



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU



**Empa**

Materials Science and Technology

# Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2024



Impressum:

Empa Dübendorf  
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt  
Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
Tel: +41 58 765 11 11  
Internet: <http://www.empa.ch>

BAFU  
Bundesamt für Umwelt  
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien  
Sektion Luftqualität  
CH-3003 Bern  
Tel: +41 58 462 93 12  
Internet: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft.html>

Dieser Bericht wurde unter Mitwirkung der im Projekt NABEL engagierten Mitarbeiter erstellt:

Amacker, Hugo Dr.  
Bruggisser, Nicole  
Bruggisser, Thomas  
Emmenegger, Lukas Dr.  
Fäh, Helene  
Fischer, Andrea Dr.  
Hüglin, Christoph Dr.  
Maurer, Tobias  
Reimann, Stefan Dr.  
Rubli Pascal  
Schibig, Michael, Dr.  
Schönenberger, David  
Schwarzenbach, Beat  
Seitz, Thomas Dr.  
Steger, David  
Steinbacher, Martin Dr.  
Vollmer, Martin Dr.  
Zellweger, Claudia



# VORWORT

Das Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe NABEL ist ein zentrales Element der Umweltbeobachtung in der Schweiz. Das NABEL wird gemeinsam vom Bundesamt für Umwelt BAFU und der Empa betrieben. Für die Durchführung der Messungen sowie die messtechnische Entwicklung des NABEL, und damit auch für diesen technischen Bericht, ist die Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik der Empa verantwortlich.

Die Messungen des NABEL umfassen die wichtigsten Luftschadstoffe, welche die menschliche Gesundheit oder die Umwelt schädigen können. Primär werden jene Luftschadstoffe gemessen, die in der schweizerischen Luftreinhalteverordnung geregelt sind, oder im Rahmen von internationalen Verpflichtungen erhoben werden müssen. Sie bilden daher das Grundmessprogramm des NABEL.

Durch Entwicklungen in Wissenschaft, Technik und Politik verändern sich laufend auch die Anforderungen an das NABEL, welches deshalb ständig weiterentwickelt und angepasst wird. Beispielsweise werden neue Messtechniken evaluiert oder entwickelt. Weiter wird das Messprogramm kontinuierlich evaluiert; es werden neue Messgrössen in das NABEL aufgenommen, oder bestimmte Messreihen werden nicht mehr weitergeführt. Der vorliegende technische Bericht zum NABEL enthält eine Dokumentation des Messnetzes und aller relevanten messtechnischen Informationen wie Messmethoden, Kalibrationen, Rückverfolgbarkeit und Datenkontrolle. Die Messwerte des NABEL werden in separaten jährlichen Berichten<sup>[1]</sup> durch das Bundesamt für Umwelt BAFU publiziert, diese können auf den Internetseiten des BAFU abgefragt oder durch eine Datenanfrage an das BAFU oder die Empa bezogen werden.

Dübendorf, April 2024

Christoph Hüglin  
Projektleiter NABEL

Lukas Emmenegger  
Abteilungsleiter Luftfremdstoffe/Umwelttechnik



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Messnetz</b>	<b>2</b>
2.1. Messstandorte	2
2.1.1. Anforderungen an einen Standort	2
2.1.2. Lage der Standorte	3
2.1.3. Belastungstypen	4
2.1.4. Charakterisierung der Standorte	4
2.2. Messstationen	37
2.2.1. Anforderungen an eine Messstation	37
2.2.2. Aufbau der Messstation	37
2.3. Messprogramm	39
2.3.1. Luftfremdstoffe	39
2.3.2. Meteoparameter	40
2.3.3. Verkehrsdaten	40
2.3.4. Detailliertes NABEL-Messprogramm (Übersichtstabelle)	41
<b>3. Messverfahren</b>	<b>42</b>
3.1. Schwefeldioxid	42
3.2. Stickoxide	44
3.2.1. Geräte mit Molybdänkonverter	45
3.2.2. Direkte NO <sub>2</sub> -Messung	47
3.3. Ozon	50
3.4. Kohlenmonoxid	52
3.4.1. CO-Messung mit „Infrarot-Absorption“ (NDIR)	52
3.4.2. CO-Messung mit „Cavity Ring Down Spectroscopy“ (CRDS)	53
3.5. Kohlendioxid	54
3.6. Kohlenwasserstoffe	56
3.6.1. Summenmessung der Nichtmethankohlenwasserstoffe	56
3.6.2. Flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC und OVOC)	57
3.6.3. Methan	59
3.7. Ammoniak	60
3.8. Lachgas	62
3.9. Feinstaub	63
3.9.1. Gravimetrische Feinstaubmessung	63
3.9.2. Kontinuierliche Feinstaubmessung	65



3.9.3.	Metalle im Feinstaub	67
3.9.3.1	Messung von Metallen im Feinstaub (HIVOL)	67
3.9.3.2	Semikontinuierliche Messung von Metallen im Feinstaub	70
3.9.4.	Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) im Feinstaub	71
3.9.5.	Mineralische Kationen im Schwebstaub	73
3.9.6.	EC/OC	75
3.9.7.	BC (Black Carbon)	75
3.9.8.	TC (Total Carbon)	77
3.9.9.	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im Feinstaub	79
3.9.10.	Partikelanzahl	80
3.9.11.	Partikelgrößenverteilung	80
3.10.	Staubniederschlag	82
3.10.1.	Metalle im Staubniederschlag	83
3.11.	Regeninhaltsstoffe	86
3.11.1.	Bestimmung des pH-Wertes	87
3.11.2.	Bestimmung der Leitfähigkeit	87
3.11.3.	Bestimmung der Anionen und Kationen	88
3.11.4.	Ionenbilanz	91
3.12.	Stickstoffhaltige Gas- und Aerosolkomponenten	92
3.12.1.	Bestimmung von ( $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$ )	92
3.12.2.	Bestimmung von ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ )	94
3.12.3.	Bestimmung von $\text{HNO}_3$ , $\text{NH}_3$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$ (MD - System)	95
3.13.	Meteomessverfahren	100
3.14.	Übersicht der Messverfahren	103
3.15.	Übersicht der Messgeräte	104
<b>4.</b>	<b>Qualitätssicherung</b>	<b>105</b>
4.1.	Grundlagen	105
4.2.	Primärnormale	105
4.2.1.	Primärnormal für Ozon	106
4.2.2.	Primärnormal für den Volumenstrom	108
4.3.	TransfERNormale	109
4.3.1.	TransfERNormal für Ozon (THERMO 49C-PS/49i-PS)	109
4.3.2.	TransfERNormal für den Volumenstrom	110
4.4.	Rückverfolgbarkeit (Traceability)	112
4.4.1.	Ozon	112
4.4.2.	Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Kohlenmonoxid und Methan	112
4.4.3.	Volumenstrom	113
4.5.	Kalibrationen	114
4.6.	Gerätetests	117

4.6.1.	Übersicht über die Gerätetestprozeduren	117
4.7.	Bestimmung der Verfahrenskenngrößen	118
4.7.1.	Kalibrierfunktion	119
4.7.2.	Drift (Stabilität)	121
4.7.3.	Signalrauschen	122
4.7.4.	Zeitabhängiges Verhalten	123
4.7.5.	Nachweisgrenze/Bestimmungsgrenze	124
4.7.6.	Wiederholbarkeit oder Wiederholgrenze $r$	125
4.7.7.	Querempfindlichkeit/Selektivität	126
4.8.	Wartung	128
4.9.	Ringversuche	131
4.10.	Stationsaudits im Rahmen des GAW Programms	134
<b>5.</b>	<b>Messunsicherheiten</b>	<b>135</b>
5.1.	Allgemeines	135
5.2.	Berechnung der Messunsicherheiten am Beispiel $O_3$	137
5.2.1.	Unsicherheit des Primärnormals für Ozon	137
5.2.2.	Unsicherheit des Empa-TransfERNormals (TN)	137
5.2.3.	Messunsicherheit des Ozonmessgerätes	138
5.2.4.	Kombinierte Messunsicherheit der Ozonmessungen	138
5.3.	Bestimmung der Messunsicherheiten von $CO$ , $SO_2$ , $NO$ und $NO_2$ für Tagesmittelwerte	141
5.4.	Zusammenfassung der Messunsicherheiten der automatischen Messverfahren	145
<b>6.</b>	<b>Daten</b>	<b>146</b>
6.1.	Datenfluss	146
6.2.	Datenverwaltung	147
6.3.	Datenkontrolle	147
6.4.	Datenpublikation	148
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>
<b>8.</b>	<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>152</b>

<b>Anhang A:</b>	<b>Spezielle Untersuchungen</b>	<b>153</b>
A1	Berechnung von Russ (BC) durch Vergleich von optischem Messverfahren mit EC-Messungen (thermisch-optisches Referenzverfahren)	153
A2	Aerosol- und gasförmige Stickstoffverbindungen an den NABEL-Stationen Rigi, Payerne und Magadino Weiterentwicklung und Validierung der Minidenudermethode	155
A3	Homogenisierung von Messreihen der Station Bern	165
<b>Anhang B:</b>	<b>Wartungstool und Arbeitsanweisungen</b>	<b>166</b>
B1	Wartungstool	166
B2	Anleitung für HIVOL-Kalibrationen mit einem zweiten Rotameter im NABEL-Messnetz	167
<b>Anhang C:</b>	<b>Diverse Tabellen</b>	<b>177</b>
C1	Umrechnungsfaktoren von ppb in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	177
C2	Zusammenfassung der geographischen Daten der Station	178
C3	Standortwechsel im NABEL	179
C4	Bergerhoff Staubniederschlag (Standortwechsel)	180
C5	Stationshöhen, Höhen Messgeräte und Anlagen	181
C6	Geräteübersicht	182
	Geräteübersicht $\text{SO}_2$ -Monitore	183
	Geräteübersicht $\text{O}_3$ -Monitore	184
	Geräteübersicht $\text{NO}/\text{NO}_x$ -Monitore	185
	Geräteübersicht $\text{NO}_2$ selektive Messungen	186
	Geräteübersicht $\text{CO}$ -Monitore	187
	Geräteübersicht $\text{CO}_2$ -Monitore	188
	Geräteübersicht $\text{N}_2\text{O}$ -Monitore	189
	VOC Messprogramm	190
	Geräteübersicht $\text{CH}_4/\text{THC}$ -Monitore	192
	Geräteübersicht $\text{NH}_3$ -Monitore	193
	Stickstoffhaltige Gas- und Aerosol-Komponenten	194
	Geräteübersicht Feinstaub $\text{PM}_{10}$ und $\text{PM}_{2.5}$	195
	Geräteübersicht Feinstaub $\text{PM}_{10}$ und TSP	196
	Geräteübersicht BC-Monitore	197
	PAK	198
	Geräteübersicht Partikelanzahl/Partikelgrössenverteilung	199
C7	Standort Lägeren (bis Ende 2017 in Betrieb)	200



# 1. EINLEITUNG

Das Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe NABEL wurde 1978 gegründet und während den ersten Jahren mit acht Messstationen betrieben. Gemäss dem Bundesratsbeschluss vom 17. August 1988 wurde das Messnetz auf 16 Stationen ausgebaut. Das Basis-Messprogramm des NABEL umfasst die Luftschadstoffe, für welche in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) Immissionsgrenzwerte festgelegt sind, oder die als krebserregend eingestuft werden. Das NABEL-Messprogramm umfasst zudem weitere Messgrössen, zu deren Erhebung die Schweiz im Rahmen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) verpflichtet ist. Darüber hinaus werden ergänzende Messungen weiterer Schadstoffe, wie Treibhausgase oder Stickstoffkomponenten, durchgeführt. In diesem Bericht finden sich alle wichtigen Informationen zum Messnetz, sowie eine ausführliche Beschreibung der im NABEL eingesetzten Messtechnik.

## Entstehung und Entwicklung des Messnetzes

1968	Beginn der Messung von Luftfremdstoffen an 4 Stationen im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit von 11 Ländern.
1972-77	In den folgenden Jahren werden diese Messungen im OECD-Basisprogramm fortgeführt.
1978	Aufbau des nationalen Messnetzes NABEL mit 8 Stationen.
1979	Die Schadstoffmessungen des European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) werden basierend auf der Unterzeichnung der UN/ECE -Konvention: Convention on Long Range Transboundary Air Pollution ins NABEL integriert.
1985-89	Im Rahmen des Forschungsprogramms „Waldschäden und Luftverschmutzung in der Schweiz“ (NFP14) wird an 3 Waldstationen gemessen.
1990/1991	Erweiterung des NABEL auf 16 Standorte.
2016	Es wird die Station Beromünster in das Messnetz aufgenommen. Die Station Beromünster ersetzt die Station Lägeren, dort wurden die Messungen Ende 2017 eingestellt.

## **2. MESSNETZ**

### **2.1. Messstandorte**

Die Immissionsbelastung in der Schweiz variiert aufgrund von charakteristischen topographischen Gegebenheiten sowie verschiedenartigen Siedlungsformen stark. Unterschiedliche Immissionsbelastungen stehen somit in engem Zusammenhang mit der Lage des Messstandortes und den Emissionsquellen in der Umgebung der Messstation. Die Standorte der 16 NABEL-Messstationen sind räumlich über die ganze Schweiz verteilt. Sie wurden so gewählt, dass sie die wichtigsten Belastungsstufen repräsentieren. Jeder dieser Belastungstypen wird durch mehrere Stationen vertreten. Einzig die Hintergrundsituation, welche über die grossräumige Belastung Aufschluss gibt, wird nur von der Station Jungfrauoch repräsentiert.

#### **2.1.1. Anforderungen an einen Standort**

Die Wahl eines Standortes ist von grosser Wichtigkeit und muss aus diesem Grund mit äusserster Sorgfalt erfolgen. Für einen repräsentativen Standort ist es entscheidend, dass er weder geographische noch andere Besonderheiten wie die unmittelbare Nähe einer untypischen Emissionsquelle aufweist. Neben den schon erwähnten, spezifischen Anforderungen an die Standortwahl sind für eine qualitativ hochstehende und vollständige Messreihe über einen langen Zeitraum weitere Kriterien zu berücksichtigen:

- freie Anströmbbarkeit der Probenahmesysteme (wenn möglich keine Hindernisse im Umkreis von 10 m). Das Windfeld im Bereich der Messstation kann die Repräsentativität der Messdaten stark beeinflussen.
- keine emittentenseitigen Störeinflüsse in unmittelbarer Umgebung
- geeigneter Standort für Meteomessungen (Wind)
- Zugänglichkeit der Messstation (Zufahrt im Winter)
- Stromversorgung und Telefonanschluss
- lokale Helfer bei abgelegenen Stationen
- langjähriger Vertrag mit Bodeneigentümer, evtl. Baubewilligungen
- Schutz vor Vandalismus

## 2.1.2. Lage der Standorte

Die folgende Karte gibt einen Überblick über die Standorte der NABEL-Stationen sowie deren Zuordnung zu den Belastungstypen (Farbcodierung siehe auch 2.1.3.).

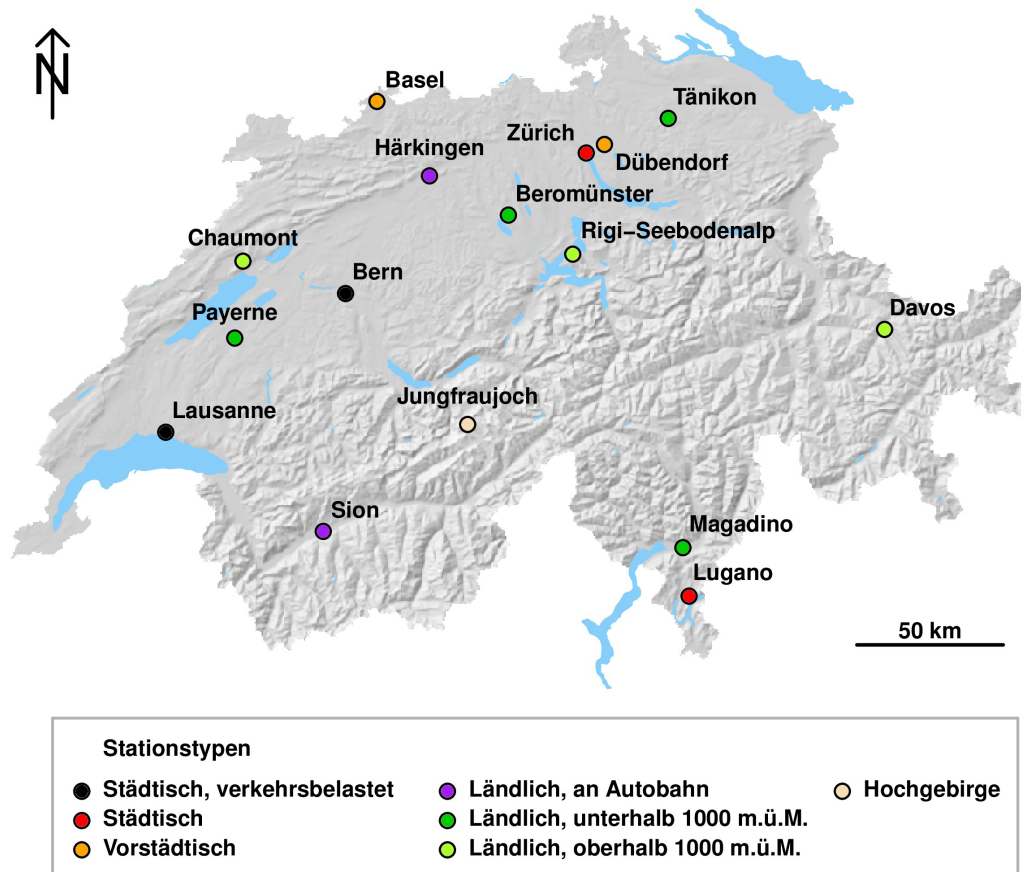



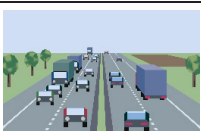





Abb. 2-1: Übersichtskarte der Standorte



### 2.1.3. Belastungstypen

Die 16 NABEL-Stationen werden auf Grund ihrer unterschiedlichen Immissionsbelastung in 7 Belastungstypen eingeteilt:

	Belastungstyp	Station	Abk.	
	<b>Städtisch, verkehrsbelastet</b>	Bern-Bollwerk Lausanne-César-Roux	BER LAU	●
	<b>Städtisch</b>	Lugano-Universita Zürich-Kaserne	LUG ZUE	●
	<b>Vorstädtisch</b>	Basel-Binningen Dübendorf-Empa	BAS DUE	●
	<b>Ländlich, Autobahn</b>	Härkingen-A1 Sion-Aéroport-A9	HAE SIO	●
	<b>Ländlich, unterhalb 1000 m ü.M.</b>	Magadino-Cadenazzo Payerne Tänikon Beromünster	MAG PAY TAE BRM	●
	<b>Ländlich, oberhalb 1000 m ü.M.</b>	Chaumont Davos-Seehornwald Rigi-Seebodenalp	CHA DAV RIG	●
	<b>Hochgebirge</b>	Jungfrauoch	JUN	○

Illustrationen: anamorph.ch

### 2.1.4. Charakterisierung der Standorte

Die Lage sowie die charakteristischen Eigenschaften der näheren Umgebung der 16 Messstandorte werden detailliert beschrieben. Neben dem Stationsnamen werden die Standortkoordinaten (in Klammer) und die Höhe über Meer angegeben.

Die 16 Kartenausschnitte mit den Standorten der NABEL-Stationen sind 1:1 Kopien der Landeskarte der Schweiz (Massstab: 1/50'000) herausgegeben vom Bundesamt für Landestopographie in Bern (Swisstopo).

**BASEL-BINNINGEN (2610890 / 1265605) 316 m**

Die Station liegt etwa 1.2 km südlich des Hauptbahnhofs auf dem Gelände der Sternwarte (Gemeinde Binningen). Die unmittelbare Umgebung ist nur wenig bebaut und weist kaum Verkehr auf. In nördlicher Richtung, am Abhang gegen die Stadt, befindet sich ein Einfamilienhausquartier sowie eine Parkanlage. Richtung Süden ist das Gelände offen und wird landwirtschaftlich genutzt. In einer Entfernung von 200 - 300 m in westlicher Richtung befindet sich eine Badeanstalt. Die Distanz zum Stadtzentrum beträgt etwa zwei Kilometer, zu den grossen Industriegebieten etwa 4 - 6 km. Auf dem gleichen Gelände befindet sich auch eine SMN-Station der MeteoSchweiz.

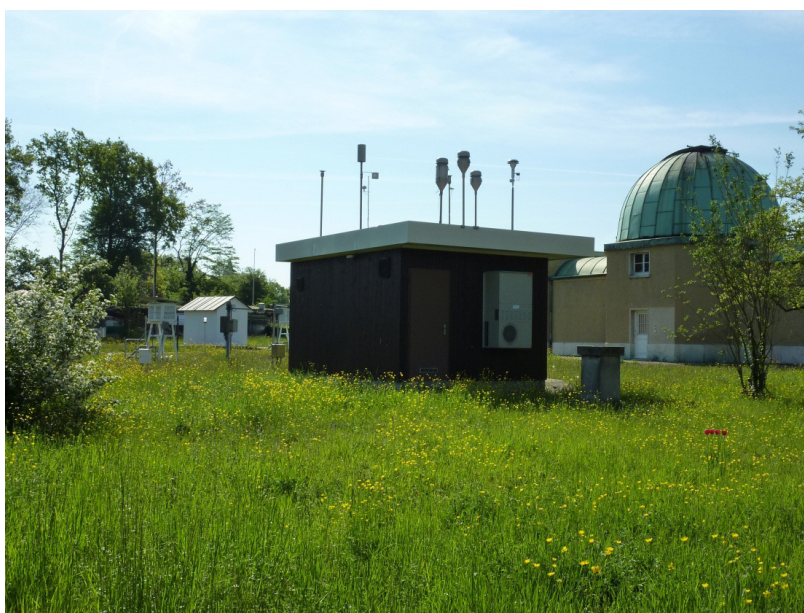
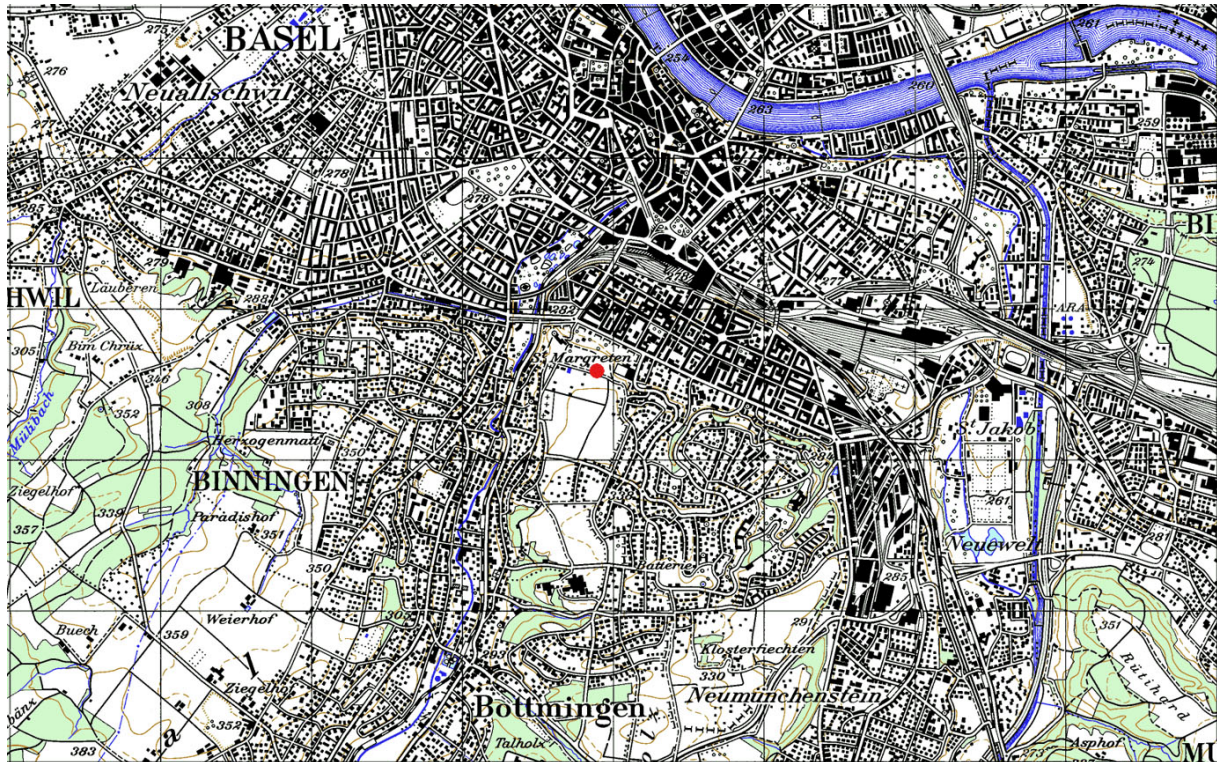


Abb. 2-2: Messstation Basel-Binningen

**BASEL-BINNINGEN**

Quelle: Bundesamt für Landestopografie

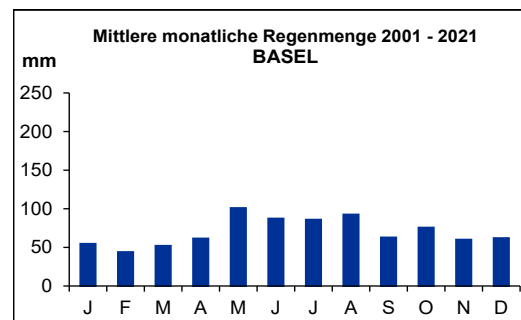
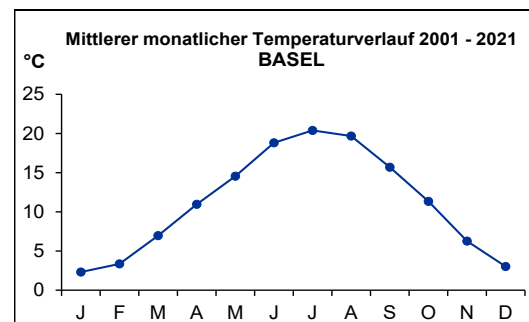
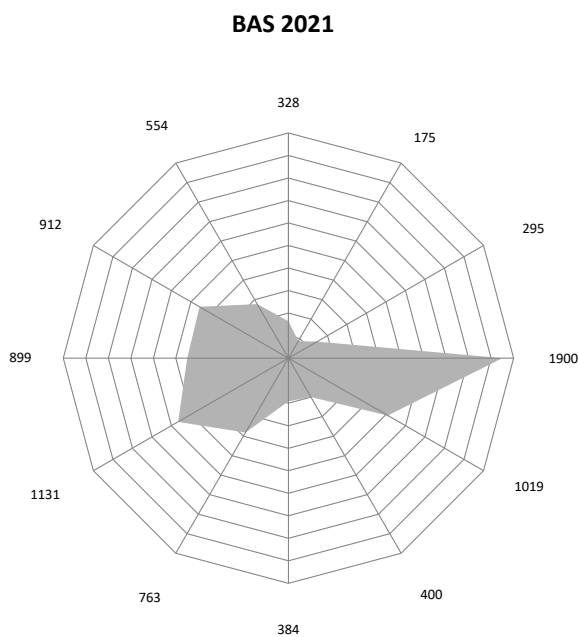


Abb. 2-3: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



### BERN-BOLLWERK (2600170 / 1199990) 536 m

In Bern liegt die Station (siehe 3 in Abb. 2-4), seit dem 8.12.1999 in der Nähe des Hauptbahnhofs am Bollwerk. Diese Strasse ist beidseitig von einer mehrstöckigen Häuserzeile gesäumt und sehr stark befahren (20'000 - 25'000 Fahrzeuge pro Tag). Die Messstation ist im Keller des Gebäudes Ecke Bollwerk/Speicherstrasse eingerichtet. Die Ansaugsonde befindet sich ca. 3.5 m über dem Strassenniveau. Der Staubbiederschlag (Bergerhoff) wird auf einem Ausleger im Bereich der Fussgängerpasserelle gemessen. In der unmittelbaren Umgebung gibt es kaum Industrie, jedoch viele Dienstleistungsbetriebe.

(1) Bis 22.7.1997 lag die Station in unmittelbarer Nähe des Hauptbahnhofs auf der Fussgängerpasserelle zwischen den Eisenbahngleisen und dem Bollwerk. Die Ansaugsonde befand sich 5 m über dem Niveau der Strasse. An diesem Standort wurden zusätzlich in der Strassenschlucht der Wind (3-Komponenten) und die Temperatur gemessen.

(2) Vom 24.7.1997 bis 6.12.1999 wurde zur Überbrückung ein mobiler Messwagen eingesetzt, welcher ca. 100 m nördlich, am Ende des Gebäudes direkt neben den Gleisen aufgestellt wurde. Der Standort lag etwas ausserhalb der Bollwerkstrassenschlucht, was eine bessere Luftdurchmischung zur Folge hatte. Für diesen Zeitraum standen für einige Meteoparameter lediglich orientierende Messungen zur Verfügung, welche auf dem ausziehbaren Meteomast des Messwagens erhoben wurden. Die Staubbiederschlagsmessung befand sich auf dem Dach des Messwagens. Eine Beeinflussung durch den nahen Bahnverkehr (Spritzwasser) kann nicht ausgeschlossen werden.

Bei der Analyse der Messwerte der Station Bern wurde festgestellt, dass der Stationswechsel im Juli 1997 zu Inhomogenitäten in den Zeitreihen einzelner Messgrössen geführt hat. Genaue Angaben zur Korrektur der verschiedenen Messgrössen befinden sich im Anhang A3 „Homogenisierung von Messreihen der Station Bern“.

Der Meteomast steht mit Ausnahme der Messzeit mit dem Messwagen (während Phase 2) auf einem der mehrstöckigen Gebäude westlich der Strassenschlucht. PM10, PM2.5 und Russ (BC) werden seit Beginn der Messungen in der Strassenschlucht (x, siehe Plan) gemessen.

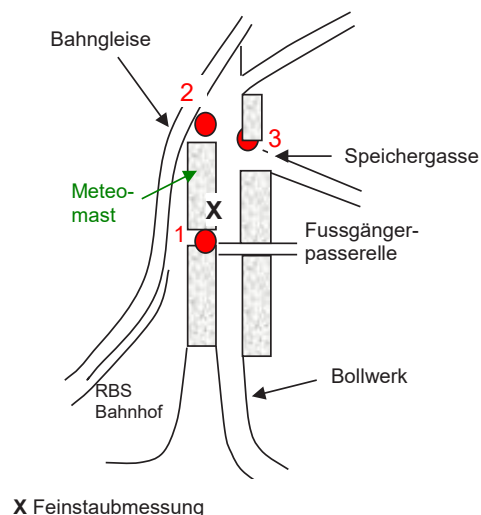
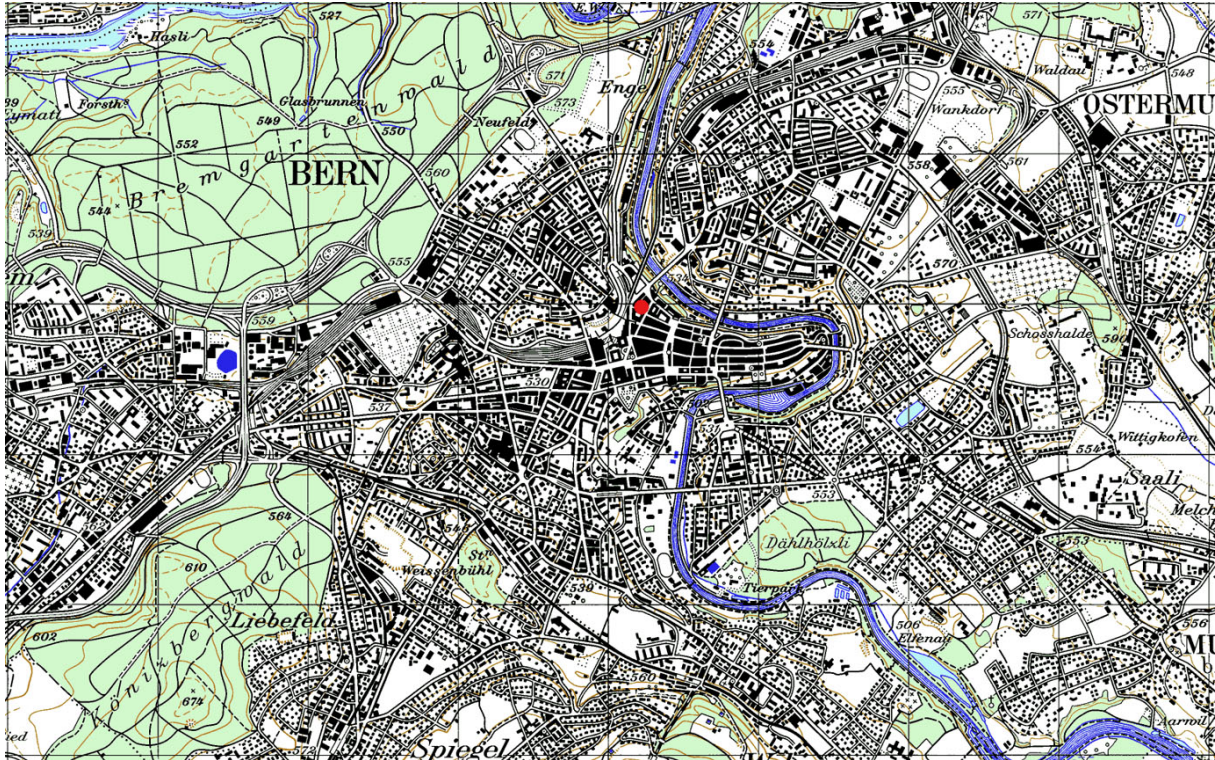


Abb. 2-4: 3 Standorte der Messstation Bern



Abb. 2-5: Messstation Bern

**BERN-BOLLWERK**

Quelle: Bundesamt für Landestopografie

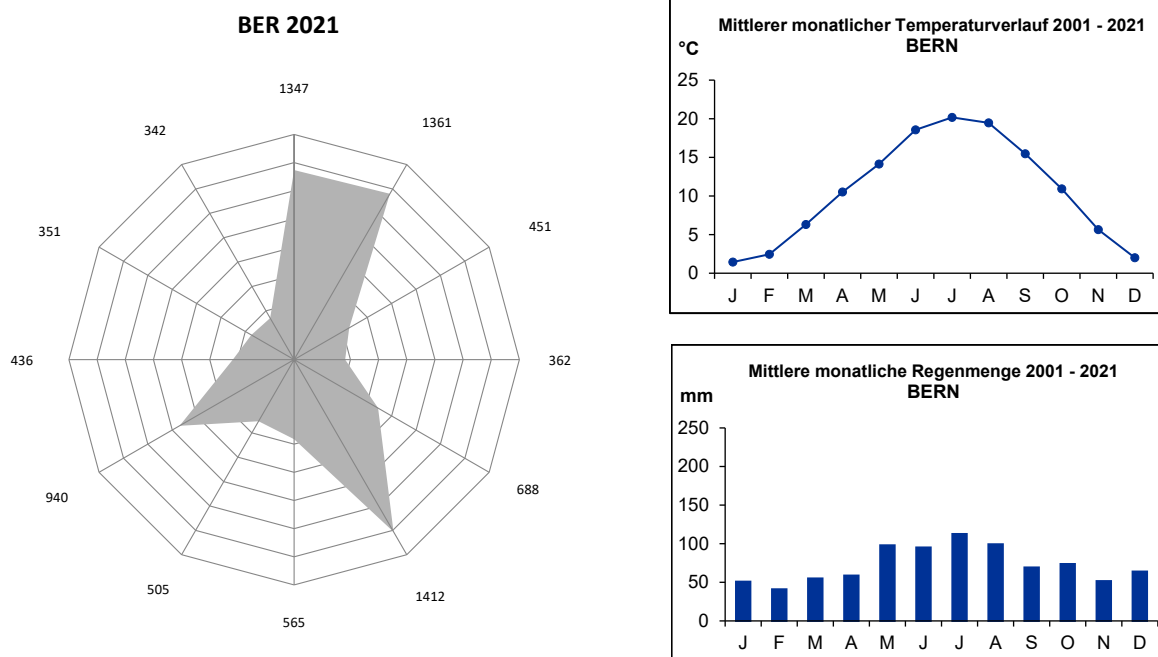


Abb. 2-6: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



**BEROMÜNSTER (2655840/1226780) 797m**

Die Station befindet sich an der Basis eines 217 m hohen, stillgelegten Sendemastes des ehemaligen Landessenders, zuoberst auf dem Blosenberg in landwirtschaftlicher Umgebung im Kanton Luzern. Die Höhe der Turmbasis beträgt 797 m ü.M. Einige kleinere landwirtschaftliche Betriebe befinden sich in der Nähe des Turms, während sich die nächste Ortschaft (Beromünster; < 7000 Einwohner) rund 2 km Richtung Norden befindet. Die umliegenden Talböden befinden sich auf ca. 500 und 650 m ü.M. Die Umgebung der Station ist geprägt von einem Mosaik verschiedener landwirtschaftlicher Nutzungstypen: Weide- und Grassland, Ackerflächen und kleiner Waldflächen im Süden der Station.

