Betameter/HVS vorkommen können. Ersteres trifft in dieser Allgemeinheit für die schweizerischen Messungen nicht zu, findet man hier sowohl tiefere (Alpen) wie auch höhere Messwerte (Härkingen, Zürich). Übereinstimmend hingegen ist, dass auch hier zu Lande saisonale Schwankungen vorkommen können (Härkingen, Roveredo), aber nicht überall. Weil der EC-Bericht ausführliche Empfehlungen enthält, folgt weiterer Text im Kap. 5.3.

4.5.2. Vergleichsmessungen Betameter / Kleinfiltergeräte / HVS in Berlin (Deutschland)

In Berlin wurden an drei städtischen Standorten, zwei davon sehr stark verkehrsexponiert, einer in einem Wohnquartier, Vergleichsmessungen während der Jahre 2000 und 2001 durchgeführt (Sen Stadt 2001). Es standen 3 Kleinfiltergeräte, 1 Betameter (Eberline), 1 HVS (Riemer) und 1 Teom (Rupprecht & Patashnick) im Einsatz. In Berlin werden Betameter-Geräte zur automatischen PM10-Messungen eingesetzt. Deshalb konzentrierte sich die Versuchsanordnung und die Auswertungen auf den Vergleich der Betameter- mit den beiden gravimetrischen Geräten (Kleinfiltergerät und HVS). Die wichtigsten Ergebnisse und Empfehlungen für das Betameter lauten:

- Der räumliche Abstand der parallelen Messgeräte hat einen Einfluss auf die Korrelation der Resultate. Deshalb sind die Ansaugorte möglichst nahe zusammenzulegen. Besonders empfindlich reagiert die Korrelation auf unterschiedliche Ansaughöhen.
- Die **Filterstandzeit** der Betameter-Geräte hat einen substanziellen Einfluss auf den k-Faktor $k=Y/X$. Je länger die Filterstandzeit ist, umso grösser wird der Minderbefund der Betameter-Geräte zu den Kleinfiltergeräten, was mit dem Anteil verdampfbarer PM10-Komponenten erklärt wird. In den schweizerischen Vergleichsmessungen wurde dieser Parameter nicht standardisiert und war bei den einzelnen Messnetzbetreibern unterschiedlich eingestellt (siehe Tabelle 25).
- Nach **Software-Updates** für Betameter-Geräte müssen sämtliche Parameter – nicht nur die im Display sichtbaren – überprüft und evtl. neu gestellt werden.

Auch zwischen den Vergleichsgeräten wurden Vergleiche angestellt:

- Kleinfiltergeräte, die als Vergleichsgeräte deklariert sind, vom selben Typ sind und die aber von verschiedenen Personen bedient werden, können signifikante unterschiedliche und nicht erklärbare Messwerte ergeben, die den Anforderungen der EN 12341 nicht genügen (R^2 sogar kleiner als 0.9).
- Auch der Vergleich zwischen Kleinfiltergeräten und HVS zeigt einen signifikanten Minderbefund des HVS von ca. 15%. Die Korrelation zwischen Kleinfiltergeräten und HVS – beide als Vergleichsgeräte deklariert! – ist mit $R^2 = 0.90$ unter dem in der EN 12341 geforderten Wert (und ist schlechter als z.B. die Korrelation zwischen Betameter und HVS in Zürich).

Angesichts der Unterschiede zwischen allen Gerätetypen kommt die Autorin zu folgender Empfehlung: „Eine Vereinheitlichung der PM10-Immissionsmessungen sollte angestrebt werden.“

Eine Möglichkeit sind das Erstellen zentral verglichener ‚Kleinfiler Muttergeräte‘. Diese sollten dann zur Basiskalibration in den Messnetzen zyklisch verliehen werden und danach wieder zum Basisvergleichsort zurück kommen.“

5. Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

5.1. Schlussfolgerungen

5.1.1. Generelle Folgerungen

In der früheren Dokumentation über PM10-Vergleichsmessungen (BUWAL 1999) wurden nur Ergebnisse von Einzelstationen mit teilweise sehr kurzer Messperiode neben einander gestellt. Es wurden keine eigenen, statistischen Auswertungen durchgeführt. Die Folgerungen lauteten damals, dass auf Grund der nur spärlich vorhandenen Daten noch keine verbindliche Aussagen getroffen werden konnten, dass standort-spezifische Umrechnungen aber mit grosser Wahrscheinlichkeit möglich seien. Zur Beantwortung der Frage nach standort-unabhängigen Umrechnungsmodellen lagen definitiv noch zu wenig Messdaten vor. Aus den ersten Versuchen mit standort-spezifischen Regressionsmodellen liess sich folgern, dass der Zusammenhang offenbar „komplexerer Natur“ als einfach linear sei.

Die seither gesammelten Messdaten lassen diese ungewissen Aussagen nun erheblich konkretisieren:

- Der Entschluss für ein koordiniertes Vorgehen mit gemeinsamer Festlegung von Geräteeinstellungen und Bezugsbedingungen war sehr lohnenswert, weil nun speziell für das Teom-Gerät wichtige Erkenntnisse über die Abweichungen zum HVS gewonnen werden konnten.
- In der Tat lassen sich mit Hilfe von Parallelmessungen **sehr gute standort-spezifische Umrechnungsmodelle für Teom- und gute Modelle für Betameter-Geräte** gewinnen. Wichtige Voraussetzung ist, dass die Parallelmessungen über mindestens ein Jahr erfolgen. Selbst wenn nur Stichproben aus allen Jahreszeiten vorliegen, ist bereits ein gutes Umrechnungsmodell ableitbar. Wenn der Datensatz (möglichst) vollständig ist, gewinnt man noch die Möglichkeit, aus mehreren Modellen (z.B. RG0, RG2, Periodenmodell) das beste auszuwählen und die Abweichungen zwischen den Umrechnungsmodellen und der HVS-Reihe zu quantifizieren. Alle Modelle bieten hohe Gewähr, dass die Schätzung des Mittelwerts sehr gut ist mit Abweichungen kleiner als $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Jahresmittel. Bei der Zahl der Tage mit Überschreitung von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ist die relative Abweichung grösser als beim Mittelwert. Hier kommt der Vorteil einer vollständigen HVS-Jahresmessreihe am stärksten zum Tragen, weil schon wenig Ausfälle das Resultat sensitiv beeinflussen können. Jedes Modell ergibt aber eine Zahl, die besser ist als unkorrigierte Zahl einer Teom- oder Betameter-Messreihe (Ausnahme Betameter in Härkingen).

- Die statistischen Auswertungen zeigen, dass die Abweichungen zwischen Teom und HVS **komplizierter als linear** sind. Die saisonalen Unterschiede schwanken periodisch und parallel mit der Temperatur, wobei allerdings ein mehr oder weniger grosses Hysterese-Verhalten zwischen dem k-Faktor ($k := Y/X$) und der Temperatur gefunden wurde, welches den Einsatz linearer Modelle grundsätzlich limitiert: Zu einer bestimmten Tagestemperatur gibt es dann zwei verschiedene Werte für den k-Faktor je nach Vorgeschichte der Temperatur. Die Berücksichtigung dieser Schwankungen in Form einer Sinus-Schwingung bringt eine erhebliche Verbesserung der Umrechnung. Ein lineares Modell (RG0) entspricht in diesem Zusammenhang der 0. Näherung.

5.1.2. Folgerungen für Teom-Messungen

Bisherige Vermutungen über dominanten Einfluss der Temperatur als bedeutendster (aber nicht einziger) Unterschied zum HVS bestätigen sich. Gleichzeitig kommt mit dem Phasenunterschied zwischen Temperatur und PM10 ein weiterer Effekt zu Tage, der für die Differenz zum HVS mitverantwortlich und der offenbar lokal unterschiedlich ist.

Standort-unabhängige Modelle Teom sind möglich. Wenn nur Jahresmittelwerte aus Teom-Messdaten geschätzt werden müssen, reicht schon ein RG0-Modell. RG0 ist dabei am einfachsten anzuwenden, weil lediglich der Jahresmittelwert mit einem Faktor multipliziert werden muss $Y_{Mod} = a_1 * X$. Im Falle eines RG1-, RG2- oder eines Periodenmodells müssen zuerst alle Tagesmittelwerte umgerechnet $Y_{Mod,i} = a_0 + a_1 * X_i$ und daraus der Mittelwert berechnet werden $m = \Sigma (Y_{Mod,i}/N)$.

Um die hier gefundenen Modelle zuverlässiger zu gestalten, sollten erstens noch mehr Vergleichsmessungen gesammelt werden, vor allem auch an Nicht-Mittellandstandorten, und zweitens sollten die statistisch anspruchsvollere Methoden zur Bestimmung der Koeffizienten benutzt werden, denn die Voraussetzungen für Regressionsanalysen (normal-verteilte und unabhängige Residuen) sind nur teilweise erfüllt (siehe Anhang).

5.1.3. Betameter

Die Differenzen zwischen Betameter- und HVS-Geräten sind bedeutend geringer als beim Teom. Allerdings zeigen sie bedeutsame Standort-Unterschiede, die in dieser Untersuchung nicht geklärt werden konnten.

Standortabhängige Modelle sind aber möglich, wenn auch noch auf einer schwachen, statistischen Basis, und tragen zu einer Verbesserung der Berechnung von LRV-Parametern bei: Den

Mittelwert können sie sehr zuverlässig auf das Niveau des HVS umrechnen. Bei der Zahl von Überschreitungstagen bringen sie ebenfalls eine Verbesserung. Eine wichtige Einschränkung ist aber, dass ohne Parallelmessung unklar ist, welches der in Frage kommenden Modell das beste ist. In drei von vier untersuchten Fällen ist RG1 die gesuchte Verbesserung, im 4. Fall, wo eine Temperatur–Abhängigkeit gefunden wurde, ist aber ein Periodenmodell am stärksten.

Weitere Auswertungen haben gezeigt, dass der k-Faktor $k = Y/X$ nicht konstant über den ganzen PM10-Konzentrationsbereich ist. Damit tritt beim Betameter-Gerät eine Nichtlinearität auf, die beim Teom nicht vorkommt. Es wurden andere, nicht-lineare Modellansätze geprüft (Exponential- und Logarithmus-Funktionen), die nur lokal eine Verbesserung ermöglichen, aber in keinem Fall auf andere Standorte übertragbar waren.

5.2. Empfehlungen zur Modellwahl

5.2.1. Referenzstationen

Als Referenzstationen gelten Stationen, die parallel zu einem Teom- oder Betametergerät auch ein HVS betreiben, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Parallelmessungen über mindestens ein volles Jahr.
- Geräteeinstellungen entsprechend dem bisherigen PM10-Vergleichsversuch.

Die Referenzstationen überwachen die Gültigkeit der regionalen Modelle. Aus ihren Daten werden die lokalen Regressionsmodelle (RG0, RG1, RG2) und das Periodenmodell (Per) hergeleitet. Sie vergleichen die Resultate mit andern Referenzstationen und stellen ihre Daten für die Optimierung der bestehenden regionalen Modelle zur Verfügung.

5.2.2. Geräteeinstellungen

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

5.2.3. Stationen mit Teom-Geräten

Für Teom-Messwerte wird das regionale Periodenmodell vorgeschlagen:

$$Y_{Per}(t) := X(t) * \left[A + B * \sin \left(2 * \pi * \frac{t - t_0 - C}{365} \right) \right]$$

Vorteile des Modells

1. Gute Schätzung des Jahresmittelwertes
2. Sehr gute Abschätzung der Anzahl Tage $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
3. Unabhängig von der Wahl der Bezugsgrössen
4. Physikalisch begründbar
5. Deutbare Parameter
6. Gute statistische Qualität (Bestimmtheitsmass)
7. Vereinfachbar zu RG0 für Jahresmittelwertberechnung

Bemerkungen

1. Die Jahresmittelwerte der lokalen und der regionalen (Mittelland) Periodenmodelle pendeln wie die statistischen Modelle um den gemessenen Wert des Referenzgerätes HVS herum. Die Abweichungen des Periodenmodell liegen zwischen denjenigen von RG1 und RG2.
2. Die Abschätzung der Anzahl Tage $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ist im Periodenmodell mit Abstand am besten. Die mittlere Abweichung beträgt 4 Tage, beim nächstbesten RG2 Modell bereits 8 Tage und bei RG1 und RWTÜV in der Grössenordnung 20 Tage.
3. Das Periodenmodell ist im Gegensatz zum RG2 Modell, nicht von der Wahl der Bezugsgrössen für Druck und Temperatur abhängig. Dieselbe Formel kann also für historische, nach bisheriger Praxis in der Schweiz normierter Daten sowie für Daten mit zukünftiger europäischer Normierung gebraucht werden.
4. Die Saisonabhängigkeit des k-Faktors ist durch die Heizung im Teom-Gerät verursacht. Deutlich zeigt sich dies auch, dass bei der Heizung auf nur 30°C statt 50°C (Teom mit Nafion-Dryer) dieser Effekt schwächer wird. Die Phasenverschiebung gegenüber der Temperatur zeigt jedoch, dass noch andere Phänomene mitspielen. Sie erklärt auch, warum die Korrelation bei den statistischen Modellen mit Einbezug der Temperatur beschränkt bleibt.
5. Die Parameter A, B und C sind einfach deutbar. A ist der Jahresmittelwert des k-Faktors, B seine mittlere Abweichung oder seine Bandbreite und C seine Phasenverschiebung in Bezug auf das astronomische Jahr. Die Phasenverschiebung C ist nicht sehr kritisch, Jahresmittelwert A und Bandbreite B zeichnen jedoch ein klares Bild der Grössenordnung und der Saisonabhängigkeit des k-Faktors.
6. Das Bestimmtheitsmass R^2 liegt beim Periodenmodell im Bereich eines 2-Faktormodells mit Temperatur (RG2) und ist damit besser als ein 1-Faktormodell (RG1).
7. Das Periodenmodell kann näherungsweise auf den Faktor A reduziert werden und fällt dann mit dem RG0-Modell zusammen. Damit kann der Jahresmittelwert genügend genau berechnet werden. Auch eine einfache Überschlagsrechnung im Kopf ist möglich.

Nachteile

1. Wahl eines Referenzdatums (21.03.XX) des Messjahres
2. Berechnung etwas komplizierter als bei einfacher Regression (Einbezug des Datums in die Formel)

Bemerkungen

Für die Umrechnung muss ein Vergleichstag gewählt werden. In der hier definierten Form ist dies der 21. März des Jahres, welches den Messdaten am nächsten liegt. Davon muss die Differenz zum Datum der Messung berechnet werden (was z.B. in Excel einfach programmiert werden kann). Es ist eine einmalig durchzuführende Arbeit.

Was die Statistik betrifft, so hat das Periodenmodell den Nachteil, dass die Verteilung der Abweichungen (Residuen) zum HVS schmalgipflig sind und damit von der Normalverteilung abweichen. Wird es auf die Kurzform RG0 reduziert, so wird die Verteilung normal (Chi-Quadrat-Test). Handkehrum sind die Abweichungen im Periodenmodell zum HVS weitgehend unabhängig, in der reduzierten RG0-Form jedoch abhängig (autokorreliert). Keines der beiden Modelle erfüllt damit exakt die beiden theoretischen Voraussetzungen für die Regessionsanalyse (siehe Anhang). Aus dem Blickwinkel der LRV ist aber dem Periodenmodell, wie oben dargestellt, eindeutig der Vorzug zu geben.

Modellempfehlungen Teom:

Modell	Mittelland-Periodenmodelle	RG0-Approximation
Teom ohne 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 mit 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 22 Empfohlene Mittelland Periodenmodelle für Teom-Messgeräte. Alle empfohlenen Modelle sind unabhängig von Bezugsgrößen, sie gelten für die bisherigen ($T = 9^\circ\text{C}$, $p = 950 \text{ hPa}$) wie auch für die zukünftigen ($T = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$).

5.2.4. Stationen mit Betameter-Geräten

a) Mittelland-Modell RG0

Im Mittelland wird das einfache RG0-Modell vorgeschlagen. Für die Berechnung der Jahresmittelwerte ist es genügend gut. Die Hinzunahme weiterer Parameter steigert die Qualität kaum, insbesondere wird die Abschätzung der Anzahl Tage $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht besser. Unsere Empfehlung unterscheidet sich klar von derjenigen der Working Group (EC PM 2001). Siehe dazu 5.3

Vorteile

1. Gute Abschätzung des Jahresmittelwertes
2. Sehr einfaches Modell
3. Unabhängig von der Wahl der Bezugsgrößen
4. Deutbare Parameter

Bemerkungen

1. Die Abschätzung des Jahresmittelwertes wird mit dem Einbezug weiterer Parameter nicht besser. Sie genügt den Anforderungen an eine Abschätzung
2. Das Multiplizieren mit einem Faktor ist das einfachste Modell überhaupt. Es ist mit jedem Taschenrechner, mit Excel oder im Kopf einfach durchführbar.
3. Das Mittellandmodell ist als RG0-Modell nicht von der Wahl der Bezugsgrößen für Druck und Temperatur abhängig. Dieselbe Formel kann also für historische, nach bisheriger Praxis in der Schweiz normierter Daten sowie für Daten mit zukünftiger europäischer Normierung gebraucht werden.
4. Der Skalierfaktor kann als Abschwächung im Mittelland resp. als Verstärkung in den Alpen interpretiert werden. Bei Modellen mit einem Achsenabschnitt ungleich Null ist keine einfache Deutung mehr möglich.

Nachteile

1. Mässig gute Abschätzung der Anzahl Tage $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2. Keine physikalische Deutung
3. Mässig gute statistische Eigenschaften

Bemerkungen

1. Die Schätzung der Anzahl Tage $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird mit dem Einbezug weiterer Parameter nicht besser. Die vorliegende Analyse bietet keine Hilfe, um diesen Nachteil zu beheben.
2. Der Zusammenhang zwischen Betameter- und HVS-Geräte ist noch zu wenig bekannt. Keine der weiteren Messgrößen bietet statistisch eine Erklärung.

3. Das RG0 Modell gibt zu Gunsten des vorbestimmten Nulldurchganges die Bedingung $\sum \text{Residuen} = 0$ auf. Die Minimierung der Residuenquadrate bleibt jedoch erhalten. Unter Statistikern ist diese Methode wenig erwünscht; ein RG1-Modell als Alternative weist aber autokorrelierte Residuen auf und genügt hohen statistischen Ansprüchen ebenfalls nicht.

b) Alpen-Modell RG2

In den Alpen genügt ein einfaches RG0 Modell nicht. Da sowohl RG1 wie auch RG2 von den Bezugsgrößen abhängen und RG2 wesentlich bessere statistische Eigenschaften hat, (weniger Autokorrelation), wird für die Alpen ein RG2 Modell vorgeschlagen.

Vorteile

1. Gute Abschätzung des Jahresmittelwertes
2. Statistisch gesehen die stärkste aller Alternativen

Bemerkungen

1. Der Jahresmittelwert wird deutlich besser als im RG0 abgeschätzt, insbesondere auch in Stationen mit niedrigen Werten wie Davos.
2. Das RG2-Modell hat zwar ein Bestimmtheitsmass R^2 von nur 0.833, die Autokorrelation ist jedoch wesentlich kleiner als im RG1-Modell.

Nachteile

1. Abhängig von der Wahl der Bezugsgrößen
2. Nur brauchbar, wenn Betameter- und Temperaturmessung vorhanden

Bemerkungen

1. Um die Abhängigkeit von den Bezugsgrößen kommt man im Fall von statistischen Modellen, die komplizierter als RG0 sind, nicht herum.
2. Als einziges Modell verlangt das Alpenmodell für das Betameter 2 Parameter.

c) Modellempfehlung

Modell	Mittelland	Alpen
Betameter bisherige Bezugsgrößen 9°C, 950 hPa	$Y_{RG0} = 0.938 * X$	$Y_{RG2} = 1.041 * X - 0.161 * T + 5.451$
Betameter zukünftige Bezugsgrößen 20°C, 1013 hPa	$Y_{RG0} = 0.938 * X$	$Y_{RG2} = 1.041 * X - 0.165 * T + 5.493$
Eignung	Für Jahresmittel und Zahl der Tage > 50 µg/m ³	Für Jahresmittel und Zahl der Tage > 50 µg/m ³
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 23: *Empfohlenes Mittelland- resp. Alpen-Modell 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 (Tabelle 10). 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 zu erwartenden, hohen Korrelationen nicht ohne Weiteres gefunden werden können. Weitere Standardisierungen für Flusskalibrierung und die Laboranalytik/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 mit Nafion

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 erst 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. Sämtliche $\frac{1}{2}$ -h-Daten der automatischen Geräte (Teom, Betameter) wurden vor den Auswertungen auf Tagesmittelwerte verdichtet. Alternativ wäre aber auch denkbar, Regressionsanalysen mit $\frac{1}{2}$ -h-Werten durchzuführen. Das heisst, bereits für jede $\frac{1}{2}$ h würde aus PM10- und Temperatur-Messung ein transformierter PM10-Wert berechnet und deren Tagesmittel- mit dem HVS-Tagesmittelwert verglichen. Gerade für Teom-Messwerte könnte dieser Ansatz lohnend sein, weil die 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 ebenfalls 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

a) 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. Im extremen Fall, in dem die erklärende Variable ohne Messfehler gemessen werden kann, ergibt sich eine steilste Gerade, die der Vertauschung von Zielvariablen und erklärenden