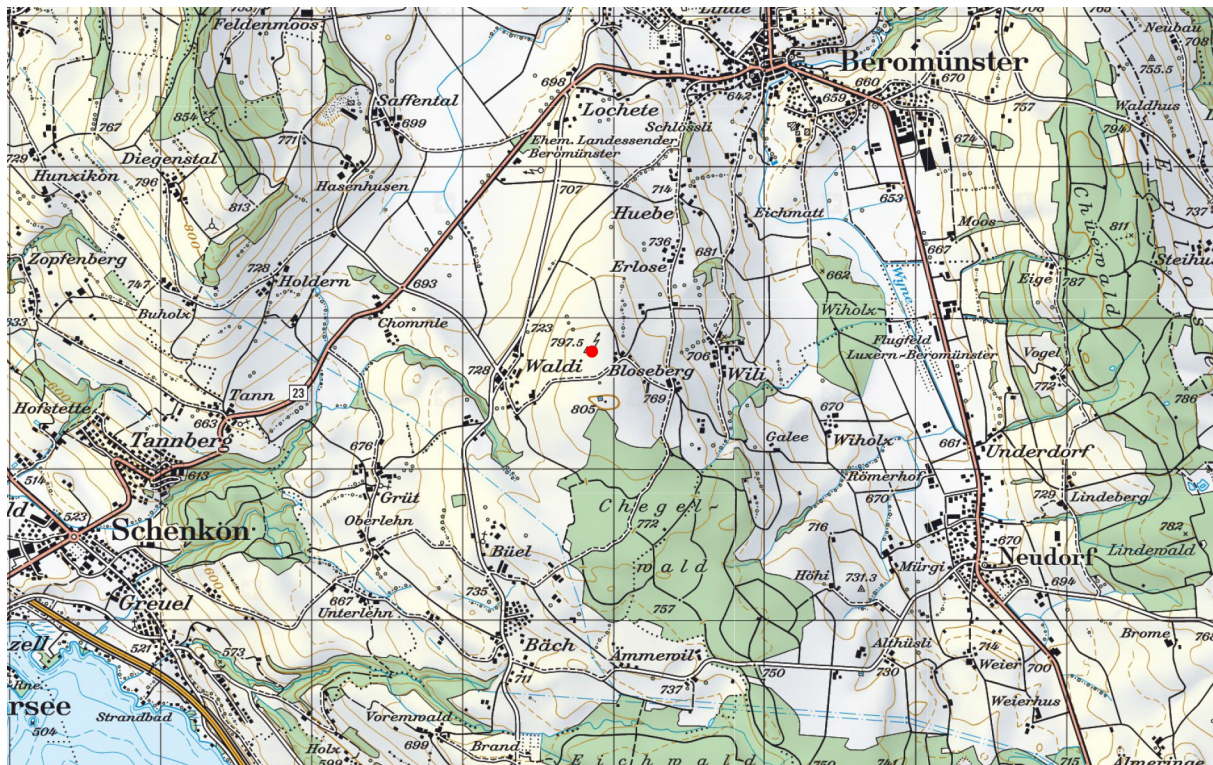


Abb. 2-7: Messstation Beromünster, stillgelegter Sendemast des ehemaligen Landessenders



Abb. 2-8: Messstation Beromünster

## BEROMÜNSTER



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

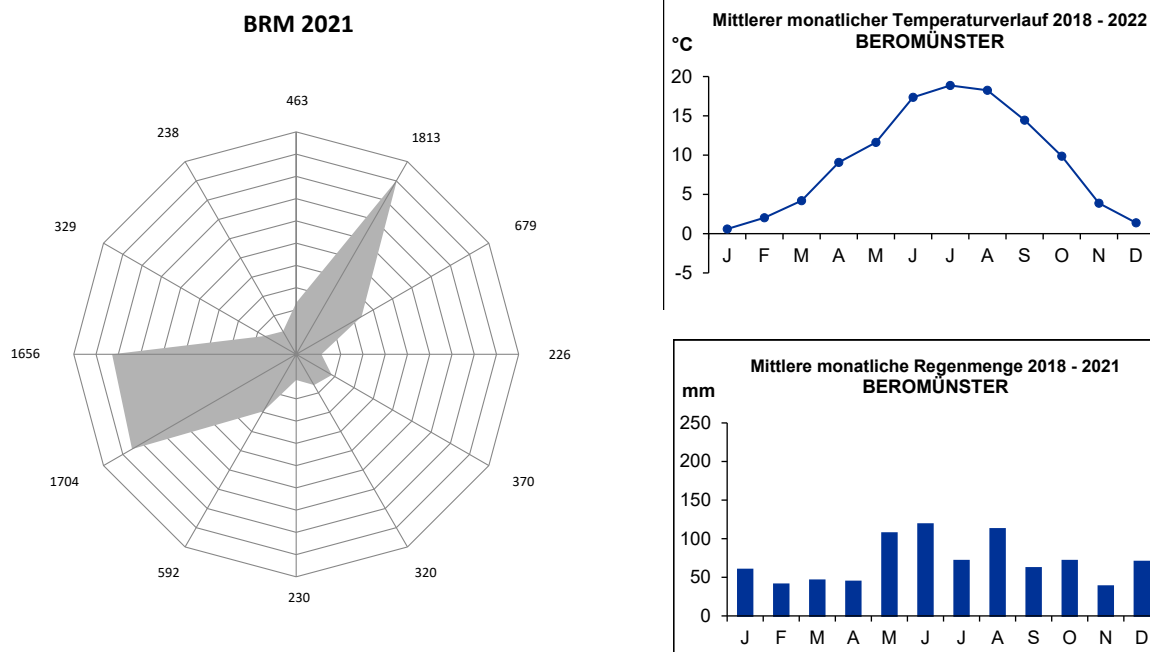


Abb. 2-9: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2018-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



**CHAUMONT (2565085 / 1211040) 1136 m**

Die Station befindet sich nördlich von Neuenburg auf dem Hügelzug des Chaumont ca. 700 m über dem Neuenburgersee. Die Umgebung wird durch Wiesen und Weideland dominiert. Bei klarer Sicht überblickt man das ganze Berner Mittelland. Die nächsten Industriebetriebe liegen 5 - 10 km entfernt am Fusse des Chaumont in der Agglomeration von Neuenburg (7 km, Cressier 4.5 km).



Abb. 2-10: Messstation Chaumont



Abb. 2-11: Messstation Chaumont (mit Sicht Richtung SE in die Berner Alpen)

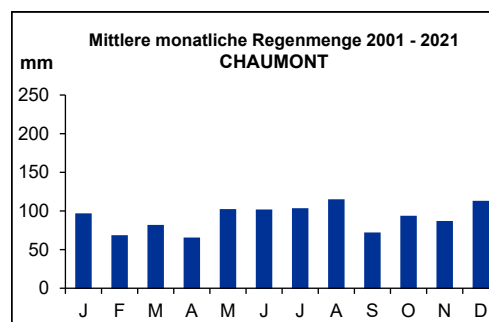
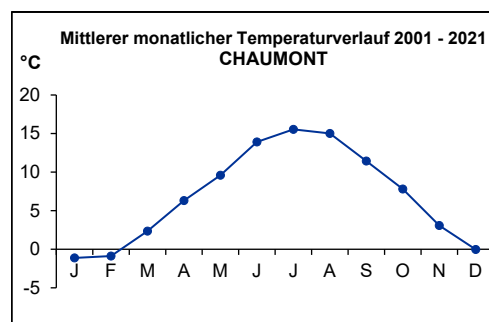
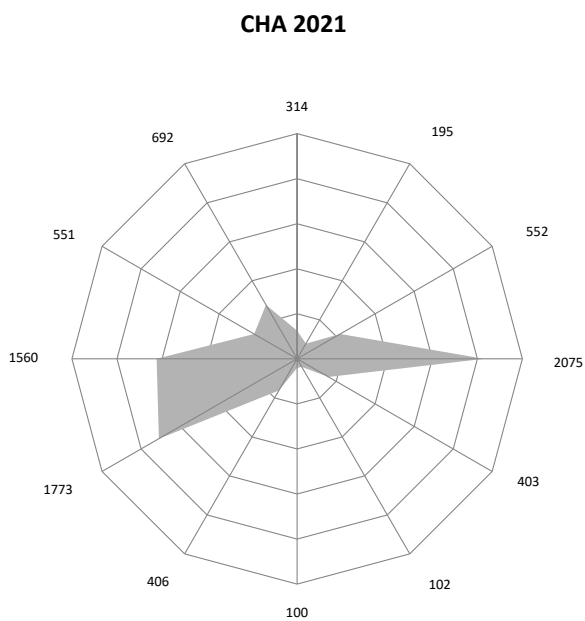
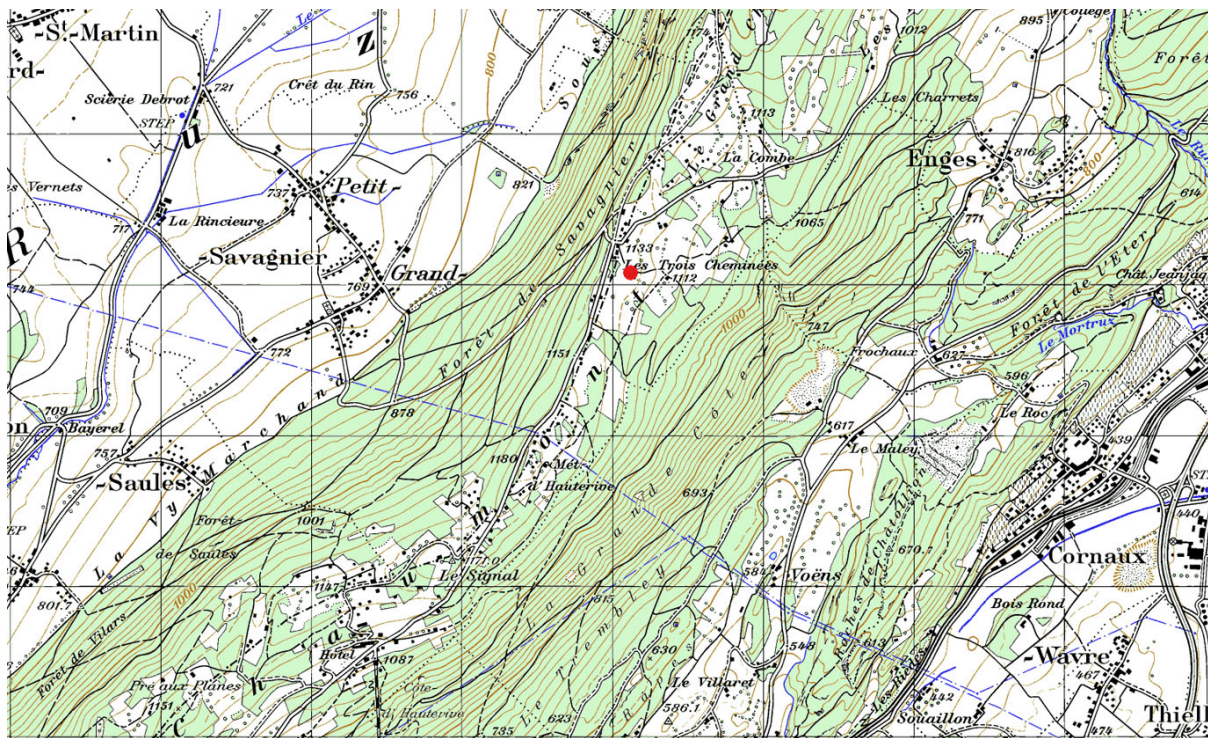
**CHAUMONT**

Abb. 2-12: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



**DAVOS-SEEHORNWALD (2784455 / 1187735) 1637 m**

Südöstlich des Davosersees liegt die Station ungefähr 70 Meter über dem Seeniveau am Abhang des Seehornwaldes. Südlich der Station zweigt das Flüelatal vom Haupttal ab und steigt bis zum Flüelapass auf 2000 m an. Das Zentrum von Davos ist ca. 3 km in südwestlicher Richtung entfernt. Da diese Station in einem Wald liegt, steht neben der Station ein 35 m hoher Turm, auf dem sich die Ansaugsonde für die gasförmigen Luftschadstoffe befindet. Die meteorologischen Parameter werden ebenfalls auf diesem Turm gemessen.



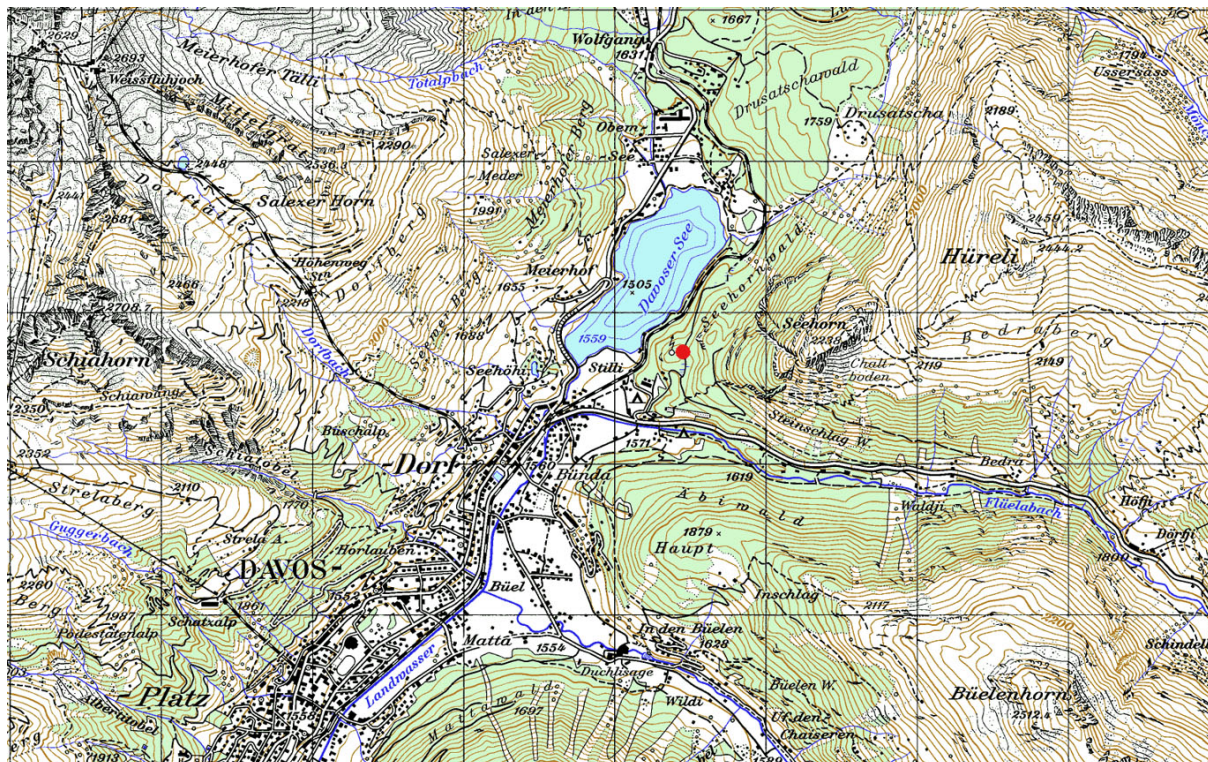
Abb. 2-13: Messstation Davos



Abb. 2-14: 35 m hoher Turm neben der Messstation



## DAVOS-SEEHORNWALD



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

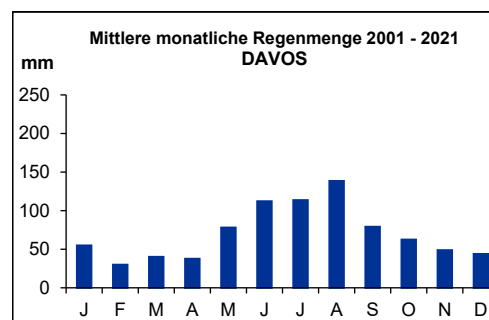
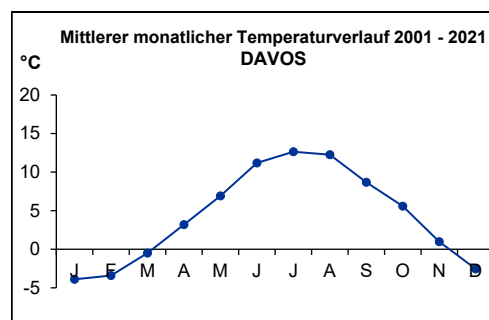
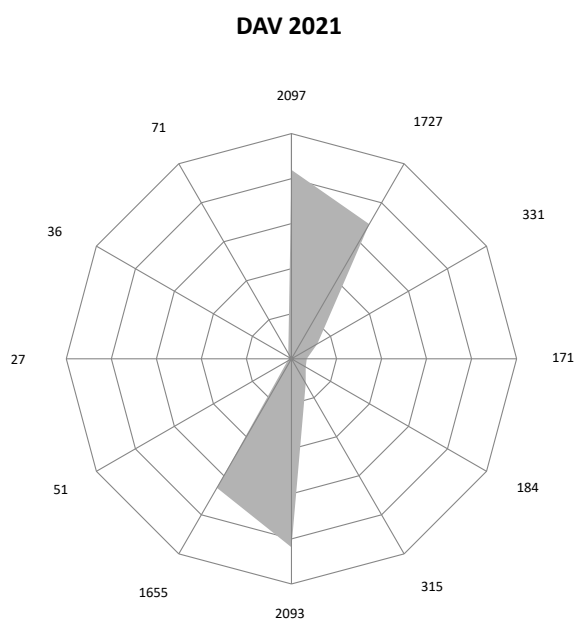


Abb. 2-15: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



**DÜBENDORF-EMPA (2688300 / 1251105) 430 m**

Die neue Station (siehe Abb. 2.16) ist seit dem 1.1.2021 auf dem Areal der Eawag, dem Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs in Betrieb. Die Entfernung der neuen Station (siehe 2 in Abb. 2.17) zur alten Station (siehe 1 in Abb. 2.17) beträgt Luftlinie ca 430 m. Die neu errichtete NABEL-Station liegt am Chriesbach im Glatttal zwischen Dübendorf und Wallisellen. Die Umgebung von Dübendorf ist dichtbesiedelt, hat viel Industrie und Gewerbe und wird von einem Netz stark befahrener Strassen und Bahnlinien durchzogen. Die Überlandstrasse führt in ca. 200 m südlich, die Ringstrasse in ca. 240 m westlich und die Autobahn A1 St. Gallen-Zürich nördlich in ca. 350 m Entfernung an der Messstation vorbei. In direkter Nähe der Messstation befinden sich Bahngleise mehrerer SBB Bahnlinien.

Vom 1980 bis zum 31.12.2020 lag die Messstation Dübendorf auf dem Gelände der Empa, dem Forschungsinstitut für Materialwissenschaften und Technologie des ETH-Bereichs (siehe 1 in Abb. 2.17). Die Station wurde nördlich und westlich von Gebäude gesäumt und südlich lag in ca 150m Entfernung die Überlandstrasse.



Abb. 2-16: Messstation Dübendorf (seit 1.1.2021)

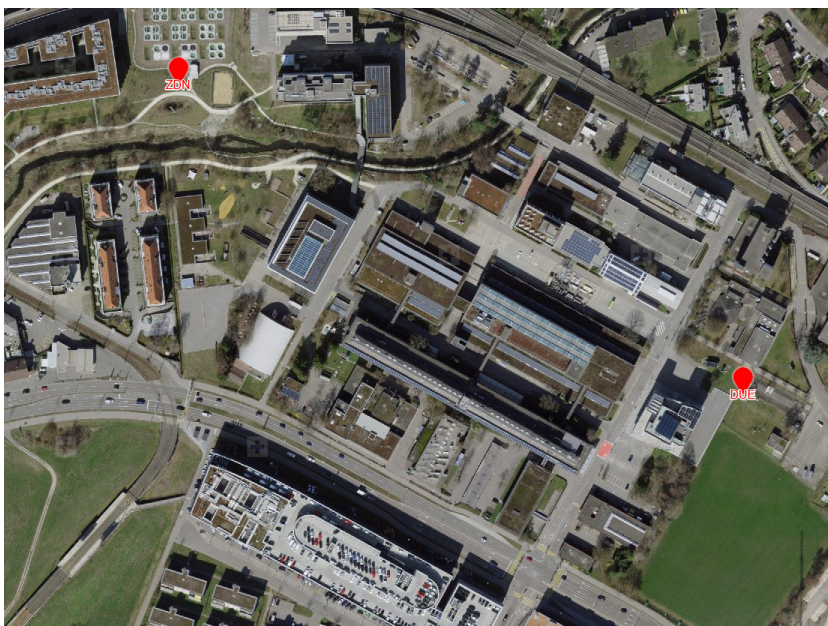
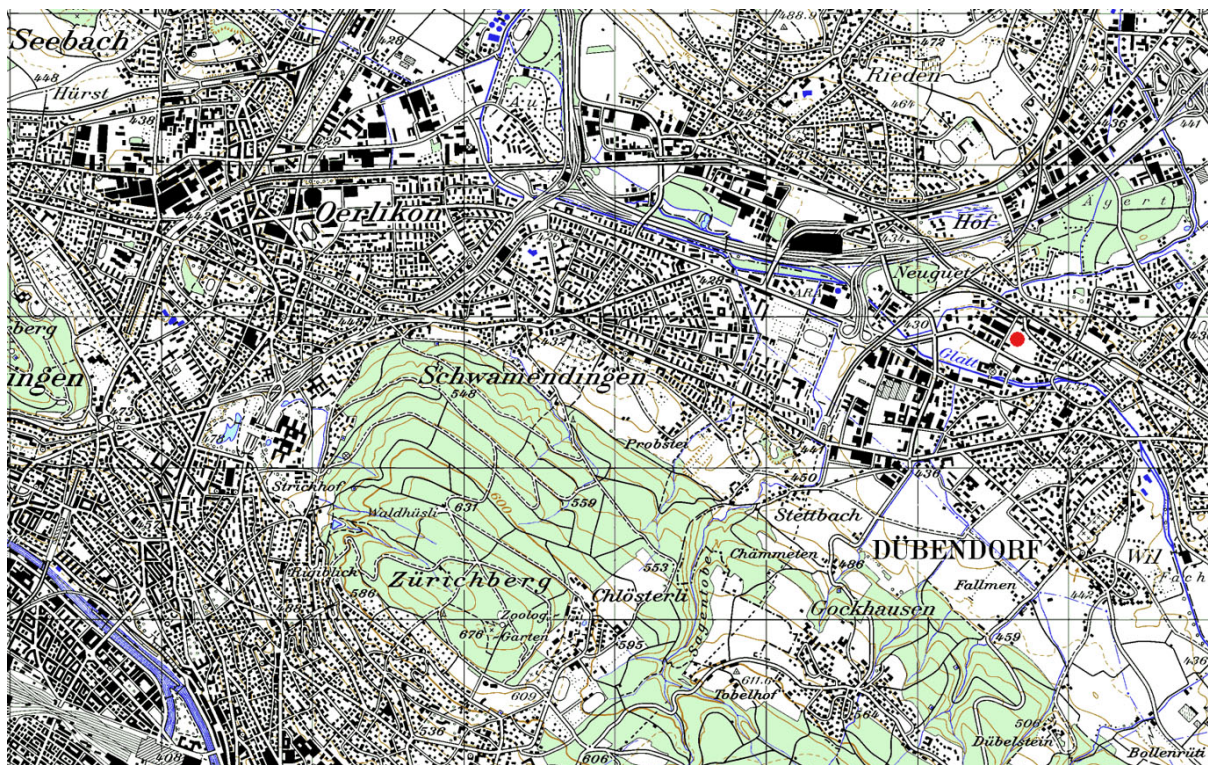


Abb. 2-17: Standorte der Messstation Dübendorf (der neue Standort 2: seit 1.1.2021 in Betrieb)



## DÜBENDORF-EMPA



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

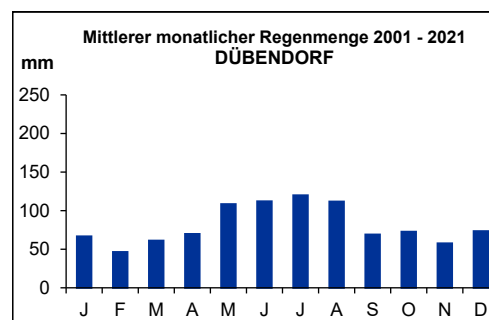
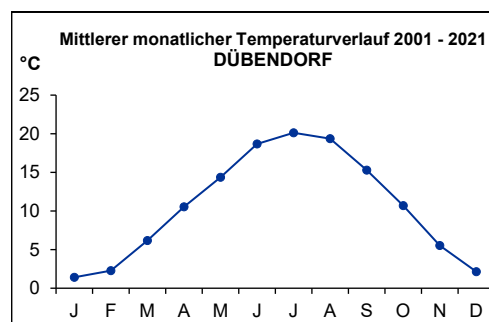
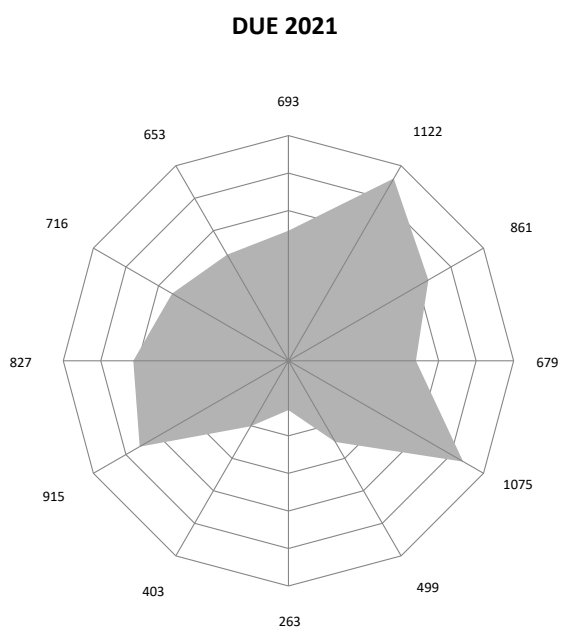


Abb. 2-18: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**HÄRKINGEN-A1 (2628875 / 1240180) 431 m**

Die Station liegt unmittelbar nördlich der Autobahn Zürich - Bern (A1), ca. 1 km östlich des Härtingerkreuzes. Dieser Autobahnabschnitt ist sehr stark befahren (85'000 - 95000 Fahrzeuge pro Tag), da sowohl die West-Ost-Achse (A1) wie auch die Nord-Süd-Achse (A2) über dieses Autobahnstück an der Station vorbeiführt. Im Norden grenzen unmittelbar an die Station Getreidefelder und andere landwirtschaftliche Kulturen. In der Umgebung befinden sich mehrere Dörfer mit kleineren Industriebetrieben.

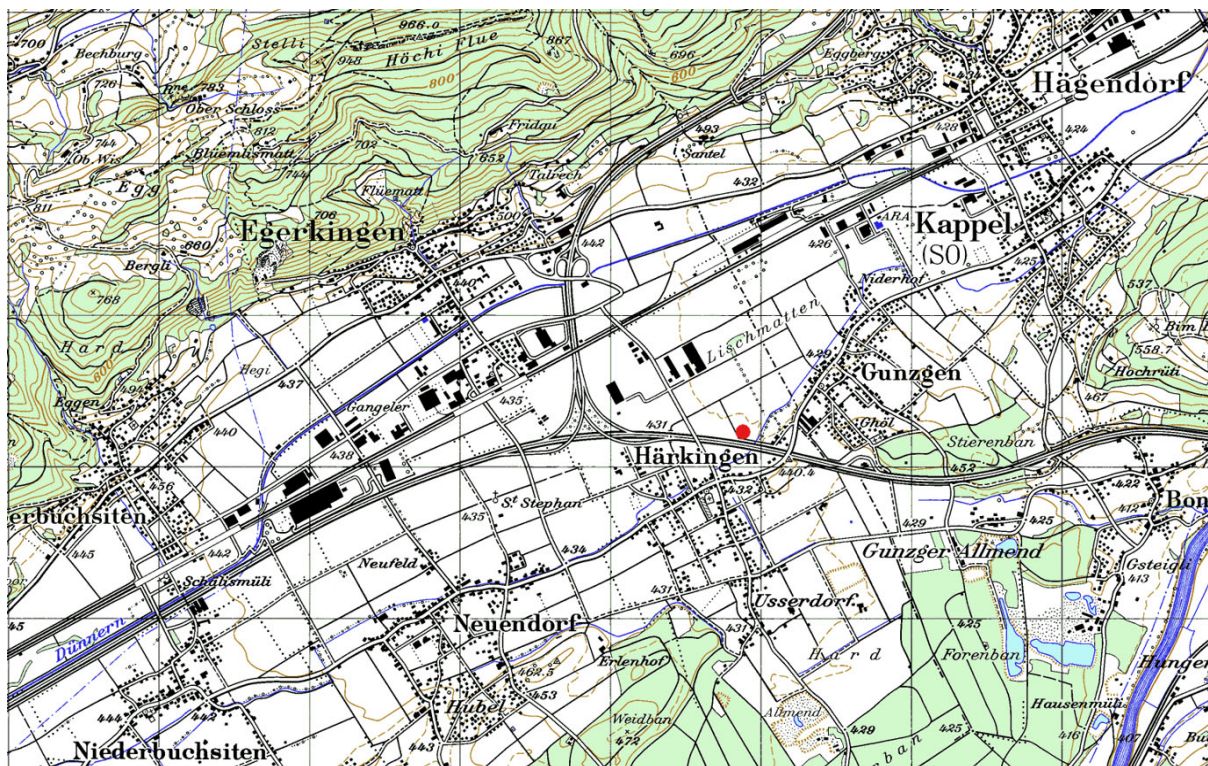


Abb. 2-19: Messstation Härkingen (mit Blick auf den Jura)



Abb. 2-20: Messstation Härkingen



**HÄRKINGEN-A1**

Quelle: Bundesamt für Landestopografie

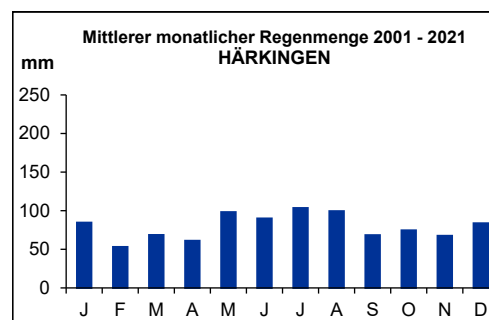
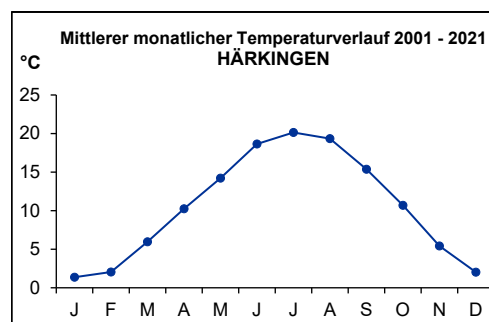
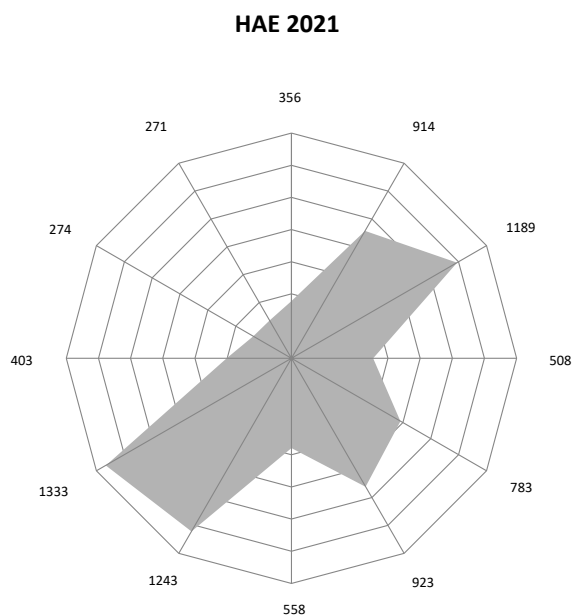


Abb. 2-21: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**JUNGFRAUJOCH (2641910 / 1155280) 3580 m**

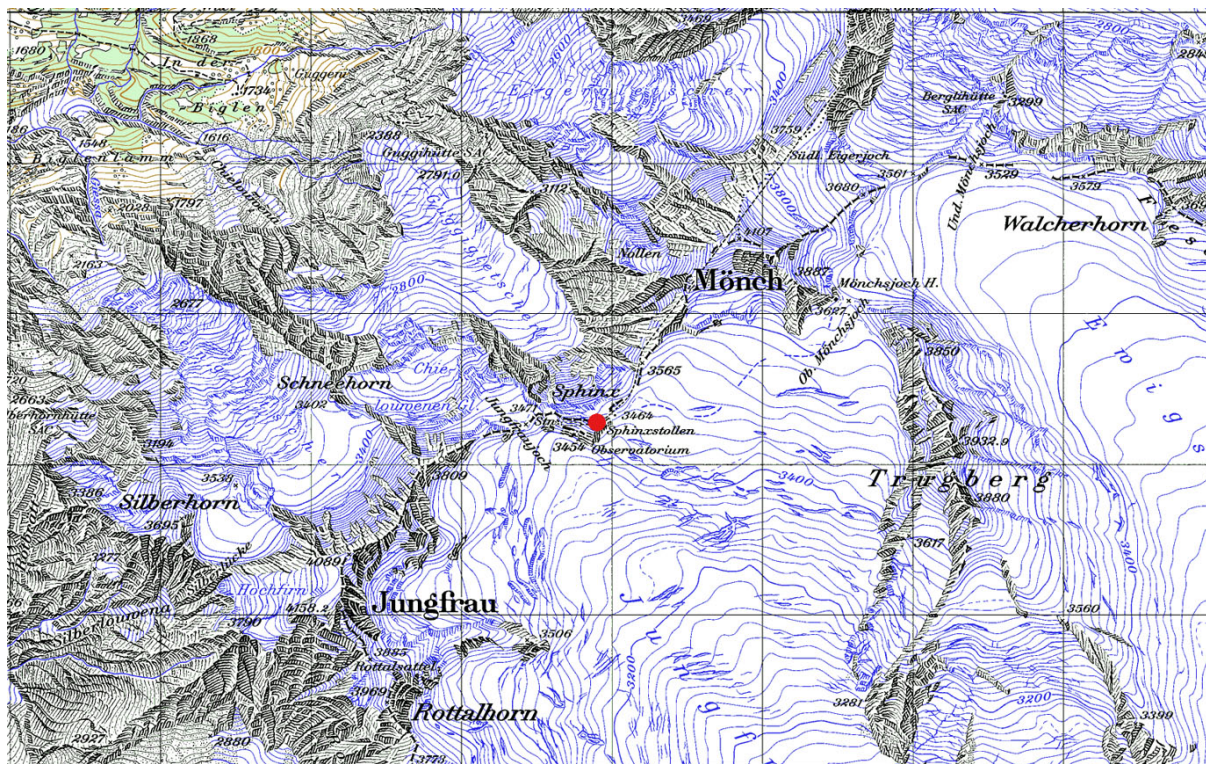
Die Station Jungfraujoch liegt in einem Sattel zwischen den zwei Alpengipfeln Jungfrau (4155 m ü.M.) im Südwesten und Mönch (4099 m ü.M.) im Nordosten. Die hochalpine Messstation ist im Labor der sogenannten Sphinx untergebracht, welche ca. 100 m höher als der Bahnhof der Jungfraujochbahn liegt und mit einem Lift erreicht werden kann. Mit dieser Messstation wird die Hintergrundbelastung, welche einerseits für die ganze Schweiz andererseits aber auch für grössere Gebiete Europas repräsentativ ist, erfasst. Unterschiedliche Anström-situationen (Episoden) bieten die Möglichkeit zu umfassenden atmosphärenchemischen Studien. Lokale Emissionen werden so gering wie möglich gehalten, da alle Gebäude auf dem Jungfraujoch elektrisch beheizt werden. Von Mitte 1991 bis Mitte 1996 wurden die Messungen durch Bauarbeiten der Jungfraujochbahn zeitweise beeinträchtigt. Eine SMN-Station befindet sich ebenfalls in der Sphinx.



Abb. 2-22: Messstation Jungfraujoch



## JUNGFRAUJOCH



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

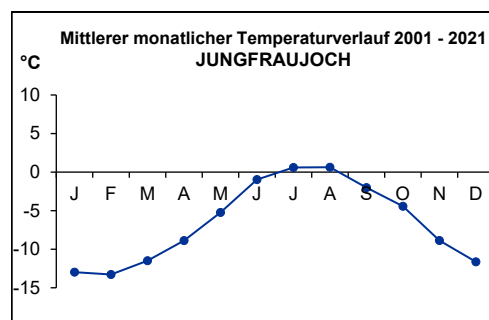
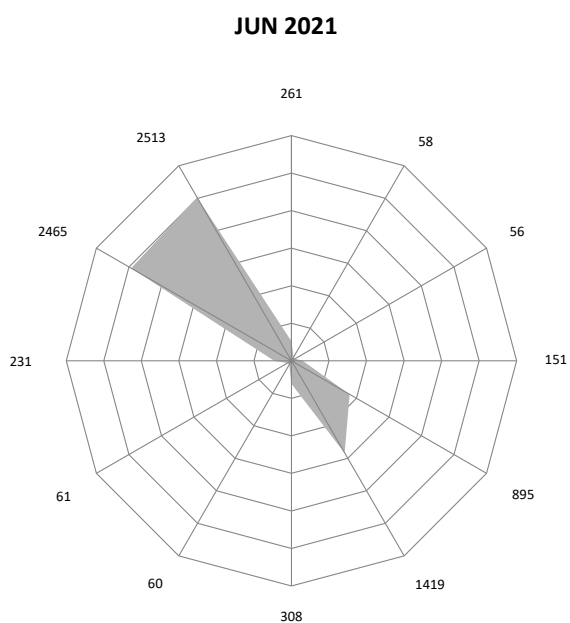


Abb. 2-23: Windrichtungsverteilung 2021 und Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021



**LAUSANNE-CÉSAR-ROUX (2538690 / 1152615) 530 m**

Die Station befindet sich im Zentrum von Lausanne im Keller der Bibliothek "Pour tous", welche unmittelbar neben einer innerstädtischen, leicht ansteigenden Transitstrasse (ca. 30'000 Fahrzeuge pro Tag) liegt. Auf der anderen Strassenseite befindet sich über einer Stützmauer von 10 m eine Schulhausanlage mit grossem Vorplatz, wo die meteorologischen Parameter erfasst werden. Diese relativ offene Situation begünstigt die Durchmischung der Luft. In der unmittelbaren Umgebung befinden sich fast ausschliesslich Wohnhäuser und Dienstleistungsbetriebe.