Variablen entspricht. Die optimale Steilheit hängt vom Verhältnis der Streuungen der Messfehler ab. Da alle in Frage kommenden Geraden durch den Schwerpunkt der Daten gehen, aber steiler sind als die erste, werden die hohen PM₁₀-Werte bei der Umrechnung zusätzlich erhöht (die niedrigen verkleinert). Das hat zur Folge, dass auch die Zahl der Überschreitungen von 50 µg/m³ bei den RG1-Modellen erhöht werden. Da die oben hergeleiteten RG1-Modelle die Zahl der Überschreitungen unterschätzen, ergäbe sich mit solchen errors-in-variables Modellen eine Aufwertung der RG1-Modelle. Die Berechnung des Mittelwerts wird übrigens durch die Wahl des Modells nicht beeinflusst. Es wäre empfehlenswert, die bisherigen Modelle um errors-in-variables Modelle zu ergänzen – Bestimmung der Koeffizienten, Residuenanalysen (Normalverteilung, Unabhängigkeit), Mittelland-Modelle, LRV-Parameter – und die Ergebnisse mit den RG1-, RG2- und Periodenmodellen zu vergleichen. Ein erster Test wurde mit den Daten der Station Luzern ausgeführt. Mit einer mittleren Regressionsgeraden⁶ beträgt die Zahl der Überschreitungen 5 Tage, mit dem bisherigen RG1-Modell nur 2 Tage (RG0 3 Tage, RG2-Modell 8 Tage, Periodenmodell 10 Tage, HVS 11 Tage).

b) Bereits im Kapitel 2.3 über Methodik wurde erwähnt, dass die Zahl der Tage mit Überschreitung von 50 µg/m³ als Kriterium zur Prüfung der Modellqualität den Nachteil besitzt, dass es einseitig auf die hohen Konzentrationswerte fokussiert. In einem verbesserten Verfahren zur Modellbeurteilung wären nicht einfach die Modellwerte > 50 µg/m³ 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 sollten die zukünftigen Daten in die bestehende Datenbank aufgenommen werden, insbesondere auch von Vergleichsversuchen an neuen Standorten. Selbstverständlich konnten in dieser Studie nur einige Modellansätze überprüft werden. Da die

⁶ In diesem Fall wurde die „geometric mean“ Regression gewählt (die Steigung ist gleich dem geometrischen Mittel aus flachster und steilster Regressionsgeraden).

Vergleichsmessung von PM10 im In- und Ausland weitergeführt werden, wird auch das Know-how über die Unterschiede der Messmethoden zunehmen, was zur Standardisierung der Modellansätze führen wird.

Empfehlungen der EC Working Group on Particulate Matter

Soeben am 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 Standorten 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 1.27,⁷ der in diesem Bericht für Teom-Messreihen (ohne Nafion) empfohlen wird. Er entspricht der RG0-Approximation für das Periodenmodell⁸. 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.

7 1.17 für Teom mit Nafion. Für Teom mit Nafion gibt die EC Working Group (noch) keine Empfehlungen.

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

5.4. Ausblick

HVS

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

Teom

In-LUFT klärt zur Zeit 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.

Betameter / Einsatzkonzept im NABEL

Im NABEL werden seit Anfang 2001 sukzessive Betameter des Typs FH62 I-R zur on-line-Messung von PM10 eingesetzt. Die bisherige normgerechte gravimetrische PM10-Messung in Tageswerten mit Digital High-Volume-Sammlers des Typs DHA 80 bleibt grundsätzlich bestehen, die Häufigkeit der Probenahme wird aber von bisher täglich auf jeden 4. Tag reduziert. Aus dem Datensatz der Betameter und den gravimetrischen Tageswerten wird der bereinigte Datensatz für PM10 mit der folgenden Prozedur ermittelt:

Es stehen zur Verfügung: a) 10-Minutendatei der unkorrigierten PM10-Betameterwerte ($b_{10_{i,j}}$), b) In der Regel jeden 4. Tag ein Tageswert PM10 gravimetrisch (gTW_i) und c) Indices: $i =$ Tag, $j =$ n-ter 10-Minutenwert am i-ten Tag, $n = 1$. Daraus wird der bereinigte Datensatz für PM10 wie folgt berechnet:

Fall 1: Tage an denen ein gravimetrischer PM10-Wert (gTW_i) vorhanden ist

$$b_{10korr_{i,j}} = b_{10_{i,j}} \cdot \frac{gTW_i}{bTW_i}$$

wobei: $bTW_i =$ Tagesmittelwert der gemessenen PM10-Betameterwerte am i-ten Tag

Fall 2: Tage an denen kein gravimetrischer PM10-Wert (gTW_i) vorhanden ist

$$b_{10korr_{i,j}} = b_{10_{i,j}} \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{gTW_v}{bTW_v} + \frac{gTW_f}{bTW_f} \right)$$

Indices: $v =$ zeitlich nahester i vorangehender Tag mit vorhandenem gTW

$f =$ zeitlich nahester i folgender Tag mit vorhandenem gTW

Berechnung von bTW_v resp. bTW_f analog wie bTW_i (siehe oben)

Daraus resultiert eine 10-Minutendatei korrigierter PM10-Betameterwerte ($b_{10korr_{i,j}}$).

Vergleichsmessungen in Härkingen zeigten, dass damit sowohl bezüglich Jahresmittelwert, wie auch Anzahl Überschreitungen des Tagesgrenzwertes sehr gute Übereinstimmung mit der gravimetrischen Messreihe erhalten wird. Zur Zeit wird das Konzept noch an weiteren 4 NABEL-Messstationen (Bern, Chaumont, Dübendorf, Payerne) überprüft.

Anhang

TM Average	300 s
MR/MC Average	300 s

Filtermaterial:

Es sind die von Rupprecht&Patashnick mitgelieferten Pallflex Filter (TX40) zu verwenden.

Verschiedenes:

Messwerte, welche bei einem Noise von grösser als 0.1 µg gemessen werden, sollten sicherheitshalber ungültig gesetzt werden. Im ConWin Capture kann dies als Verknüpfung der Messkanäle Noise und Konzentration realisiert werden.

Das Teom erlaubt die Kompensation des Druckes und der Temperatur auf verschiedene Art und Weisen. Im Menü „Set Temps / Flows“ können die entsprechenden Standardbedingungen gesetzt werden. Es wird vorgeschlagen, dass die folgenden Einstellungen unabhängig des Standortes gewählt werden:

T-A/S (Mittlere Betriebstemperatur / Bezugstemperatur) 25°C / 25°C
P-A/S (Mittlere Druckverhältnisse / Bezugsdruck) 1atm / 1 atm

Diese Einstellungen entsprechen der Defaulteinstellung ab Werksauslieferung. Damit erfolgt weder bei der Temperatur noch beim Druck eine Umrechnung. Allfällige Umrechnungen auf einen definierten Standard können nachträglich immer noch vorgenommen werden.

Datenerfassung

Bei der Datenerfassung ist darauf zu achten, dass nicht das analoge Momentan-ausgangssignal der PM10 Konzentration benützt wird, da dieses Signal bei den oben erwähnten Einstellungen einen gleitenden 5 Minuten Mittelwert darstellt. Richtigerweise ist der 30 min. Mittelwert am RS 232 Ausgang zu verwenden.

Zur Qualitätssicherung der PM10 Messwerte wird empfohlen folgende Messdaten additional zu erfassen:

Total Mass PRC 009
Noise PRC 013
Operating Mode PRC 014
Current Air Temperature PRC -----
Filter Loading PRC 035
Current Main Flow PRC 039
Current Auxilary Flow PRC 040

Current Pressure PRC -----

Filtertemperatur PRC -----

Achtung: die PRC (Program Register Codes) können je nach Gerätegeneration zum Teil von einander abweichen.

PM10 Probenahmekopf

Um keine unkontrollierbaren Unterschiede zu erzeugen, wird vorgeschlagen, den Original – Probenahmekopf von Rupprecht&Patashnick zu verwenden. Der gesamte Kopf ist bei stark belasteten Standorten ($> 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) alle 3 Monate zu reinigen. Die Prallplatte darf nicht mit Fett behandelt werden. Der Probenahmekopf soll während des ganzen Jahres mit dem mitgelieferten Insektenschutz - Maschennetz betrieben werden. Die Dichtungs O – Ringe sind bei jeder Reinigung auf ihre Dichtigkeit zu überprüfen. Nach einem Jahr Betriebsdauer sind sie sicherheits- halber auszu-wechseln.

Wartungsarbeiten

Halbjährlich muss eine Kontrollmessung der Massflow Controller durchgeführt werden. Auch ein Dichtigkeitscheck des Gesamtsystemes muss durchgeführt werden. Anleitungen dazu sind im Teom Manual in Section 7 detailliert beschrieben.

Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung sind die leeren Filter vor dem Einsetzen in das Teom zu wägen. Die belegten Filter werden nach der Entnahme aus dem Teom wieder gewogen und die Differenz mit der Gesamtmassenangabe des Teom für diesen Filter verglichen. Somit ist eine unabhängige Kontrolle der ausgewiesenen Teom-Masse und der daraus berechneten PM10 Konzentration möglich. Die Filter müssen vor den Wägungen nicht konditioniert werden, da das Filtermaterial keine hydrophoben Eigenschaften aufweist. Zudem wird der Filter beim Betrieb ständig auf 50°C gehalten, sodass es kaum wahrscheinlich ist, dass Wasseranteile auf den Staubpartikeln angehaftet
bleiben.