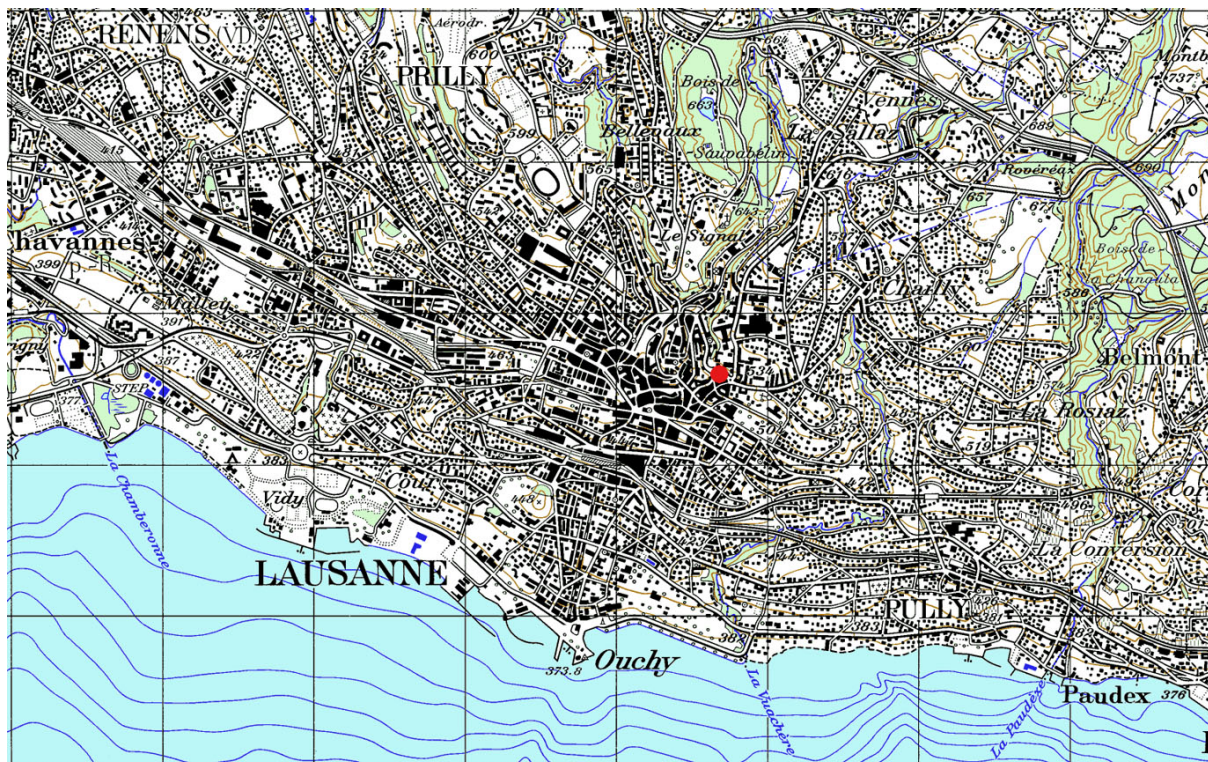
Abb. 2-24: Messstation Lausanne im Keller der Bibliothek „Pour tous“



Abb. 2-25: Messstation Lausanne im Gebäude auf der linken Seite



## LAUSANNE-CÉSAR-ROUX



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

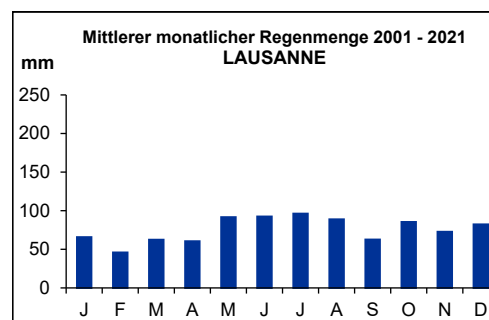
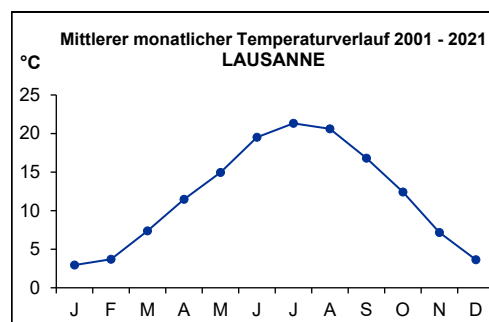
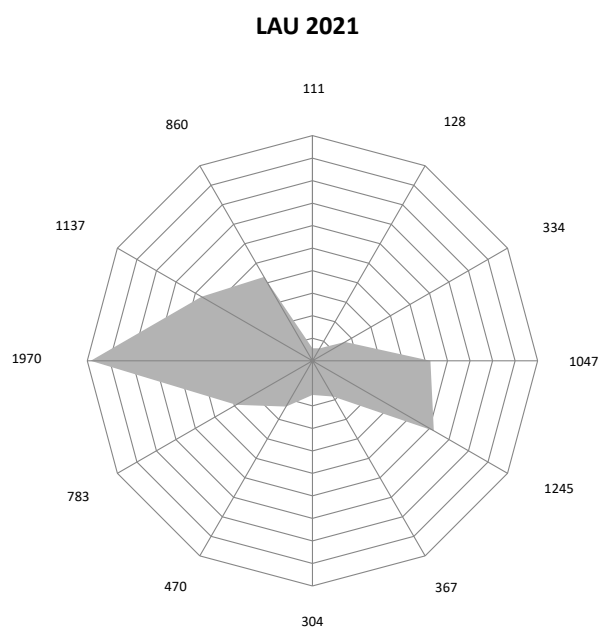


Abb. 2-26: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

### LUGANO-UNIVERSITA (2717610 / 1096645) 280 m

Die Messstation (siehe 4 in Abb. 2-27) liegt, seit dem 12.9.2001, im Zentrum von Lugano auf dem Gelände der Università della Svizzera italiana, ca. 50 m vom lebhaften Corso Elvezia entfernt. Nördlich und südlich durch die Gebäude von der Strasse abgeschirmt, stellt sie eine typische städtische Station dar. Im umliegenden Quartier befinden sich vorwiegend Wohn- und Geschäftshäuser, jedoch kaum Industriebetriebe. Das ganze Gebiet weist starken Durchgangsverkehr auf. Die Messeinrichtungen sind in einem Raum in der Tiefgarage untergebracht. Auf dem Gelände sind lediglich die etwa 2.5 m hohen Ansaugsonden sichtbar. Die SMN-Station von Lugano befindet sich rund 1.5 km südlich der NABEL-Station bei der Biblioteca Cantonale.

(1) Vom 5.8.1980 bis zum 24.4.1991 war die Messstation im Dachstock eines kleinen, inzwischen abgebrochenen Nebengebäudes auf dem Areal des damaligen Schulhauses installiert. Dadurch befanden sich die Ansaughöhen der beiden Sonden auf rund 7 m über Boden. Wie aus der Planskizze ersichtlich ist, war die Art der Exposition gegenüber der lokalen Umgebung abgesehen von der Ansaughöhe und den neuen Gebäuden nicht wesentlich verschieden vom heutigen Standort. Die meteorologischen Messungen wurden von der rund 1.5 km südlich gelegenen damaligen ANETZ-Station (Automatisches Messnetz der SMA, Schweizerische Meteorologische Anstalt) übernommen.

(2) Vom 25.4.1991 bis zum 2.11.1992: Wegen des Abbruchs des kleinen Gebäudes, in welchem sich die NABEL-Station befand, musste diese vorübergehend in einem provisorischen Container betrieben werden. Die Ansaughöhe befand sich auf rund 4 m über Boden. Verglichen mit dem Standort 1 war die Distanz zum stark befahrenen Corso Elvezia kleiner.

(3) Vom 4.11.1992 bis zum 11.9.2001 lag die Messstation, rund 150 m vom heutigen Standort entfernt, im Park des alten Ospedale Civico. Zwei Häuserzeilen vom lebhaften Corso Elvezia getrennt und durch eine Nadelbaumreihe von der Transitstrasse abgeschirmt, war diese Station eine typische städtische Hintergrundstation. In den Gebäuden des Ospedale Civico sind seit 1996 die beiden Fakultäten Ökonomie und Kommunikationswissenschaften der Università della Svizzera Italiana untergebracht.

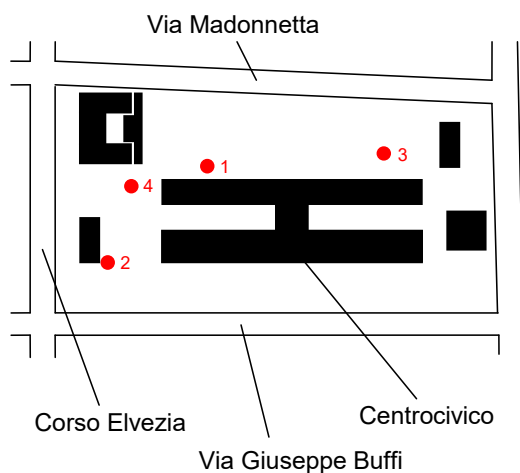


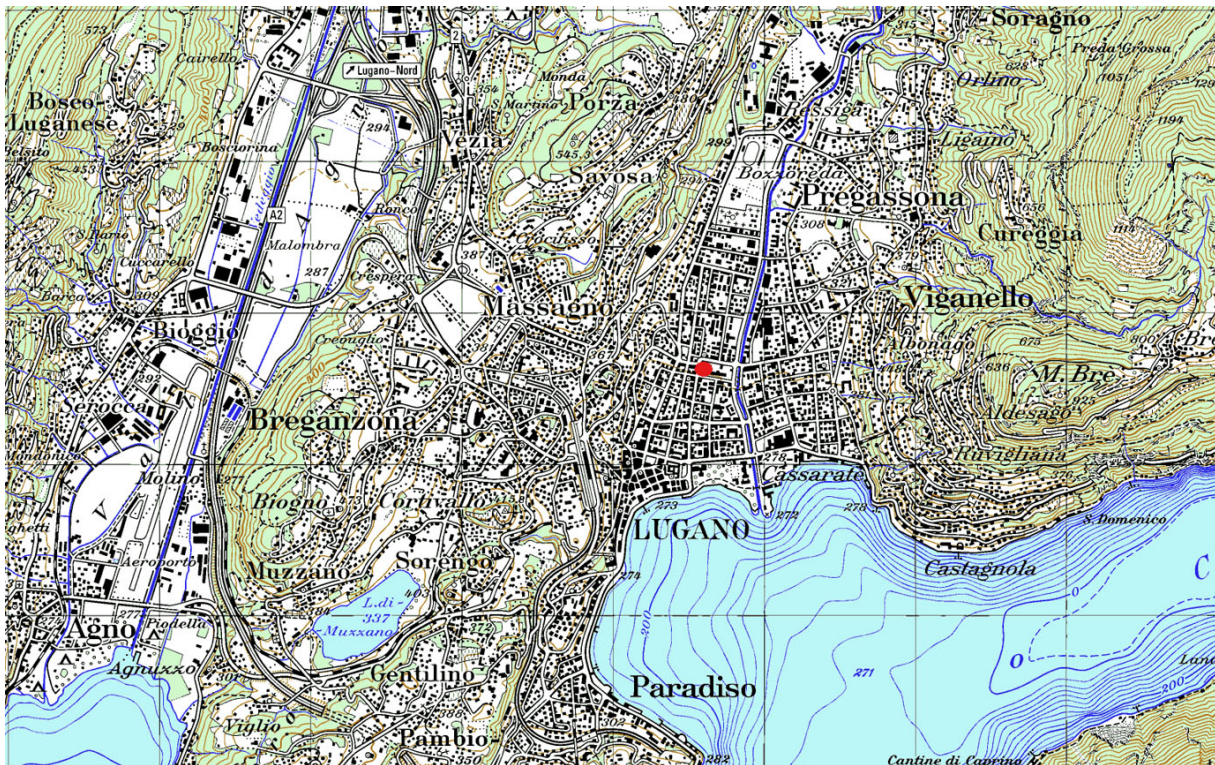
Abb. 2-27: 4 Standorte der Messstation Lugano



Abb. 2-28: Messstation Lugano



## LUGANO-UNIVERSITA



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

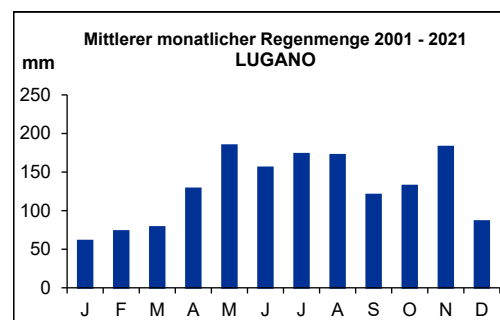
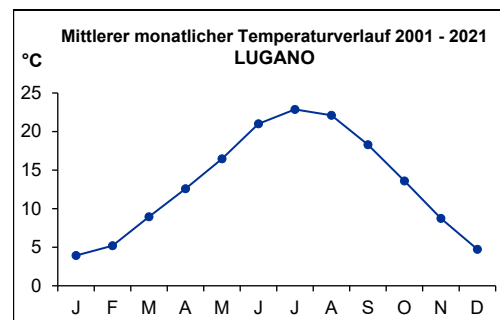
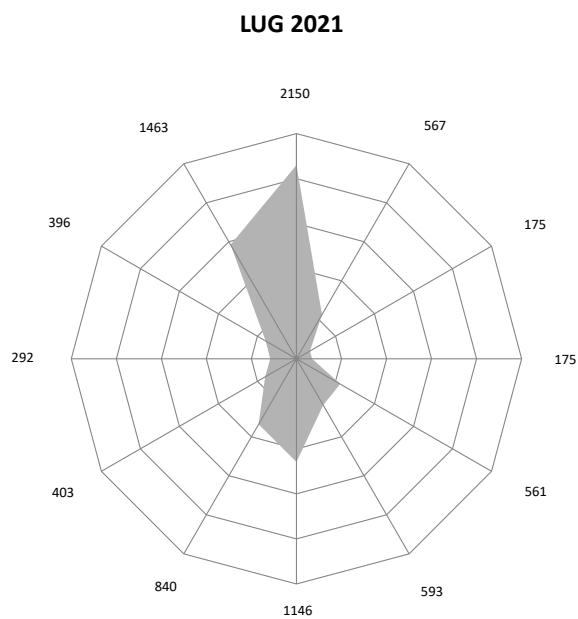


Abb. 2-29: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**MAGADINO-CADENAZZO (2715500 / 1113195) 203 m**

In der Magadinoebene, zwischen der Ortschaft Cadenazzo und dem Fluss Ticino steht die Messstation auf dem Gelände einer landwirtschaftlichen Versuchsanstalt. Sie liegt umgeben von Feldern der Versuchsanstalt, wodurch die Umgebung der Station ländlich wirkt. In der Magadinoebene befinden sich jedoch verschiedene kleinere Industriebetriebe. Die Autobahn Bellinzona-Lugano verläuft steigend ca. 2 km südöstlich der Station Richtung Monte Ceneri. Auf dem gleichen Gelände befindet sich auch eine SMN-Station der MeteoSchweiz.



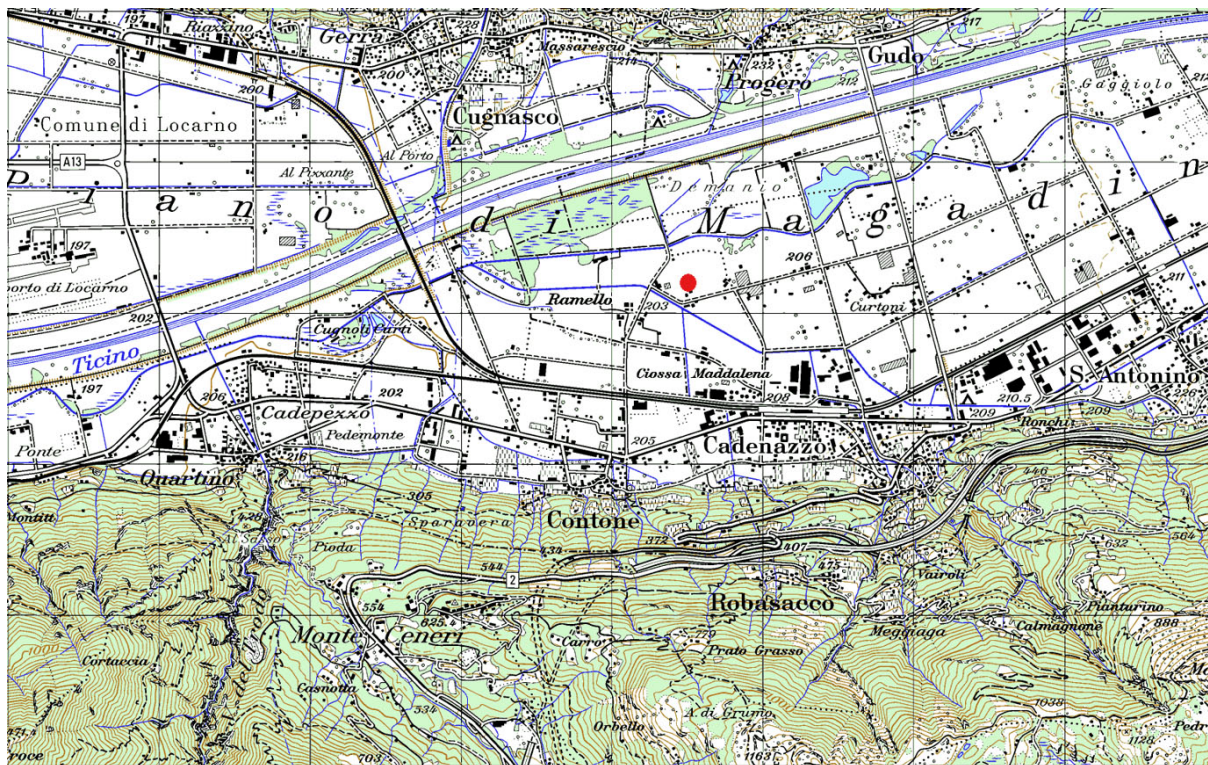
Abb. 2-30: Messstation Magadino



Abb. 2-31: Messstation Magadino (inmitten der Versuchsanstalt)



## MAGADINO-CADENAZZO



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

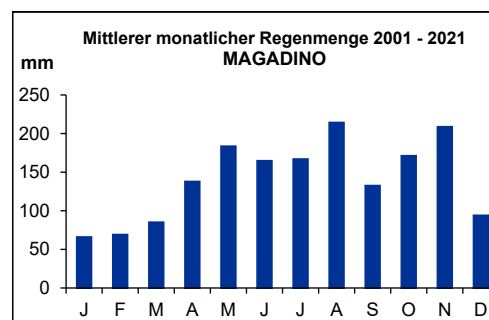
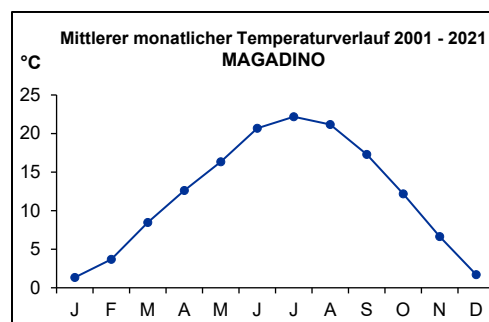
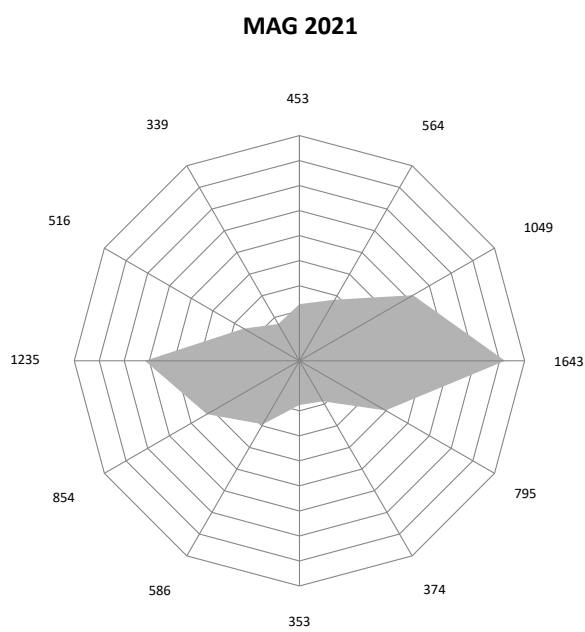


Abb. 2-32: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**PAYERNE (2562285 / 1184775) 489 m**

Etwa 1 km südöstlich des Städtchens Payerne liegt die Station auf dem Gelände der Météo-Suisse Payerne. Die nähere und weitere Umgebung von Payerne ist ausgesprochen ländlich. Die Hauptstrasse der Umfahrung von Payerne verläuft einige hundert Meter süd-östlich an der Station vorbei. Eine SMN-Station wird auf dem gleichen Areal betrieben.



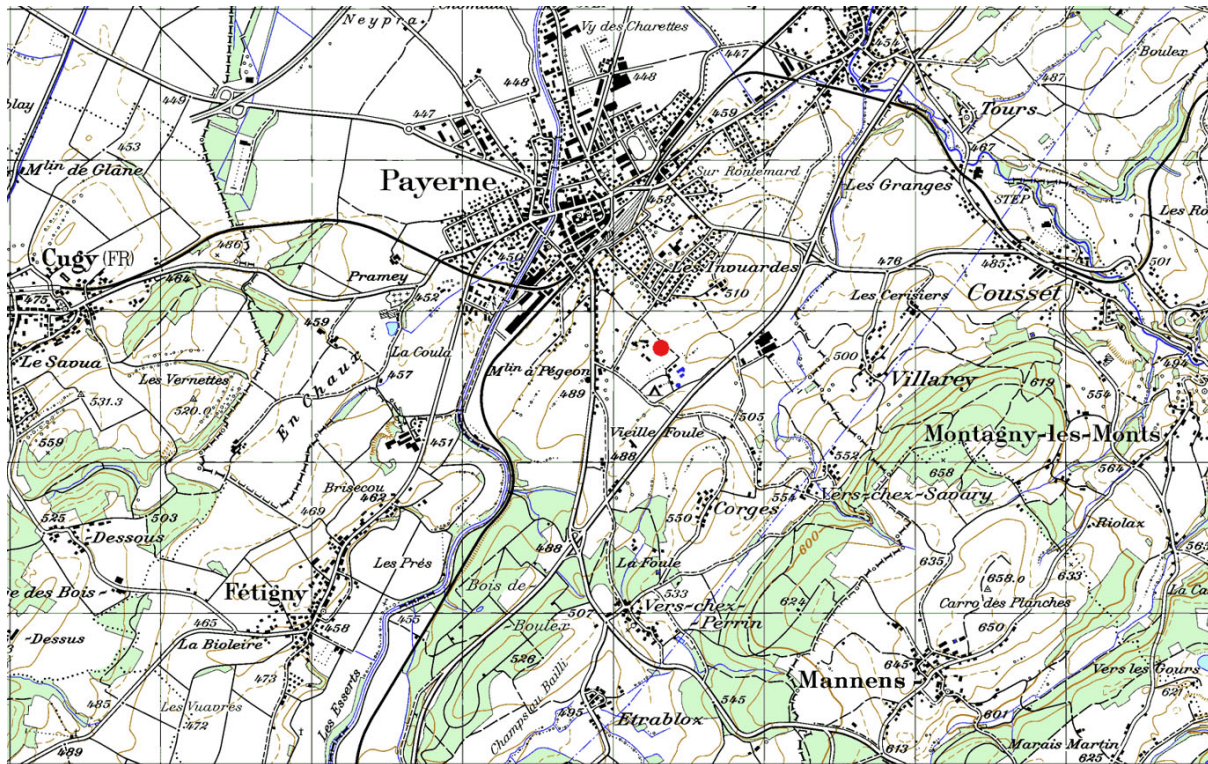
Abb. 2-33: Messstation Payerne



Abb. 2-34: Messstation Payerne, auf dem Gelände von MétéoSuisse Payerne



## PAYERNE



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

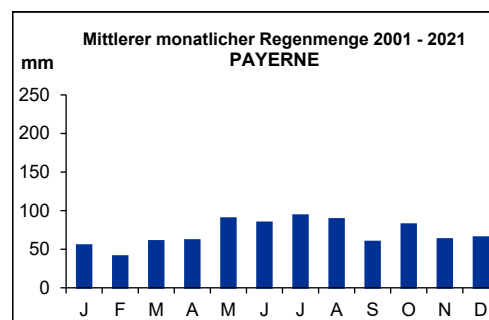
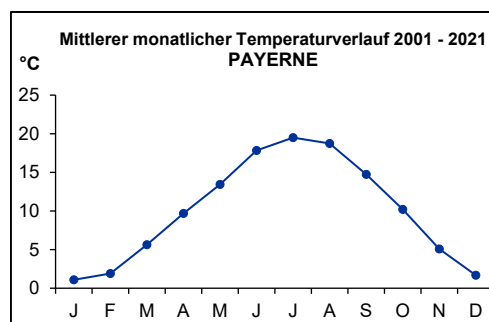
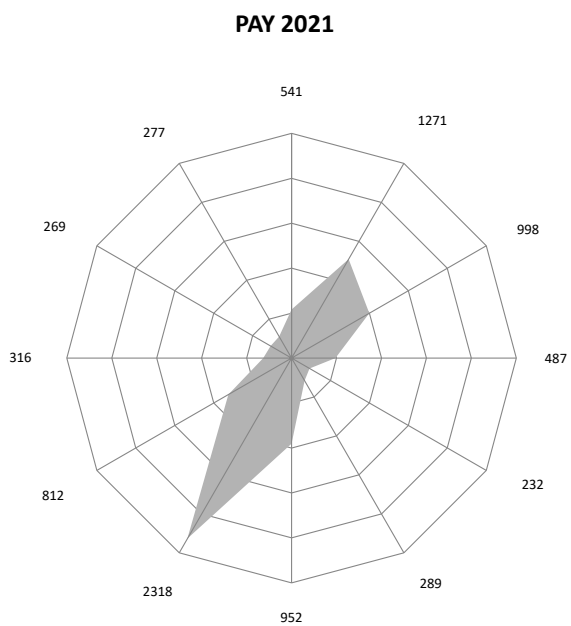


Abb. 2-35: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**RIGI-SEEBODENALP (2677835 / 1213440) 1031 m**

Die Station befindet sich ca. 300 m südwestlich der Bergstation der Seebodenalpbahn auf der Krete der Mülimannsegg. Die Umgebung ist voralpin; Weideland und Waldpartien wechseln sich ab. Die Station liegt 600 m über dem Vierwaldstättersee und ist ca. 12 km von Luzern und Zug entfernt. Das stetig wachsende Messprogramm an der Station (die Station ist Teil des European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP)) hat zu Platzproblemen in den letzten Jahren geführt, daher wurde zwischen August und September 2006 die bestehende Messstation in ihrer Längsachse vergrössert (Abb. 2-37).



Abb. 2-36: Messstation Rigi (Blick gegen Westen)



Abb. 2-37: Messstation Rigi (Blick gegen Nordwesten)



## RIGI-SEEBODENALP



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

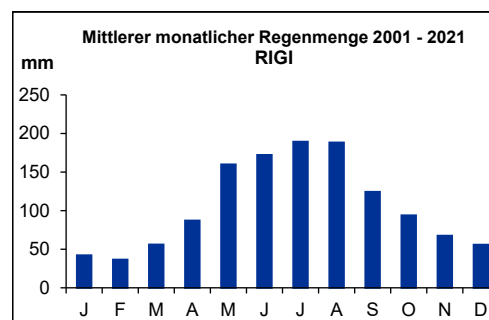
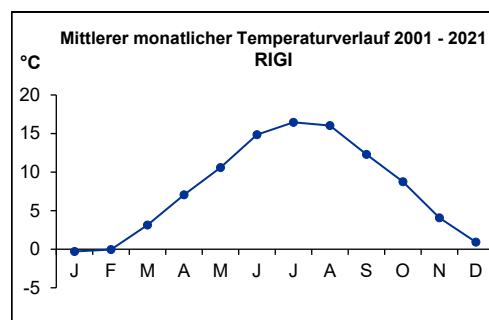
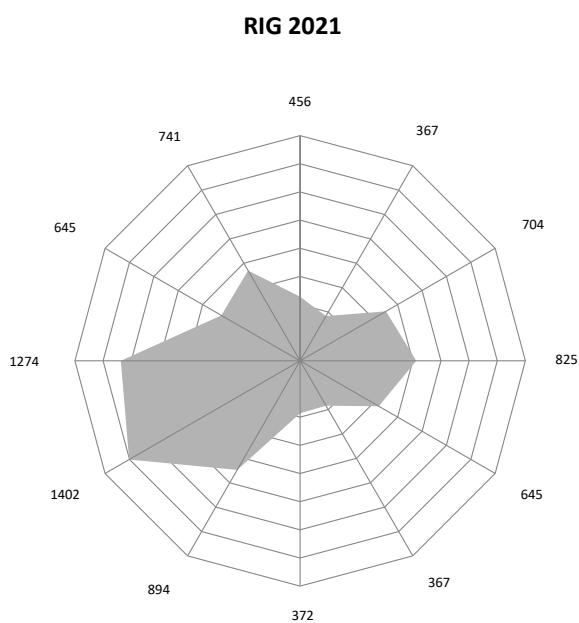


Abb. 2-38: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



**SION-AÉROPORT-A9 (2592545 / 1118745) 483 m**

Die Station befindet sich auf dem Gelände des Militärflugplatzes von Sion, rund 2 km südwestlich des Stadtzentrums. Die flache Umgebung wird geprägt durch niedrige Bauten und Pisten des Flugplatzes sowie durch ausgedehnte Obstkulturen. Seit Dezember 1988 führt das neue Autobahnstück (A9) zwischen Riddes und Sion nur ca. 50 m südlich an der Messstation vorbei. Seither ist dieser Standort einer Belastung durch die Autobahn ausgesetzt (ca. 35'000 Fahrzeuge pro Tag) und hat dadurch den ländlichen Charakter verloren. Eine SMN-Station der MeteoSchweiz wird auf dem gleichen Gelände betrieben.



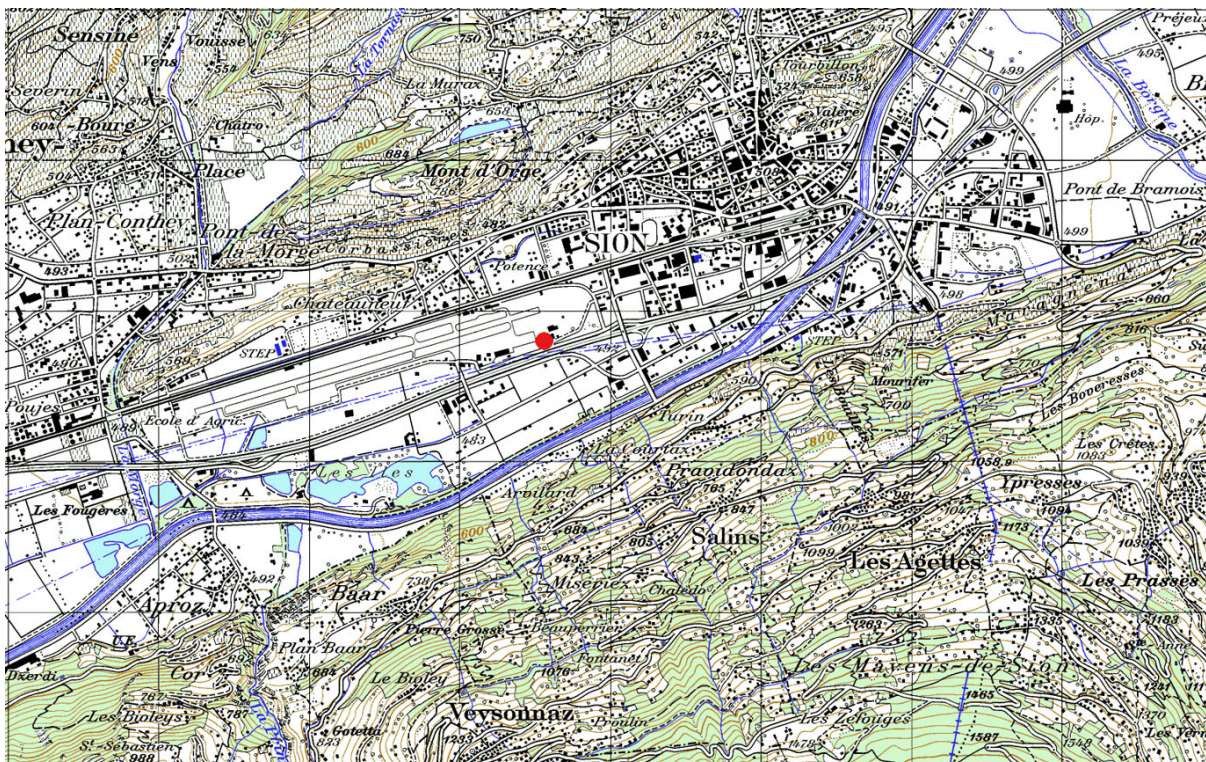
Abb. 2-39: Autobahn neben der Station Sion



Abb. 2-40: Messstation Sion



## SION-AÉROPORT-A9



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

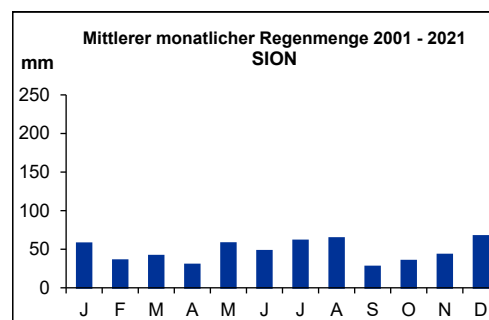
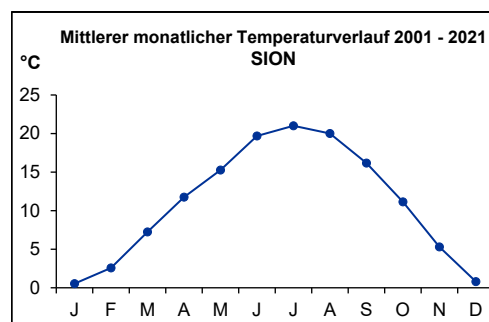
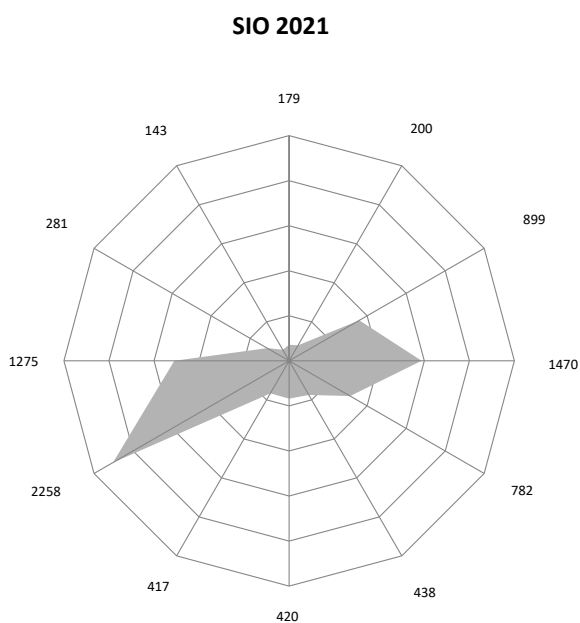


Abb. 2-41: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**TÄNIKON (2710500 / 1259810) 538 m**

Die Station liegt auf dem Gelände der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) auf dem Boden der Gemeinde Ettenhausen. Die unmittelbare Umgebung ist, abgesehen von den Gebäuden der Forschungsanstalt nur wenig überbaut und wird von Landwirtschaft (Felder und Wiesen) und Wäldern dominiert. Das etwa 1 km nördlich gelegene Aadorf weist einige kleinere Industriebetriebe auf. Eine SMN-Station der MeteoSchweiz befindet sich auf dem gleichen Gelände. Die Autobahn A1 (St. Gallen-Zürich) führt ca. 4 km nordöstlich der Station vorbei.



Abb. 2-42: Messstation Tänikon (ART im Hintergrund)



Abb. 2-43: Messstation Tänikon



## A detailed topographic map of the Aadorf region in Switzerland. The map features the Aadorf river flowing through the center, with numerous tributaries and smaller streams. Major settlements include Aadorf, Elgg, Guntershausen, and Hofstetten. The map is characterized by green contour lines indicating elevation, with peaks reaching up to 671 meters. Various geographical features like forests, fields, and roads are depicted. The map is oriented with North at the top.

**TAE 2021**

Month	TAE 2021
J	472
F	287
M	749
A	1071
M	381
J	280
J	576
A	792
S	1586
O	1313
N	852
D	404

**Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001 - 2021 TÄNIKON**

Month	Temperature (°C)
J	1
F	1.5
M	5
A	9
M	13
J	17
J	18.5
A	18
S	14
O	10
N	5
D	2

**Mittlerer monatlicher Regenmenge 2001 - 2021 TÄNIKON**

Month	Precipitation (mm)
J	85
F	70
M	85
A	85
M	130
J	120
J	130
A	135
S	85
O	90
N	75
D	95

Abb. 2-44: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021

**ZÜRICH-KASERNE (2682450 / 1247990) 409 m**

Mitten in der Stadt Zürich (ca. 500 m westlich des Hauptbahnhofs) steht die Station in einem parkähnlichen Hof, welcher zum Gebäudekomplex der alten Kaserne gehört. In unmittelbarer Nachbarschaft liegen die Gebäude und Werkstätten der ehemaligen Zeughaus- und Kasernenverwaltung. Im angrenzenden Quartier befinden sich hauptsächlich Wohnhäuser sowie Kleinunternehmen und Geschäfte. Im April 1997 wurde die Station vom Kasernenhof an den heutigen Standort im Zeughaushof unter den Boden verlegt. In Abb. 2-46 sieht man nur die Luftansaugsonden der Messstation. An der Station führt keine Hauptverkehrsstrasse vorbei, der Verkehr im umliegenden Quartier ist jedoch Tag und Nacht recht lebhaft. Die Meteogrößen Wind und Globalstrahlung werden auf einem benachbarten vierstöckigen Gebäude gemessen.



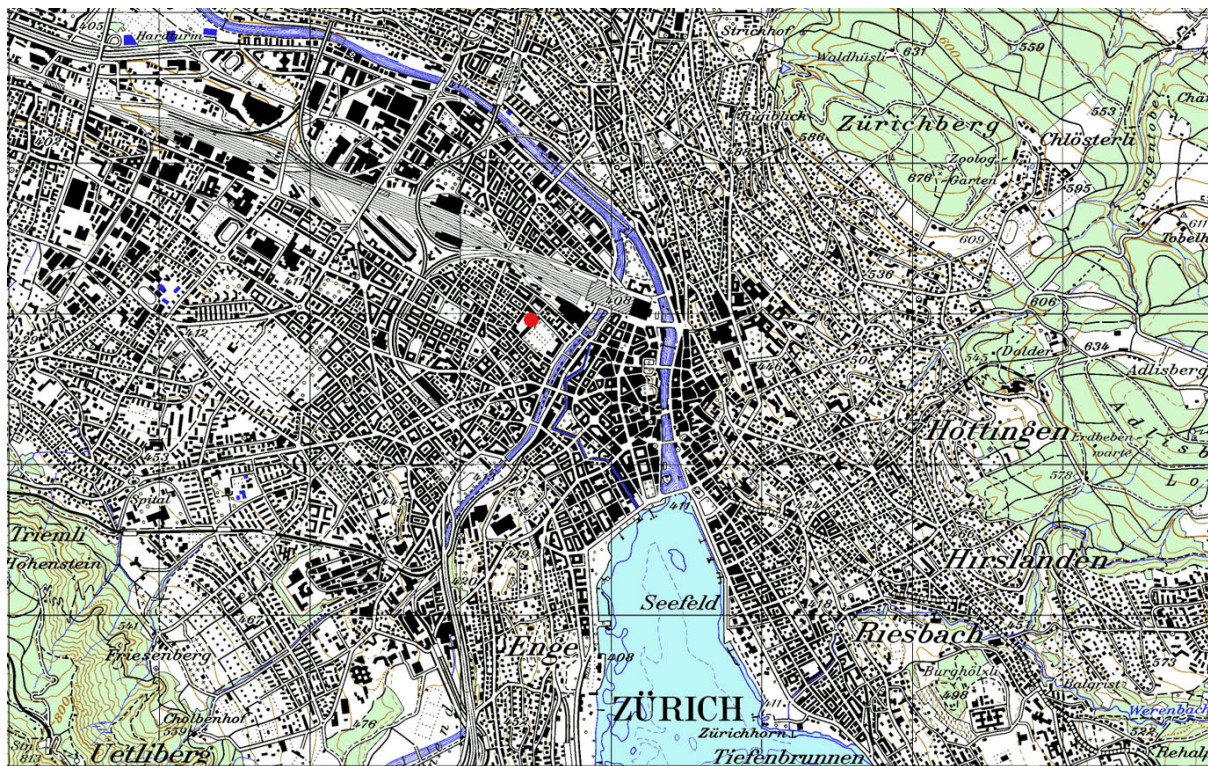
Abb. 2-45: Messstation Zürich, Zeughaushof



Abb. 2-46: Messstation Zürich (Messstation unterirdisch)



## ZÜRICH-KASERNE



Quelle: Bundesamt für Landestopografie

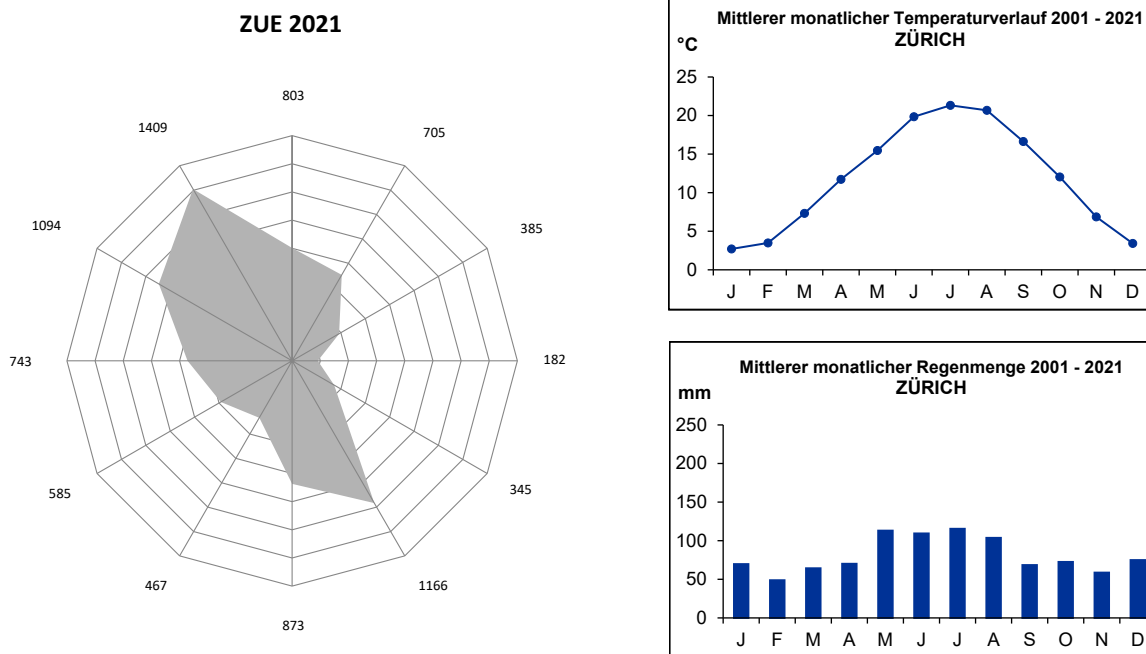


Abb. 2-47: Windrichtungsverteilung 2021, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 2001-2021 und Mittlere monatliche Regenmenge 2001-2021



## 2.2. Messstationen

### 2.2.1. Anforderungen an eine Messstation

Für eine zuverlässige Messung von Luftfremdstoffen werden an eine Messstation folgende Anforderungen gestellt:

- gute thermische Isolation, Klimatisierung des Innenraums (ca. 22°C, tägl.  $\pm 1$  °C)
- Vermeidung starker Wärmequellen (z.B. Pumpen)
- geeignete Elektroinstallationen (genügend unabhängige Sicherungen, keine Stromschwankungen)
- Blitzschutz für alle vom Messfeld in die Station führenden Leitungen
- keine störenden Schadstoffemissionen vom Kabinenmaterial (problematisch bei VOC-Messungen)
- kurze Verweilzeiten der Luft in der Ansaugleitung (< 10 sec)

### 2.2.2. Aufbau der Messstation

Eine typische NABEL-Station (Ausnahmen: Bern, Beromünster, Dübendorf, Jungfrauoch, Lausanne, Lugano, Rigi und Zürich) hat eine Grundfläche von ca. 3.5 x 4.5 m (Abb. 2-48 und 2-49). Die Gerätepumpen und die Nullluftaufbereitung befinden sich aus lärm- und wärmetechnischen Gründen in einem separaten Raum von 1.5 x 1.5 m. Die Ansaugsonden (Luftfremdstoffe und Feinstaub) sind aus emataliertem Aluminium und befinden sich ca. 4 m über Grund. Einzig bei der ländlichen Station Davos, welche in einem Wald steht, befindet sich die Ansaugsonde auf einem 35 m hohen Mast. Die Messluft wird dort durch eine Teflonleitung (Innendurchmesser: 22 mm) mit einem Fluss von 170 l/min in die Messstation gesaugt. Es hat sich gezeigt, dass bei diesem hohen Fluss die Leitungsverluste auch bei alten Leitungen vernachlässigbar klein sind. <sup>[2]</sup>



Abb. 2-48: Innenansicht einer NABEL-Station

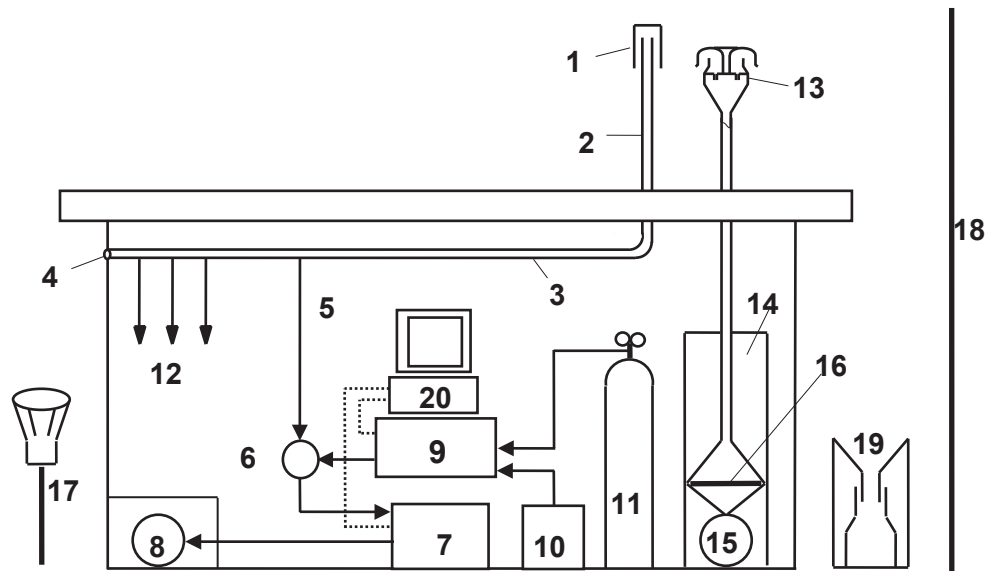


Abb. 2-49: Schematischer Aufbau einer NABEL-Station

### Legende

- 1) Sondentopf, ematiertes Aluminium (Durchmesser 17.5 cm, Höhe 35 cm)
- 2) Ansaugleitung, ematiertes Aluminium (Innendurchmesser 4.0 cm, Länge 1.5 - 2 m, Abstand zum Topf 1 cm)
- 3) Ringleitung, Glas, (Aussendurchmesser 4.6 cm)
- 4) Ventilator, mind. 300 l/min
- 5) Sticleitung zum Gerät, (Aussendurchmesser 6 mm, Teflon)
- 6) Dreiwegventil
- 7) Messgerät
- 8) Gerätepumpe
- 9) Verdünnungseinheit zur Kalibration
- 10) Nullluft-Aufbereitung: bestehend aus Kompressor, CO/CO<sub>2</sub> Konverter, Aktivkohle, Purafile (für KW: synthetische Luft, für CO ohne Aktivkohle)
- 11) Kalibriergasflasche zur Kalibration
- 12) Sticleitungen für weitere Geräte
- 13) Vorabscheider PM10/2.5/1 mit Ansaugrohr für Feinstaub, ematiertes Aluminium (Innendurchmesser 4 cm, Länge 1-1.5 m)
- 14) HIVOL-Sampler für Feinstaub
- 15) HIVOL-Pumpe, geregelt (500 l/min)
- 16) Quarzfaserfilter
- 17) Bergerhofftopf für Staubniederschlag
- 18) Meteomast
- 19) Regensammler
- 20) Datenerfassung



## 2.3. Messprogramm

Das Messprogramm umfasst im wesentlichen Schadstoffe allgemeiner Bedeutung, für welche in der Luftreinhalteverordnung (LRV)<sup>[3]</sup> ein Grenzwert definiert ist. Rund 10 Jahre nach der NABEL-Erweiterung auf 16 Stationen wurden die Standorte und das Messprogramm einer intensiven Analyse unterzogen und angepasst. Das detaillierte Messprogramm (siehe 2.3.4.) wird laufend den aktuellen Bedürfnissen und Fragestellungen angepasst.

Seit der NABEL-Erweiterung im Jahr 1990/91 werden an allen Standorten auch die wichtigsten meteorologischen Grössen erfasst. Acht NABEL-Standorte (BAS, CHA, JUN, LUG, MAG, PAY, SIO und TAE) sind zugleich auch Standorte des SwissMetNet (SMN), dem automatischen meteorologischen Messnetz der MeteoSchweiz. An diesen Standorten werden die Messwerte der MeteoSchweiz übernommen.

Seit 1993 werden an den Standorten Sion, Bern, Härkingen und Lausanne, welche massgeblich von Verkehrsemissionen beeinflusst sind, auch Verkehrsdaten erhoben. Seit 2003 werden in Härkingen die Daten der nahegelegenen Zählstelle Gunzgen des ASTRA (Bundesamt für Strassen) übernommen.

Im Rahmen des EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) werden an den Standorten Payerne, Rigi und teilweise auch Tänikon, Chaumont und Jungfrauoch zusätzliche Grössen (Aerosole, Regeninhaltsstoffe) gemessen, welche in diesem europäischen Programm zur Untersuchung des grenzüberschreitenden Transports von Luftschadstoffen benötigt werden.

### 2.3.1. Luftfremdstoffe

- |   |                                         |                                                                                                                        |
|---|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| • | <b>Schwefeldioxid</b>                   | SO <sub>2</sub>                                                                                                        |
| • | <b>Stickstoffmonoxid</b>                | NO                                                                                                                     |
| • | <b>Stickstoffdioxid</b>                 | NO <sub>2</sub>                                                                                                        |
| • | <b>Ozon</b>                             | O <sub>3</sub>                                                                                                         |
| • | <b>Kohlenmonoxid</b>                    | CO                                                                                                                     |
| • | <b>Kohlendioxid</b>                     | CO <sub>2</sub>                                                                                                        |
| • | <b>Kohlenwasserstoffe</b>               | Nichtmethankohlenwasserstoffe, Methan, Aromaten, Halogenkohlenwasserstoffe                                             |
| • | <b>Lachgas</b>                          | N <sub>2</sub> O                                                                                                       |
| • | <b>oxidierte Stickstoffverbindungen</b> | NO <sub>y</sub>                                                                                                        |
| • | <b>Ammoniak</b>                         | NH <sub>3</sub>                                                                                                        |
| • | <b>Feinstaub</b>                        | Gesamtmenge; Partikelanzahl; Partikelgrössenverteilung; OC/EC; BC, Blei, Cadmium, Schwefel, Nickel, Arsen, Kupfer, PAK |
| • | <b>Schwebstaub (TSP)</b>                | mineralische Kationen                                                                                                  |
| • | <b>Staubniederschlag</b>                | Gesamtmenge; Blei, Cadmium, Zink, Thallium, Kupfer, Arsen, Nickel                                                      |

- **Regeninhaltsstoffe** Gesamtmenge; pH, Leitfähigkeit,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$
- **Stickstoffhaltige Gas- + Aerosolkomponenten** Summe ( $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$ ), Summe ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ ),  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$

### 2.3.2. Meteoparameter

- Luftfeuchtigkeit
- Niederschlagsmenge
- Temperatur
- Luftdruck
- Globalstrahlung (Totale Einstrahlung)
- Strahlungsbilanz (Einstrahlung – Abstrahlung)
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Windspitze

### 2.3.3. Verkehrsdaten

Die Verkehrsdaten werden als Stundensummenwerte erhoben. An den Standorten Bern und Lausanne werden die Fahrzeuge nach zwei Längen klassifiziert. In Härkingen und Sion werden die Daten nach der Fahrzeugerfassungsmethode "Swiss10" registriert, allerdings werden die 10 Fahrzeugkategorien in die 4 Kategorien MR (Motorräder), PKW (Personenwagen und Personenwagen + Anhänger), LFW (Lieferwagen, Lieferwagen + Anhänger und Lieferwagen + Auflieger) und LKW (Lastwagen, Lastzüge, Sattelzüge und Bus) zusammengefasst. Die Verkehrszähler werden jährlich durch manuelle Zählung auf ihre Funktion überprüft.

- **2 Längenklassen** Bern, Lausanne < 6 m  
> 6 m
- **4 Fahrzeugkategorien (Swiss10)** Härkingen, Sion MR  
PKW  
LFW  
LKW
- **2 Richtungen** Bern, Härkingen,  
Lausanne, Sion



## 2.3.4. Detailliertes NABEL-Messprogramm (Januar 2024)

### Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe: Messprogramm

			EMEP GAW	EMEP				EMEP GAW				EMEP GAW	EMEP GAW		EMEP	
Messgrösse	BAS	BER	BRM	CHA	DAV	DUE	HAE	JUN	LAU	LUG	MAG	PAY	RIG	SIO	TAE	ZUE
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	X					X	X	X		X	X	X	X			X
Stickoxide (NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NO <sub>2</sub> selektive Methoden			X					X				X	X			
Lachgas (N <sub>2</sub> O)			X					X								
Ozon (O <sub>3</sub> )	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kohlenmonoxid (CO)		X	X			X	X	X	X	X		X	X			X
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )			XB				X	X				X	X			
Methan (CH <sub>4</sub> )			XB				X	X		X						X
Nichtmethankohlenwasserstoffe										X						X
BTX (Benzol, Toluol, Xylol)		S	S			S										
VOC Komponenten <sup>1)</sup>			S					S								
Halogenierte Verbindungen <sup>1)</sup>								S								
Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )								S								
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )			X									X			X	
Feinstaub PM10, HiVol	T	T	T	T		T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Feinstaub PM10, kontinuierlich	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Feinstaub PM2.5, HiVol	T	T				T	T		T	T	T	T	T	T	T	T
Feinstaub PM2.5, kontinuierlich	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Partikelanzahl	X	X					X			X			X			X
Partikel-Grössenverteilung																X
EBC im PM2.5	X	X				X	X			X	X	X	X			X
TC im PM2.5, kontinuierlich												S				
EC/OC im PM2.5	T	T				T	T			T	T	T	T			T
PAK im PM10	3M	3M	3M			3M	3M		3M	3M	3M	3M		3M	3M	3M
Pb, Cd, As, Ni, Cu im PM10	J	J	J	J		J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> im PM10								M		M		T	T			
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> im TSP												T	T			
Staubniederschlag (SN)	J	J					J		J		J	J	J			J
Pb, Cd, Zn, Tl, As, Cu, Ni im SN	J	J					J		J		J	J	J			J
pH-Wert, Leitfähigkeit (Regen)											W	T	W			
Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> (Regen)											W	T	W			
Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (Regen)											W	T	W			
Σ(NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ); Σ(HNO <sub>3</sub> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )												T	T			
NH <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , HNO <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			2W								2W	2W	2W		2W	
Druck	XA	X	X	XA	X	X	X	XA	X	XA	XA	XA	X	XA	XA	X
Temperatur	XA	X	X	XA	X	X	X	XA	X	XA	XA	XA	X	XA	XA	X
Feuchtigkeit	XA	X	X	XA	X	X	X	XA	X	XA	XA	XA	X	XA	XA	X
Wind	XA	X	XB	XA	X	X	X	XA	X	XA	XA	XA	X	XA	XA	X
Globalstrahlung	XA	X	X	XA	X	X	X	XA	X	XA	XA	XA	X	XA	XA	X
Niederschlagsmenge	XA	X	X	XA	X	X	X		X	XA	XA	XA	X	XA	XA	X
Verkehrsstärke		S					SA		S					SA		

X=Zehnminutenmittelwerte

S=Stundenmittelwerte

T=Tagesmittelwerte

W=Wochenmittelwerte

2W=14-Tage-Mittel

M=Monatsmittelwerte

3M=Dreimonatsmittel

J=Jahresmittelwerte

XA=Zehnminutenmittelwerte (MeteoSchweiz)

SA=Stundenmittelwerte (ASTRA)

XB=Zehnminutenmittelwerte (Universität Bern)

EMEP=European Monitoring and Evaluation Programme

GAW=Global Atmosphere Watch Programme

<sup>1)</sup> Einzelkomponenten siehe Technischer Bericht des NABEL (Empa und BAFU)

Gase

Partikel

Deposition

N-Verbindungen

Meteo

### 3. MESSVERFAHREN

#### 3.1. Schwefeldioxid

Für die kontinuierliche Messung der Zehnminutenmittelwerte werden Messgeräte basierend auf der UV-Fluoreszenzmethode (Referenzverfahren CEN Norm EN 14212 <sup>[4]</sup>) eingesetzt.

##### Messprinzip

Die SO<sub>2</sub>-haltige Probeluft wird mit einer gepulsten UV-Lampe bestrahlt. Ein Teil der SO<sub>2</sub>-Moleküle wird durch die zugeführte Energie in einen angeregten Zustand versetzt (Abb. 3-1). Beim Zurückfallen in den Grundzustand wird Licht im UV-Bereich (Fluoreszenzstrahlung: 320-380 nm) ausgesendet, dessen Intensität mit einem Photomultiplier (PMT) gemessen wird (Abb. 3-2). Die Fluoreszenzstrahlung ist proportional zur Menge SO<sub>2</sub>.

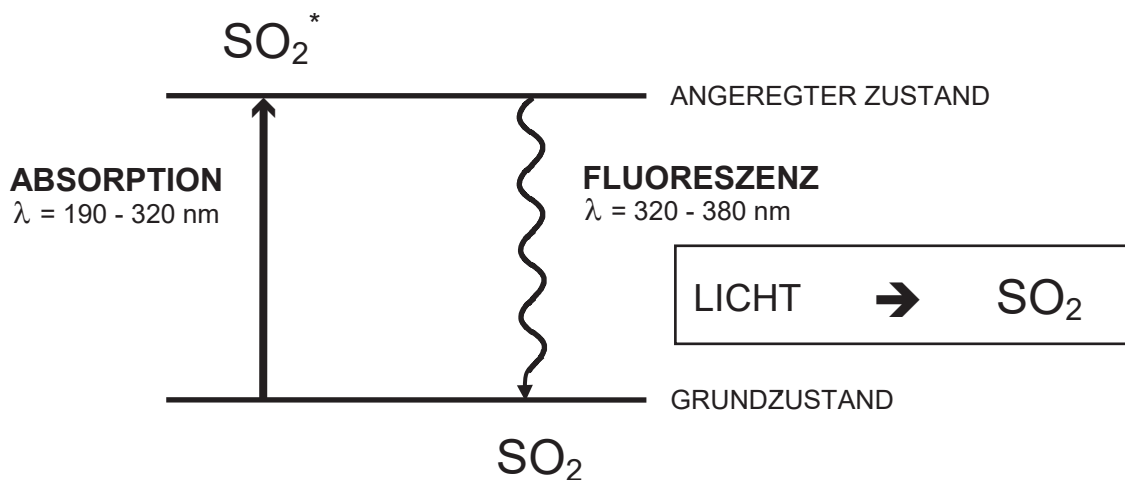


Abb. 3-1: Reaktionsprinzip

##### Kalibration

Die Kalibration erfolgt mit Nullluft und SO<sub>2</sub>-Kalibriergas:

- automatische Überprüfung des Null- und Spanpunktes alle 25 Stunden
- manuelle Kalibration auf der Station alle 2 - 4 Wochen

##### Querempfindlichkeit

Die Querempfindlichkeit dieses Messprinzips beruht darauf, dass die Energie der angeregten SO<sub>2</sub>-Moleküle nicht als Fluoreszenzstrahlung emittiert, sondern auf Störmoleküle übertragen wird, was zu einer Verringerung der Fluoreszenzausbeute führt. Bei den handelsüblichen Geräten wird diese Art der Querempfindlichkeit mit einem so genannten Kicker (Permeationsgasaustauscher) Rechnung getragen, welcher Kohlenwasserstoffe, die als Störmoleküle in Frage kommen, aus dem Messgas entfernt. Stickstoffmonoxid, welches durch den Kicker nicht entfernt wird, zeigt eine positive Querempfindlichkeit.



Experimentell bestimmte Querempfindlichkeit gegenüber Stickstoffmonoxid:

Thermo43i TLE: 0.8%

**Messunsicherheit** siehe Kapitel 5

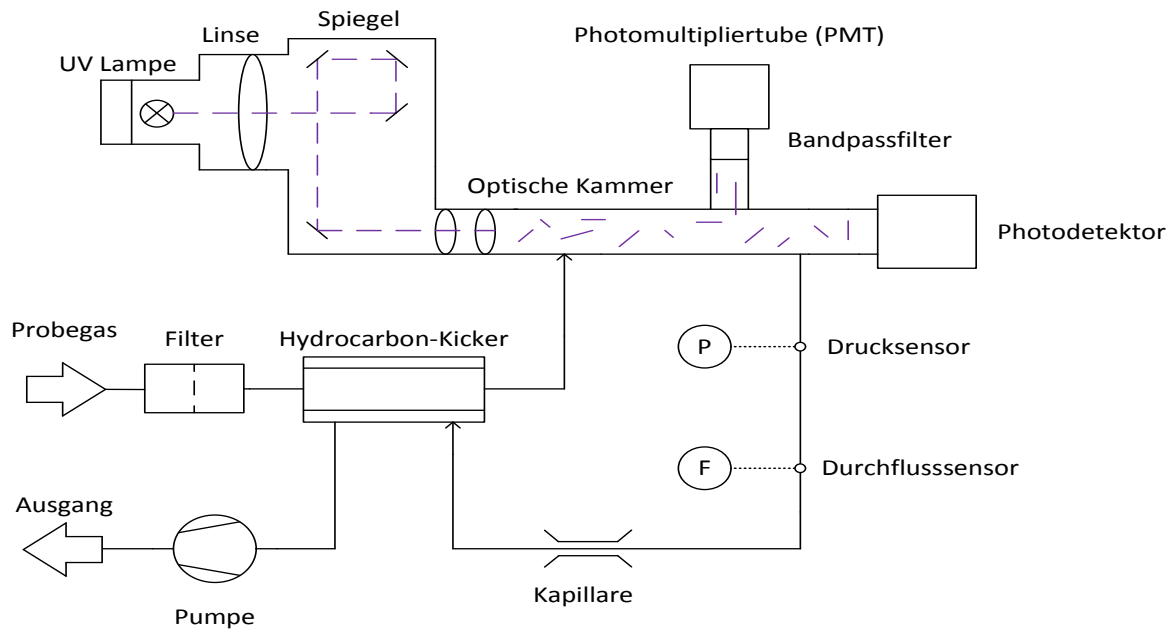


Abb. 3-2: Schematischer Geräteaufbau eines SO<sub>2</sub>-Messgerätes

## 3.2. Stickoxide

Für die Messung der Stickoxide werden kontinuierliche online Verfahren basierend auf dem Prinzip der Chemilumineszenz (Referenzverfahren CEN Norm EN 14211 <sup>[5]</sup>) eingesetzt.

### Messprinzip

Die Methode basiert auf der Intensitätsmessung der Chemilumineszenzstrahlung (Abb. 3-3), welche bei der Reaktion von Stickstoffmonoxid (NO) mit Ozon auftritt. Um sowohl NO, als auch Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) messen zu können, wird die Probeluft zweigeteilt. Ein Teil gelangt direkt in die Reaktionszelle und zeigt die NO-Konzentration an. Der zweite Teilstrom wird zunächst durch einen Konverter geleitet, dabei wird NO<sub>2</sub> zu NO reduziert und gelangt anschliessend in die Reaktionszelle. Dieses Messsignal entspricht dann NO<sub>x</sub>, der Summe von NO und NO<sub>2</sub>. Die NO<sub>2</sub>-Konzentration wird durch Differenzbildung (NO<sub>x</sub>-NO) erhalten. Dies bedingt, dass bei hohen NO- und gleichzeitig tiefen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen für NO<sub>2</sub> mit einer grösseren Messunsicherheit gerechnet werden muss (Differenz von zwei ähnlich grossen Werten). In der Regel werden Molybdänkonverter eingesetzt.

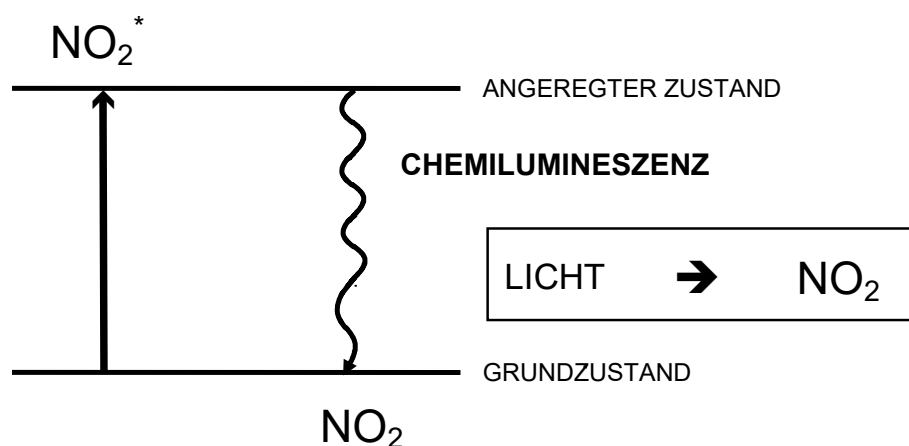
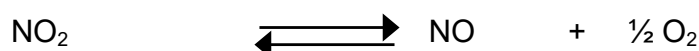
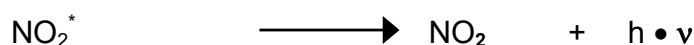


Abb. 3-3: Reaktionsprinzip der Chemilumineszenzmessung

### Querempfindlichkeit

Mit den allgemein gebräuchlichen Molybdänkonvertern ist keine spezifische NO<sub>2</sub>-Messung möglich, da neben dem NO<sub>2</sub> auch weitere Stickstoffverbindungen zu NO reduziert werden. Die üblicherweise als NO<sub>2</sub> deklarierte Differenz der zwei Messsignale NO<sub>x</sub>-NO entspricht einer Summe von verschiedenen Stickstoffverbindungen ("NO<sub>2</sub>"), die mit Hilfe des Konverters zu NO reduziert werden. Der jeweilige Konvertierungsgrad (a, b, c etc.) ist abhängig von der Konverterbeschaffenheit und der jeweiligen N-Verbindung.

$$\text{"NO}_2\text{"} = \text{NO}_2 + a \text{PAN} + b \text{HNO}_3 + c \text{HNO}_2 + d \text{NO}_3 + e 2 \text{N}_2\text{O}_5 + f \text{org. Nitrate} + g \text{NH}_3 + \dots$$



### 3.2.1. Geräte mit Molybdänkonverter

Beim folgenden Beispiel (Abb. 3-4) handelt es sich um ein Einkammergerät, bei welchem zusätzlich mit Hilfe eines Loops sichergestellt wird, dass es sich bei der sequentiellen Detektion von NO und NO<sub>x</sub> um Luft handelt, welche zum gleichen Zeitpunkt angesaugt wurde.

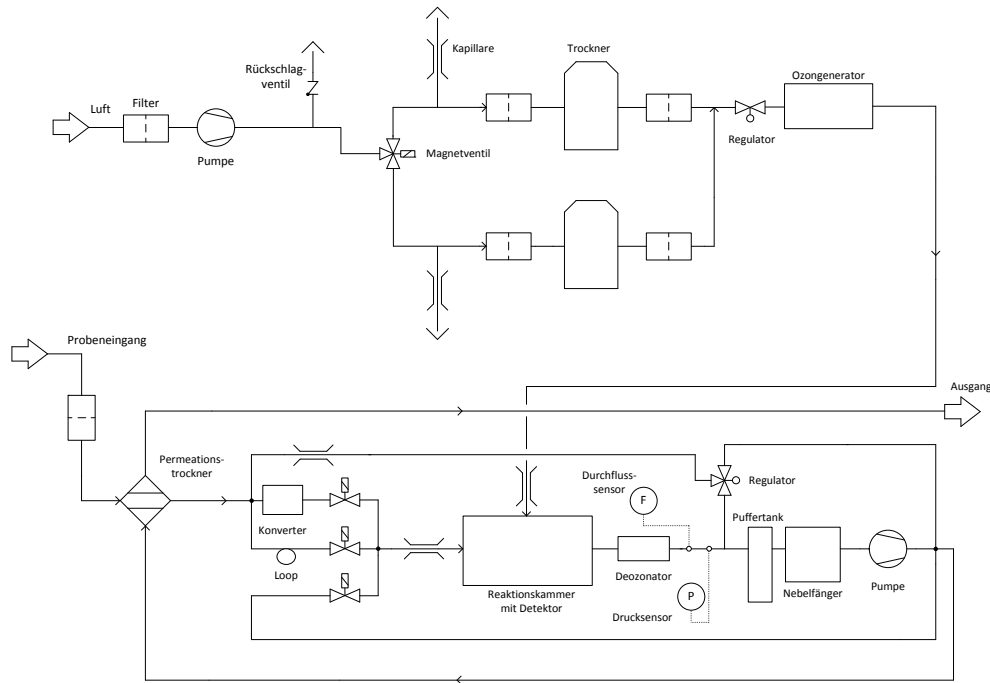


Abb. 3-4: Schematischer Geräteaufbau eines NO<sub>x</sub>-Messgerätes

Der Vorteil von nur einer Reaktionszelle und einem Detektor liegt in der Vergleichbarkeit der Messung ohne dass zusätzliche Kontrollen durchgeführt werden müssen. Mit dem Loop werden falsche NO<sub>2</sub>-Werte vermieden, die bei starken Konzentrationsschwankungen auftreten können.

#### Kalibration

Die Kalibration erfolgt mit Nullluft und NO-Kalibriergas.

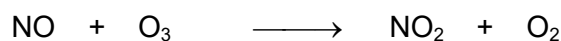
- automatische Überprüfung des Null- und Spanpunktes alle 25 Stunden
- manuelle Kalibration auf der Station alle 2 - 4 Wochen.

Der Konverterwirkungsgrad wird einmal jährlich mit Gasphasentitration (GPT) überprüft.

**Messunsicherheit** siehe Kapitel 5

#### Bestimmung des Konverterwirkungsgrades mit GPT

Die Gasphasentitration (Abb. 3-5) beruht auf der Reaktion von Stickstoffmonoxid (NO) mit Ozon (O<sub>3</sub>) zu Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>):



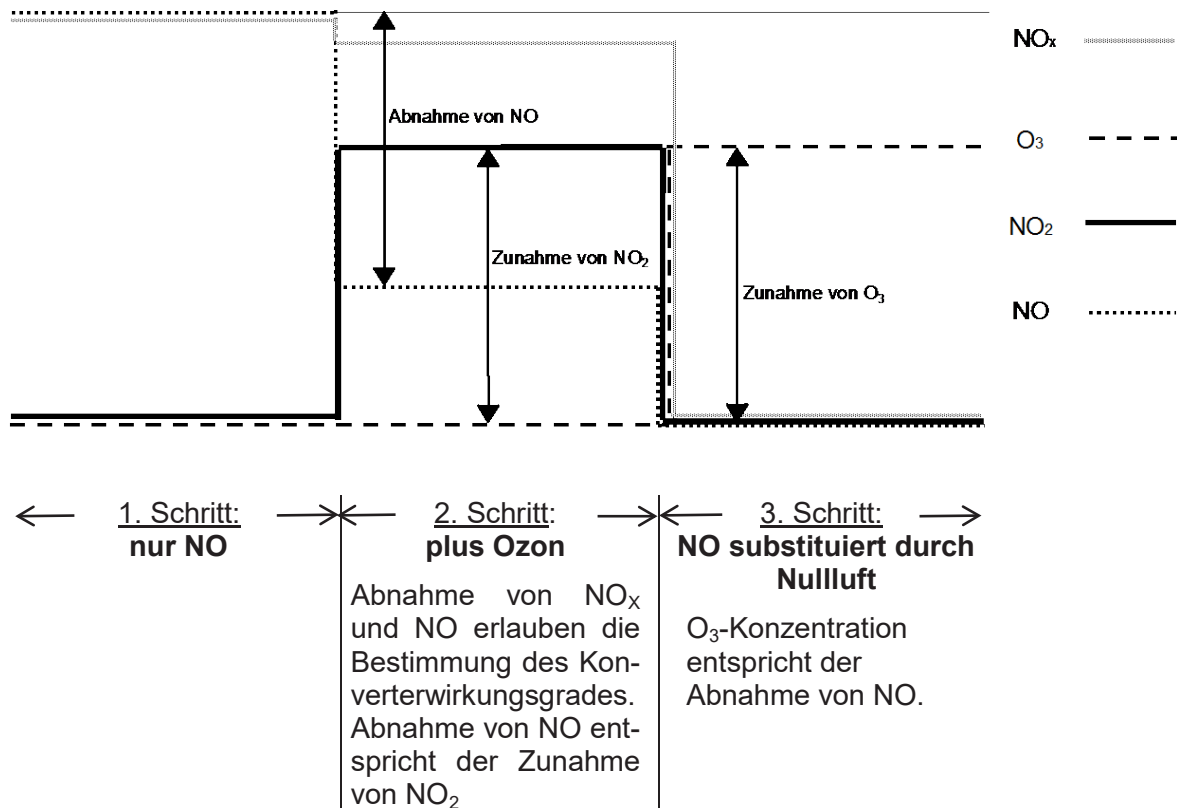


Abb. 3-5: Schematische Darstellung der Gasphasentitration

Die Reaktion verläuft relativ schnell und quantitativ, vorausgesetzt die Konzentrationen der beiden Reaktionspartner liegen im ppm Bereich vor und die Verweilzeit in der Reaktionskammer ist ausreichend. Ozon wird dabei immer im Unterschuss (50 – 90% der  $\text{NO}$ -Konzentration) eingesetzt. Unter dieser Voraussetzung kann die Konzentration von  $\text{NO}_2$  als Abnahme einer bekannten  $\text{NO}$ -Konzentration (Anfangskonzentration minus Endkonzentration von  $\text{NO}$ ) bestimmt werden.

Für die Gasphasentitration werden in einer Reaktionskammer (Glasgefäß) Ozon und  $\text{NO}$ , in hohen Konzentrationen (ppm) gemischt (Abb. 3-6).  $\text{NO}$  liegt im Überschuss vor. Anschließend wird das Reaktionsgemisch in der zweiten Kammer (Mischkammer) mit Nullluft verdünnt (ppb - Bereich).

Die empfohlenen Konzentrationen liegen in den folgenden Bereichen:

- |                                                                             |             |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| - Reaktionskonzentration $\text{NO}$ :                                      | 20 ppm      |
| - Reaktionskonzentration Ozon:                                              | ca. 15 ppm  |
| - Endkonzentration $\text{NO}$ (80% vom Geräterange d.h. für 500 ppb Range) | 400 ppb     |
| - Endkonzentration $\text{O}_3$ (75% der $\text{NO}$ Konzentration)         | ca. 300 ppb |

Analysator A  $\text{O}_3$ -Gerät zur Festlegung der optimalen Ozonkonzentration

Analysator B  $\text{NO}_x$ -Gerät für GPT

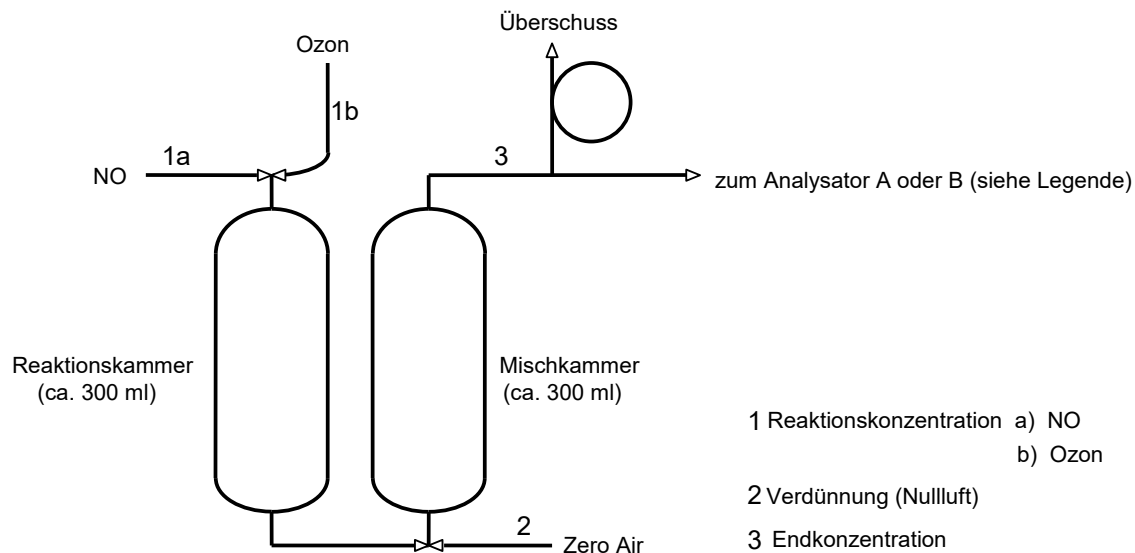


Abb. 3-6: Detaillierte Darstellung der Reaktions- und Mischkammer

### Berechnung des Konverterwirkungsgrades ( $w_K$ )

$$w_K = \left( 1 - \frac{NO_x^{1)} - NO_x^{2)}}{NO^{1)} - NO^{2)}} \right) \times 100\%$$

$NO_x^{1)}$	NOx-Konzentration während des 1. Schrittes
$NO^{1)}$	NO-Konzentration während des 1. Schrittes
$NO_x^{2)}$	NOx-Konzentration während des 2. Schrittes
$NO^{2)}$	NO-Konzentration während des 2. Schrittes

### 3.2.2. Direkte $NO_2$ -Messung

#### CAPS

Seit Oktober 2016 wird an der Station Rigi-Seebodenalp, seit Juni 2017 in Payerne und seit September 2020 wird in Beromünster das optische Messverfahren Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy (CAPS) verwendet. Dieses neuere Messverfahren erlaubt eine direkte und selektive Messung von  $NO_2$ .

#### Messprinzip

Im CAPS-Analysator T500U der Firma Teledyne API (Abb. 3-7) wird eine blaue LED als Lichtquelle, eine Messzelle mit zwei hochreflektierenden Spiegeln sowie einer Photodiode als Detektor verwendet. Das Licht wird als Rechteckfunktion moduliert und in die Messzelle eingespeist. Durch die vielen Reflektionen und die Absorption des Messgases wird die Modulation verändert und kann als Phasenverschiebung gegenüber der ursprünglichen Wellenform detektiert werden. Die Grösse dieser Phasenverschiebung ist abhängig von Gerätekonstanten wie



Zellenlänge, Reflektivität der Spiegel und Modulationsfrequenz sowie der  $\text{NO}_2$ -Konzentration. Um Störungen durch Partikel und Luftfeuchtigkeit zu eliminieren wird das Probegas gefiltert und über einen Permeationstrockner getrocknet. Die Messzelle mit der LED und dem Detektor sind in einer temperaturkontrollierten Box ( $45^\circ\text{C}$ ) untergebracht. Mittels einer internen Pumpe wird ein Probegasfluss von 0.9 l/min erzeugt. Um die gerätespezifische Phasenverschiebung zu bestimmen wird stündlich eine interne Nullmessung durchgeführt, dabei wird das Messgas während einigen Minuten über einen Aktivkohlefilter geleitet.