In-LUFT, 25.Sept. 1999, Thomas Zünd

A1.1.3 Eberline Betastaubmeter FH62 I-R

	Härkingen (EMPA)	Davos - Matta (GR)	Roveredo (GR)	Stampfenbachstrasse (UGZ)
• Alter des Strahlers:	1998	1998	1999	1999
• Messkopftyp: Andersen Digital gefettet alle . . W	x	x x	x	x (05/99 - 10/00) x (ab 10/00) (Digital) 1 W
• Heizungstyp: kurz lang Regelung auf Heizungstemp [°C] Temp. Bestäubungskammer [°C]	x T4 35°C ca 25 - 30 °C	x T2 geregelt auf Bestäubungskammer 35°C	x T4 40°C 35°C	x T4 40°C(05/99-07/00) 45°C(07/00-12/00) max 30°C
• Messort Aussentempensensor (T1): • Messort Heiztempensensor (T4):	oben am Probennaherohr ca. 15 cm vor Rohrende	bei Ansaugkopf unterhalb beheizter Strecke	bei Ansaugkopf unterhalb beheizter Strecke	im Wetterhaus bei Wärmetauscher ca. 15 cm über unt. Messingheizblock
• Filterbandtyp: normal (GF10) schw ermetallarm (GF3516)	?	x	x	x
• Kalibration mit SiO ₂ Folien +15% Foliensatznummer	ja	ja 0163	ja 0163	ja 0164
• Durchflusskalibration:	Gasuhr ½ jährlich	DryCal	DryCal	Gasuhr (mit Eichzertifikat) ½ jährlich
• Kal Temp und Drucksensoren:				jährlich
• Berechnungsmethode PM ₁₀ :	4 (ADF)	2 (Ratemeter)	2 (Ratemeter)	4 (ADF)
• DC Filter für Masse:		120 sec	120 sec	33 sec
• Ausgabe negativer Messwerte:	ja	ja	ja	ja
• Filterbandwechsel: [h] 24 h	24h und max Masse 500 µg	12h	6h	4h (Winter) / 6h (Sommer) ja
• Messkopf / Düsenplatte reinigen:	jährlich	jährlich	jährlich	jährlich / ¼ jährlich
• Ansaugrohrleitungen reinigen:	jährlich	jährlich	jährlich	½ jährlich
• Reinigung der Messkammer:				jährlich
• Kohleflügel Samplepumpe ersetzen:	jährlich	jährlich	jährlich	jährlich
Bemerkungen	mit Russmesskopf	mit Russmesskopf	mit Russmesskopf	mit Russmesskopf

Tabelle 25: Einstellungen der Betameter-Geräte

Die folgenden Parameter des Beta-Staubmeters sind zu beachten und sollten dokumentiert werden:

- Messkopftyp: Andersen / Digital (gefettet)
- Strahleralter: Die Halbwertszeit des Krypton⁸⁵ Strahlers beträgt 10 Jahre. Die abnehmende Strahlerintensität wird mit einem zunehmenden Faktor korrigiert (wird als erste Zahl bei Kalibration angezeigt)
- Heizungstyp: kurz (innerhalb Messkontainer / Messkabine) lang (durchgehend von Messgerät bis Messkopf)
- Heizungstemperatur: gemessen an der Aussenseite des Ansaugrohrs ca. 10 cm vor Ende der Heizstrecke
- Heiztemperatursensoren: T4 Sensor (hinten am Gerät eingesteckt zusammen mit T1, T4 = kurzer Sensor) Der T4 Sensor muss gut isoliert werden damit die Heizungstemperatur korrekt gemessen wird.
- Bestäubungskammertemperatur: Temperaturverlauf (T2) beim bestäubten Filterband (max ~ 30°C)
- Messort Aussentemperatursensor: T1 Sensor zur Berechnung des Durchflusses am Messkopf (1 m³/h, aktuelle Bedingungen)
- Regelung der Heizung auf: T4 an Heizung oder T2 in Bestäubungskammer
- Filterbandtyp: Glasfaser (GF10) Schwermetallarm Glasfaser (GF3516) beide Schleicher & Schüel
- Kalibration mit SiO₂-Folien, Foliensatznummer, Wert + 15 % verwenden (aus Vergleichsmessungen zum Kleinfiltergerät OK).
- Vor Kalibration die Heizung ausschalten und abkühlen lassen.
- Durchflusskalibration mit Gasuhr, DryCal Vorsicht: die Neueinstellung bei Beta muss berechnet auf aktuelle Bedingungen eingegeben werden und der Aussensensord T1 muss dieselbe Temperatur messen wie die angesogene Kalibrationsluft.
- Massekorrekturfaktor Temperaturkompensationsfaktor ($\mu\text{g}/\text{K} * 100$) soll 26.5 (nur mit PC Parameterliste oder Steuerbefehl KL einstellbar)
- DC Filter für Masse ... sec (nur für Massenausgabe am Display und am Analogausgang)
- Berechnungsmethode PM10 lineare Regression, Ratemeter, Advanced Digital Filter
- Ausgabe negativer Messwerte: Ja
- Filterbandwechsel nach maximal 24 h (bei Russmesskopf RZ < 8)
- Filterstandzeit dokumentieren (höhere Verluste leichtflüchtiger Substanzen bei langen Standzeiten)
- Kalibration Temperatur- und Drucksensoren: jährlich

- Messkopf reinigen alle 6 Monate
- Düsenplatte reinigen alle 3 Monate
- Ansaugrohrleitung reinigen alle 6 Monate
- Sample-Pumpe: jährlich warten, Kohleflügel auswechseln
- Messkammer reinigen alle 1 - 2 Jahre, durch Servicefachmann, je nach Belastung des Messsorts (1 Tag nach Kammerreinigung muss das Betameter mit den SiO₂-Folien kalibriert werden)
- Umrechnung auf °C und hPa (mbar) je nach Einstellung des Betameters und Ausstattung der Messstation (siehe unten)

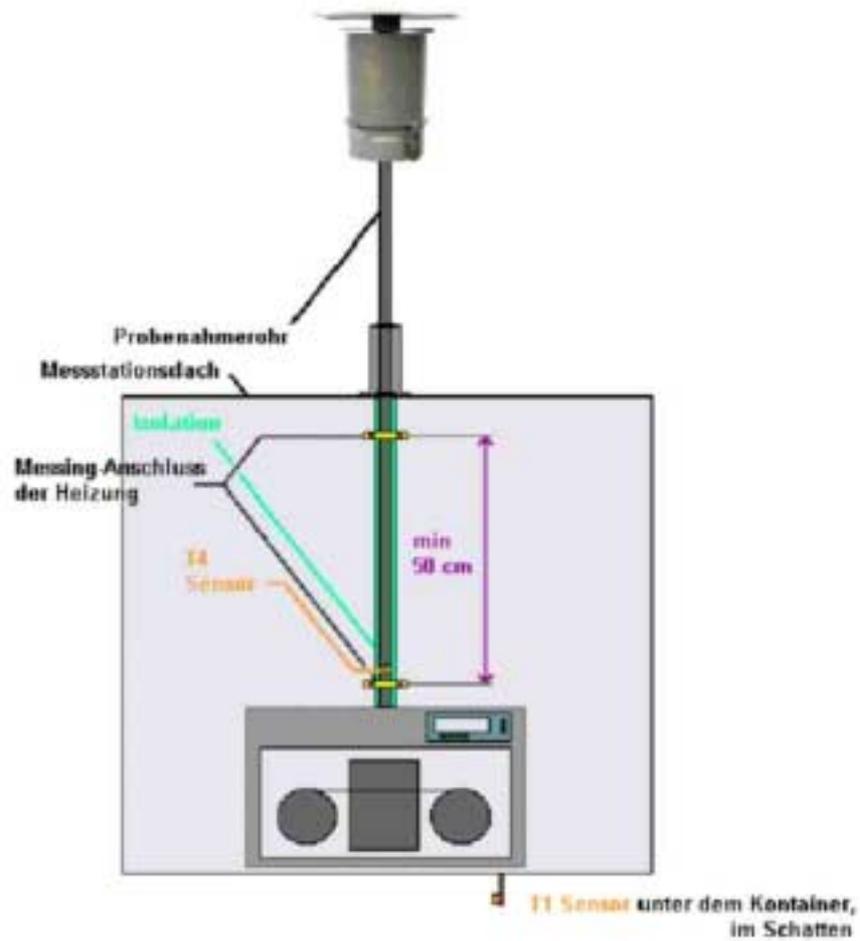
Montage der Heizung im Kontainer:

Siehe dazu folgende Figur.

Beispiel für eine kurze Heizung: Das Probennahmerohr sollte im Kontainer über die ganze Länge gut isoliert sein. Die beheizte Strecke zwischen den Messinganschlüssen sollte min. 50 cm betragen. T1 Sensor für die Aussentemperaturmessung, T4 Sensor für die Temperaturregelung der Heizung.

Bei der langen Heizung muss darauf geachtet werden, dass der T1-Sensor nicht von der Heizung oder durch Sonneneinstrahlung falsche hohe Messwerte anzeigt.

Siehe auch Bericht zum Erfahrungsaustausch über „Messungen von PM10/PM2.5“ im Auftrag des LAI, (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, UMEG), Februar 2000 und „Erfahrungen bei der Vergleichbarkeit von automatischen und manuellen PM10-, Staub- und Russ-Messungen“, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin, Michael Preuss, Messtechnisches Kolloquium, Grainau 2001



Figur 11 Betameter: Montage der Heizung im Container

8.7.2001, Susanne Schlatter, Umwelt - und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ)

A1.2 Bezugsbedingungen

A1.2.1 Schweizerische und europäische Bezugsbedingungen

Sämtliche Messdaten, die im Vergleichsversuch ausgewertet und benutzt wurden, sind auf folgende Bezugsbedingungen umgerechnet:

$$c(\text{korr.}) = c(\text{unkorr.}) * \frac{T(\text{aussen, effektiv})}{p(\text{aussen, effektiv})} * \frac{p(\text{Bezug})}{T(\text{Bezug})} = c(\text{unkorr.}) * k$$

mit

Temperatur $T(\text{Bezug}) = 9\text{ }^{\circ}\text{C} = 282\text{ K}$,

Aussendruck $p(\text{Bezug}) = 950\text{ hPa}$

$k = 3.3688\text{ hPa/K}$

Für den Vergleichsversuch wurden damit Bezugsbedingungen festgelegt, welche den zur Zeit noch gültigen schweizerischen Messempfehlungen entsprechen. Sie werden demnächst ändern und den europäischen Empfehlungen angepasst. Diese sind bis heute allerdings erst für SO₂ und NO₂ (1013 hPa, 293 K, Richtlinie 1999/30/EC vom 22.04.99⁹), nicht aber für Staub definiert. In der EN 12341 „Ermittlung der PM10-Fraktion von Schwebstaub, 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. (Es ist zu erwarten, dass für Staub die gleichen Bezugsbedingungen definiert werden wie für die gasförmigen Komponenten.) Das bedeutet, dass die zukünftigen Bezugsbedingungen noch unsicher sind, und die definierten Normbedingungen EN 12341 einen Standard setzen (273 K), wie er für die gasförmigen Komponenten sicher nicht verwendet werden wird. Die gasförmigen Komponenten werden als erklärende Grössen in den gesuchten Umrechnungsformeln verwendet und sind deshalb auf die gleichen Bedingungen zu beziehen wie die PM10-Daten. Deshalb wurde für den Vergleichsversuch beschlossen, sich an den bisherigen schweizerischen Bezugsgrössen zu orientieren. Die Differenz zwischen dem zukünftigen EU-Korrekturfaktor [$k = p(\text{Bezug})/T(\text{Bezug}) = 3.4573\text{ hPa/K}$] und dem Faktor mit schweizerischen Bezugsgrössen von (3.3688 hPa/K) ist lediglich 2.6%, sodass die Differenz zum vermuteten zukünftigen, europäischen Standard gering ist.

⁹ Vermutlich werden die Europäer den Standard 293 K, 1013 hPa wählen, was nach Gasgesetz einen Korrekturfaktor von $k = p(\text{Bezug})/T(\text{Bezug}) = 3.4573\text{ hPa/K}$ ergibt.

A1.2.2 Umrechnung der HVS-Daten

Für den routinemässigen Messbetrieb im schweizerischen Mittelland wird das Rotameter des Geräts so eingestellt, dass bei einer Aussentemperatur von 9°C und einem Aussendruck von 950 hPa exakt 500 l/min (bezogen auf 9°C und 950 hPa, gemäss I-Empfehlung) angesaugt werden. Dies entspricht für Glasfaserfilter den Rotameter-Betriebsbedingungen von 19°C und 920 hPa (Erwärmung im Gerät und Druckabfall über das Filter). Unter Berücksichtigung der Kalibrierbedingungen des Rotameters entspricht dies dem Skalenpunkt 506 l/min (näheres siehe Anleitung zur Einstellung der Rotameter). Weichen nun die effektiven Aussentemperaturen und Drücke erheblich von 9°C und 950 hPa ab, so ist das tatsächlich angesaugte Volumen nicht mehr exakt 500 l/min (bezogen auf 9°C und 950 hPa). Die Abweichungen sind aber für die in der Praxis auftretenden Temperatur- und Druckbereiche so gering, dass sie für Routinemessungen (z.B. NABEL) nicht korrigiert werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie eine solche Korrektur durchgeführt werden kann. Ausgangspunkt ist Formel 3 der Anleitung zur Einstellung der Rotameter:

$$V(\text{Bezug}) = V(\text{Rota}) \cdot \frac{T_3}{p_3} \cdot \sqrt{\frac{p_1 \cdot p_2}{T_1 \cdot T_2}}$$

Index	1	Kalibrierbedingungen	288K; 1013 hPa
	2	Betriebsbedingungen	für Glasfaserfilter, T(aussen)+10; p(aussen)-30
	3	Bezugsbedingungen	282K; 950 hPa

Für das Ausmass der Korrektur massgebend ist das Verhältnis von V(Bezug), berechnet für folgende zwei Fälle:

- Betriebsbedingungen 292 K und 920 hPa wie routinemässig angenommen für die zu korrigierende Messung
- Betriebsbedingungen T(aussen, effektiv)+10 und p(aussen, effektiv)-30 als Tagesmittelwerte für den zu korrigierenden Tageswert.

also:

$$\frac{V(\text{effektiv})}{V(\text{unkorr.})} = \sqrt{\frac{(p(\text{aussen, effektiv}) - 30) \cdot 292}{920 \cdot (T(\text{aussen, effektiv}) + 10)}}$$

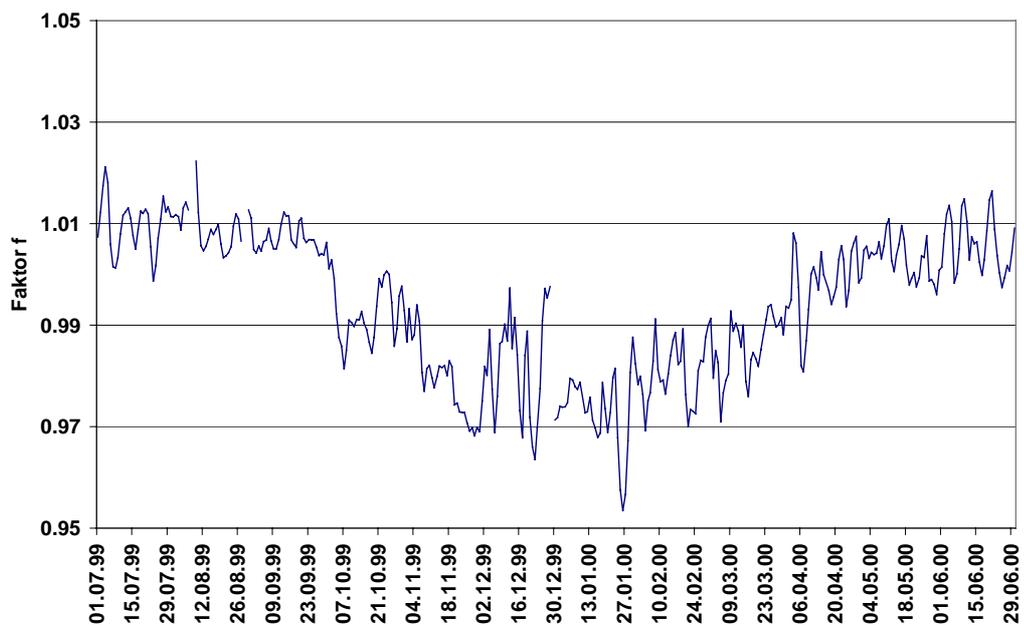
resp. für die Korrektur der unkorrigierten Konzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$):

$$c(\text{korr.}) = c(\text{unkorr.}) * f = c(\text{unkorr.}) * \sqrt{\frac{920 * [T(\text{aussen}, \text{eff}) + 10]}{[p(\text{aussen}, \text{eff}) - 30] * 292}}$$

Auf diese Weise kann für jeden Tag der routinemässig ermittelte unkorrigierte Wert mit der an diesem Tag herrschenden durchschnittlichen Temperatur und Druck korrigiert werden. Resultate für die Station Härkingen (Messzeit vom 1.7.1999 bis 30.6.2000)

Mittelwert der Faktoren	0.994
Standardabweichung	0.014
95% der Faktoren innerhalb	0.97 – 1.02
Maximaler Faktor	1.022
Minimaler Faktor	0.953

Tabelle 26 Korrekturfaktoren f für die Station Härkingen



Figur 12: Zeitlicher Verlauf der Korrekturfaktoren für die Station Härkingen

EMPA Dübendorf, 4. September 2000, R. Gehrig

A2. Hinweise zur Statistik

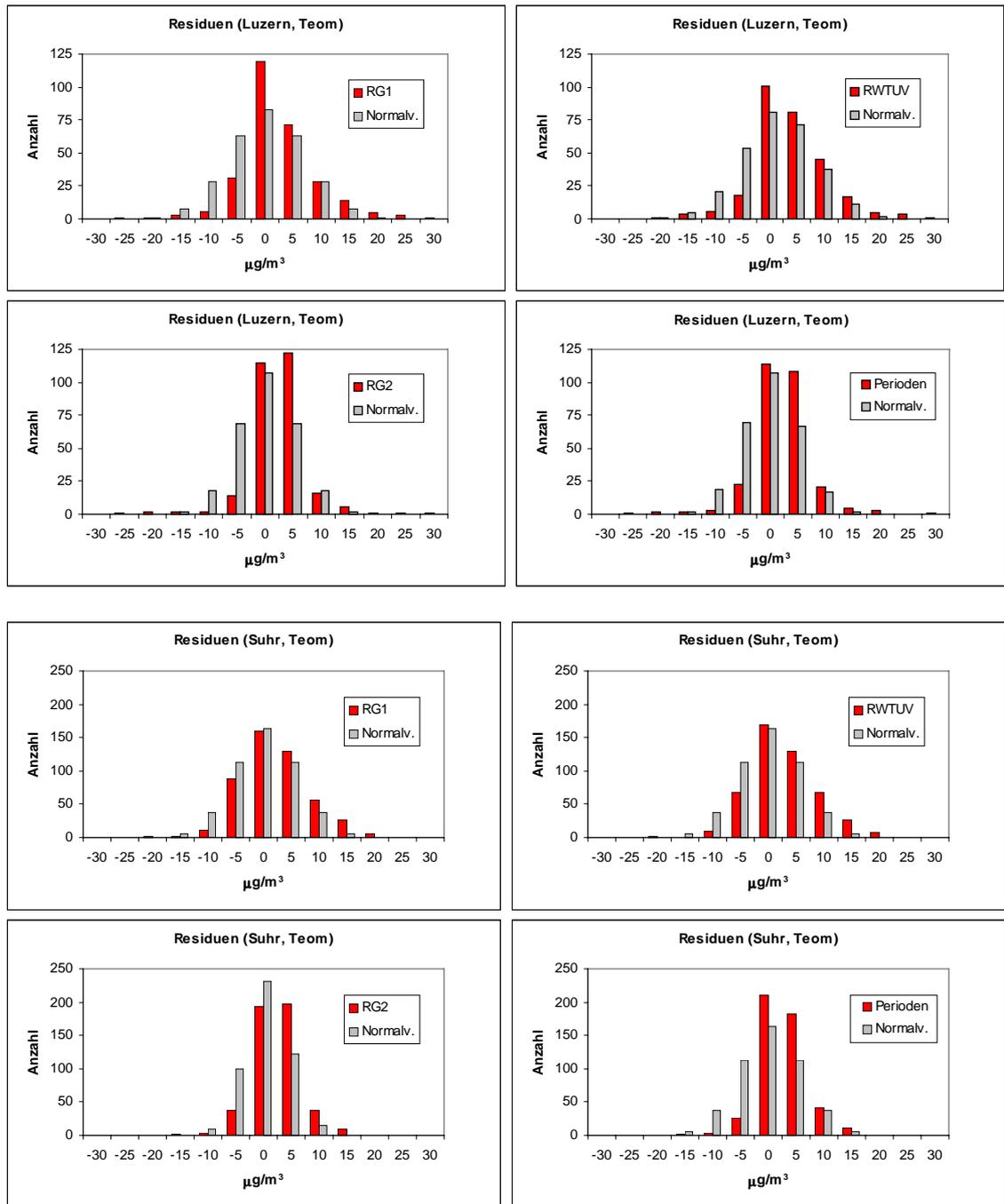
Für die Anwendung linearer Regression wird vorausgesetzt, dass die Residuen normalverteilt und unabhängig sind. Diese Voraussetzungen sollten für die Modelle RG1 und RG2 erfüllt sein. Sie werden deshalb überprüft. Das Periodenmodell ist das Resultat einer nicht-linearen Regressionsrechnung, bei der die beiden Bedingungen

$\Sigma \text{Res.} = 0$, $\Sigma (\text{Res.})^2 = \text{min.}$ erfüllt wurden. Es wird ebenfalls in die Betrachtung einbezogen.