## Kalibration

Anfänglich wurde zur Kalibration des CAPS-Analysators  $\text{NO}_2$ -Prüfgas dynamisch mit Nullluft verdünnt. Da sich die Konzentration nur sehr langsam stabilisierte, wurde regelmässig mittels Gasphasentitration (GPT)  $\text{NO}_2$  erzeugt und auf das CAPS- sowie das  $\text{NO}_x$ -Gerät aufgegeben. Das Verhältnis beider Messwerte wurde für die Korrektur der CAPS-Daten verwendet. Da sich die Verdünnung von  $\text{NO}_2$ -Prüfgas nicht bewährt hat, wurde sie durch einen Permeationskalibrator ersetzt. Damit lässt sich eine gut reproduzierbare  $\text{NO}_2$ -Konzentration erzeugen und so den Spandrift des Analysators überprüfen.

Das mit dem Permeationskalibrator erzeugte  $\text{NO}_2$ -Gas wird alle 2 Monate mit dem  $\text{NO}_x$ -Messgerät (Chemilumineszenzdetektor) gemessen und so die Konzentration bestimmt, die für die Kalibration angewendet wird.

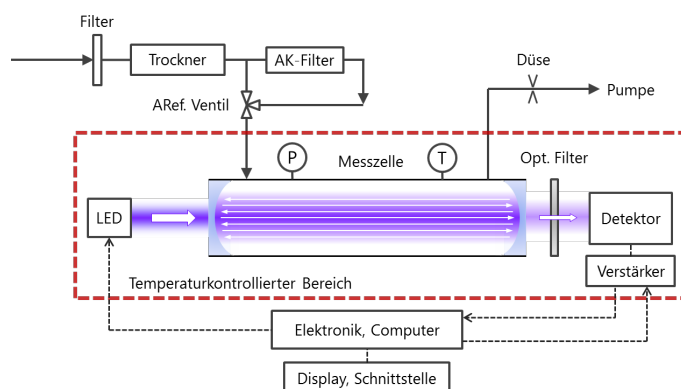


Abb. 3-7: Schematischer Geräteaufbau vom CAPS-Analysator T500U

## Direkte Laser Absorptionsspektroskopie im mittleren IR-Bereich

Seit Juli 2022 wird an der Station Jungfraujoch das Messverfahren der direkte Laser Absorptionsspektroskopie im mittleren IR-Bereich zur selektive Messung von  $\text{NO}_2$  verwendet.

### Messprinzip

Das Laserspektrometer der Firma MIRO basiert auf der direkten Absorptionsspektroskopie im mittleren Infrarotbereich. Unter Anwendung des Beer-Lambertschen Gesetzes ist mit dieser Technik eine hochselektive und hochempfindliche Messung von  $\text{NO}_2$  möglich. Wird Licht im Mid-IR-Bereich durch eine Gasprobe geschickt, kann eine Absorptionsfunktion detektiert werden, wenn die Frequenz des Lichts mit der Frequenz eines Schwingungsübergangs übereinstimmt. Für die Bestimmung von  $\text{NO}_2$  wird die Absorptionslinie bei einer Wellenzahl von  $1630.33\text{cm}^{-1}$  verwendet. Zusammen mit der Gastemperatur, der optischen Weglänge, dem

Druck und dem Absorptionsquerschnitt kann die Gaskonzentration in der Messzelle bestimmt werden.

Im Spektrometer der Firma MIRO wird ein Mid-IR Quantenkaskadenlaser (QCL) als Lichtquelle, eine Multipass-Zelle vom Typ Herriott (76 m Absorptionsweg) sowie ein MCT-basierter IR-Detektor verwendet (Abb. 3-8).

Das Gerät enthält folgende Elektronikbauteile: Ansteuerungselektronik und Temperaturregelung für den QCL, ein FPGA-basiertes Datenerfassungssystem zur Aufzeichnung des Detektorsignals und einen PC mit der MIRO-Software zur Gerätesteuerung, Erfassung, Speicherung und Anzeige der Messdaten.

Darüber hinaus gehört zum Gerät ein Magnetventil zum Umschalten zwischen Probegas- und Nullluft, eine Membran-Vakuumpumpe, mit der die Messluft durch die Absorptionszelle gesogen wird und ein geschlossener Wasserkühlkreislauf (Oasis Three) zur Temperaturstabilisierung der wichtigsten Elemente des Geräts, wie z. B. des Lasers, der Optik und der Elektronik.

### Kalibration

Um den Nullpunktdrift möglichst gering zu halten wird alle 12 Minuten über das Magnetventil während 70 s Nullluft in die Messzelle geleitet und während 30 s gemessen. Der daraus ermittelte Nullwert wird bei den darauffolgenden Messungen subtrahiert.

Einen Null- und Spanpunktüberprüfung wird automatisch alle 61 Stunden mithilfe der Gasphasentitration durchgeführt. Das Kalibriergas wird gleichzeitig auf das MIRO NO<sub>2</sub>-Gerät und den NO CLD aufgegeben und gemessen. Aus der Abnahme des NO-Wertes wird die Sollkonzentration von NO<sub>2</sub> berechnet.

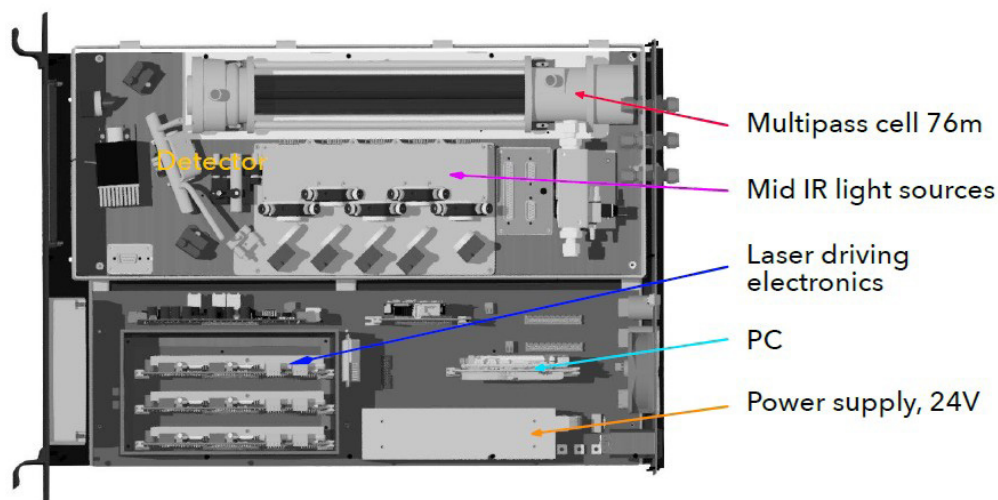


Abb. 3-8: Schematischer Geräteaufbau vom MIRO NO<sub>2</sub>-Gas Analyzer (3D CAD Model MIRO)

### 3.3. Ozon

Für die Messung von Ozon werden kontinuierliche Messverfahren, basierend auf dem UV-Absorptionsprinzip (Referenzverfahren CEN Norm EN 14625 <sup>[6]</sup>), eingesetzt.

#### Messprinzip

Das UV-Messprinzip nutzt die Absorptionsbande von Ozon bei 254 nm (Abb. 3-9) aus. Mit einer Quecksilberdampfampe, deren Resonanzlinie bei 253.7 nm liegt, wird die Messküvette durchstrahlt. Mit Hilfe eines Magnetventils wird abwechselungsweise Aussenluft und anschließend, über einen beheizten Scrubber geleitete, ozonfreie Luft der Messzelle zugeführt. Eine Photodiode am Ende der Messküvette bestimmt die Lichtintensität der ozonfreien Luft ( $I_0$ ) und der Aussenluft ( $I$ ). Die Berechnung der Ozonkonzentration erfolgt nach dem Gesetz von Lambert-Beer:

$$C = \frac{1}{k \cdot L} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot 10^9 \cdot \underbrace{\log \frac{I}{I_0}}_A$$

C ist proportional zu A

- C = Ozonkonzentration in ppb
- T = Gastemperatur in Kelvin
- $T_0$  = Standardtemperatur: 273 K
- P = Druck in mbar
- $P_0$  = Standarddruck: 1013 mbar
- $I_0$  = Lichtintensität: ozonfreie Luft (Nullluft)
- I = Lichtintensität: ozonhaltiger Luft
- k = Absorptionsfaktor  $134 \pm 2 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$
- L = Länge der Zelle in cm

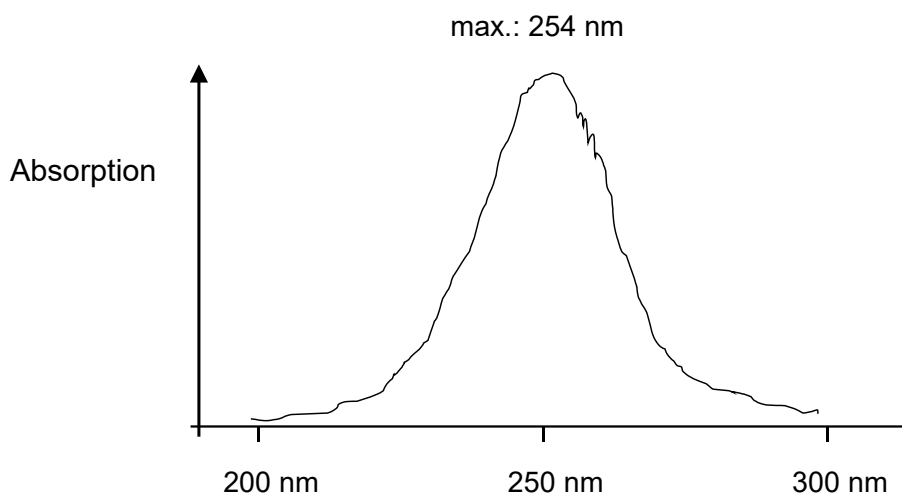


Abb. 3-9: Absorptionsspektrum von Ozon



Im Messnetz werden Geräte eingesetzt, die zwei Messzellen und zwei Detektoren besitzen. Bei diesen Geräten durchströmen das Probegas und das vom Ozon befreite Referenzgas alternierend Messzelle A und B (Abb. 3-10).

### Kalibration

Auf der Station werden der Null- und der Spannpunkt überprüft:

- alle 25 Stunden automatisch
- alle 2 - 4 Wochen manuell

Halbjährlich wird das Messgerät auf der Station mit dem TransfERNormal (Thermo 49i-PS) überprüft. Das TransfERNormal wird im Kalibrierlabor mit Hilfe des Primärnormals (Standardreferenzphotometer) kalibriert (siehe Kap. 4.2.).

### Querempfindlichkeit

Durch die alternierende Messung der Aussenluft und der ozonfreien Luft (via Scrubber) werden Querempfindlichkeiten vermieden. Verschmutzte Geräte wie auch Geräte mit verkratzten, alten Zellenfenstern zeigen negative Querempfindlichkeit auf Wasserdampf (bis 10 % Signalreduktion bei 100 % Feuchtigkeit)<sup>[7]</sup>.

**Messunsicherheit** siehe Kapitel 5

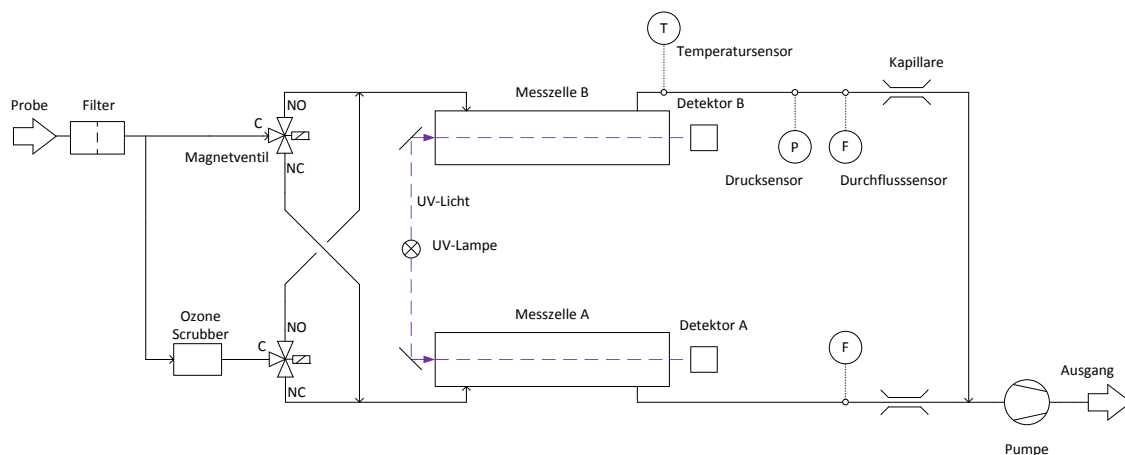


Abb. 3-10: Schematischer Geräteaufbau eines Ozon Messgerätes mit zwei Messzellen

## 3.4. Kohlenmonoxid

### 3.4.1. CO-Messung mit „Infrarot-Absorption“ (NDIR)

Zur kontinuierlichen Messung von Kohlenmonoxid in Umgebungsluft wird das Messprinzip der nichtdispersiven Infrarotabsorption (Referenzverfahren CEN Norm EN 14626 <sup>[8]</sup>) eingesetzt (Abb. 3-11).

#### Messprinzip

Die Abschwächung von infrarotem Licht bei der Passage durch eine Probenküvette ist nach dem Lambert-Beerschen Gesetz ein Mass für die CO-Konzentration in der Küvette.

Ein Teil des Messgases wird nach der Pumpe (am Messgasausgang) rückgeführt und als Referenzgas verwendet. Im Referenzgasstrom wird das CO katalytisch entfernt. Über ein Magnetventil wird abwechselnd Mess- bzw. Referenzgas in die Messküvette zwischen IR-Quelle und Detektor geleitet. Ein Teil der Infrarotenergie wird in Abhängigkeit vom CO-Gehalt des Mess- bzw. Referenzgases bereits in der Messküvette absorbiert und gelangt nicht mehr in den Detektor. Die unterschiedliche Energieaufnahme führt nun innerhalb des Detektors zur Auslenkung einer dünnen Metallmembrane (im 1-Hz-Rhythmus), deren Stellung kapazitiv abgetastet wird.

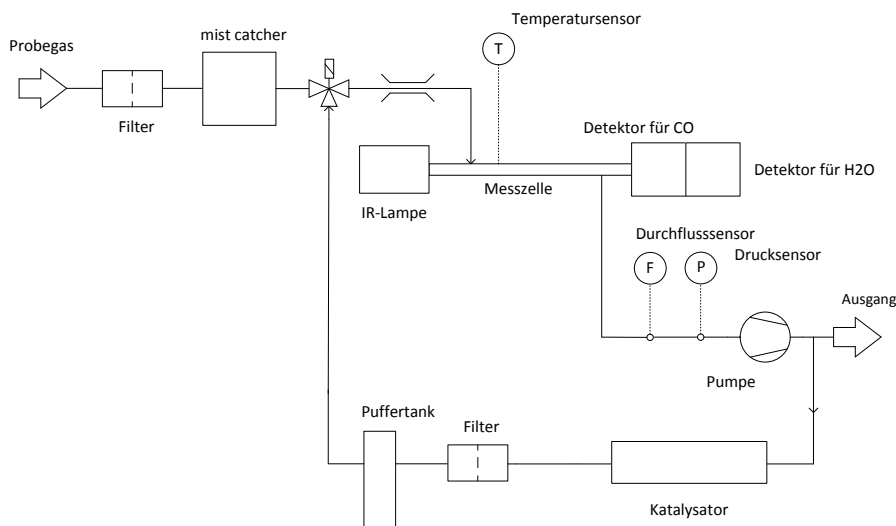


Abb. 3-11: Schematischer Geräteaufbau eines CO-Messgerätes

#### Kalibration

Die Kalibration erfolgt mit Nullluft und CO-Kalibriergas. Für die Aufbereitung der Nullluft wird keine Aktivkohle verwendet, da diese CO abgeben kann. Das CO-Gerät wird alle 2 - 4 Wochen manuell auf der Station kalibriert. Es wird keine automatische Kalibration durchgeführt.

#### Querempfindlichkeit

Die Querempfindlichkeit auf Wasserdampf kann nicht immer vollständig eliminiert werden, obwohl das Messgerät mittels eines zweiten Detektors für Wasserdampf diese Querempfindlichkeit bei der Signalberechnung berücksichtigt. Ein Feuchtigkeitsabgleich wird einmal jährlich durch die Servicefirma ausgeführt.

**Messunsicherheit** siehe Kapitel 5

### **3.4.2. CO-Messung mit „Cavity Ring Down Spectroscopy“ (CRDS)**

Seit 2012 wird auf dem Jungfraujoch, an den Stationen Payerne und Rigi, seit 2017 an der Station Beromünster und seit 2020 in Härkingen ein Spektrometer für die kontinuierliche Messung von Kohlenmonoxid eingesetzt (Picarro G2401, G2302 sowie G5310; siehe Anhang C6).

#### **Messprinzip**

siehe Kapitel 3.5. CO<sub>2</sub>-Messung mit „Cavity Ring Down Spectroscopy“ (CRDS)

Selektive Lichtabsorption für CO bei Wellenlänge 1.567 µm.

#### **Kalibration**

siehe Kapitel 3.5.

#### **Querempfindlichkeit**

siehe Kapitel 3.5.

#### **Messunsicherheit**

Die Präzision der Messungen, basierend auf 20-minütigen Analysen der Kalibrationsgase, beträgt circa 1.5 ppb für CO.



### 3.5. Kohlendioxid

#### CO<sub>2</sub>-Messung mit „Cavity Ring Down Spectroscopy“ (CRDS)

An den Stationen Jungfraujoch, Härkingen, Payerne und Rigi wird ein Spektrometer für die kombinierte kontinuierliche Messung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) eingesetzt. An den beiden Stationen Jungfraujoch und Härkingen wird zusätzlich noch Methan (CH<sub>4</sub>) gemessen.

##### Messprinzip

Das Prinzip des Analysators (Picarro G1301 und G2401) beruht auf der „Cavity Ring Down Spectroscopy“-Technik. Dazu wird ein Laserstrahl im nah-infraroten Spektralbereich in eine 25 cm lange Messzelle geleitet. Die Messzelle ist mit hoch reflektierenden Spiegeln versehen, so dass eine effektive Weglänge des Laserstrahls in der Zelle von mehr als 20 km entsteht. Ein Photodetektor misst die Intensität des durch die verspiegelte Oberfläche nach aussen dringenden Lichts, welche proportional zu der Intensität in der Messzelle ist. Wird der Laser abgeschaltet, nimmt das detektierte Signal ab, hervorgerufen einerseits durch Verluste bei der Reflektion des Laserstrahls und andererseits durch Absorption des Lichts durch Gasmoleküle in der Zelle (siehe Abb. 3-12).

Misst man die Abnahme der Lichtintensität nach Abschalten des Lasers in einem Spektralbereich in dem Verluste durch Absorption durch Gase in der Zelle keine Rolle spielen und zudem bei geeigneten Wellenlängen bei denen bestimmte Gase selektiv das Licht absorbieren (1.6032 µm für CO<sub>2</sub>) und vergleicht die beiden Lichtintensitätsabnahmen (siehe Abb. 3-13), so kann die Stärke der Abnahme des Laserlichts am Detektor bei einer der oben genannten Wellenlängen in eine Spurengas-Konzentration für das entsprechende Molekül umgerechnet werden.

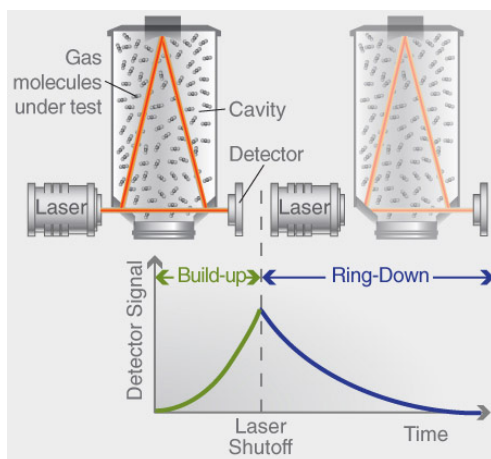


Abb. 3-12: Schematische Darstellung des Cavity Ring Down Spektrometers  
(Quelle: [www.picarro.com](http://www.picarro.com))

Die Aussenluft wurde anfänglich mit Hilfe eines Nafion-Trockners vor der Analyse getrocknet, da H<sub>2</sub>O-Moleküle eine Interferenz verursachen können (siehe Querempfindlichkeit) und die Kalibrationsgase aus Stabilitätsgründen sehr trocken sein müssen. Da das Messgerät auch den H<sub>2</sub>O-Gehalt der Probe misst, kann jedoch auch eine Wasserdampf-Korrektur vorgenommen werden. Tests haben gezeigt, dass die H<sub>2</sub>O-Querempfindlichkeit experimentell gut bestimmt werden kann und sehr reproduzierbar und langzeitstabil ist. Daher wird seit Mitte 2010

auf eine Trocknung der Probenluft verzichtet und nachträglich eine Wasserdampf-Korrektur durchgeführt.

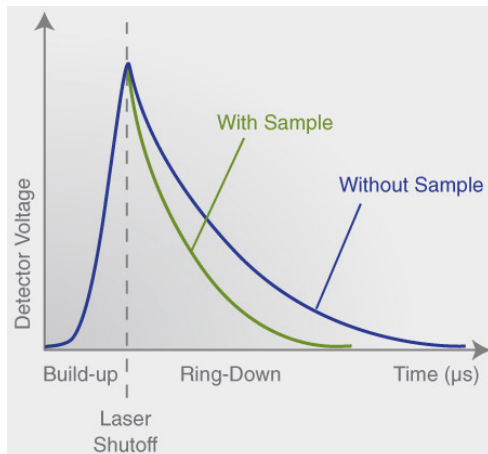


Abb. 3-13: Abnahme der Lichtintensität mit und ohne Beitrag durch Absorption an Gasmolekülen (Quelle: [www.picarro.com](http://www.picarro.com))

### Kalibration

Auf dem Jungfraujoch werden automatische 2-Punkt-Kalibrationen (beide Konzentrationen in der Nähe der typischen Aussenluftbedingungen) alle 47 Stunden durchgeführt. Zudem wird alle 15 Stunden ein Targetgas gemessen, um kurzfristigere Schwankungen der Gerätesensitivität überwachen zu können. Die Kalibrationsgase werden vor und nach dem Einsatz auf der Station im Labor gegen Primärstandards vermessen und beziehen sich auf die WMO-2000 Skala für CH<sub>4</sub> und die WMO-X2007 Skala für CO<sub>2</sub>.

Bei allen anderen Stationen erfolgt alle 4 Wochen manuell eine Zero-/Span-Kalibration.

### Querempfindlichkeit

Eine Querempfindlichkeit durch Wasserdampf in der Probenluft existiert. Eine Wasserdampf-Korrektur wird mit Hilfe des vom Gerät gemessenen Wasserdampfsignals und einer experimentell bestimmten Wasserdampfabhängigkeits-Funktion durchgeführt.

### Messunsicherheit

Die Präzision der Messungen, basierend auf 20-minütigen Analysen der Kalibrationsgase, beträgt circa 0.06 ppm für CO<sub>2</sub>.

Erweiterte Messunsicherheit

$$U_{\text{CO}_2} = 2 \cdot [(0.0302 \text{ ppm})^2 + (0.000181 \cdot c)^2]^{1/2}$$

## 3.6. Kohlenwasserstoffe

### 3.6.1. Summenmessung der Nichtmethankohlenwasserstoffe

Die kontinuierliche online Messung der flüchtigen Kohlenwasserstoffe wird mit Geräten durchgeführt, welche mit Flammenionisationsdetektoren (FID) ausgerüstet sind. Das Prinzip des FID beruht auf der Ionisation von kohlenstoffhaltigen Substanzen mittels einer Wasserstoff/Luft-Flamme. Diese Ionisation führt zur Erhöhung des Grundstroms im Detektor, welcher mit einem Elektrodensystem unter Verstärkung gemessen wird. Kohlenwasserstoffe ohne Heteroatome (z.B. Sauerstoff oder Halogene) leisten einen Beitrag proportional der Anzahl Kohlenstoffatome. Bei gleicher Konzentration ist das Messsignal von Verbindungen mit Heteroatomen reduziert.

#### Messprinzip

Der Probeluftstrom wird zweigeteilt (Abb. 3-14). Ein Teilstrom gelangt direkt zu einem FID und liefert als Signal die Summe der Kohlenwasserstoffe (THC: total hydrocarbons). Im zweiten Teilstrom wird Methan gemessen, indem der Probeluftstrom über einen selektiven katalytischen Cutter geleitet wird, welcher alle Kohlenwasserstoffe mit Ausnahme des Methans zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  oxidiert. Die Summe der Konzentrationen der so genannten Nichtmethankohlenwasserstoffe (NMHC: non-methane hydrocarbons) wird als Differenz der beiden Messsignale erhalten, wobei jede Komponente in Methanäquivalenten ( $\text{mg CH}_4/\text{m}^3$ ) in die Summe eingeht.

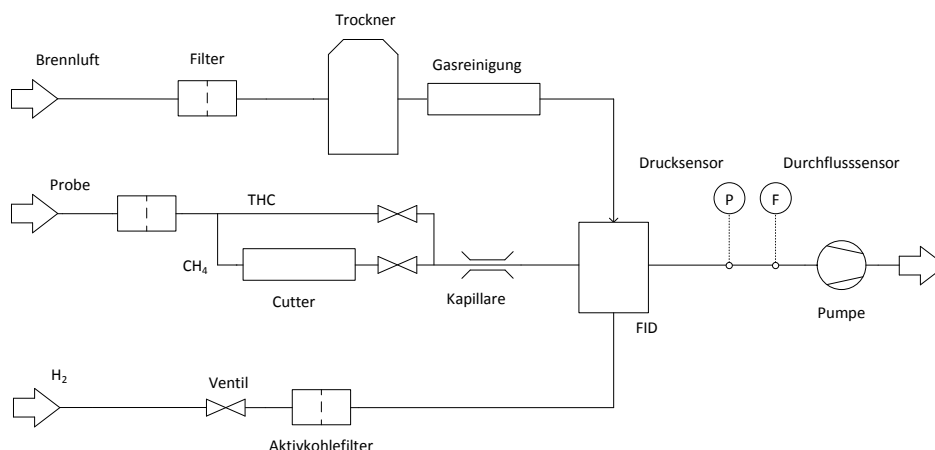


Abb. 3-14: Schematischer Geräteaufbau eines Messgerätes für Nichtmethankohlenwasserstoffe

#### Kalibration

- Manuelle Kalibration mit Nullluft und Methankalibriergas alle 4 Wochen
- Überprüfung des Cutters mit Propankalibriergas
- Es wird keine automatische Kalibration durchgeführt.

**Messunsicherheit** siehe Kapitel 5



### 3.6.2. Flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC und OVOC)

In den NABEL-Stationen Bern, Dübendorf und Beromünster werden flüchtige Kohlenwasserstoffe aus der Aussenluft aufkonzentriert, mittels der Kapillargaschromatographie aufgetrennt und mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) oder einem Photoionisationsdetektor (PID) gemessen.

#### Messprinzip

Abbildung 3-15 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung des Messprinzips. Die Probeluft wird auf einer Trap, die mit einem Adsorbens gefüllt ist, angereichert und anschliessend thermisch desorbiert. Die Auftrennung des Substanzgemisches erfolgt im Gaschromatographen auf einer Kapillarsäule. Am Ende der Kolonne gelangen die Substanzen im Trägergasfluss in den Detektor.

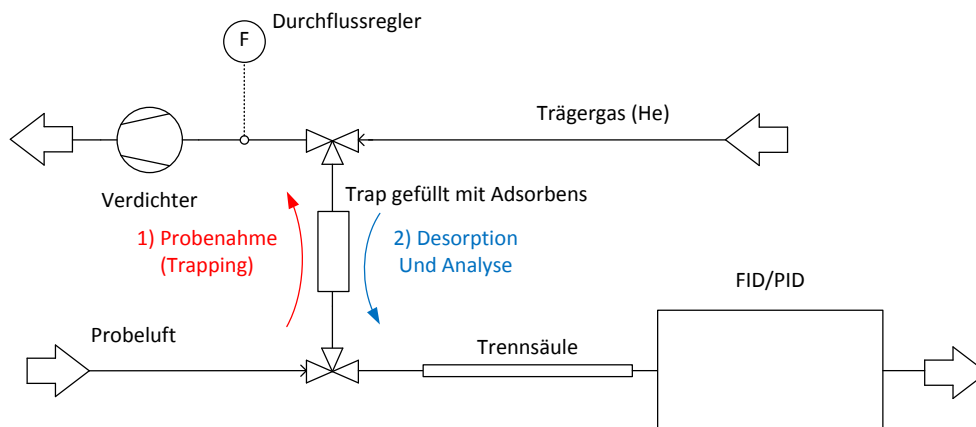


Abb. 3-15: Vereinfachte Darstellung des Messprinzips  
(Beromünster: FID; Bern, Dübendorf: PID)

An der Station Beromünster werden mit dem FID 21 Kohlenwasserstoffe sowie 8 oxidierte Kohlenwasserstoffe (OVOC) analysiert. In Dübendorf werden mit einem PID nur Benzol und Toluol und am Standort Bern die BTX (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und 3 Xylol-Isomere) gemessen.

#### FID (Flammenionisations-Detektor)

Das Messprinzip des FID beruht darauf, dass die organische Substanz in einer Wasserstoff-Flamme verbrennt und ionisiert wird. Die gebildeten Ionen fliegen auf einen Kollektor und werden als positives Detektorsignal registriert. Die Menge der gebildeten Ionen ist proportional zu der Konzentration des Moleküls im Detektor und dessen Anzahl oxidierbarer Kohlenstoffatome.

#### PID (Photoionisations-Detektor)

Das Messprinzip des PID beruht darauf, dass die Moleküle durch starkes UV-Licht ionisiert werden. Diese bilden schwach positiv geladene Ionen, welche gemessen werden.

## Probenahme

Die Probenahme erfolgt gleich wie bei den anderen Luftschadstoffen über die Ansaugsonde auf dem Dach der Messstation. Von der Ringleitung im Innern der Station führt eine kurze (2 m) Stichleitung zum Messgerät.

In Beromünster erfolgt pro Stunde eine Probenahme, wobei während der ersten 20 Minuten ein Probevolumen von insgesamt 400 ml auf die Trap gelangt. In Bern und Dübendorf erfolgt die Probenahme kontinuierlich alle 20 Minuten.

## Chromatographische Bedingungen

	Beromünster	Bern/Dübendorf
Trap:	Markes Cold Trap Ozone Precursor	Tenax GR
Trapkühlung:	Peltier-Element	-
GC:	Agilent 7890B	Synspec GC955
Trennsäule:	VOC: PLOT Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; 50 m x 0.53 mm ID  OVOC: GS-OxyPLOT; 30 m x 0.53 mm ID	BGB 2.5
Trärgas:	Helium 60	Stickstoff 50
Make-up Gas FID:	Stickstoff 50	
Brenngas FID:	H <sub>2</sub> -Generator	
Detektortemperaturen:	280° C (FID)	

## Quantifizierte Verbindungen

Beromünster		
FID	Ethan; Ethen; Ethin; Propan; Propen; n-Butan; Isobutan; Butadien; n-Pentan; Isopentan; Isopren; n-Hexan; Summe der Isohexane; Summe der Isoheptane; Benzol; Toluol; Ethylbenzol; Summe m-/p-Xylol; o-Xylol; Acetaldehyd, Methanol, Ethanol, Summe Propanol und iso-Propanol, Aceton, Butan-2-on (MEK), 2-Methoxy-2-methylpropan (MTBE), Ethyl-acetat, Acetonitril, α-Pinen, Limonen	
<hr/>		
	Bern	Dübendorf
PID	Benzol; Toluol; Ethylbenzol; Summe m-/p-Xylol; o-Xylol	Benzol; Toluol

### Messunsicherheit

Aufgrund der Qualität der Chromatogramme (Auftrennung, Peaküberlagerungen, Integrationsprobleme bei verzerrten Peakformen, Reproduzierbarkeit der Kalibriergasmessungen) wurde ein Vertrauensbereich wie folgt abgeschätzt:

$$\pm 10 \%$$

### Bestimmungsgrenze

Beromünster	Bern/Dübendorf
Für die mit dem FID quantifizierten Kohlenwasserstoffe liegt die Bestimmungsgrenze bei etwa 0.02 ppb.	Für die mit dem PID quantifizierten Kohlenwasserstoffe liegt die Bestimmungsgrenze bei etwa 0.02 ppb.

### Kalibration

Eine Kalibration erfolgt an allen Stationen etwa alle 4 Wochen. Es wird ein Primärnormal verwendet, welches ca. 4 ppb der gemessenen Verbindungen in Stickstoff enthält (NPL, England) oder ein davon abgeleiteter Arbeitsstandard mit kalibrierter Aussenluft.

Die Konzentrationen der oxidierten Kohlenwasserstoffe werden mit einem theoretischen Kalibrationsfaktor (effektive Kohlenstoffzahl) relativ zu Ethan berechnet.

## 3.6.3. Methan

Seit Dezember 2009 wird auf dem Jungfrauoch ein Spektrometer für die kombinierte kontinuierliche Messung von Methan (CH<sub>4</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) eingesetzt.

### Messprinzip

siehe Kapitel 3.5. CO<sub>2</sub>-Messung mit „Cavity Ring Down Spectroscopy“ (CRDS)

Selektive Lichtabsorption für CH<sub>4</sub> bei Wellenlänge 1.6510 µm.

### Kalibration

siehe Kapitel 3.5.

### Querempfindlichkeit

siehe Kapitel 3.5.

### Messunsicherheit

Die Präzision der Messungen, basierend auf 20-minütigen Analysen der Kalibrationsgase, beträgt circa 0.3 ppb für CH<sub>4</sub>.

Erweiterte Messunsicherheit

$$U_{\text{CH}_4} = 2 \cdot [(0.31 \text{ ppb})^2 + (0.000361 \cdot c)^2]^{1/2}$$



### 3.7. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )

Seit 2011 wird an den Stationen Payerne und Tänikon und seit Anfang 2018 an der Station Beromünster ein Spektrometer zur kontinuierlichen Messung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) eingesetzt. Bis 2011 wurde an den Standorten Härkingen, Payerne und Tänikon das Messprinzip der Photoakustischen Spektroskopie (PAS) verwendet. An weiteren Standorten wurden in den vergangenen Jahren zeitlich begrenzte Messungen durchgeführt (siehe Anhang C6).

#### $\text{NH}_3$ -Messung mit Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)

##### Messprinzip

Das Prinzip des Analysators (Picarro G1103 und G2103) beruht auf der „Cavity Ring Down Spectroscopy“-Technik (siehe Kapitel 3.5., Abb. 3-12 und 3-13). Bei der Messung von Ammoniak mit geschlossenen Messinstrumenten (Messinstrumente mit geschlossener Messkammer) ist es kaum zu vermeiden, dass Ammoniak auf den Oberflächen der Ansaugleitung adsorbiert. Ammoniak wird auf den meisten Oberflächen nicht irreversibel angelagert, sondern nach einer gewissen Zeit wieder freigesetzt. Durch diese Wechselwirkung von Ammoniak mit den Oberflächen in der Ansaugleitung ist die gemessene Ammoniakkonzentration gegenüber der wahren Konzentration in der Aussenluft typischerweise gepuffert und zeitlich verschleppt. Um diese Oberflächeneffekte möglichst klein zu halten werden für die Ansaugleitung nur geeignete Materialien verwendet (PFA und PTFE), die Verweilzeit der Aussenluftprobe in der Ansaugleitung wird zudem so kurz wie möglich gehalten. Ausserdem wird durch leichtes Heizen der Ansaugleitung (ca. 5 °C über Aussentemperatur) verhindert, dass Wasser in der Ansaugleitung kondensieren und das gasförmige Ammoniak absorbieren kann. Die zeitliche Verschleppung des Ammoniaksignals in der gewählten Messanordnung konnte noch nicht abschliessend bestimmt werden.

Da auf dem Probeluft-Filter abgeschiedene  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Aerosole schon bei Raumtemperatur mit der Zeit zu einem grossen Teil zu  $\text{NH}_3$  und  $\text{HNO}_3$  dissoziieren, werden (vor allem im Winter) fälschlicherweise zu hohe  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen gemessen. Deshalb wird im Winterhalbjahr ein auf 10°C gekühltes Filter verwendet, womit dieser Effekt erheblich vermindert werden kann. Um eine Wasserkondensation auf dem gekühlten Filter zu verhindern wird dabei die Probeluft mit getrockneter  $\text{NH}_3$ -freier Luft verdünnt. Beim gekühlten Filter handelt es sich um eine Empa-Eigenentwicklung und einen Eigenbau.

##### Kalibration

Alle 2 - 4 Wochen wird  $\text{NH}_3$ -Prüfgas (Konzentration ca. 70 ppb  $\text{NH}_3$ ) und Nullluft für die Kalibration verwendet. Das Prüfgas wird mit einem Permeationskalibrator SONIMIX 6000C (LNI Swissgas, Genf) erzeugt. Die Kalibratoren werden jährlich mit dem Transferstandard (SONIMIX 3014 Permeationskalibrator) auf den Stationen überprüft. Dieser wird ebenfalls jährlich, nasschemisch mittels Impinger-Probenahme und Ionenchromatographie im Empa-Labor überprüft.

##### Querempfindlichkeit

Eine Querempfindlichkeit mit  $\text{H}_2\text{O}$  besteht, wird jedoch vom Gerät automatisch korrigiert.

##### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit bzw. der Messfehler wird durch die Verluste und Freisetzung von Am-

moniak in der Ansaugleitung dominiert (siehe Messprinzip, oben). Bei zeitlich höher aggregierten Werten (z.B. 14-Tage Mittelwert) mitteln sich diese Effekte aus, die Messunsicherheit ist dann  $< 20\%$ . Für zeitlich hoch aufgelöste Werte (z.B. Stundenmittelwerte) konnte die Messunsicherheit noch nicht bestimmt werden.

### 3.8. Lachgas (N<sub>2</sub>O)

Seit 2017 wird an der Station Beromünster und seit August 2021 an der Station Jungfrauoch ein Spektrometer für die kontinuierliche Messung von Lachgas eingesetzt (Picarro G5310). Bis 2021 waren am Standort Jungfrauoch GC-ECD (Gaschromatographie mit Elektroneneinfangdetektion) und OA-ICOS (Off-Axis Integrated Cavity Output) im Einsatz (siehe Anhang C6).

#### N<sub>2</sub>O-Messung mit CRDS

Seit 2017 wird an der Station Beromünster ein Spektrometer für die kontinuierliche Messung von Lachgas eingesetzt (Picarro G5310; siehe Anhang C6).

#### Messprinzip

siehe Kapitel 3.5. CO<sub>2</sub>-Messung mit „Cavity Ring Down Spectroscopy“ (CRDS)

#### Kalibration

Automatische 2-Punkt-Kalibrationen (beide Konzentrationen in der Nähe der typischen Außenluftbedingungen) werden alle 25 Stunden durchgeführt. Zudem wird alle 6 Stunden ein Targetgas gemessen, um kurzfristigere Schwankungen der Gerätesensitivität überwachen zu können. Die Kalibrationsgase werden vor und nach dem Einsatz auf der Station im Labor gegen Primärstandards vermessen und beziehen sich auf die WMO-X2006A Skala für N<sub>2</sub>O.

#### Querempfindlichkeit

siehe Kapitel 3.5.

#### Messunsicherheit

Die Präzision der Messungen, basierend auf 15-minütigen Analysen der Kalibrationsgase, beträgt circa 0.1 ppb für N<sub>2</sub>O.



## 3.9. Feinstaub

Als Feinstaub wird die Partikelfraktion mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm (PM10) definiert.

Die Konzentration von Feinstaub kann als Partikelanzahl oder als Partikelmasse pro Volumeneinheit definiert werden. Man unterscheidet dementsprechend

- Partikelmassenkonzentrationen (Masse/Volumen) siehe Kap. 3.9.1 - 3.9.9
- Partikelanzahlkonzentrationen (Anzahl Teilchen/Volumen) siehe Kap. 3.9.10 - 3.9.11

### 3.9.1. Gravimetrische Feinstaubmessung

**PM10<sub>grav.</sub>**: Die Immissionsgrenzwerte der LRV (Änderung vom 15.12.97, in Kraft seit 1.3.98) für Feinstaub sind als Massenkonzentrationen der Partikelfraktion unterhalb eines aerodynamischen Durchmessers von 10 µm (PM10) definiert. Auf das Jahr 1997 wurde im NABEL-Messnetz von TSP (Total Suspended Particulates, Schwebstaub) auf PM10 umgestellt. Parallelmessungen zwischen PM10 und TSP wurden von der Empa<sup>[9]</sup> durchgeführt.

**PM2.5<sub>grav.</sub>**: Seit 1998 wird an einigen charakteristischen Standorten (siehe Anhang C6) die Massenkonzentrationen der Partikelfraktion unterhalb eines aerodynamischen Durchmessers von 2.5 µm (PM2.5) gemessen.

#### Messprinzip

Die Referenzmethode<sup>[10]</sup> zur Bestimmung der Partikelmassenkonzentration ist die gravimetrische Methode. Ein genau bekanntes Luftvolumen wird über einen Quarzfaserfilter angesaugt. Der Filter wird unter definierten Klimabedingungen\*) vor und nach der Probenahme gewogen. Die Feinstaubkonzentration wird aus der Differenz der beiden Wägungen und dem aktuellen Probeluftvolumen berechnet.

Seit dem 1. Januar 2015 wird das Volumen bezogen auf die tatsächlichen Betriebs- und Bezugsbedingungen berechnet (siehe Anhang B2).

\*)Klimabedingungen zur Filterkonditionierung:

vor Tarawägung:	96 h bei 95% relativer Feuchte (r.F.), 96 h im Wägeraum bei 20 ± 1 °C / 45 - 50 % r.F.
vor Wägung des exponierten Filters:	96 h im Wägeraum bei 20 ± 1 °C / 45 - 50 % r.F.

#### Probenahme

Für die Probenahme wird ein High-Volume-Gerät (HIVOL) des Typs Digitel DHA-80 (Abb. 3-16) mit automatischem Filterwechsler für max. 16 Filter verwendet. Das Gerät ist detailliert in der VDI-Richtlinie VDI 2463 Bl. 11<sup>[11]</sup> beschrieben. Der für die Messung verwendete Probenahmekopf der Firma Digitel ist auf Grund des Testberichts der UMEG<sup>[12]</sup> äquivalent zu dem Referenzverfahren nach EN12341<sup>[10]</sup>. Der hohe Luftdurchsatz (30 m³/h für PM10 und PM2.5) erlaubt das Messen grösserer Staubmengen. Es werden Tagesproben mit einem Probevolumen von 720 m³ (Ausnahme Jungfrauoch: 1075 m³) und einer belegten Filterfläche mit einem Durchmesser von 14 cm erhoben. Der Probewechsel erfolgt an allen Stationen um Mitternacht. Seit dem 1. April 2019 wird für PM10 an allen Stationen (ausser Jungfrauoch, Payerne und Rigi) jeden 2. Tag eine Probe gesammelt. An den Standorten Jungfrauoch, Payerne und Rigi werden tägliche Probenahmen durchgeführt (siehe Anhang C6). Für PM2.5 wird an allen

Stationen jeden 4. Tag eine Probe gesammelt. An den beiden Stationen Lausanne und Bern wird ein HIVOL mit gekühltem Filterraum des Typs DHA-80-C verwendet (siehe Anhang C6).

### Geräte, Material

HIVOL mit automatischem Filterwechsel	Digitel
Probenahmesonde PM10, PM2.5	Digitel
Waage XP205 mit Antistatic-Kit	Mettler
Referenzgewicht F1, 1 g	Mettler
Filterbeutel	PAWI
Klimaraum $20 \pm 1$ °C / 45 - 50 % r.F.	Empa
Befeuchtungszelle	Empa
Quarzfaserfilter:	
Pallflex XP56 Tissuquartz 2500QAT-UP	
Durchmesser d = 15 cm (belegte Filterfläche: d = 14 cm)	Pall (Schweiz)

### Weitere verwendete Filtermaterialien:

1980 - 1984	Sartorius Nr. 13400, Glasfaserfilter
1985 - 1996	Binzer 227/1/60, Glasfaserfilter
1997 - 2005	Ederol 227/1/60, Glasfaserfilter
2006 - März 2009	Whatmann QMA 1851150, Quarzfaserfilter

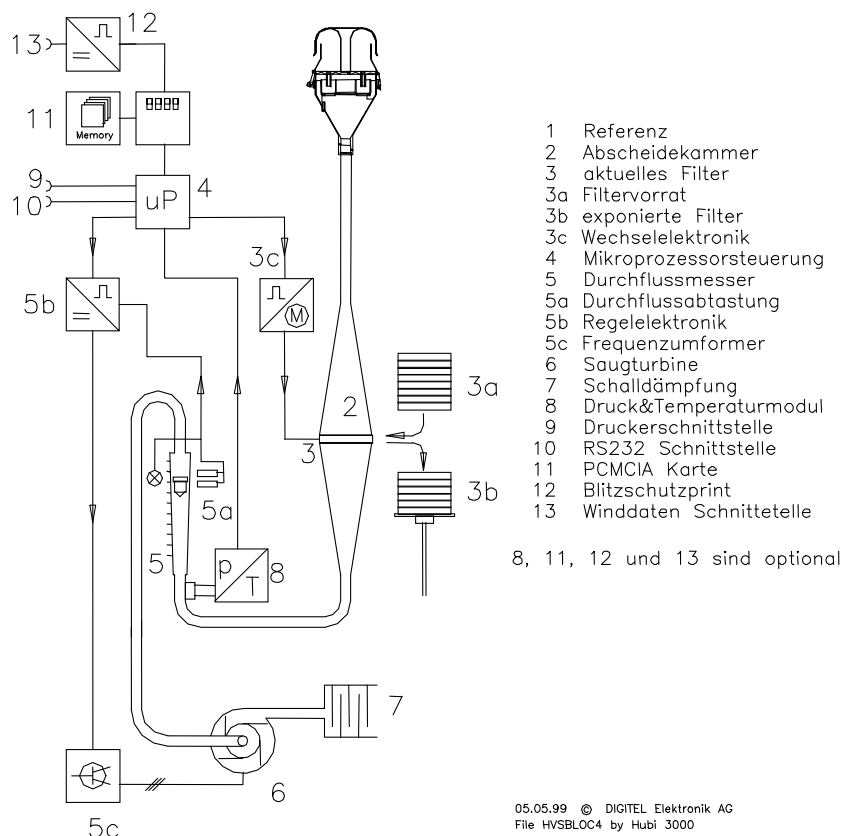


Abb. 3-16: Schematische Darstellung eines Probenahmeegerätes DHA-80 von Digital

## Kalibration

Der Volumenstrom des DHA-80 wird regelmässig mit einem externen Referenzrotameter überprüft. Dieses externe Rotameter wird mit einer Messblende kalibriert. Zudem werden die Geräte auf allfällige Lecks überprüft. Die detaillierten Ausführungen sind im Anhang B1 enthalten. Die Waage wird vor Gebrauch mit dem internen Kalibriergewicht kalibriert und zusätzlich vor jeder Messreihe mit einem Referenzgewicht von 1 g überprüft.

## Messunsicherheit

Tagesmittelwert	+/- 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Jahresmittelwert	+/- 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

## Bestimmungsgrenze

Tagesmittelwert	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
-----------------	----------------------------

## 3.9.2. Kontinuierliche Feinstaubmessung

### Feinstaubmonitor PALAS Fidas 200

Zwischen Ende 2014 und Mitte 2018 wurde an allen Standorten das Messgerät für die kontinuierliche Bestimmung von PM<sub>10</sub> durch das Fidas 200 von PALAS ersetzt (Details siehe Anhang C6).

#### Probenahme

Als Probenahmekopf wird entweder ein Sigma-2 oder ein Digital Low Volume-Einlasskopf verwendet um das Einlassrohr vor Niederschlag und Insekten zu schützen. Bei beiden handelt es sich um einen TSP Kopf und es findet keine grössenselektive Abscheidung im Probenahmekopf statt.

#### Messprinzip

Das PALAS Fidas 200 ist ein EN 16450<sup>[13]</sup>-zertifiziertes optisches Feinstaubmessgerät für die kontinuierliche und simultane Erfassung der Massenkonzentration von PM<sub>2.5</sub> und PM<sub>10</sub>. Es arbeitet mit einem Aerosolspektrometer, welches über die Streulichtanalyse am Einzelpartikel nach Lorenz-Mie die Partikelgrösse bestimmt. Aus der Grössenverteilung werden die PM-Werte abgeleitet.

Der Streulichtsensor vom Fidas arbeitet mit einer polychromatischen LED-Lichtquelle und ist mit einer T-Blende ausgestattet (Abb. 3.17). Diese Optik erlaubt es, Randzonenfehler zu eliminieren, die sonst zu einer Verschiebung der Partikelzahlen zu den kleinen Grössenklassen führt. Ebenso kann mit der T-Blendenoptik Koinzidenz (mehr als ein Partikel im Detektionsvolumen) erkannt werden. Das von jedem Partikel gestreute Licht wird unter einem Winkel von 85° bis 95° über einen Spiegel an den Detektor weitergeleitet. Die Partikelanzahl wird anhand der Anzahl Streulichtimpulse ermittelt wobei die Intensität des Impulses ein Mass für die Partikelgrösse ist. Der Messbereich des Fidas umfasst Partikel in der Grösse von 0.18 bis 18  $\mu\text{m}$ . Die ermittelte Partikelgrösse wird einer Grössenklasse zugeordnet und daraus die Grössen-



verteilung abgeleitet. Davon ausgehend wird in mehreren Berechnungsschritten mit Hilfe eines Korrelationsfaktors die Massenkonzentration der verschiedenen Fraktionen berechnet. Der Korrelationsfaktor widerspiegelt die unterschiedlichen Quellen eines Partikels (z.B. Verbrennungsaerosol, Pollen, Reifenabrieb). Diverse Korrekturen und Annahmen sind dazu nötig. Die PM-Konzentrationen werden als gleitende Mittelwerte (in der Regel 15min) ausgegeben.

## Kalibration

Der Abgleich der Empfindlichkeit des Partikelsensors erfolgt mit monodispersen Kalibrierstaub des Herstellers (CalDust 1100 oder MonoDust 1500), der eine Partikelgrösse von 0.93 resp. 1.28  $\mu\text{m}$  aufweist. Damit wird die Grössenklassierung des Spektrometers 2-monatlich überprüft und justiert. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass die Grössenklassierung recht stabil bleibt und nur selten justiert werden muss.

Die nachfolgenden Kontrollen erfolgen alle drei Monate: Der Nullpunkt wird mit einem gerätespezifischen HEPA-Filter überprüft, zudem wird ein Offsetabgleich durchgeführt, bei dem der elektronische Nullpunkt des Systems automatisch abgeglichen wird. Dadurch wird das Eigenrauschen des Gerätes minimiert. Ebenfalls wird die Dichtigkeit des gesamten Messsystems geprüft sowie der Volumenstrom der angesaugten Aussenluftprobe (4.8 l/min) mit einem Referenzdurchflussmessgerät überprüft und wenn nötig kalibriert. Schliesslich wird die Partikelgeschwindigkeit im Sensor mittels Aufgabe von Kalibrierstaub überprüft.

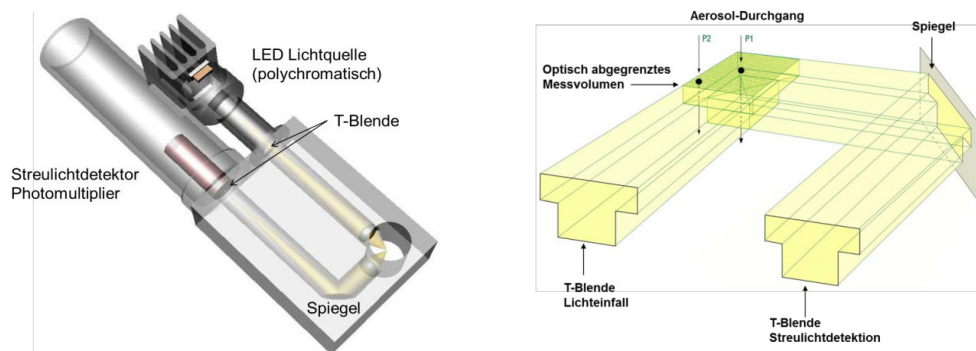


Abb. 3-17: Aufbau des Sensors des Fidas Messsystems und Veranschaulichung der T-Blende  
(Quelle: Bedienungsanleitung Feinstaubmonitorsystem Fidas, PALAS GmbH)

## Querempfindlichkeit

Um den Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf die Aerosolmessung zu vermeiden, wird die Probeluft über ein beheizbares Einlassrohr angesogen. Das sogenannte IADS (Intelligent Aerosol Drying System) wird in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit geregelt. Die Minimaltemperatur des IADS beträgt 23°C, ab 60% rel. Feuchte wird das Rohr bis auf 50 – 60°C erwärmt. Dazu ist am Fidas ein Meteofühler angeschlossen, der die Temperatur, relative Feuchtigkeit und den Druck in der Umgebungsluft misst.

### **Korrektur der kontinuierlich gemessenen PM10- und PM2.5-Konzentrationen**

Die Messprinzipien von Feinstaubmessungen mittels gravimetrischem Referenzverfahren und solcher mit der optischen Streulichtmethode sind grundverschieden. Die Abhängigkeit der Messwerte dieser unterschiedlichen Methoden ist typischerweise jedoch linear. Aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung oder zeitlicher Veränderungen der chemischen Zusammensetzung von Feinstaub, ist die lineare Beziehung zwischen beiden Messprinzipien allerdings abhängig vom Standort und der Zeit.

Es ist daher notwendig, die mit den Fidas 200 gemessenen Feinstaubkonzentrationen zu korrigieren, so dass die Messwerte gleichwertig zum manuellen gravimetrischen Referenzverfahren sind (SN EN 16450:2017<sup>[13]</sup>). Die Gleichwertigkeit gegenüber dem gravimetrischen Referenzverfahren stellt die Vergleichbarkeit der kontinuierlichen Feinstaubmessungen sicher. Dazu sind parallele Messungen mit beiden Messverfahren notwendig. Die Mindestanforderung an parallelen Messungen zum Nachweis der Gleichwertigkeit sind in SN EN 16450<sup>[13]</sup> beschrieben. Das Partikelmessprogramm des NABEL übertrifft diese Mindestanforderungen. Basierend auf den parallelen Messungen werden die automatisch gemessenen Feinstaubkonzentrationen korrigiert. Bis 2018 wurde diese Korrektur mit der in Gehrig et al. (2005)<sup>[14]</sup> beschriebenen Methode durchgeführt, seit 2019 erfolgt die Datenkorrektur mit einer gleitenden Regressionsmethode (Müller und Hüglin, 2015)<sup>[15]</sup>.

An der ländlichen und erhöht gelegenen NABEL-Station Davos-Seehornwald werden die Feinstaubmessungen 25 m über Grund auf einem Messturm nur mit einem automatischen Messgerät durchgeführt, es gibt in Davos Seehornwald daher keine gravimetrischen Feinstaubmessungen. An den Stationen Beromünster, Chaumont und Jungfrauoch fehlen gravimetrische Messungen von PM2.5. An diesen Stationen werden die entsprechenden kontinuierlich gemessenen Feinstaubkonzentrationen nicht korrigiert. Dies bedeutet, dass die Feinstaubwerte PM10 und PM2.5 von Davos-Seehornwald sowie PM2.5 von Beromünster, Chaumont und Jungfrauoch höhere Messunsicherheiten aufweisen und daher als orientierende Messwerte aufgefasst werden sollten. Aufgrund der typischen Datenkorrektur der automatischen Feinstaubmessungen kann die Messunsicherheit dieser orientierenden Werte mit etwa 25% angegeben werden.

### **3.9.3. Metalle im Feinstaub**

#### **3.9.3.1 Messung von Metallen im Feinstaub (HIVOL)**

Im Feinstaub werden aufgrund der Grenzwerte in der LRV die beiden Metalle Blei (Pb) und Cadmium (Cd) bestimmt, zusätzlich werden seit dem 01.01.2006 auch Arsen (As), Nickel (Ni) und Kupfer (Cu) analysiert.

Aus den Quarzfaserfiltern der Feinstaubmessung werden Teilfilter gestanzt, welche in einem Mikrowellenofen nach EN 14902 aufgeschlossen werden. Die Metalle werden im Feinstaub mittels Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) quantitativ bestimmt.

#### **Bildung der Stichproben und Probenvorbereitung**

Pro Station werden in einem Jahr ca. 182 Tagesproben gezogen. Aus jedem Filter wird ein Teilfilter mit einem Durchmesser von 0.8 cm ausgestanzt. Die so erhaltenen 182 Teilfilter werden vereinigt und mit 15 ml konz. Salpetersäure (65 %) plus 3 ml Wasserstoffperoxid (30 %) in Hochdruck-Teflongefäßen mit Quarzglaseinsätzen im Mikrowellenofen aufgeschlossen. Die

auf 50 ml verdünnte Aufschlusslösung wird abfiltriert. Ein Aliquot dieser Lösung wird mit Salpetersäure (1 %) verdünnt, mit internem Standard versetzt und mit ICP-MS analysiert.

Alle zur Analyse verwendeten Glaswaren werden in einer Dampfreinigungsapparatur mit Salpetersäure gereinigt.

Jede Aufschluss- und Analysenserie wird mit dem zertifizierten Teststaub ERM-CZ120 (Fine Dust, PM10-like) kontrolliert. Die Matrix dieses Referenzstaubes entspricht derjenigen einer realistischen Feinstaubprobe.

### Aufschluss

Mikrowellenofen-Programm für 10 Hochdruckgefäße mit Quarzglaseinsätzen:

Zeit (Minuten)	Temperatur (°C)	Leistung (Watt)
7	120	1200
15	190	1200
10	190	800

### Messprinzip (ICP-MS)

Die wässrigen Proben werden von einem Probengeber über eine peristaltische Pumpe in das Zerstäubersystem gebracht (Abb. 3-18). Das entstandene Aerosol wird danach in ein induktiv gekoppeltes Argonplasma geblasen. Bei einer Temperatur von 6000 - 8000 K werden die Tropfen der Probe eingetrocknet und ionisiert. Die Ionen passieren dann zwei kegelförmige, wassergekühlte Lochblenden aus Metall und werden danach mit elektrostatischen Linsen auf die Eintrittsöffnung des Massenspektrometers fokussiert. Der Druck wird in zwei Stufen auf etwa  $10^{-8}$  bar reduziert. Das Quadrupolmassenspektrometer besteht aus vier parallelen Stäben, an die ein elektrisches Wechselfeld angelegt wird. Nur die Ionen einer bestimmten Masse erhalten eine stabile Flugbahn und können nach dem Analysator auf den Detektor treffen. Durch die Veränderung des angelegten Feldes werden verschiedene Massen nacheinander bestimmt.

Die folgenden Isotope werden quantifiziert:

$^{111}\text{Cd}$

$^{206}\text{Pb}$  und  $^{208}\text{Pb}$

$^{60}\text{Ni}$

$^{75}\text{As}$

$^{63}\text{Cu}$  und  $^{65}\text{Cu}$

$^{187}\text{Re}$  wird als interner Standard zur Kontrolle des Analysensystems verwendet

### Kalibration

Es wird eine 4-Punktkalibration durchgeführt. Die dazu verwendeten Gebrauchsstandardlösungen werden mit den folgenden Konzentrationen vor jeder Messreihe durch Verdünnen der Standardlösungen hergestellt.



	<b>Cadmium</b> µg/l	<b>Blei</b> µg/l	<b>Arsen</b> µg/l	<b>Nickel</b> µg/l	<b>Kupfer</b> µg/l	<b>Thallium*</b> µg/l	<b>Zink*</b> µg/l
Standard 1	0.05	1	0.1	0.5	2.5	0.01	5
Standard 2	0.1	2	0.2	1.0	5	0.02	10
Standard 3	0.2	4	0.4	2.0	10	0.04	20
Standard 4	0.5	10	1.0	5.0	25	0.1	50

\* Thallium und Zink werden auch kalibriert, aber nur für die Metalle im Staubbiederschlag nach Bergerhoff ausgewertet.

Beim Wechsel der Standardlösungen (Erreichen des Ablaufdatums) werden die neuen Lösungen immer gegen die vorher verwendeten verglichen. Zudem werden die Gebrauchsstandardlösungen mit dem Multielementstandard VIII und IX von VWR International überprüft.

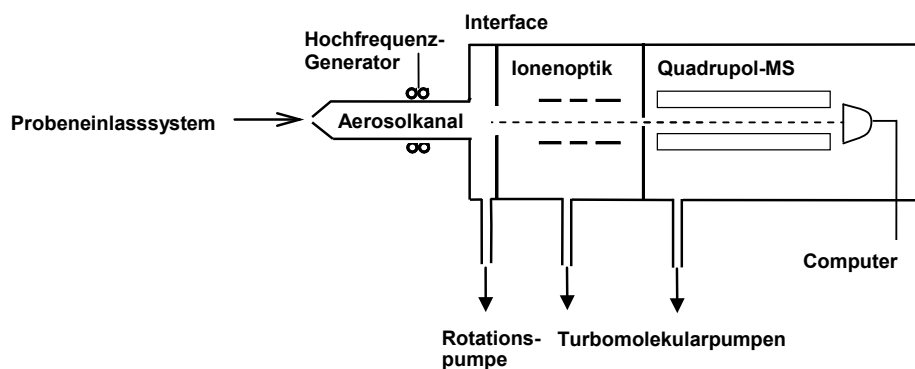


Abb. 3-18: Schematische Darstellung des ICP-MS

### Messunsicherheit

Jahresmittelwert (aus 2 Halbjahresproben)	Cadmium	± 10 %
	Blei	± 10 %
	Arsen	± 10 %
	Nickel	± 10 %
	Kupfer	± 10 %

### Bestimmungsgrenze

Jahresmittelwert	Cadmium	0.01 ng/m <sup>3</sup>
	Blei	0.1 ng/m <sup>3</sup>
	Arsen	0.01 ng/m <sup>3</sup>
	Nickel	0.1 ng/m <sup>3</sup>
	Kupfer	0.1 ng/m <sup>3</sup>

## Geräte, Material

Reinstwasseranlage	Millipore
Stanzwerkzeug aus rostfreiem Stahl	Hasler
Mikrowellenofen MLS START 1500 mit Hochdruck- gefäßen HPR 1000/10	Anton Paar Switzerland
Quarzglaseinsätze QS 50	Anton Paar Switzerland
Dampfreinigungsapparatur	Trabold
ICP-MS NexION 2000	Perkin Elmer
Probengefäße (PP-Tubes) 50 ml und 15 ml	FAUST Laborbedarf
Filtrationseinheiten Merck Steriflip HV, PVDF 0.45 µm	Milian

## Chemikalien

Salpetersäure Suprapur (65 %)	VWR International
Wasserstoffsuperoxid Suprapur (30 %)	VWR International
Cadmium Standard (1000 mg/l)	VWR International
Blei Standard (1000 mg/l)	VWR International
Arsen Standard (1000 mg/l)	VWR International
Nickel Standard (1000 mg/l)	VWR International
Kupfer Standard (1000 mg/l)	VWR International
Rhenium Standard (1000 mg/l)	VWR International
Multielementstandard VIII	VWR International
Multielementstandard IX	VWR International
Teststaub Standard Referenz Material ERM-CZ120 (Fine Dust, PM10-like)	IRMM / VWR International

### 3.9.3.2 Semikontinuierliche Messung von Metallen im Feinstaub PM10

Seit 2022 wird an der Station Dübendorf zur Messung von Schwermetallen und weiteren Elementen im PM10 der Ambient Metal Monitor Xact 625i verwendet.

Das Gerät misst mittels Röntgenfluoreszenzmethode (EDXRF) semikontinuierlich die Konzentration von 67 Elementen mit einer Ordnungszahl zwischen Aluminium (Al) und Uran (U).

#### Messprinzip

Der Xact 625i Ambient Metals Monitor (Cooper Environmental Services, Tigard, OR, USA) ist ein Röntgenfluoreszenzspektrometer, das für die halbkontinuierliche Online-Messungen von Elementen in Aerosolen entwickelt wurde.

Die Probenahme zwischen 15 min und 4 Stunden und die Analyse von Schwermetallen und weiteren Elementen in Umgebungsluft im Xact 625i erfolgen kontinuierlich und gleichzeitig. Die Messmethode beruht auf der EPA Methode IO 3.3 (Determination of Metals in Ambient PM using XRF) beruht.

Die Partikel der Umgebungsluft werden über einen PM10-Strömungsabscheider, mit einer Durchflussrate von 16.7 l/min, auf einem Teflon-Filterband gesammelt.

Nach jedem Probenahme-Intervall (im NABEL 60 min) wird das Filterband mit den PM-Ablagerungen in den Analysebereich des Spektrometers gebracht, wo die Probe mittels zerstörungsfreien energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse EDXRF auf ausgewählte Metalle analysiert wird, während die nächste Probe gesammelt wird. Dieser Zyklus wird in jedem Probenahme-Intervall wiederholt.

Das am Standort Dübendorf eingesetzte Gerät ist für die Quantifizierung von 29 Elementen konfiguriert.

Die Spektren werden mit der firmeneigenen ADAPT-Analysesoftware von Cooper Environmental analysiert und die Daten direkt ausgewertet und entsprechend visualisiert.

### Kalibration

Von den 67 gemessenen Elementen werden 29 einzeln kalibriert, wobei für jedes Element eine Referenzprobe verwendet wird.

Tägliche Qualitätssicherungsprüfungen (QS-Energiekalibrierungstest und QS-Upscale-Test) werden während 30 Minuten nach Mitternacht durchgeführt. Daher ist das Probenahmeintervall nach Mitternacht auf nur 30 Minuten begrenzt.

Zu den zusätzlichen Qualitätssicherungskontrollen, gehören Durchfluss- und Leckkontrollen, Durchflusskalibrierungen, regelmäßige externe Element-Standardkontrollen und Blindwertkontrollen.

Die gemessenen und kalibrierten Elemente sind Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ba, Hg, Tl, Pb und Bi.

### Querempfindlichkeit

Wurde nicht untersucht und ist nicht bekannt.

### Messunsicherheit

Wurde nicht bestimmt und ist nicht bekannt.

### Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenzen der einzelnen Elemente gelten für eine Probenahme von 60 Minuten.

Element	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V
Nachweisgrenze (ng/m <sup>3</sup> )	100	17.8	5.2	3.16	1.73	1.17	0.3	0.16	0.12

Element	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se
Nachweisgrenze (ng/m <sup>3</sup> )	0.12	0.14	0.17	0.14	0.1	0.079	0.067	0.063	0.081

Element	Br	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Ba	Hg	Tl
Nachweisgrenze (ng/m <sup>3</sup> )	0.1	1.9	2.5	3.1	4.1	5.2	0.39	0.12	0.12

Element	Pb	Bi
Nachweisgrenze (ng/m <sup>3</sup> )	0.13	0.13

## 3.9.4. Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) im Feinstaub

Seit August 2010 wird die Konzentration an Schwefel im Feinstaub auf den PM10 Feinstaubfiltern gemessen. Die alten partikulären Schwefelkonzentrationen (S\_SF) werden mit stationsspezifischen Faktoren auf partikulären Schwefel im PM10 (S\_PM10) umgerechnet. Die Faktoren wurden anhand von Vergleichsmessungen beider Methoden bestimmt. Ab Januar 2011 werden zusätzlich Nitrat und Chlorid quantifiziert.

### Messprinzip

siehe Kapitel 3.9.1.



## Probenahme

siehe Kapitel 3.9.1.

## Probenvorbereitung

Für die Tagesproben (Payerne und Rigi) wird aus den PM10 Feinstaubfiltern je ein Teilfilter mit einem Durchmesser von 0.8 cm ausgestanzt. Der Teilfilter wird direkt in ein Probevial des Dionex Ionenchromatographen transferiert und mit 2 ml resp. 4 ml Reinstwasser versetzt. Das Vial wird danach mit einer Filterfritte verschlossen und die Probe gemischt. Das Elutionsvolumen ist abhängig vom Stationsstandort. Für die Monatsproben (Jungfrauoch und Lugano) wird aus jedem gültigen PM10 Feinstaubfilter eines Monats je ein Teilfilter mit einem Durchmesser von 0.8 cm ausgestanzt. Die Teilfilter werden in einer PP-Probenflasche vereint und mit 20 ml resp. 60 ml Reinstwasser versetzt. Nach mindestens 4 Stunden Elutionsdauer wird ein Vial abgefüllt, mit einer Filterfritte verschlossen und auch auf Chlorid, Nitrat und Sulfat analysiert. Zur Kontrolle des Blindwertes wird für die Tagesproben pro Serie ein Teilfilter eines Fieldblankfilters der Station Jungfrauoch ausgestanzt, mit 2 ml Reinstwasser eluiert und analysiert. Für die Monatsproben werden 30 Teilfilter aus den Fieldblankfiltern des entsprechenden Monats ausgestanzt und mit 20 ml Reinstwasser eluiert. Nach mindestens 4 Stunden Elutionsdauer wird mit Ionenchromatographie die Konzentration an Chlorid, Nitrat und Sulfat bestimmt. Die im Probenvial integrierte 20 µm Glasfritte filtriert die Probe beim Füllen, bevor diese in die Probenschleife des Ionenchromatographen gelangt.

## Chromatographische Bedingungen

	Anionen
<b>Säule:</b>	Dionex AG14A und AS14A
<b>Eluent:</b>	8.0 mM Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /1.0 mM NaHCO <sub>3</sub>
<b>Fluss:</b>	1 ml/min
<b>Suppressor:</b>	Dionex AERS-500 43 mA
<b>Injektionsvolumen:</b>	150 µl

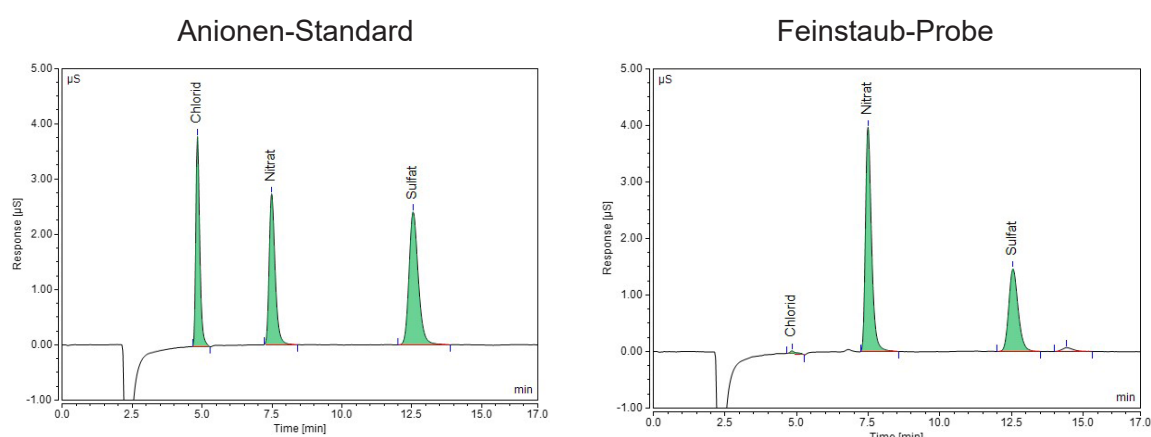


Abb. 3-19: IC-Chromatogramm von Anionen-Standard und Feinstaub-Probe

## Kalibration

siehe Kapitel 3.11.3. unter Anionen

**Messunsicherheit**

Tagesmittelwert	Sulfat	10 % (mind. 0.015 µg S m <sup>3</sup> )
	Nitrat	10 % (mind. 0.010 µg N/m <sup>3</sup> )
	Chlorid	10 % (mind. 0.02 µg Cl-/m <sup>3</sup> )
Monatsmittelwert	Sulfat	10 % (mind. 0.015 µg S m <sup>3</sup> )
	Nitrat	10 % (mind. 0.010 µg N m <sup>3</sup> )
	Chlorid	10 % (mind. 0.05 µg Cl-/m <sup>3</sup> )

**Bestimmungsgrenze**

Tagesmittelwert	Sulfat	0.005 µg S/m <sup>3</sup>
	Nitrat	0.011 µg N/m <sup>3</sup>
	Chlorid	0.01 µg Cl-/m <sup>3</sup>
Monatsmittelwert	Sulfat	0.004 µg S/m <sup>3</sup>
	Nitrat	0.008 µg N/m <sup>3</sup>
	Chlorid	< 0.01 µg Cl-/m <sup>3</sup>

**Geräte, Material**

Reinstwasseranlage	Millipore
Ionenchromatograph Aquion	Dionex, Thermo Fisher Scientific
Eppendorf Pipette	Vaudaux-Eppendorf
Probevials mit Filterfritten	Dionex, Thermo Fisher Scientific
Stanzwerkzeug aus rostfreiem Stahl	Hasler
PP-Probeflaschen (weithals), NALGENE 125 ml	FAUST Laborbedarf

**Chemikalien**

siehe Kapitel 3.11.3. unter Anionen

**3.9.5. Mineralische Kationen im Schwebstaub****Messprinzip**

Die Kationen Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und Ca<sup>2+</sup> werden auf den Filtern, die zur Bestimmung der Summe von Ammoniak und Ammonium gesammelt werden (siehe Kapitel 3.12.2.), analysiert.

**Probenahme**

siehe Kapitel 3.12.2.

**Probenvorbereitung**

siehe Kapitel 3.12.1.

## Geräte, Material

siehe Kapitel 3.12.1.

## Chemikalien

siehe Kapitel 3.12.2.

## Chromatographische Bedingungen und Kalibration

Siehe Kapitel 3.11.3. unter Kationen.

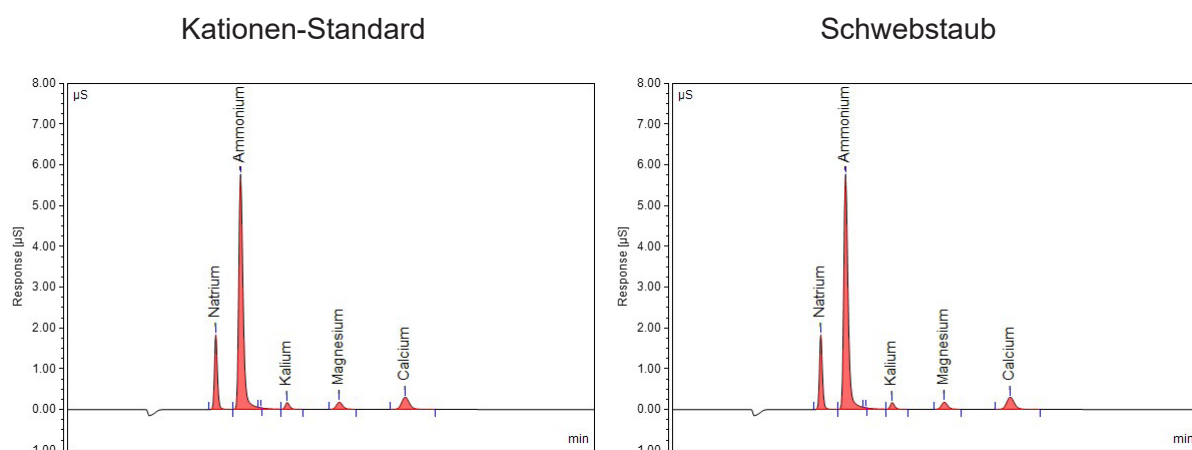


Abb. 3-20: IC-Chromatogramm Kationen-Standard und Kationen im Schwebstaub

## Messunsicherheit

Tagesmittelwert	Natrium	15 % (mind. BG)
	Kalium	15 % (mind. BG)
	Magnesium	15 % (mind. BG)
	Calcium	15 % (mind. BG)
(BG = Bestimmungsgrenze)		

## Bestimmungsgrenze

Tagesmittelwert	Natrium	0.04 µg/m <sup>3</sup>
	Kalium	0.03 µg/m <sup>3</sup>
	Magnesium	0.012 µg/m <sup>3</sup>
	Calcium	0.04 µg/m <sup>3</sup>



### 3.9.6. EC/OC

Für die Messung von elementarem (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) wurde in Europa ein Referenzverfahren eingeführt DIN EN 16909 (2017)<sup>[16]</sup>. Beim Referenzverfahren handelt es sich um eine Labormethode, bei der PM<sub>2.5</sub> Filterproben mittels thermisch-optischem Messverfahren analysiert werden. Dieses Referenzverfahren wird im NABEL mit einem Stichprobenkonzept (Analyse von PM<sub>2.5</sub> Filterproben von jedem zwölften Tag) für die Bestimmung von EC und OC an neun Messstationen (Basel, Bern, Dübendorf, Härkingen, Lugano, Payerne, Rigi, Magadino und Zürich) eingesetzt.

#### Messprinzip

Das Messprinzip beruht auf dem thermisch-optischen Verfahren mit Korrektur für die pyrolytische Umwandlung von organischem Kohlenstoff in elementaren Kohlenstoff. Zur optischen Korrektur wird die Transmission eines Lichtstrahls durch die Probe während der Analyse gemessen (TOT-Methode; Sunset Laboratory OC/EC Analyzer, Model 5L mit Autoloader, USA). Für die Analyse von PM<sub>2.5</sub> Feinstaub-Tagesproben wird das international akzeptierte EUS-AAR2-Temperaturprotokoll verwendet.