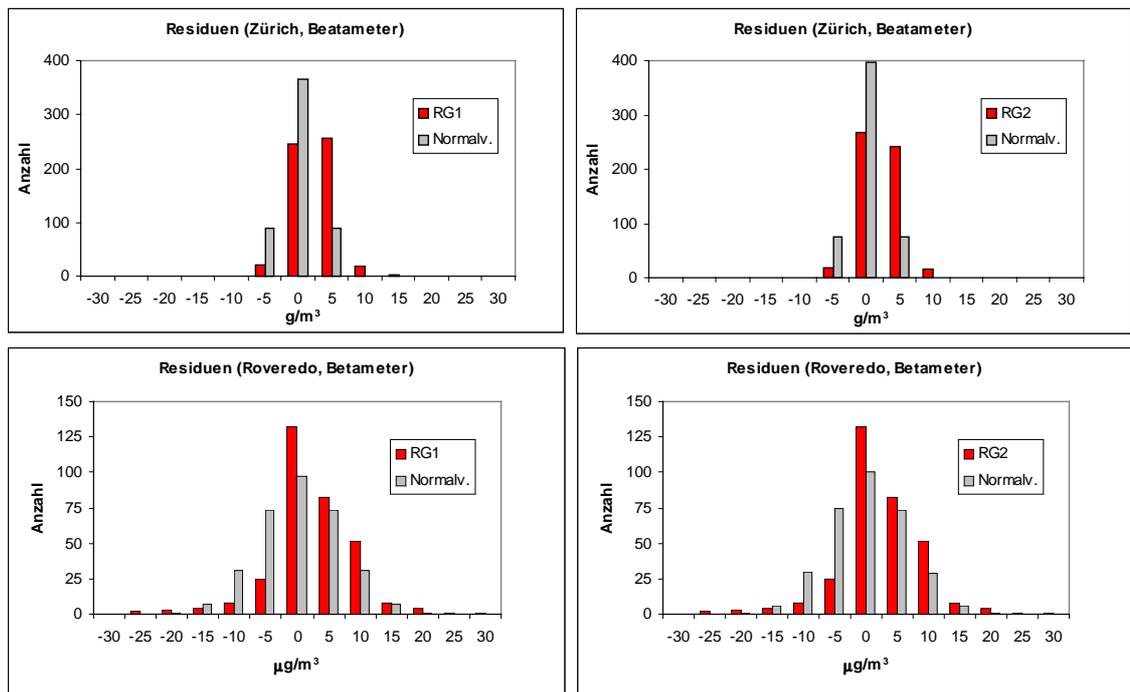
Normalverteilung der Residuen: Alle Modelle zeigen eine Verteilung mit einem Maximum, die Lage des Maximums bei Null, wie dies bei einer Normalverteilung zu erwarten ist. Allerdings weichen die Formen der Verteilungen in unterschiedlicher Weise von der Normalverteilung ab. Der Chi-Quadrat-Test ergibt folgendes Resultat: Für die meisten Verteilungen kann die Nullhypothese (die Verteilung ist normal) auf dem 5% Niveau akzeptiert werden. Für Luzern, RG2 und Periodenmodell, wird die Nullhypothese abgelehnt, weil die empirischen Verteilungen bei grossen Residuen ($30\text{-}35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) einen höheren Wert als die Normalverteilungen aufweisen. Eine Bestimmung der Kurtosis zeigt, dass im Fall Luzern das RG2-Mittelland-Modell schmalgipflig (leptokurtisch) ist – was auch für das Periodenmodell zutrifft - alle übrigen Verteilungen sind aber normal. Für die vorliegenden Untersuchungen wird davon ausgegangen dass die Normalverteilung in den meisten Fällen gegeben ist. Interessant ist, dass die beiden RG1-Modelle ähnlich sind und sich vom RG2-Modell unterscheiden. Dieses wiederum besitzt Ähnlichkeit mit dem Periodenmodell.

χ^2 -Test: H0: Verteilung ist normal (5%-Niveau)					
Station		RG1		RG2	Periodenmod.
		lokal	RWTÜV	lokal	lokal
Luzern	H0 akzeptiert	ja	ja	nein	nein
Teom	Kurtosis	2.5	2.2	8.1	6.5
Suhr	H0 akzeptiert	ja	ja	ja	ja
Teom	Kurtosis	0.4	0.5	1.6	1.7
Zürich	H0 akzeptiert	ja	nicht get.	nein	nicht get.
Betameter	Kurtosis	1.4	nicht ber.	2.5	nicht ber.
Roveredo	H0 akzeptiert	ja	nicht get.	ja	nicht get.
Betameter	Kurtosis	2.8	nicht ber.	3.5	nicht ber.

Tabelle 27: Chi-Quadrat-Test für die Prüfung auf Normalverteilung der Residuen. Wo die Nullhypothese nicht akzeptiert werden kann („nein“), weist der Wert der Kurtosis auf schmalgipflige (leptokurtische) Verteilungen. (Der Test wurde nicht für alle Stationen durchgeführt: nicht get./ber.: nicht getestet/berechnet.)



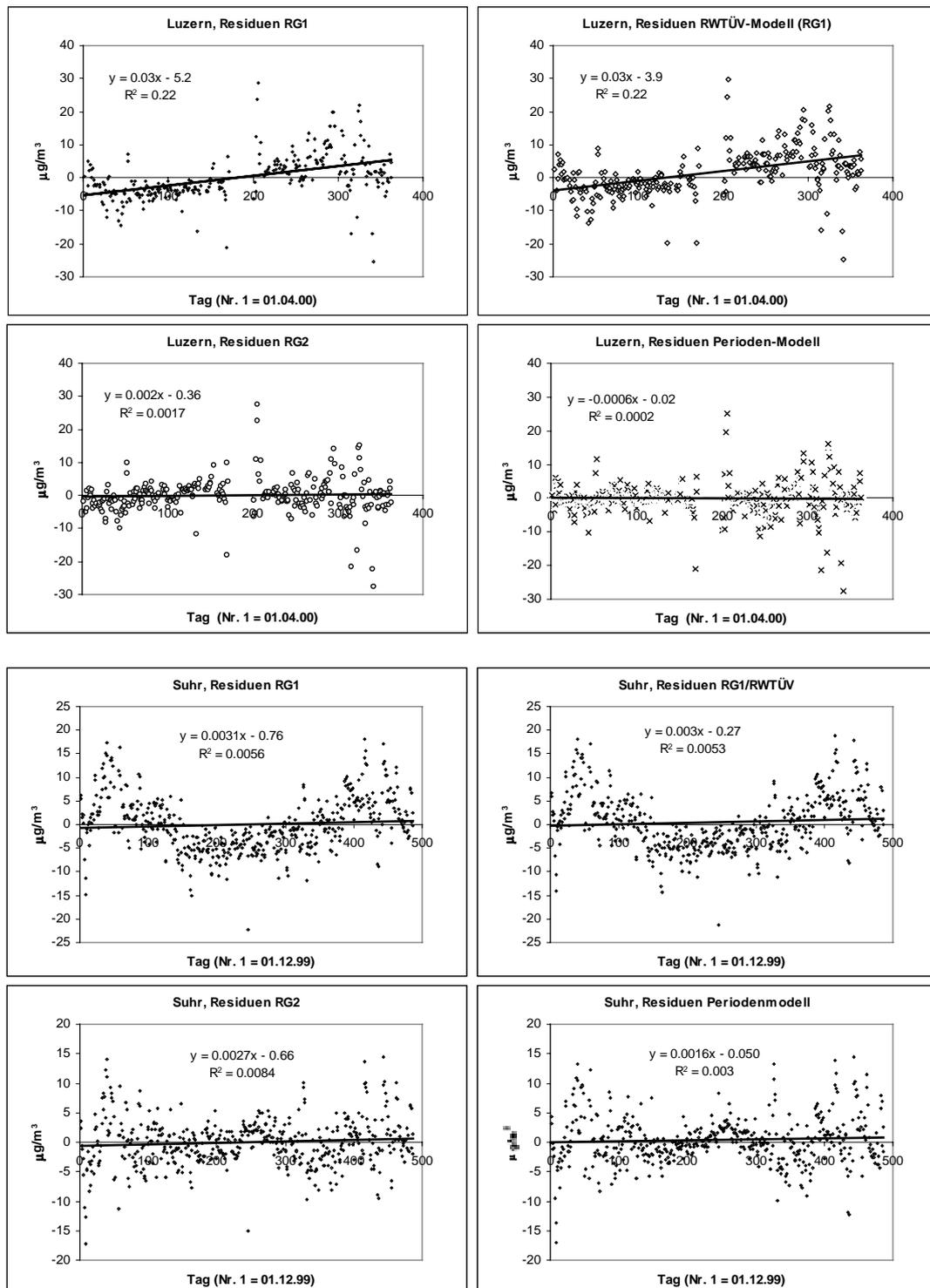
Figur 13 Häufigkeitsverteilungen der Residuen, oben für die Station Luzern (Teom ohne Nafion), unten für die Station Suhr für vier Modelle RG1, (Mittelland und RWTÜV, RG2, Periodenmodel). Zum Vergleich die Normalverteilungen. ()



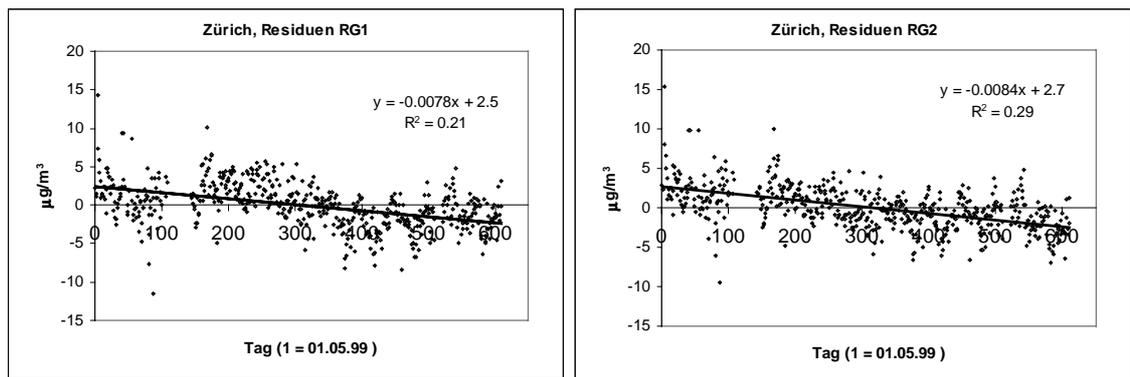
Figur 14 Häufigkeitsverteilungen der Residuen für die Stationen Zürich und Roveredo (Beater) für Modelle RG1 und RG2. Zum Vergleich die Normalverteilungen.

Unabhängigkeit der Residuen: Um die Unabhängigkeit zu prüfen, werden zuerst die Zeitreihen der Residuen betrachtet (siehe Figur 15). Bei den RG1-Modellen (Mittelland und RWTÜV) sind Korrelationen bereits von Auge erkennbar (Jahresgang). Auch beim RG2- und dem Periodenmodell sind noch Korrelationen sichtbar, allerdings deutlich schwächer. Die Berechnung des Durbin-Watson-Koeffizienten bestätigt das Auftreten der Korrelationen, zumindest zwischen benachbarten Zeitpunkten¹⁰, und auch die von Auge sichtbaren Unterschiede. Wenn der Koeffizient zwischen 1.5 und 2.5 liegt, kann von unabhängigen Residuen ausgegangen werden. Die RG1-Modelle weisen Werte zwischen 0.4 und 1.3 auf, jene des RG2- und des Periodenmodells sind zwar mit 0.7–1.4 grösser, aber immer noch unter der Grenze für Unabhängigkeit. Auch hier gilt, dass sich die Resultate paarweise gleichen resp. unterscheiden. Die beiden RG1-Modelle bilden ein Paar sowie das RG2- und das Periodenmodell.

10 Definition: Durbin-Watson-Koeffizient = $\sum (e_{t+1} - e_t)^2 / e_t$



Figur 15 Residuen in Funktion der Zeit (Tage), oben für die Station Luzern (Team ohne Nafion), unten für die Station Suhr (Team ohne Nafion) für vier Modelle RG1, (Mittelland und RWTÜV), RG2, Periodenmodell. Die Trendlinien sind ebenfalls eingetragen.

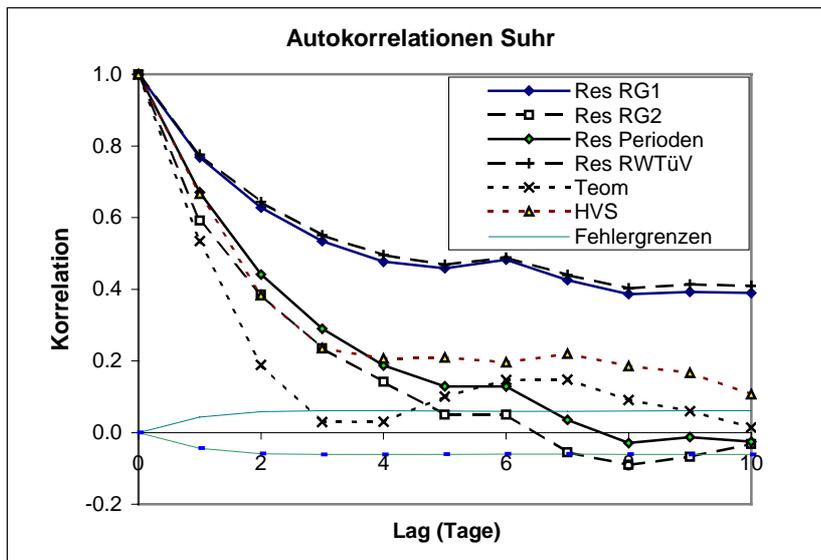


Figur 16 Residuen in Funktion der Zeit (Tage), für die Station Zürich für beiden Modelle RG1 und RG2. Die Trendlinien sind ebenfalls eingetragen.

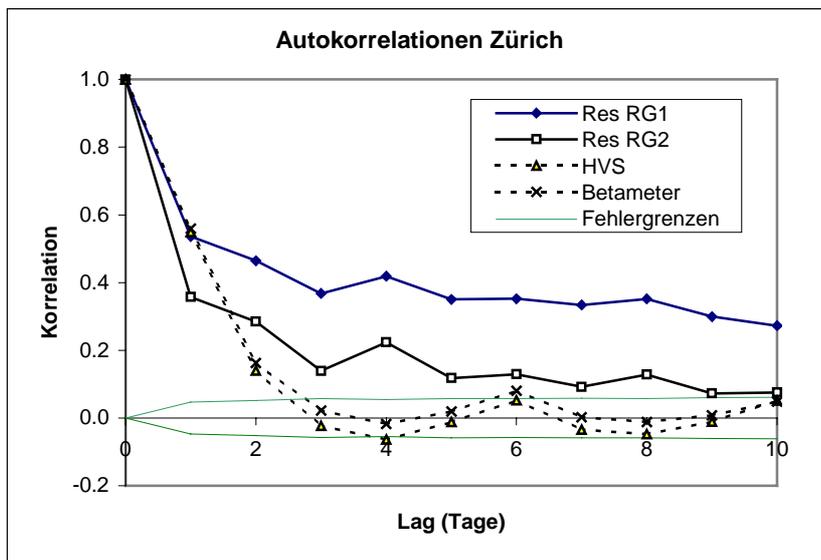
Durbin Watson-Koeffizient		RG1	RG2	Periodenmod.	RWTÜV
Luzern	Teom	0.68	1.18	1.18	0.70
Suhr	Teom	0.44	0.80	0.69	0.43
Zürich	Betameter	0.77	0.90	nicht ber.	nicht ber.
Roveredo	Betameter	1.33	1.39	nicht ber.	nicht ber.

Tabelle 28: Durbin-Watson-Koeffizient für Mittelland- und RWTÜV-Modelle. Werte unter 1.5 deuten auf Abhängigkeit der Residuen. Der Koeffizient wurde nur für die Teom-Stationen für alle Modelle bestimmt.

Eine weitergehende Untersuchung zeigt die Abhängigkeit der Residuen. Dazu werden die Autokorrelationsfunktionen der Residuen für die vier Modelle am Beispiel Suhr berechnet (Figur 17). Für die RG1-Modelle (Mittelland und RWTÜV) fallen die Korrelationsfunktionen zusammen, weil sie durch Linearkombination auseinander hervorgehen. Das Erinnerungsvermögen in der Zeitreihe bleibt nach einem Abfall während sieben Tagen auf dem Wert 0.4 konstant. Wären die Residuen unabhängig voneinander, würde die Funktion sofort auf Null abfallen. Für das RG2- und das Periodenmodell findet man einen rascheren Abfall gegen Null, die Korrelationen sind schwächer, aber doch noch etwa vier Tage vorhanden. In der Figur sind auch noch die Korrelationsfunktionen der PM10-Messungen selber eingetragen. Nach zwei bis drei Tagen fallen deren Korrelationen rasch ab, beim Teom schneller als beim HVS. Beim Teom ist ausserdem der Wochengang der PM10-Immission gut erkennbar. (Ein Vergleich mit der Autokorrelationsfunktion der NO₂-Immissions- und der Temperaturmessung hat ergeben, dass PM10 die niedrigsten Korrelationen aufweist, die Temperatur die höchste. NO liegt dazwischen.)



Figur 17 Autokorrelation der Residuen für die Station Suhr. Die gestrichelten Linien zeigen die Autokorrelationsfunktionen für die entsprechenden Messreihen des HVS- und des Teom-Geräts.



Figur 18 Autokorrelation der Residuen für die Station Zürich. Die gestrichelten Linien zeigen die Autokorrelationsfunktionen für die entsprechenden Messreihen des HVS- und des Betameter-Geräts.

A3. Details zu den Modellresultaten

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Modellwerte		
		HVS Y	Teom X	Perioden A+Bsin(t+C)	RG 1 a ₀ +a ₁ X	RG 2 a ₀ +a ₁ X+a ₂ T
Luzern OHNE Naf.	Mittelwert	23.0	17.8	23.2	22.9	22.8
	Anzahl Tage					
	>60µg/m ³	5	1	4	2	3
	>55µg/m ³	8	2	6	3	4
	>50µg/m³	11	2	10	4	8
	>45µg/m ³	15	3	17	7	13
	>40µg/m ³	23	3	29	16	22
>35µg/m ³	34	7	48	34	40	
Luzern MIT Naf.	Mittelwert	23.0	19.6	23.3	23.0	23.0
	Anzahl Tage					
	>60µg/m ³	5	2	6	3	4
	>55µg/m ³	8	3	9	5	6
	>50µg/m³	11	3	13	7	8
	>45µg/m ³	15	5	19	10	13
	>40µg/m ³	23	9	31	20	24
>35µg/m ³	34	18	50	36	44	
Wallisellen OHNE Naf.	Mittelwert	20.8	16.4	20.7	20.6	20.8
	Anzahl Überschreitungen					
	>60µg/m ³	4	0	2	1	2
	>55µg/m ³	4	0	2	2	2
	>50µg/m³	5	0	3	3	5
	>45µg/m ³	12	2	8	7	10
	>40µg/m ³	20	2	14	11	15
	>35µg/m ³	22	7	21	24	18
	Anzahl Überschreitungen					
	>60µg/m ³	>4	0	4	2	4
	>55µg/m ³	>4	0	5	3	5
	>50µg/m³	>5	0	7	5	9
	>45µg/m ³	>12	3	13	13	15
>40µg/m ³	>20	4	24	20	26	
>35µg/m ³	>22	13	36	44	36	
Wallisellen MIT Naf.	Mittelwert	20.8	17.8	20.6	20.3	20.5
	Anzahl Überschreitungen					
	>60µg/m ³	3	0	1	1	1
	>55µg/m ³	3	1	3	1	2
	>50µg/m³	4	1	4	2	4
	>45µg/m ³	7	1	6	4	6
	>40µg/m ³	14	4	9	9	9
	>35µg/m ³	15	9	14	12	14
	Anzahl Überschreitungen					
	>60µg/m ³	>3	0	3	1	2
	>55µg/m ³	>3	1	5	2	4
	>50µg/m³	>4	2	6	4	6
	>45µg/m ³	>7	2	11	6	9
>40µg/m ³	>14	6	17	14	15	
>35µg/m ³	>15	14	27	27	29	
Suhr OHNE Naf.	Mittelwert	27.1	21.4	26.8	27.1	27.1
	Anzahl Tage					
	>60µg/m ³	21	1	13	12	14
	>55µg/m ³	27	1	16	19	22
	>50µg/m³	39	5	29	28	33
	>45µg/m ³	55	9	51	49	54
	>40µg/m ³	77	20	74	77	82
>35µg/m ³	113	43	114	116	123	
Härkingen	Mittelwert	25.4	21.1	26.1	25.5	25.5
	Anzahl Tage					
	>60µg/m ³	9	0	8	3	5
	>55µg/m ³	12	1	11	5	6
	>50µg/m³	20	3	21	7	14
	>45µg/m ³	28	7	32	15	23
	>40µg/m ³	35	11	38	31	32
>35µg/m ³	54	28	61	53	53	

Tabelle 29: Teom-Modelle: Mittelwerte und Anzahl Überschreitungen für weitere Stufen als 50 µg/m³

LRV-Statistik	Parameter	Messwerte		Standort-spezifische Modelle			
		HVS	Betameter	Perioden	RG 1	RG 2	
		Y	X	$A+B\sin(t+C)$	a_0+a_1X	$a_0+a_1X+a_2T$	
Zürich	Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.1	25.6	24.9	24.2	24.1
	Anzahl Tage	$>60\mu\text{g}/\text{m}^3$	4	10	10	3	4
		$>55\mu\text{g}/\text{m}^3$	10	18	18	9	8
		$>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	15	28	31	15	18
		$>45\mu\text{g}/\text{m}^3$	36	47	48	29	34
		$>40\mu\text{g}/\text{m}^3$	60	76	67	50	54
		$>35\mu\text{g}/\text{m}^3$	78	124	105	88	80
Härkingen	Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	26.3	27.3	26.7	26.1	26.2
	Anzahl Tage	$>60\mu\text{g}/\text{m}^3$	12	10	13	7	9
		$>55\mu\text{g}/\text{m}^3$	16	13	16	11	12
		$>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	29	21	29	16	19
		$>45\mu\text{g}/\text{m}^3$	43	43	43	31	34
		$>40\mu\text{g}/\text{m}^3$	55	64	63	56	54
		$>35\mu\text{g}/\text{m}^3$	81	96	82	78	78
Roveredo	Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	25.9	21.7	27.0	25.9	26.0
	Anzahl Tage	$>60\mu\text{g}/\text{m}^3$	6	3	7	6	7
		$>55\mu\text{g}/\text{m}^3$	10	6	12	7	7
		$>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	14	7	23	10	10
		$>45\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	8	32	23	23
		$>40\mu\text{g}/\text{m}^3$	50	19	49	37	35
		$>35\mu\text{g}/\text{m}^3$	81	37	84	59	63
Davos	Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	13.7	7.9	17.1	13.2	13.2
	Anzahl Tage	$>60\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	6	0	0
		$>55\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	7	0	0
		$>50\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	8	1	1
		$>45\mu\text{g}/\text{m}^3$	1	1	8	1	1
		$>40\mu\text{g}/\text{m}^3$	5	1	14	4	5
		$>35\mu\text{g}/\text{m}^3$	12	3	21	7	7

Tabelle 30: Betameter-Modelle: Mittelwerte und Anzahl Überschreitungen für weitere Stufen als $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

A4. Optimale Modelle für die Referenzstationen

Im Folgenden sind für alle Referenzstationen, die am Vergleichversuch beteiligt waren, diejenigen Modelle angegeben, welche die geringsten Abweichungen – auf Basis der LRV-Parameter – zu den HVS-Daten ergeben.