Die thermisch-optische Methode beruht auf den unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von EC und OC. EC ist schwerflüchtig und verbrennt erst bei Temperaturen über 500°C und nur in einer oxidativen Umgebung. Organische Stoffe werden bei Temperaturen bis etwa 900°C unter Inertgasbedingungen vollständig verflüchtigt oder pyrolysiert. Der Anteil des pyrolytisch gebildeten Kohlenstoffs (PC) sollte bestimmt und dem OC-Wert zugerechnet werden. Dies wird durch die Messung der Lichttransmission durch das Filter während der Analyse erreicht. Durch die pyrolytische Umwandlung während der OC-Bestimmung kann die Lichttransmission abnehmen (das Filter wird schwärzer). Bei der Bestimmung von EC nimmt die Lichttransmission anschliessend aufgrund der Oxidation von elementarem Kohlenstoff wieder zu. Der pyrolytisch gebildete Kohlenstoff entspricht der Menge Kohlenstoff die oxidiert wird, bis das Filter wieder die gleiche Lichttransmission wie zu Beginn der Analyse aufweist. Der Zeitpunkt der Trennung von EC und OC wird allgemein als 'Splitpoint' bezeichnet.

Proben von Aerosolpartikeln, welche auf Quarzfaserfilter gesammelt wurden, werden im Ofenkomplex des Gerätes mittels eines klar definierten Temperaturprotokolls in einer ersten Phase unter Inertgasatmosphäre (Helium) in mehreren Temperaturstufen bis auf 850°C aufgeheizt. In einer zweiten Phase wird das Filter unter einer oxidierenden Atmosphäre (He/O<sub>2</sub>-Gemisch) erneut in mehreren Temperaturstufen aufgeheizt. Zur Detektion wird das in die Gasphase übergetretene Material mit einem Gasstrom in den Hinterofen des Ofenkomplexes befördert. Dort wird es bei einer konstanten Temperatur von 870°C mit Hilfe eines MnO<sub>2</sub>-Katalysators vollständig verbrannt. Das entstandene CO<sub>2</sub> wird im Methanator (500°C), katalytisch zu Methan umgewandelt und mittels FID (Flammenionisationsdetektor) detektiert.

Nach Abschluss der He- und Ox-Phase gibt es eine interne Kalibration mit Methan.

### 3.9.7. BC (Black carbon)

#### Aethalometer

An den Standorten Basel, Bern, Dübendorf, Härkingen, Lugano, Magadino, Payerne, Rigi und Zürich werden kontinuierlich die Menge von schwarzem Kohlenstoff (BC) mit Hilfe eines optischen Messverfahrens (Aethalometer AE 33, siehe Anhang C6) im PM<sub>2.5</sub> gemessen.

## Messprinzip

Der Russmonitor Aethalometer AE 33 (Magee Scientific Inc.) dient zur kontinuierlichen Bestimmung des Absorptionskoeffizienten  $b_{abs}$  [1/m] in der Aussenluft, basierend auf dem Funktionsprinzip der Licht-Transmissionsmessung durch ein Filter bei einer oder mehreren Wellenlängen.

Auf einem Quarzfaser-Filterband findet gleichzeitig auf zwei verschiedenen Flächen des Filters eine kontinuierliche Aerosolabscheidung mit unterschiedlichen Volumenströmen statt. Diese Dual Spot Technologie bietet den Vorteil, dass der Einfluss der Filterbelegung auf die gemessene Lichtabsorption bestimmt und dadurch das Messsignal entsprechend kompensiert werden kann.

Die physikalischen Grundlagen für die Bestimmung der Lichtabsorption werden durch das Lambert-Beersche Gesetz beschrieben. Aus der Abschwächung des Lichtes beim Durchgang durch den belegten Filter wird die Menge an Black Carbon (BC) auf dem Filter und mit Hilfe des Volumenstroms und der Fläche des Filter-Spots dann die BC Konzentration in der Aussenluft berechnet. Die Messung wird beeinflusst durch Mehrfachstreuung des Lichtes an den Filterfasern, durch Streuung an grossen Partikeln und die Menge an Feinstaub die auf dem Filter ist, sowie durch Streuung an Partikeln die nicht aus BC bestehen. Da der gemessene Absorptionskoeffizient nicht mit dem Absorptionskoeffizienten des Feinstaubes ( $b_{abs}$ ) übereinstimmt ist für eine quantitative Bestimmung von BC eine Korrektur der gemessenen Lichtabsorption notwendig. Diese Korrektur wird gemäss der Publikation von Weingartner *et al.* (2003) <sup>[17]</sup> durchgeführt.

$$BC = \frac{b_{abs}}{\sigma_{abs}}$$

BC	=	Black Carbon [g/m <sup>3</sup> ]
$b_{abs}$	=	Absorptionskoeffizient des Feinstaubes [1/m]
$\sigma_{abs}$	=	spezifischer Absorptionsquerschnitt des Feinstaubes, Wellenlängenabhängig [m <sup>2</sup> /g]

Die Lichtquelle des Monitors umfasst 7 verschiedene Wellenlängen im Bereich von 370 nm bis 950 nm und sie befindet sich oberhalb des Filters, die beiden Detektoren für die Transmissionsmessung von belegtem und unbelegtem Filter befinden sich unterhalb des Filterbandes (Abb. 3-21).

**Nachweisgrenze:** 10 min-Wert: 400 ng/m<sup>3</sup>

## Kalibrierung

Alle 6 Monate wird eine Kalibrierung des Luftdurchsatzes durchgeführt.

## Querempfindlichkeit

BC Messungen haben den Nachteil, dass die Lichtabsorption nicht nur von der Menge an graphitähnlichen Kohlenstoff abhängt, sondern allgemein von den optischen Eigenschaften des Feinstaubes. Je nach Anteil von anderen Licht absorbierenden Inhaltsstoffen im Feinstaub können sich die BC Messwerte an verschiedenen Standorten unterscheiden, auch wenn die Feinstaubproben beider Standorte die gleichen Mengen an graphitähnlichem Kohlenstoff aufweisen. Um diese Abhängigkeiten zu korrigieren werden die kontinuierlichen Messungen (Aethalometer Daten der Wellenlänge 880nm) periodisch mit parallel durchgeführten EC-Mes-

sungen verglichen. Die EC Bestimmungen erfolgen mittels einer Analyse (Sunset Labs OC/EC Analyzer) von Feinstaub-Tagesproben.

Aus dem Vergleich von thermisch-optisch bestimmten EC- und  $b_{\text{abs}}$ -Daten wird für jede Messstation der spezifische Absorptionsquerschnitt  $\sigma_{\text{abs}}$  bestimmt (siehe Anhang A1).

Die BC-Konzentrationen der einzelnen Stationen werden mit Hilfe des stationsspezifischen Absorptionsquerschnittes aus den  $b_{\text{abs}}$  Daten berechnet und sind konsistent mit den ermittelten thermisch-optischen EC-Werten.

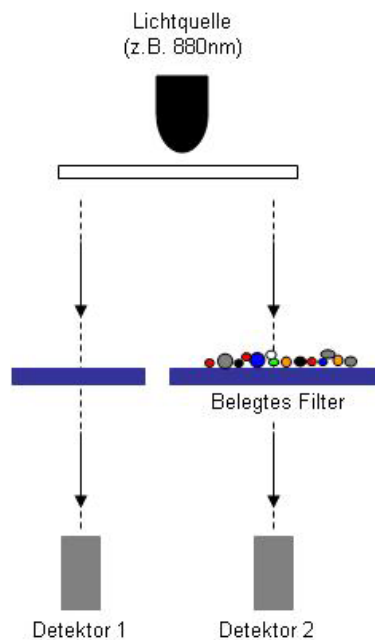


Abb. 3-21: Schematischer Geräteaufbau eines Russmonitor Magee Aethalometer

### 3.9.8. TC (Total Carbon)

Am Standort Payerne wird seit November 2020 die Menge des Gesamtkohlenstoffanteils (TC) in der PM<sub>2.5</sub> Fraktion kontinuierlich mit Hilfe eines thermischen Messverfahrens gemessen (siehe Anhang C6).

#### Messprinzip

Der TCA08 Total Carbon Analyzer (Magee Scientific Inc.) verwendet eine thermische Methode zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs (TC). Das Gerät sammelt kontinuierlich Feinstaub (PM<sub>2.5</sub>) auf einem Quarzfaserfilter. Der Filter mit einem Durchmesser von 47 mm ist in einer kleinen Edelstahlkammer eingeschlossen und wird von einem geregelten Probenahmestrom durchströmt. Die Probenahmezeit beträgt 1 Stunde und das Gerät verfügt über zwei parallele Probenahme- und Analysekanäle, deren Luftstrom durch Kugelventile gesteuert wird. Während der eine Kanal die Probe für die nächste Zeitperiode sammelt, analysiert der andere Kanal die im vorangegangenen Zeitraum gesammelte Probe.

Nach der Sammelperiode erhitzen Legierungsdrähte die Probe direkt in einem kleinen Trägergasstrom (Umgebungsluft). Die als Trägergas verwendete Umgebungsluft wurde durch ein Puffervolumen von 10 Liter geleitet, um die CO<sub>2</sub>-Schwankungen in der Umgebungsluft auszu-

gleichen. Das Erhitzen der Probe führt zu einer vollständigen Verbrennung aller kohlenstoffhaltigen Verbindungen zu  $\text{CO}_2$ , welches an einen empfindlichen NDIR-Detektor weitergeleitet wird. Die erzeugte  $\text{CO}_2$ -Menge wird durch den NDIR-Detektor als Peak über der Basislinie des Trägergases registriert, durch Integration dieses Signals wird der Gesamtkohlenstoffgehalt der Probe bestimmt. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass als Trägergas Umgebungsluft und nicht spezielle Gaslieferungen verwendet werden können.

### Kalibrierung

Die Kalibrierung des Kohlenstoffdetektors erfolgt mit Hilfe von Filterproben, deren TC Werte mit einem kalibrierten OC/EC-Gerät (TOT Analyse) bestimmt wurden. Im Offline-Verfahren werden für eine Blindprobe (gereinigter Filter) und Proben von Umgebungsfiltren Analysen für jede Kammer durchgeführt. Die Kalibration wird mit mehreren Kalibrationspunkten, welche sich über den gesamten Messbereich erstrecken, durchgeführt. Die gemessenen TC Daten des TCA-08 Geräts werden mit den thermisch-optisch bestimmten TC Werten verglichen. Die Steigungen der linearen Regressionsgeraden entsprechen den Kohlenstoffkalibrierwerten der beiden Analysekamern.

### Querempfindlichkeit

Positive und negative Artefakte beim Sammeln von Feinstaub auf Quarzfaserfiltern (Adsorption oder Verlust von flüchtigen organischen Verbindungen) können auftreten und den Messfehler dominieren.

### Nachweisgrenze

0.5  $\mu\text{g C / m}^3$  (Stundenmittelwerte)

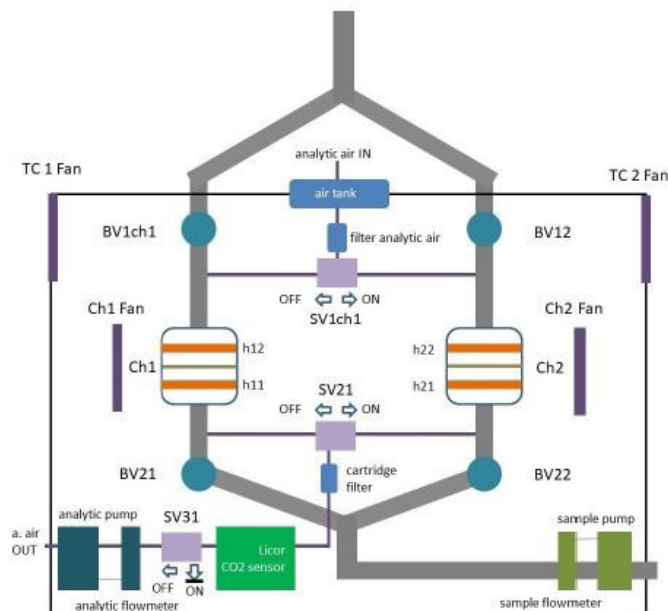


Abb. 3-22: Schematischer Geräteaufbau eines Total Carbon Analyzer TCA 08 (Quelle: TCA 08 User's Manual Ver. 1.1.09, Magee Scientific)



### 3.9.9. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im Feinstaub

An ausgewählten NABEL-Stationen werden die Konzentrationen von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in PM10 quartalsweise analysiert.

#### Messprinzip

Die Analyse der Proben auf PAK folgt methodisch den Vorgaben der EN-Norm 15549 (CEN 2008)<sup>[18]</sup>. Zusätzlich zu den von der europäischen Richtlinie 2004/107/EC vom 15. Dezember 2004 (EU-Commission 2004)<sup>[19]</sup> geforderten PAK-Verbindungen werden auch noch Pyren, Chrysen und Benzo(ghi)perylen bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich im Bericht „Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone“ (Fischer und Hüglin 2023)<sup>[20]</sup>, dieser Bericht ist abrufbar unter: [www.empa.ch/web/s503/nabel](http://www.empa.ch/web/s503/nabel).

#### Probenahme

An folgenden NABEL-Stationen werden PAK-Messungen durchgeführt: Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Beromünster, Dübendorf-Empa, Härkingen-A1, Lausanne, Lugano-Universita, Magadino-Cadenazzo, Payerne, Sion, Tänikon und Zürich-Kaserne.

Aus den täglichen Feinstaubfiltern (siehe Kap. 3.9.1) der ausgewählten Stationen wird jeweils ein Rondell von 14 mm Durchmesser ausgestanzt und quartalsweise zu einer Probe vereinigt.

#### Quantifizierte Verbindungen

Fluoranthen, Pyren, Benz(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b+j)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Benzo(a)pyren, Indeno(1,2,3,cd)pyren, Dibenzo(ah)anthracen, Benzo(ghi)perylen.

Aus den Siedepunkten der einzelnen PAK kann abgeschätzt werden, ob Sammelverluste durch Verflüchtigung vom Filter auftreten können. Bei den üblichen Sammeltemperaturen muss unterhalb eines Siedepunkts von rund 450°C (entsprechend den Verbindungen mit 4 oder weniger Ringen) mit merklichen Verlusten gerechnet werden. Die Ergebnisse der PAK bis und mit Chrysen haben deshalb nur orientierenden Charakter. Bei den Verbindungen mit 5 und mehr Ringen sind die Sammelverluste durch Verflüchtigung bei den üblichen Sammeltemperaturen kleiner als 10%<sup>[21]</sup> und damit deutlich tiefer als die analytische Messunsicherheit.

#### Querempfindlichkeit

Benzo(b)fluoranthen und Benzo(j)fluoranthen können chromatographisch nicht getrennt werden und resultieren daher als Summe. Da beide Substanzen identische Toxizitäts-Äquivalentfaktoren aufweisen gehen keine Toxizitätsinformationen verloren. Ein weiteres Problem der PAK-Messung stellt die teilweise Oxidation der gesammelten PAK auf dem Probefilter durch Ozon dar<sup>[19]</sup>.

#### Messunsicherheit

Als zusätzliches Element der Qualitätssicherung wurde der zertifizierte PM10-Referenzstaub ERM-CZ100 des European Institut for Reference Materials and Measurements (Geel, Belgium) mitanalysiert. Alle Wiederfindungsraten bewegten sich zwischen 83 – 111%, also im Bereich der analytischen Messunsicherheit von rund 20%.

#### Nachweisgrenze

0.02 ng/m<sup>3</sup>

### 3.9.10. Partikelanzahl

An den Standorten Basel, Bern, Härkingen und Lugano wird seit 2003, am Standort Rigi seit 2007 und am Standort Zürich seit Oktober 2020 die Partikelanzahl bestimmt. In Zürich wurden während 1.5 Jahren (Juni 2013 - Ende 2014) zeitlich begrenzte Messungen durchgeführt. Während 4 Jahren (2003 – 2006) wurde auch am Standort Chaumont die Partikelanzahl gemessen. An allen Standorten werden Kondensationskernzähler (CPC) von TSI eingesetzt (siehe Anhang C6).

#### Messprinzip

Die angesaugte Probeluft wird zunächst durch eine butanoldampfgesättigte Kammer geleitet, dabei kondensiert Butanol auf den durchgeleiteten Partikeln. Die Kondensation bewirkt die Vergrößerung der Partikel auf eine optisch erfassbare Grösse. Die aktuell eingesetzten Geräte TSI 3750 arbeiten nur im Einzelzählmodus und haben einen Messbereich bis 100'000 Partikel/cm<sup>3</sup>. An den Stationen Bern und Härkingen wird die Probeluft mit Hilfe einer speziellen Verdünnungseinheit TSI 3333-10 aufbereitet. Das Verdünnungsverhältnis in Bern und Härkingen beträgt 1:20. Eine geeignete Probenaufbereitung ist notwendig, da erhöhte Partikelkonzentrationen und/oder hohe absolute Luftfeuchten den Wartungsaufwand erhöhen bzw. Messausfälle verstärkt auftreten. Ein weiterer wichtiger Vorteil der Verdünnung ist, dass die Geräte so weitestgehend im Einzelzählmodus betrieben werden können.

#### Kalibration

##### Kalibration Partikelanzahl:

Für Partikelanzahlkonzentrationen gibt es keine Referenzmaterialien, welche zur Kalibration der Messgeräte eingesetzt werden könnten. Das NABEL unterhält daher ein Referenz-Kondensationskernzähler, dieser wird jährlich beim METAS kalibriert. Die auf den Stationen eingesetzten Messgeräte werden wiederum jährlich, bzw. vor und nach Gerätereperaturen oder Geräterevisionen mit dem Referenzgerät verglichen.

**Kalibration Fluss, auch Verdünnung:** Mit einem Volumenstrom-Vergleichsmessgerät werden die Flüsse alle 2 - 4 Wochen bestimmt.

### 3.9.11. Partikelgrößenverteilung

Seit Juni 2023 wird die Partikelgrößenverteilung am Standort Zürich mit einem Electrostatical Classifier TSI 3082 in Kombination mit einem CPC 3750 gemessen, von Oktober 2014 bis Juni 2023 war die Kombination TSI 3080 mit CPC 3775 im Einsatz. Von 2005 bis 2012 wurde an der Station Härkingen und von 2006 bis Oktober 2014 an der Station Zürich die Partikelgrößenverteilung mit einem SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) des Typs TSI 3034 gemessen (siehe Anhang C6)

#### Messprinzip

Dieses Online-Messsystem zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung basiert auf der Klas-

sierung der feinen und ultrafeinen Partikel mit einem Mobilitätsanalysator (DMA) und anschließender Zählung der Partikel mit einem Kondensationskernzähler (CPC). Das SMPS-System ermöglicht eine automatisierte Messung der Partikelgrößenverteilung im Größenbereich von ca. 10 – 800 nm bis zu einer totalen Konzentration von  $10^7$  Partikel /cm<sup>3</sup>.

### **Kalibration**

**Kalibration Partikelgrößenverteilung:** Wie bei der Partikelanzahlkonzentration, so stehen auch für die Messung von Partikelgrößenverteilungen keine Referenzmaterialien zur Verfügung. Eine Kalibration ist daher nicht möglich. Das NABEL unterhält im Labor ein SMPS Messsystem (Referenz-Messsystem), welches beim METAS im Rahmen von so genannten Kalibrierworkshops mit anderen Messsystemen verglichen wird. Die auf den Stationen eingesetzten Messgeräte werden regelmässig im Labor mit dem Referenz-Messsystem verglichen.

**Flusskontrolle:** Mit einem Volumenstrom-Vergleichsmessgerät wird der Luftdurchsatz alle 2 - 4 Wochen bestimmt.

## 3.10. Staubniederschlag

Zur Erfassung des Staubniederschlags und seiner Inhaltsstoffe, vor allem der Schwermetalle, wird die Bergerhoffmethode nach VDI. 4320 Bl. 2<sup>[22]</sup> angewendet.

### Messprinzip

Während ungefähr 4 Wochen werden in Bergerhofftöpfen der nasse und trockene Niederschlag (Gesamtdeposition) gesammelt. Nach dem Eindampfen wird aus dem Rückstand die Staubniederschlagsmenge gravimetrisch ermittelt.

### Probenahme

Alle Glaswaren werden in einer Dampfreinigungsanlage mit Salpetersäuredampf gereinigt und anschliessend vor dem Gebrauch mit Reinstwasser gespült. Die als Sammelgefässe verwendeten Polypropylengefässe und die zugehörigen Deckel werden vor dem ersten Gebrauch in HNO<sub>3</sub> (ca. 10 %) eingelegt und danach ebenfalls mit Reinstwasser gespült.

Da auch Kunststofftöpfe, wenn diese mit Niederschlag halbvoll gefüllt sind, bei strengem Frost bersten können, werden während der Wintermonate (Oktober – März) 200 ml Frostschuttlösung aus 1-Methoxy-2-propanol mit Wasser (1:4) in den Gefässen vorgelegt. Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probenahmen mit oder ohne Frostschutzmittel bestehen.

Aus dem Mittelwert der 12 bis 13 4-Wochenproben resultiert der Jahresmittelwert.

### Aufarbeitung

Die während ungefähr 4 Wochen exponierten Kunststofftöpfe werden für den Transport mit einem Kunststoffdeckel verschlossen. Im Labor wird die Probe bis fast zur Trockene eingedampft und anschliessend über ein Kunststoffsieb (um Insekten, Tannennadeln und andere Grobbestandteile zu entfernen) in tarierte Glasröhren transferiert. Nach dem Eindampfen bis zur Trockene und dem Konditionieren für mindestens 24 Stunden bei  $20 \pm 1$  °C/45 -50 % r.F. wird der Staubniederschlag gravimetrisch bestimmt.

Routinemässig werden Blindwerte von Bergerhoffproben mitanalysiert. Dazu werden Reinstwasserproben wie exponierte Proben behandelt und durch die ganze Aufarbeitungs- und Analysenprozedur mitgeführt.

Detaillierte Angaben zur Bergerhoffmethode sind bei Gehrig et al.<sup>[23]</sup> zu finden.

### Kalibration

Die Waage wird vor Gebrauch mit dem internen Kalibriergewicht kalibriert. Zusätzlich wird die Waage mit einem Referenzgewicht von 100 g vor jeder Messserie überprüft.

### Messunsicherheit für den gesamten Staubniederschlag

*Monatsmittelwert (Doppelbestimmung)	22 mg/(m <sup>2</sup> Tag)
Jahresmittelwert (Doppelbestimmung)	7 mg/(m <sup>2</sup> Tag)
*gilt auch für 4-Wochenproben	



**Bestimmungsgrenze für den gesamten Staubbiederschlag**

*Monatsmittelwert (Doppelbestimmung)	12 mg/(m <sup>2</sup> Tag)
Jahresmittelwert (Doppelbestimmung)	2 mg/(m <sup>2</sup> Tag)
*gilt auch für 4-Wochenproben	

**Geräte, Material**

Reinstwasseranlage	Millipore
Polypropylentöpfe (d = 10cm, h = 15cm) mit Polyethylendeckeln	Brac
Bergerhoff - Körbe (rostfreier Stahl)	Koneth
Wasserbad	Salvis
Trockenschrank	Salvis
Tecator Eindampf- und Aufschlussapparatur	nicht mehr erhältlich
Proberohre zu Tecator	Glasbläserei Möller
Waage XP 205 mit Antistatic Kit	Mettler
Referenzgewicht F1 100 g	Mettler
Schwermetallfreier Kunststoffschaber	Starkermann und Empa
Schwermetallfreies Kunststoffsieb	unbekannt
Klimaraum 20 ± 1 °C / 45 -50 % r.F.	Empa

**Chemikalien**

Salpetersäure suprapur 65 % (Aufschluss)	VWR International
Salpetersäure p.a. 65 % (Reinigung)	VWR International
1-Methoxy-2-propanol	VWR International

**3.10.1. Metalle im Staubbiederschlag**

Die mit der Bergerhoffmethode erhaltenen Proben werden für jede Station zu Sammelproben mit drei bis vier 4-Wochenproben vereinigt und aufgeschlossen. In dieser Lösung werden Blei (Pb), Cadmium (Cd), Zink (Zn), Thallium (Tl), Kupfer (Cu), Arsen (As) und Nickel (Ni) quantitativ bestimmt. Die Metalle in den Staubbiederschlagsproben werden mit ICP-MS quantitativ analysiert.

**Probenahme**

Die Probenahme erfolgt wie oben beschrieben in Bergerhofftöpfen aus Polypropylen. Aus den drei bis vier 4-Wochenproben wird eine Sammelprobe gebildet, welche analysiert wird. Aus dem Mittelwert der vier Sammelproben resultiert der Jahresmittelwert.

**Aufschluss**

Die Quartalsproben werden mit 40 ml Salpetersäure (32 %) versetzt und bis fast zur Trockene eingengt. Diese Aufschlusslösung wird nach Abkühlen mit Salpetersäure (1 %) versetzt und quantitativ in ein Polypropylentube überführt.

Jede Aufschluss- und Analysenserie wird mit dem zertifizierten Teststaub ERM-CZ120 (Fine Dust, PM10-like) kontrolliert.

## Analyse

Die Proben werden für ca. 12 Stunden stehen gelassen, damit sich nicht aufgeschlossene Partikel absetzen können. Von der überstehenden Lösung wird ein Aliquot entnommen, entsprechend verdünnt und mit interner Standardlösung versetzt. Die Analyse erfolgt dann mit ICP-MS.

Die folgenden Isotope werden quantifiziert:

$^{64}\text{Zn}$ ,  $^{66}\text{Zn}$  und  $^{67}\text{Zn}$

$^{111}\text{Cd}$

$^{206}\text{Pb}$  und  $^{208}\text{Pb}$

$^{205}\text{Tl}$

$^{63}\text{Cu}$  und  $^{65}\text{Cu}$

$^{75}\text{As}$

$^{60}\text{Ni}$

$^{187}\text{Re}$  wird als interner Standard zur Kontrolle des Analysensystems verwendet

## Messprinzip ICP-MS und Kalibration

siehe Kapitel 3.9.3.1

## Messunsicherheit

Jahresmittelwert	Cadmium	$\pm 0.2$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	Blei	$\pm 2$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	Thallium	$\pm 0.005$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	Zink	$\pm 6$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	Kupfer	$\pm 2$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	Arsen	$\pm 0.1$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	Nickel	$\pm 0.6$	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
	(Doppelbestimmung)		

## Bestimmungsgrenze

Cadmium	0.01	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
Blei	0.1	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
Thallium	0.001	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
Zink	0.5	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
Kupfer	0.1	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
Arsen	0.03	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
Nickel	0.1	$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ Tag})$
(Doppelbestimmung)		



## 3.11. Regeninhaltsstoffe

### Messprinzip

Zur Bestimmung der Regeninhaltsstoffe wird nur die nasse Deposition gesammelt. Im Labor wird die Menge des gesammelten Niederschlags gravimetrisch bestimmt sowie der pH-Wert und die Leitfähigkeit gemessen. Die Konzentration der folgenden Ionen, Chlorid, Nitrat, Sulfat, Natrium, Ammonium, Kalium, Magnesium und Calcium, wird mittels Ionenchromatographie bestimmt.

### Probenahme

Um die Regeninhaltsstoffe analytisch bestimmen zu können, ist es ausserordentlich wichtig, dass die Regenproben nicht kontaminiert werden und dass die Bestimmung nicht durch Fremdfaktoren gestört wird. Beim verwendeten Regensammler vom Typ DRA-12HK handelt es sich um ein neues, überarbeitetes Modell eines so genannten Wet-only-Sammlers (Abb. 3-23). Die Probenahme erfolgt bei dieser Methode nur bei Regen, wobei das Öffnen und Schliessen des Sammeltrichters durch einen Regensensor gesteuert wird. Dadurch wird vermieden, dass auch trockener Staubbiederschlag in den Sammler gelangt.

Um die Blindwerte möglichst tief zu halten, wird der Sammeltrichter monatlich mit Reinstwasser und einer Nylonbürste gereinigt. Die Probenflaschen werden vor jedem Gebrauch mit Reinstwasser gespült. Damit sich die Proben zwischen Probenahme und Analyse nicht verändern, werden Regensammler und Transportbehälter gekühlt (4 - 8°C). Nach dem Transport der Proben ins Labor wird die Niederschlagsmenge bestimmt und anschliessend werden die Proben tiefgeköhlt (-20°C) oder bei kürzerer Lagerzeit im Köhlschrank bei 4°C aufbewahrt.



Abb. 3-23: Probenahme mit Regensammler

Alle Teile des Regensammlers, die mit dem Niederschlag in Berührung kommen, sind aus Teflon. Die Sammelflaschen bestehen aus Polyethylen. Die Proben werden für die Analysen im Labor in 250 ml Polypropylenflaschen umgefüllt.

Das Probenahmegefäss wird um Mitternacht automatisch gewechselt, wenn pro Probenahmeintervall (Tag bzw. Woche) mehr als 5 Minuten Niederschlag registriert wurden. Das Wochenprobenahme-Intervall dauert von Montag 0 Uhr bis Sonntag 24 Uhr, das Tagesprobenahme-Intervall von 0 Uhr bis 24 Uhr.

Der Regensammler hat eine Kapazität von 32 Fläschchen à 250 ml (1 Fläschchen entspricht 4-5 mm Niederschlag).



**Geräte, Material**

DRA-92 HK Regensammler	Digitel
Polypropylen- und Polyethylenfläschchen	Semadeni
Oberschalenwaage	Mettler
Diverse Polypropylenflaschen	Semadeni
Reinstwasseranlage	Millipore

**3.11.1. Bestimmung des pH-Wertes**

Um die geringe Ionenstärke der Regenproben zu erhöhen, wird den unfiltrierten Proben das Reagenz pHisa (100 µl/10 ml Regenprobe) zugegeben. Dadurch wird die Ionenstärke der Proben derjenigen der verwendeten Pufferlösungen angeglichen ohne den pH-Wert zu beeinflussen. Die Messwerte werden auf 25 °C bezogen.

**Kalibration**

Das pH-Meter wird vor jeder Messserie mit IUPAC Puffern von pH 7.00 und pH 4.01 kalibriert. Der Zustand der Elektrode wird anhand der Kalibrierparameter (Nullpunkt und Steigung) überprüft.

**Messunsicherheit**

Tageswert  $\pm 0.04$  pH-Einheiten

**Geräte**

Reinstwasseranlage	Millipore
PHM 220 pH-Meter	IG, Radiometer Analytical
PHC 2401 pH-Glaselektrode mit Schliffdiaphragma	IG, Radiometer Analytical
SAC 90 Autosampler	IG, Radiometer Analytical
T 901 Temperaturfühler	IG, Radiometer Analytical

**Chemikalien**

IUPAC Puffer pH 7.00	IG, Radiometer Analytical
IUPAC Puffer pH 4.01	IG, Radiometer Analytical
pHisa Ionic Strength Adjustor	Hügli Labortec
3 M Kaliumchlorid	IG, Radiometer Analytical

**3.11.2. Bestimmung der Leitfähigkeit**

Die Leitfähigkeit kann in den unfiltrierten Regenproben ohne Vorbehandlung bestimmt werden. Die Messwerte werden auf 25°C bezogen.

**Kalibration**

Die Zellkonstante der Leitfähigkeitselektrode wird mit der 20 µS/cm Standard-Lösung über-

prüft und während der Messung regelmässig kontrolliert. Zusätzlich wird zur Kontrolle eine zertifizierte Kaliumchloridlösung mit einer Leitfähigkeit von ca. 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mitgemessen.

### Messunsicherheit

Tagesmittelwert 2.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$

### Geräte

Reinstwasseranlage	Millipore
CDM 230 Leitfähigkeitsmessgerät	IG, Radiometer Analytical
CDC 741M3 Leitfähigkeitselektrode	IG, Radiometer Analytical
SAC 90 Autosampler	IG, Radiometer Analytical
T 901 Temperaturfühler	IG, Radiometer Analytical

### Chemikalien

Leitfähigkeitsstandard Reagecon, 20 $\mu\text{S}/\text{cm}@25^\circ\text{C}$	FAUST Laborbedarf
Leitfähigkeitsstandard Reagecon, 10 $\mu\text{S}/\text{cm}@25^\circ\text{C}$	FAUST Laborbedarf

## 3.11.3 Bestimmung der Anionen und Kationen

In den Regenproben werden die Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) und Kationen (Natrium, Ammonium, Kalium, Magnesium und Calcium) direkt mit Ionenchromatographie bestimmt.

### Probenvorbereitung

Um tiefe Blindwerte zu erhalten, werden alle verwendeten Gefässe mit Reinstwasser gespült. Die Proben für die Kationenanalyse werden mit 0.6 mol/l  $\text{HNO}_3$  angesäuert (10  $\mu\text{l}$  0.6 mol/l  $\text{HNO}_3$  pro 5 ml Probe). Eine im Probenvial integrierte 20  $\mu\text{m}$  Glasfritte filtriert die Probe, bevor diese in die Probenschleife des Ionenchromatographen gelangt.

### Chromatographische Bedingungen

	Anionen	Kationen
<b>Säule:</b>	Dionex AG14A und AS14A	Dionex CG16 und CS16
<b>Temperatur Säule</b>	30°C	60°C
<b>Eluent:</b>	8.0 mM $\text{Na}_2\text{CO}_3$ /1.0 mM $\text{NaHCO}_3$	38 mM Methansulfonsäure
<b>Fluss:</b>	1 ml/min	1 ml/min
<b>Suppressor:</b>	Dionex AERS 500, 43 mA	Dionex CSRS 300, 112 mA
<b>Temperatur Messzelle</b>	35°C	35°C
<b>Injektionsvol.:</b>	150 $\mu\text{l}$	100 $\mu\text{l}$

## Kalibration

Zur Kalibration werden Standardlösungen mit einer Konzentration von 1000 mg/l verwendet. Zur Überprüfung der Einzelement-Standardlösungen wird bei jeder Analysenserie der Anionen-Mehrelementstandard II bzw. der Multi-Component Cation Mix 1 Standard mitgemessen (Abb. 3-24 und Abb.3-25).

Zudem werden die Gebrauchsstandardlösungen für die Kationen angesäuert, so dass die Lösungen einen pH-Wert von ca. 3 aufweisen.

Die Konzentrationen der Gebrauchsstandardlösungen sind:

	Anionen			Kationen in ca. 0.001 mol/l $\text{HNO}_3$				
	Chlorid mg/l	Nitrat mg/l	Sulfat mg/l	Natrium mg/l	Ammonium mg/l	Kalium mg/l	Magnesium mg/l	Calcium mg/l
Standard 1	0.1	0.2	0.2	0.04	0.2	0.02	0.02	0.1
Standard 2	0.25	0.5	0.5	0.1	0.5	0.05	0.05	0.25
Standard 3	0.5	1	1	0.2	1	0.1	0.1	0.5
Standard 4	1	2	2	0.4	2	0.2	0.2	1
Standard 5	2	4	4	1	5	0.5	0.5	2.5
Standard 6	5	10	10	2	10	1	1	5

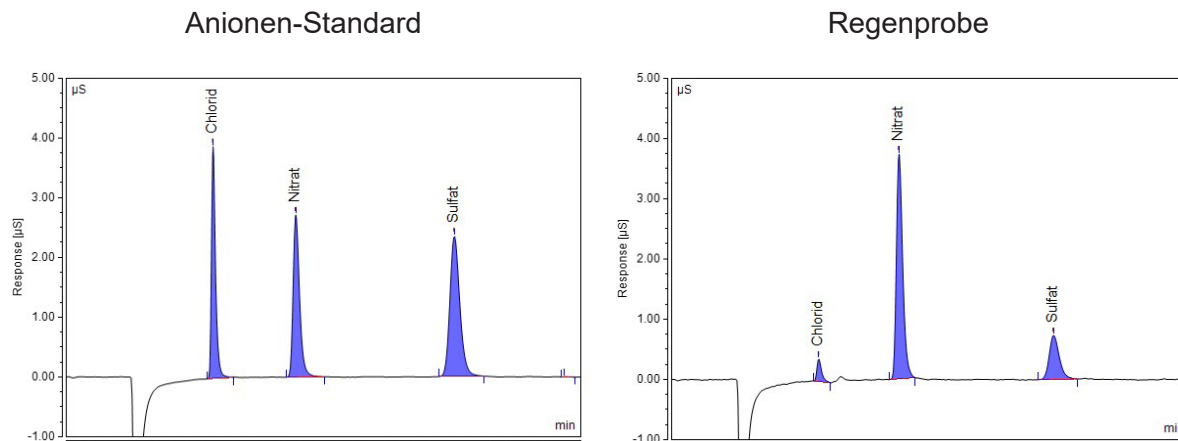


Abb. 3-24: IC-Chromatogramm Anionen-Standard und Regenprobe

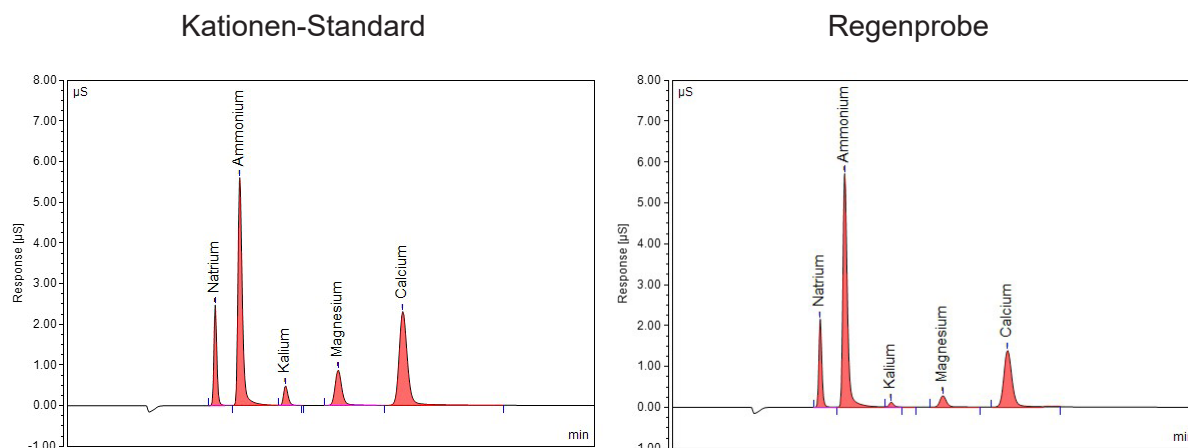


Abb. 3-25: IC-Chromatogramm Kationen-Standard und Regenprobe

### Messunsicherheit

Die Messunsicherheit wurde sowohl für die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat als auch für die Kationen Natrium, Ammonium, Kalium, Magnesium und Calcium aus Messungen, die im Rahmen einer Feldstudie<sup>[24]</sup> durchgeführt wurden, berechnet.