Davos-Matta (AfU GR)

Betameter	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
RG1-Modell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{RG1}} = 5.171 + 1.019 * X$	13.2	13.7	1	0

Tabelle 31 Optimales Modell für Davos

Härkingen (NABEL)

Teom ohne Nafion-Dryer	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
Periodenmodell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{Per}} = \{1.34 - 0.36 * \sin[0.0172 * (t - t_0 + 6.5)]\} * X$	26.1	25.4	21	20

Tabelle 32 Optimales Modell für das Teom in Härkingen

Betameter	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
Periodenmodell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{Per}} = \{0.98 - 0.13 * \sin[0.0172 * (t - t_0 + 11.6)]\} * X$	26.6	26.3	24	29

Tabelle 33 Optimales Modell für das Betameter in Härkingen

Luzern Museggstrasse (in-LUFT)

Teom ohne Nafion-Dryer	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
Periodenmodell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{Per}} = \{1.30 - 0.32 * \sin[0.0172 * (t - t_0 - 1.8)]\} * X$	23.2	23.0	10	11

Tabelle 34 Optimales Modell für das Teom ohne Nafion in Luzern

Teom mit Nafion-Dryer	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
RG2-Modell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{RG2}} = 5.037 + 1.188 * X - 0.457 * T$	23.3	23.0	13	11

Tabelle 35 Optimales Modell für das Teom mit Nafion in Luzern

Roveredo Municipio (AfU GR)

Betameter	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
RG1-Modell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{RG1}} = 2.630 + 1.075 * X$	25.9	25.9	10	14

Tabelle 36 Optimales Modell für Roveredo

Suhr Bärenmatte (AUS AG)

Teom ohne Nafion-Dryer	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
RG2-Modell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{RG2}} = 8.78 + 1.184 * X - 0.650 * T$	27.1	27.1	33	39

Tabelle 37 Optimales Modell für Suhr

Wallisellen Dietlikerstrasse (AWEL)

Teom ohne Nafion-Dryer	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
RG2-Modell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{RG2}} = 3.57 - 1.136 * X - 0.55 * T$	20.8	20.8	5	5

Tabelle 38 Optimales Modell für das Teom ohne Nafion in Wallisellen

Teom mit Nafion-Dryer	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
Periodenmodell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{Per}} = \{1.16 - 0.23 * \sin[0.0172 * (t - t_0 + 15)]\} * X$	20.8	20.7	4	4

Tabelle 39 Optimales Modell für das Teom mit Nafion in Wallisellen

Zürich Stampfenbachstrasse (UGZ ZH)

Betameter	Vergleich mit HVS			
	Modell	HVS	Modell	HVS
Typ / Gleichung				
RG1-Modell	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anz>50 Tage	Anz>50 Tage
$Y_{\text{RG1}} = 2.082 + 0.86 * X$	24.2	24.1	15	15

Tabelle 40 Optimales Modell für Zürich

A5. Ringversuch Filterwägungen

A5.1 Durchführung des Versuchs

Für die HVS-Geräte von Digital ist die Gleichwertigkeit mit der Referenzmethode von der UMEG nachgewiesen worden (UMEG 1999), für Teom- und Betameter-Geräte (noch) nicht. Weil aber in der Schweiz so viele dieser Geräte in Betrieb stehen, wurden die Vergleichsmessungen überhaupt durchgeführt und Umrechnungsmodelle gesucht, welche Teom- und Betameter-Messreihen in Sequenzen verwandeln, welche zu den entsprechenden HVS-Messreihen gleichwertig sind. Trotz der Gleichwertigkeit mit der Referenzmethode ist aber noch relativ wenig Datenmaterial zur Frage nach den Messunsicherheiten der HVS-Geräte erhoben und ausgewertet worden. Am Ringversuch 2000 des Cercl'Air in Basel waren erstmals auch PM10-Geräte im Einsatz, darunter auch acht HVS-Geräte. Über das Messintervall von sieben vollen Tagen ergab sich eine Vergleichsstandardabweichung von $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ resp. von 19% des Mittelwerts ($24.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), was ein grosser Wert im Vergleich mit gasförmigen Schadstoffen und Meteorparametern bedeutet. Das lässt erwarten, dass die Messunsicherheit der HVS-Geräte zur Zeit noch gross ist. Als Fehlerquellen ist nicht nur das HVS-Geräte allein von Bedeutung (Durchfluss), sondern auch die Analytik (Filterkonditionierung, -handling, Wägung). Um eine Vorstellung der Messunsicherheit bei der Filterwägung zu erhalten, führten die an der Kooperation beteiligten Fachstellen einen einfachen Ringversuch aus:

- Es wurden 10 HVS-Filter ausgewählt, 5 davon unbeladen, 5 beladen (Expositionszeit 24 Std.)
- Die Filter wurden von 5 verschiedenen Labors gewogen in der Reihenfolge AWEL ZH, UGZ ZH, EMPA, AUS AG, AfU GR.
- Aus den Wägungen wurden fiktive Staubbeladungen berechnet unter der Annahme eines konstanten Durchflusses.
- Für die gemessenen Staubbeladungen wurden die Vergleichsstandardabweichungen berechnet.

A5.2 Resultate

Alle 10 Filter wurden im Abstand von 2–5 Tagen zweimal im selben Labor unter definierten Bedingungen (Temperatur = $22^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, relative Feuchte = $50\% \pm 5\%$ im Klimaschrank und im Wägeraum) gewogen:

Filter Nr.	AWEL ZH	UGZ ZH	EMPA	AUS AG	AfU GR
	Differenz der Wägungen (nachher minus vorher) in mg				
1	-0.02	0.10	0.20	-0.05	-0.10
2	-0.10	0.20	0.10	0.07	-0.10
3	0.00	0.10	0.20	-0.04	-0.10
4	-0.04	0.10	0.20	-0.01	-0.10
5	0.00	0.10	0.20	-0.06	-0.20

Tabelle 41: Differenz der Wägungen in Milligramm.

Bei 3 der 5 Labors fielen die Wägungen der leeren Filter mit systematischen Differenzen aus, das heisst die Differenzen zeigen bei allen 5 Filtern dasselbe Vorzeichen.

Jedem unbeladenen Filter wurde fix ein beladener Filter zugeordnet und die Massendifferenz als fiktive Staubbelastung definiert. Dank der Differenzbetrachtung konnten systematische Abweichungen der Waagen ausgeglichen werden. Die Standardabweichungen liegen im Bereich 1.2% bis 1.9% der Mittelwerte.

Filter Nr.	Differenz der Wägungen (beladen minus unbeladen) in mg					Mittelwert	St.abw.	V.K.
	AWEL ZH	UGZ ZH	EMPA	AUS AG	AfU GR			
187 - 1	56.64	55.53	55.83	54.58	56.23	55.76	0.78	1.4%
188 - 2	53.66	52.77	52.87	52.03	53.37	52.94	0.63	1.2%
189 - 3	32.97	32.08	32.28	31.30	32.58	32.24	0.62	1.9%
190 - 4	52.24	51.35	51.65	50.63	51.95	51.56	0.62	1.2%
191 - 5	63.00	62.15	62.15	61.04	62.55	62.18	0.73	1.2%

Tabelle 42: Staubbelastung in Milligramm, berechnet als Differenz zwischen einem beladenen Filter und einem unbeladenen Filter (z.B. Nr. 187 minus Nr. 1)

Aus den Massendifferenzen werden die fiktiven Staubkonzentrationen ausgerechnet, indem die Staubbelastungen durch den mittleren Fluss (720 m³/Tag) dividiert werden. Die auf diese Weise berechneten, hypothetischen Konzentrationen sind im Bereich 45 µg/m³ bis 87 µg/m³ mit Standardabweichung zwischen 0.9 und 1.1 µg/m³, was Variationskoeffizienten von 1.2 % bis 1.9 % entspricht (wie Tabelle 42).

Filter Nr.	Staubkonzentration in µg/m ³					Mittelwert	St.abw.	V.K.
	AWEL ZH	UGZ ZH	EMPA	AUS AG	AfU GR			
187 - 1	78.7	77.1	77.5	75.8	78.1	77.4	1.1	1.4%
188 - 2	74.5	73.3	73.4	72.3	74.1	73.5	0.9	1.2%
189 - 3	45.8	44.6	44.8	43.5	45.3	44.8	0.9	1.9%
190 - 4	72.6	71.3	71.7	70.3	72.2	71.6	0.9	1.2%
191 - 5	87.5	86.3	86.3	84.8	86.9	86.4	1.0	1.2%

Tabelle 43: Berechnete (hypothetische) Staubkonzentrationen für fünf verschiedene Filterpaare. Die drei Kolonnen rechts zeigen Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten.

In einem Ringversuch entspricht die berechnete Standardabweichung der „Vergleichstandardabweichung“. Diese wurde im Ringversuch 2000 in Basel für 8 HVS-Geräte berechnet, wobei die Messperiode dort allerdings 7 Tage (7 Filter) betrug, nicht wie im vorliegenden Fall bloss ein Tag (1 Filter). Die Vergleichstandardabweichung betrug dort $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respektive 16% des Mittelwerts ($24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). **Ein Vergleich mit dem Resultat der Filterwägung mit der Vergleichstandardabweichung von ca. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respektive 1.2 % bis 1.9 % legt die Vermutung nahe, dass die Filterwägung nur zu einem geringen Teil zur gesamten Unsicherheit einer HVS-Messung beiträgt.** In einem weiteren Ringversuch wäre die Unsicherheit der Durchflussraten zu untersuchen (siehe Kap. Empfehlungen) und der Frage nachzugehen, ob und welche weiteren Ursachen zur Messunsicherheit beitragen.

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 ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide: Summe von NO und NO ₂
O ₃	Ozon
SO ₂	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.
- 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