Tagesmittelwert	Anionen		Kationen	
	Chlorid	26.4 %	Natrium	33.2 %
	Nitrat	14.2 %	Ammonium	13.6 %
	Sulfat	14.0 %	Kalium	36.2 %
			Magnesium	30.2 %
			Calcium	29.6 %

### Bestimmungsgrenze

Tagesmittelwert	Anionen		Kationen	
	Chlorid	0.005 mg/l	Natrium	0.019 mg/l
	Nitrat	0.007 mg N/l	Ammonium	0.010 mg N/l
	Sulfat	0.002 mg S/l	Kalium	0.013 mg/l
			Magnesium	0.007 mg/l
			Calcium	0.005 mg/l

### Geräte

Reinstwasseranlage  
Ionenchromatograph Dionex Aquion

Millipore  
Thermo Fisher Scientific



**Chemikalien**

Natriumcarbonat p.a.	VWR International
Natriumhydrogencarbonat p.a.	VWR International
Chlorid Standard (1000mg/l)	VWR International
Nitrat Standard (1000mg/l)	VWR International
Sulfat Standard (1000mg/l)	VWR International
Natrium Standard (1000mg/l)	VWR International
Ammonium Standard (1000mg/l)	VWR International
Kalium Standard (1000 mg/l)	VWR International
Magnesium Standard (1000mg/l)	VWR International
Calcium Standard (1000mg/l)	VWR International
Methansulfonsäure	Sigma-Aldrich
Anionen Mehrelementstandard II	VWR International
Multi-Component Cation Mix 1 Standard	VWR International
Salpetersäure Suprapur 65%	VWR International

**3.11.4. Ionenbilanz**

Es ist zu beachten, dass die analysierten Anionen und Kationen nur eine Auswahl der hauptsächlichen Bestandteile des Regens darstellen. Die routinemässig bei jeder einzelnen Probe durchgeführte Berechnung der Ionenbilanz ergibt in der Regel bei pH-Werten <5 eine gute Übereinstimmung der Anionen und Kationen. Bei den häufig auftretenden Regenproben mit pH-Werten >5 wird meist ein mit steigendem pH höherer Kationenüberschuss festgestellt, was auf ein oder mehrere nicht analysierte (basische) Anionen hindeutet. Die Zuverlässigkeit der Analyse der quantifizierten Ionen ist durch regelmässige Ringversuche hinreichend gesichert. Neben Bikarbonat können andere Komponenten eine Rolle spielen. Das Vorhandensein von Phosphat und Nitrit wird im Ionenchromatogramm erkannt. Diese Komponenten kommen aber nur in wenigen Proben und in tiefen Konzentrationen vor und werden deshalb nicht quantifiziert. Zudem sind in den Chromatogrammen weitere Peaks zu erkennen, bei denen es sich vor allem um Anionen organischer Säuren (Acetat, Formiat etc.) handelt.

## 3.12. Stickstoffhaltige Gas- und Aerosolkomponenten

### 3.12.1. Bestimmung von ( $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$ )

Die Summe von Salpetersäure + Nitrat wird als Tagesprobe bestimmt.

#### Messprinzip

Ein genau bekanntes Volumen Aussenluft wird durch ein alkalisch imprägniertes Filter gesaugt. Staubförmige Nitratpartikel werden durch das Filter zurückgehalten und Salpetersäuregase werden durch die Imprägnierlösung zu Nitrat umgesetzt. Auf dem Filter wird die Summe von Salpetersäure und Nitrat gesammelt. Die exponierten Filter werden mit Reinstwasser eluiert und anschliessend wird die Nitratkonzentration mit Ionenchromatographie bestimmt.

#### Probenahme

Die Filter werden in den unteren Teil des Filterhalters eingelegt und dann mit 300 µl der entsprechenden Imprägnierlösung imprägniert. Nach dem Einsetzen der O-Ringe werden die Filterhalter verschraubt, auf Dichtigkeit geprüft und bis zur Exponierung im Kühlschrank aufbewahrt. Die Filterhalter werden an der Station im Freien exponiert. Für die Probenahme der beiden Messgrössen Salpetersäure + Nitrat und für Ammoniak + Ammonium (Kap. 3.12.2) sind an der Aussenwand der NABEL-Station Probenahmeverrichtungen für je 17 Filterhalter angebracht (Abb. 3-26). Mit Mehrprobennehmern wird während eines Tages je ein Filter mit einem Fluss von 13 l/min belegt. Der Probengasfluss wird regelmässig überprüft. Nach 24 Stunden wird automatisch zum nächsten Filter gewechselt. Während der ca. 14-tägigen Exposition wird zur Erfassung des Blindwertes für die beiden Messgrössen je ein Blindfilter exponiert, durch welches aktiv keine Aussenluft gesaugt wird. Nach dem Probenwechsel vor Ort werden die Filterhalter im Labor aufgearbeitet.



Abb. 3-26: Probenahme Stickstoffaerosole

Imprägnierlösungen zur Absorption der Summe an:

Salpetersäure + Nitrat:

1 % (g/v) Natronlauge in Ethanol

### Probenvorbereitung zur Analytik

Die Filter werden aus den Filterhaltern in Polyethylenflaschen transferiert. Die exponierten Proben und die Feldblankproben werden mit 40 ml Reinstwasser versetzt und gut geschüttelt. Nach mindestens 4 Stunden Elutionsdauer wird in den Eluat der alkalisch imprägnierten Filter die Konzentration an Nitrat und in den Eluat der sauer imprägnierten Filter die Konzentration an Ammonium mit Ionenchromatographie bestimmt.

Um tiefe Blindwerte zu erhalten, werden alle Probeflaschen und verwendeten Glaswaren mit Reinstwasser gespült. Eine im Probenvial integrierte 20 µm Glasfritte filtert die Probe automatisch bevor diese in die Probenschleife gelangt.

### Chromatographische Bedingungen und Kalibration

Siehe Kapitel 3.11.3. unter Anionen.

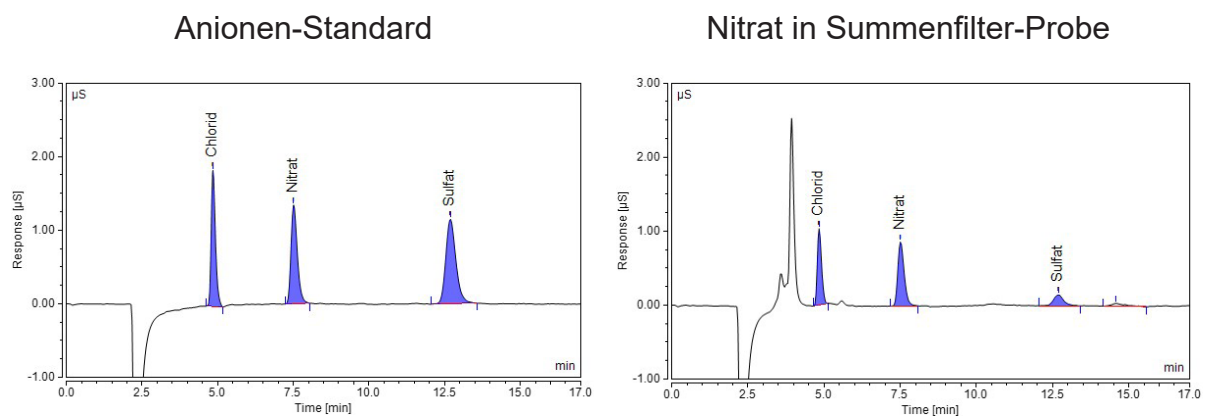


Abb. 3-27: IC Chromatogramm Anionen-Standard und Summenfilter-Probe (Nitrat)

### Messunsicherheit

Tagesmittelwert	Salpetersäure + Nitrat	0.13 µg N/m <sup>3</sup>
-----------------	------------------------	--------------------------

### Bestimmungsgrenze

Tagesmittelwert	Salpetersäure + Nitrat	0.01 µg N/m <sup>3</sup>
-----------------	------------------------	--------------------------

### Geräte, Material

Mehrprobennehmer MPN-16K	Breitfuss
PE-Schlauch, schwarz, Durchmesser 8 mm	Gressel
Transfornormal für den Volumenstrom	Techn. Bericht Kap. 4.3.2.
Filterhalter, Durchmesser 50 mm	FAUST Laborbedarf
Filter Whatman 40, Durchmesser 50 mm (Spezialanfertigung)	Sebio
Oberschalenwaage	Mettler
Brand Dispenser	FAUST Laborbedarf
PP-Probeflaschen (weithals), NALGENE 125 ml	FAUST Laborbedarf
Ionenchromatograph Dionex Aquion	Thermo Fisher Scientific
Reinstwasseranlage	Millipore

### Chemikalien

Natriumhydroxid	VWR International
Ethanol p.a.	VWR International
Natriumcarbonat p.a.	VWR International
Natriumhydrogencarbonat p.a.	VWR International
Nitrat-Standard (1000 mg/l)	VWR International
Anionen-Mehrelementstandard II	VWR International

### 3.12.2. Bestimmung von ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ )

Die Summe von Ammoniak und Ammonium wird als Tagesprobe bestimmt.

#### Messprinzip

Ein genau bekanntes Volumen Aussenluft wird durch einen sauer imprägnierten Filter gesaugt. Staubförmige Ammoniumpartikel werden durch das Filter zurückgehalten und Ammoniakgase werden durch die Imprägnierlösung zu Ammonium umgesetzt. Auf dem Filter wird die Summe von Ammoniumpartikeln und Ammoniakgas gesammelt. Die exponierten Filter werden mit Reinstwasser eluiert und anschliessend wird die Ammoniumkonzentration mit Ionenchromatographie bestimmt.

#### Probenahme

Die Probenahme von  $\text{NH}_3$  und  $\text{NH}_4^+$  erfolgt gleich wie die Bestimmung von ( $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$ ) in Kapitel 3.12.1. Die Filter müssen aber vor dem Einsatz, zur Gewährleistung niedriger Blindwerte, mit 0.1 M Zitronensäure in Ethanol (Imprägnierlösung) und Reinstwasser gespült werden.

Imprägnierlösungen zur Absorption der Summe an:

Ammoniak + Ammonium: 0.1 M Zitronensäure in Ethanol

#### Probenvorbereitung zur Analytik

Die Probenvorbereitung erfolgt gleich wie bei der Bestimmung von ( $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-$ ) in Kapitel 3.12.1.



## Chromatographische Bedingungen und Kalibration

Siehe Kapitel 3.11.3. unter Kationen.

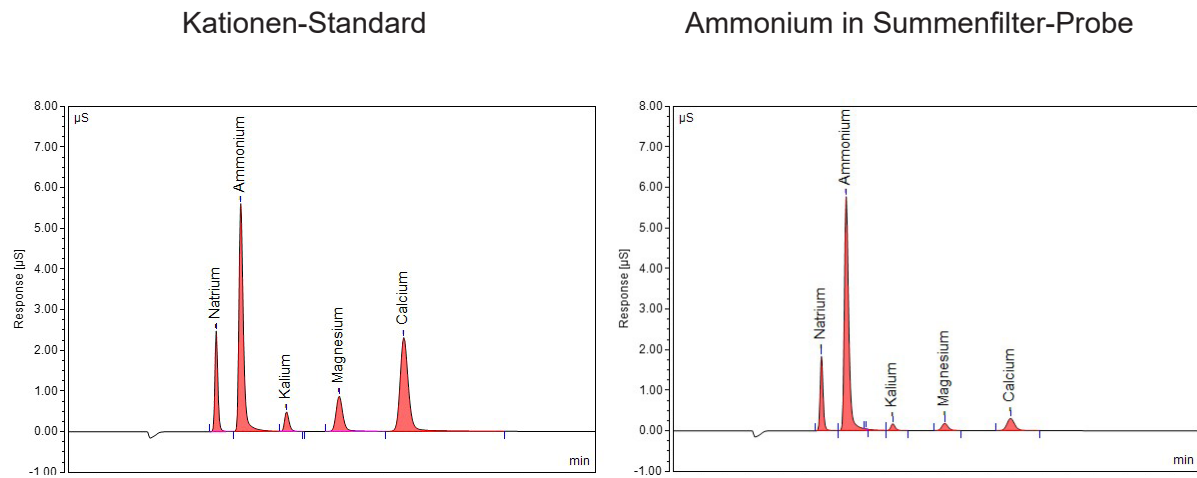


Abb. 3-28: IC- Chromatogramm Kationen - Standard + Summenfilter-Probe

### Messunsicherheit

Tagesmittelwert	Ammoniak + Ammonium	0.45 µg N/m <sup>3</sup>
-----------------	---------------------	--------------------------

### Bestimmungsgrenze

Tagesmittelwert	Ammoniak + Ammonium	0.05 µg N/m <sup>3</sup>
-----------------	---------------------	--------------------------

### Geräte

siehe Kapitel 3.12.1

### Chemikalien

Methansulfonsäure puriss	Sigma-Aldrich
Multi-Component Cation Mix 1 Standard	VWR International
Ammonium-Standard (1000 mg/l)	VWR International
Zitronensäure p.a.	VWR International
Ethanol p.a.	VWR International

### 3.12.3. Bestimmung von HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (MD-System)

Die Bestimmung von HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> erfolgt mit Hilfe eines Minidenuder-Systems (MD-System). Es werden jeweils 14-Tages-Proben bestimmt.

### Messprinzip

Ein genau bekanntes Volumen Aussenluft wird durch ein MD-System gesaugt. Es sind jeweils

pro Analysegas zwei Denuder in Serie geschaltet um die Abscheideeffizienz der einzelnen Analysegas zu bestimmen. Die Ammoniumpartikel werden auf sauer imprägnierten Filtern, und die Nitratpartikel auf alkalisch imprägnierten Filtern gesammelt. Es werden immer zwei Cellulosefilter hintereinander geschaltet, da die Abscheideeffizienz bei nur einem Cellulosefilter ungenügend ist.

### Probenahme

Die Glasdenuder werden mit Hilfe einer Pipettierhilfe bis zur entsprechenden Markierung beschichtet. Beim unbeschichteten Teil des Denuders handelt es sich um jene Distanz, die es braucht, um im Denuder eine laminare Strömung zu erzeugen. Zur Trocknung der Denuder wird mit Hilfe einer speziellen Trocknungseinheit gereinigte Pressluft verwendet. Die Trocknungseinheit besteht aus einem Trocknungsverteiler mit 4 Ausgängen und einer Trocknungspatrone mit Silicagel, welche mit einem Filterpack mit je einem sauer und einem alkalisch beschichteten Filter bestückt ist. So wird die Trocknungsluft von allfälligen Stickstoffverbindungen gereinigt. Sobald die Denuder trocken sind, werden diese von der Trocknungseinheit entfernt.

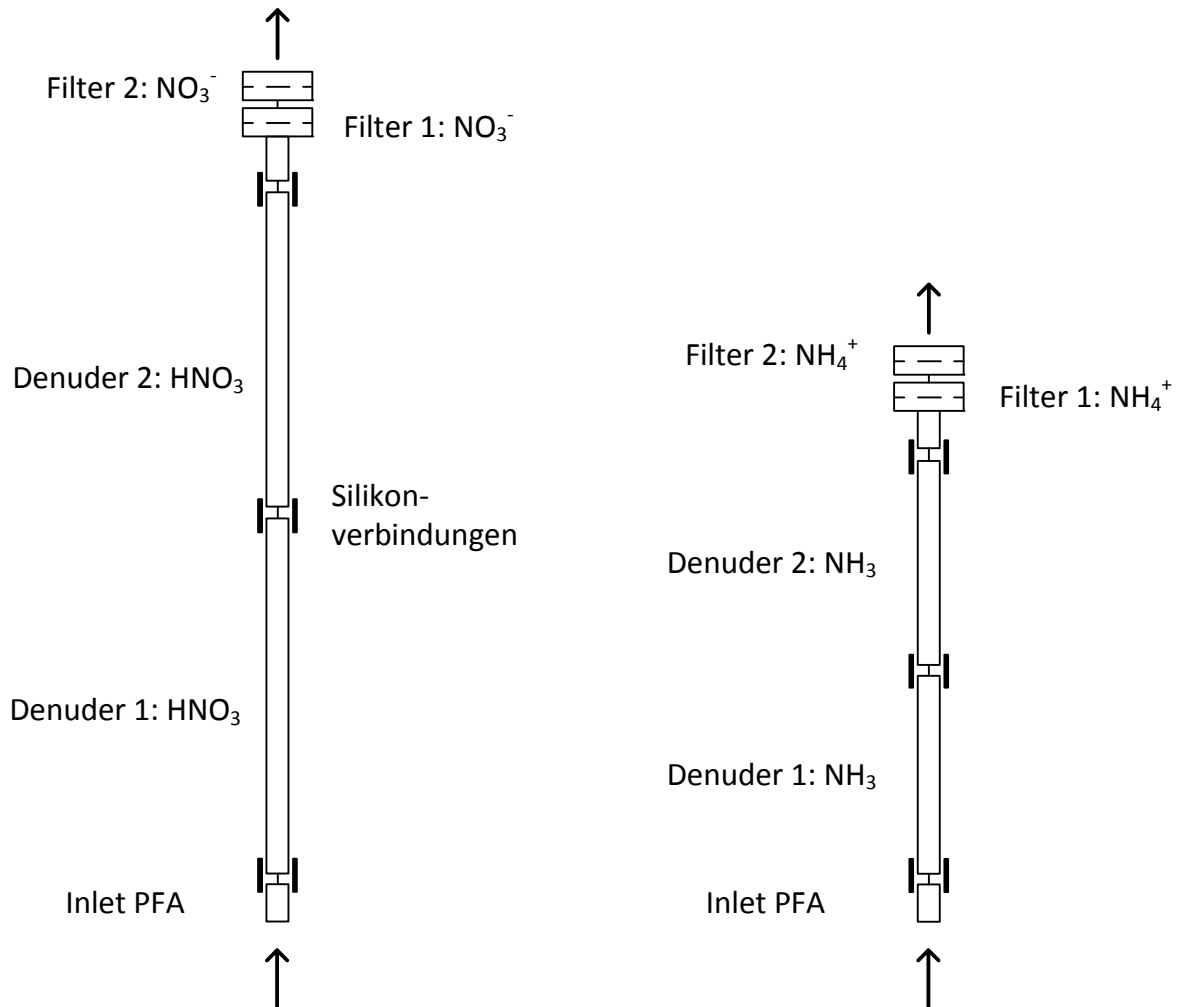


Abb. 3-29: Probetrains zur getrennten Bestimmung von HNO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Die Filter werden direkt auf dem Filterhalter mit der entsprechenden Imprägnierlösung imprägniert und sobald die Filter trocken sind, werden diese verschraubt. Die Filterhalter werden

dann mit Parafilm umwickelt und danach zu den in Abbildung 3-29 dargestellten Probetrains zusammengesetzt und mit Caps verschlossen. Die Probetrains werden auf Dichtheit überprüft und dann bis zur Exposition im Kühlschrank gelagert. Zur Bestimmung der Blindwerte werden Filterhalter (mit sauer bzw. alkalisch imprägnierten Filtern) und sauer bzw. alkalisch beschichtete Denuder vorbereitet. Die Filterhalter und die Denuder werden mit Caps verschlossen und in einem Minigripbeutel bis zur Analyse im Kühlschrank aufbewahrt. In einer speziell konstruierten Probenahmeeinrichtung (Abb. 3-30) wird während ca. 14 Tagen, mit einem Fluss von 0.30 l/min, ein bekanntes Volumen an Aussenluft (Messung mit Massendurchflussregler) durch das Minidenuder-System gesaugt.

Imprägnierlösungen:

- $\text{HNO}_3$ : 1 % (m/v) KOH und 1% (m/v) Glycerin in Methanol
- $\text{NH}_3$ : 5 % (m/v) Zitronensäure in Methanol
- $\text{NO}_3^-$ : 5 % (m/v) KOH und 10% (m/v) Glycerin in Methanol
- $\text{NH}_4^+$ : 13 % (m/v) Zitronensäure in Methanol

### Probenextraktion

Die Probetrains werden nach der Exposition bis zur Demontage wieder im Kühlschrank gelagert. Die Aufarbeitung der exponierten Proben und der zugehörigen Blindwerte erfolgt identisch. Die Filter werden zusammen mit den o-Ringen jeweils mit 12 ml Reinstwasser versetzt und gut geschüttelt. Nach mindestens 2 Stunden Extraktionszeit wird in den Eluaten der alkalisch imprägnierten Filter die Konzentration an Nitrat und in den Eluaten der sauer imprägnierten Filter die Konzentration an Ammonium bestimmt. Die Denuder werden mit 5 ml Reinstwasser ( $\text{HNO}_3$  Denuder) bzw. 3 ml Reinstwasser ( $\text{NH}_3$  Denuder) gefüllt und mehrmals gut geschüttelt. Das Eluat wird, nach einer Extraktionszeit von mindestens 1 Stunde, in ein Tube überführt und der Denuder mit Reinstwasser gespült, so dass sich ein Endvolumen von 12 ml Probe ergibt. Danach wird die Konzentration an Nitrat bzw. Ammonium mit Ionenchromatographie im Eluat bestimmt.

### Probenvorbereitung

Die verwendeten Probengefässe werden vor Gebrauch mit Reinstwasser gespült. Die Denuder werden zusätzlich vor der Neuexposition in die entsprechenden Reinigungslösungen ( $\text{HNO}_3$ -Denuder: 1M  $\text{HNO}_3$  /  $\text{NH}_3$ -Denuder: 0.1 % NaOH) eingelegt und danach auch mit Reinstwasser gespült. Nach dem Trocknen bei 105 °C sind diese wieder einsatzbereit.

### Chromatographische Bedingungen und Kalibration

Die chromatographischen Bedingungen, sowie die Kalibration sind analog zu Kapitel 3.12.1. und 3.12.2.

### Messunsicherheit

Im Anhang A5 (Abschnitt Messunsicherheiten) finden sich detaillierte Angaben über die Bestimmung der folgenden Messunsicherheiten, welche aus Vergleichsmessungen ermittelt wurden.

Summe $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$	0.30 $\mu\text{g N/m}^3$
Summe $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3$	0.18 $\mu\text{g N/m}^3$

$\text{NH}_3$	$0.49 \mu\text{g N/m}^3$
$\text{NH}_4^+$	$0.65 \mu\text{g N/m}^3$

Für die Abschätzung der Messunsicherheit für  $\text{HNO}_3$  und  $\text{NO}_3^-$  stehen keine Vergleichsdatensätze zur Verfügung.

### Bestimmungsgrenze

$\text{NH}_3$	$0.04 \mu\text{g N/m}^3$
$\text{NH}_4^+$	$0.04 \mu\text{g N/m}^3$
$\text{HNO}_3$	$0.01 \mu\text{g N/m}^3$
$\text{NO}_3^-$	$0.03 \mu\text{g N/m}^3$

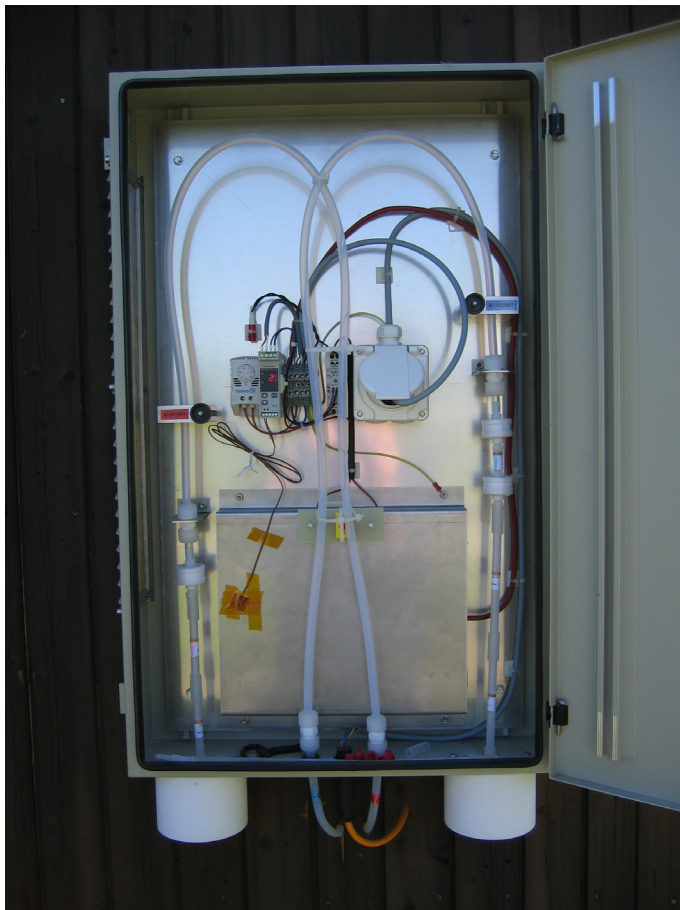


Abb. 3-30: Probenahme Minidenuder-System (MD-System)



**Geräte, Material**

Minidenuder-System  
Glasdenuder 100 mm ( $\text{NH}_3$ )  
Glasdenuder 150 mm ( $\text{HNO}_3$ )  
Filter Whatman 1, Durchmesser 25 mm  
In-line Filter Holder, 25 mm, Delrin  
Trocknungseinheit  
Probengefäße (PP-Tubes) 15 ml und 50 ml  
Silicagel PS  
BRAND Dispenser  
BRAND Pipettierhilfe  
Eppendorf Pipette  
PARAFILM  
Reinstwasseranlage

Empa Eigenbau  
Mikrolab Aarshus, DK  
Mikrolab Aarshus, DK  
FAUST Laborbedarf  
VWR International  
Mikrolab Aarshus, DK  
FAUST Laborbedarf  
ZEOCHEM  
FAUST Laborbedarf  
FAUST Laborbedarf  
Vaudaux-Eppendorf  
FAUST Laborbedarf  
Millipore

**Chemikalien**

Zitronensäure p.a.  
KOH puriss p.a.  
Glycerin, wasserfrei  
Methanol puriss p.a.  
 $\text{HNO}_3$  p.a.

VWR International  
VWR International  
VWR International  
VWR International  
VWR International

### 3.13. Meteomessverfahren

#### Wind

##### Messprinzip Metek USA I (DAV, HAE, RIG)

Das Ultraschall-Anemometer (USA-1) bestimmt mit Hilfe von Schallwellen die **Windgeschwindigkeit und die Windrichtung**. Das Gerät hat drei Sender-Empfängerpaare mit jeweils einem Abstand von ca. 175 mm. Die Sender schicken Ultraschallimpulse aus, die von den Empfängern registriert werden. Dasselbe wird in umgekehrter Richtung wiederholt, da beim USA-1 jeder Sender auch Empfänger ist. Die Laufzeit des Signals ist von der Luftbewegung in der Messrichtung, also vom Wind, abhängig. Gesamthaft gibt es 3 verschieden gerichtete Messstrecken, d.h. 6 verschiedene Laufzeiten. Anhand dieser 6 Laufzeiten können die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung sowie zusätzlich neben den horizontalen Windkomponenten auch der Vertikalwind berechnet werden.

##### Messprinzip Thies Ultrasonic 2D (BER, DUE, LAU, ZUE)

Das Ultrasonic Anemometer 2D bestimmt mit Hilfe von Schallwellen die **Windgeschwindigkeit und die Windrichtung**. Das Anemometer besteht aus 4 Ultraschall-Wandlern, von denen sich jeweils 2 Wandler im Abstand von 200 mm gegenüberstehen. Die dadurch gebildeten zwei Messstrecken stehen senkrecht zueinander. Die Wandler fungieren sowohl als Schallsender als auch als Schallempfänger. Über die Steuerelektronik werden die jeweilige Messstrecke und deren Messrichtung angewählt. Mit dem Start einer Messung läuft eine Sequenz von 4 Einzelmessungen in alle 4 Richtungen der Messstrecken mit maximal möglicher Geschwindigkeit ab. Die Messrichtungen (Schallausbreitungsrichtungen) verlaufen im Uhrzeigersinn rotierend, zuerst von Süd nach Nord, dann von West nach Ost, von Nord nach Süd und schliesslich von Ost nach West. Aus den 4 Einzelmessungen der Streckenrichtungen werden die Mittelwerte gebildet und zur weiteren Berechnung verwendet. Die benötigte Zeit für eine Messsequenz liegt bei der maximalen Messgeschwindigkeit bei ca. 2.5 ms bei +20°C.

#### Niederschlag

##### Messprinzip Wippe Lamprecht 1518H3 (DAV)

Auf ca. einem Meter über dem Boden befindet sich ein trichterartiger Behälter mit einer Auffangfläche von 200 cm<sup>2</sup>. Beim verwendeten automatischen Regenmesser registriert eine unter dem Auffangtrichter angebrachte Wippe, mittels eines Impulses beim Entleeren der Wippe, die Regenmenge. Eine eingebaute Heizung ermöglicht auch das Messen von Schnee und Eis.

Auflösung:	0.1 mm Niederschlag
Bereich:	0 - 7.5 mm/min
Kalibration:	ca. alle 2 Jahre (200 ml Wasser laufen innerhalb ca. 15 min durch den Regenmesser $\pm$ 10 mm Niederschlag)
Fehlerquellen:	Schnee, Eis (Heizung defekt) oder Insekten verstopfen den Trichter, verschmutzte Wippe Verluste durch Verdampfung von Wasser (defekte Heizung)

**Messprinzip Waage Pluvio<sup>2</sup>S und L (BER, BRM, DUE, HAE, LAU, RIG, ZUE)**

Der Niederschlagssensor Pluvio2 arbeitet nach dem Wägeprinzip. Über eine Auffangöffnung von 200 cm<sup>2</sup> wird der Niederschlag (flüssig oder fest) in einem Behälter aufgefangen und die Gewichtsänderung mit der darunterliegenden hochpräzisen, langzeitstabilen Wägezelle bestimmt. Mit einem integrierten Temperaturfühler werden Temperatureinflüsse auf den Wägemechanismus gemessen und kompensiert. Alle 6 Sekunden wird das Gewicht des Auffangbehälters inklusive Inhalt mit einer Auflösung von 0.001 mm bestimmt und daraus der momentane Behälterfüllstand ermittelt. Ein Filteralgorithmus verhindert dabei eine Verfälschung der Messergebnisse, wie sie beispielsweise durch Windeinflüsse verursacht werden können. Aus der Differenz von zwei aufeinanderfolgenden Messungen wird die Niederschlagsintensität berechnet. Diese Werte werden zu einer akkumulierten Niederschlagsmenge addiert und über die Schnittstelle ausgegeben. Weiter können die Intensität, Menge Total, Gewicht des Behälters sowie Temperatur- und Statuswerte des Niederschlagsmessers abgefragt werden.

**Globalstrahlung**

Unter der Globalstrahlung versteht man die Summe der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Strahlung, welche aus dem oberen Halbraum des Pyranometers auf eine horizontale Fläche einfällt.

Spektralbereich: 0.3 – 2.8 µm

**Messprinzip**

Die eintretende Strahlung bewirkt eine Erwärmung der schwarzen Empfängerfläche. Die entstehende Übertemperatur gegenüber dem Gerätekörper wird mit Hilfe einer Thermobatterie in Thermospannung umgesetzt (Bereich: mV).

Standort: horizontal, leicht zugänglich und schattenfrei, Ausleger nach Süden gerichtet

Fehlerquellen: Verschmutzung der Glaskuppel  
Kondensation im Innern des Gebers  
Tau, Reif oder Schnee  
Schatten von Hindernissen

**Druck****Messprinzip**

Der Messteil des Barometers ist in einem thermisch gut isolierten, auf einer konstanten Temperatur aufgeheizten Gehäuse untergebracht. Die Ausdehnungsänderung einer Barometerdose aus einer Stahl-Speziallegierung beeinflusst die Induktivität und damit die Frequenz eines LC-Oszillators. Diese Frequenz wird von einem Mikroprozessor erfasst und mittels Korrekturkonstanten, welche bei der Eichung ermittelt wurden, umgerechnet.

Fehlerquellen: Unruhige Lage

## Relative Feuchtigkeit und Temperatur

### Messprinzip Rotronic HC2A-S3

Der kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler HC2A-S3 ist in einem belüfteten, doppelwandigen Gehäuse untergebracht, das ihn vor Umwelteinflüssen wie Regen und direkter Sonneneinstrahlung schützt. Ein oberhalb des Fühlers angebrachter Ventilator sorgt dabei für einen permanenten Luftstrom von unten durch das Gehäuse. Der Fühler HC2A-S3 besteht aus einem Temperatursensor PT100 1/3 Klasse B und einem kapazitiven Feuchtesensor Hygromer® HT-1. Die Messdaten werden kontinuierlich über die serielle Schnittstelle des Fühlers abgefragt und an die Datenerfassung übermittelt.

## Meteorologische Grössen

Bei 8 Stationen (BAS, CHA, JUN, LUG, MAG, PAY, SIO, TAE) werden die Meteomessungen vom SMN der MeteoSchweiz übernommen.

An 8 Stationen (BER, BRM, DAV, DUE, HAE, LAU, RIG, ZUE) werden im Rahmen des NABEL eigene Meteomessungen durchgeführt. Die folgenden Gerätetypen werden eingesetzt.

Grösse	Gerätetyp
Luftfeuchtigkeit Temperatur	Thygan VTP 6 (mit Steuergerät), Meteolabor / Rotronic HC2A-S3
Niederschlagsmenge	Lamprecht 1518H3, Pluvio <sup>2</sup> S + L
Luftdruck	Barometer GB1, Meteolabor; PTB 330 Vaisala (BRM)
Globalstrahlung	SMP 21 mit Gehäuse CV F4
Windrichtung Windgeschwindigkeit Windspitze	Metek USA-1, Thies Ultrasonic 2D

Januar 2024



### 3.14. Übersicht der Messverfahren

Luftfremdstoffe	Zeitliche Erfassung (MW)	Messmethode	Anmerkung
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	Zehnminuten	UV-Fluoreszenz	gemäss CEN Norm EN 14212
Stickoxide (NO/NO <sub>2</sub> )	Zehnminuten	Chemilumineszenz	Überprüfung vom Konverterwirkungsgrad: Gasphasentitration gemäss CEN Norm EN 14211
Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> )	Zehnminuten	Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy (CAPS) Mid-infrared Laser Spectroscopy	
Ozon (O <sub>3</sub> )	Zehnminuten	UV-Absorption	Funktionskontrolle mit O <sub>3</sub> -Generator gemäss CEN Norm EN 14625
Kohlenmonoxid (CO)	Zehnminuten	NDIR-Absorption oder Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)	gemäss CEN Norm EN 14626
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	Zehnminuten	NDIR-Absorption oder CRDS	
Nichtmethankohlenwasserstoffe (NMHC)	Zehnminuten	FID-Detektor	Cutter-Überprüfung mit Propan
Methan (CH <sub>4</sub> )	Zehnminuten	FID-Detektor oder CRDS	
VOC	Standortsabhängig	FID oder PID-Detektor	
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Zehnminuten	CRDS	
N <sub>2</sub> O	Zehnminuten	CRDS	
Feinstaub	Tag	Gravimetrische Bestimmung	Quarzfaserfilter; äquivalent zu CEN Norm EN 12341
	Zehnminuten	opt. Feinstaubmessung (Lichtstreuung)	gemäss CEN Norm EN 16450
Pb, Cd, Ni, As, Cu (Feinstaub PM <sub>10</sub> )	Jahr	ICP-MS	Salpetersäureaufschluss in Mikrowellenofen gemäss EN 14902
Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (Feinstaub, PM <sub>10</sub> )	Monat/Tag	Ionenchromatographie	
Staubniederschlag (SN)	Jahr/Quartal	Staubniederschlag nach Bergerhoff-Methode	gemäss VDI 4320/2
Pb, Cd, Zn, Tl, Cu, As, Ni (SN)	Jahr/Quartal	ICP-MS	offener Salpetersäureaufschluss
Regeninhaltsstoffe	Woche/Tag	Ionenchromatographie	
Σ (HNO <sub>3</sub> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Tag	Ionenchromatographie	Filtermethode
Σ (NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )			
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> (Schwebstaub, TSP)	Tag	Ionenchromatographie	Filtermethode
HNO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2 Wochen	Ionenchromatographie	Minidenuder (MD) - System
Partikelanzahl	Zehnminuten	Condensation Particle Counter (CPC)	CEN/TS 16976:2016/17434:2020
Partikelgrößenverteilung	Zehnminuten	Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)	
EC/OC	Tag	Thermisch-optische Methode (TOT)	DIN EN 16909
BC	Zehnminuten	Aethalometer	
TC	Stunden	TCA-08	
PAK	Quartal	GC/MS	CEN Norm EN 15549

### 3.15. Übersicht der Messgeräte

Messgrösse	Gerätetyp	an folgenden Stationen im Einsatz
SO <sub>2</sub>	Thermo 43i TLE/43iQ TL	BAS, DUE, HAE, JUN, LUG, MAG, PAY, RIG, ZUE
NO / NO <sub>x</sub>	Horiba APNA 370	BER, DUE, LAU, LUG, SIO, TAE
	Thermo 42i TL / 42iQ TL	BRM, CHA, DAV, PAY, RIG
	Teledyne API T200	BAS, HAE, MAG, ZUE
NO	Eco Physics CLD 89p	JUN
NO <sub>2</sub>	Teledyne API CAPS T500U	BRM, PAY, RIG
	MIRO NO <sub>2</sub> Gas Analyzer	JUN
N <sub>2</sub> O	Picarro G5310	BRM, JUN
O <sub>3</sub>	Thermo 49i	Alle Stationen
CO	Horiba APMA 370	BER, DUE, LAU, LUG, ZUE
	Picarro G2302	PAY
	Picarro G2401	HAE, JUN, RIG
	Picarro G5310	BRM, JUN
CO <sub>2</sub>	Picarro G2401	HAE, JUN, RIG
	Picarro G2302	PAY
CH <sub>4</sub> / THC	Horiba APHA 360 / APHA 370	LUG, ZUE
NH <sub>3</sub>	Picarro G2103	BRM, PAY, TAE
Feinstaub	Digitel DHA-80, DHA-80/c	Alle Stationen ausser DAV
	Palas Fidas 100	JUN
	Palas Fidas 200	Alle Stationen ausser JUN
Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (Feinstaub, PM10)	Digitel DHA-80	JUN, LUG, PAY, RIG
Partikelanzahl	TSI CPC 3750	BAS, BER, HAE, LUG, RIG, ZUE
Partikelgrössenverteilung	TSI SMPS 3082 + CPC 3750	ZUE
EC/OC	Sunset Laboratory OCEC Analyzer	BAS, BER, DUE, HAE, LUG, MAG, RIG, PAY, ZUE
BC	Magee Scientific AE-33	BAS, BER, DUE, HAE, LUG, MAG, PAY, RIG, ZUE
TC	Magee Scientific TCA-08	PAY
Regeninhaltsstoffe	Digitel DRA-12 HK	MAG, PAY, RIG
Σ (HNO <sub>3</sub> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) Σ (NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Mehrprobennehmer Deltatech	RIG, PAY
Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> (Schwebstaub, TSP)	Mehrprobennehmer Deltatech	RIG, PAY
HNO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (MD)	Minidenuder (MD)-System (Eigenbau)	BRM, MAG, PAY, RIG, TAE
Kalibration SO <sub>2</sub> , NO/NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , CO, CH <sub>4</sub> /THC	Horiba APMC-370	Alle Stationen
Kalibration NH <sub>3</sub>	LNI Sonimix 6000C	BRM, PAY, TAE

Januar 2024

## 4. QUALITÄTSSICHERUNG

### 4.1. Grundlagen

Als Grundlage für die angestrebte Qualität gelten folgende **allgemeine** Qualitätssicherungsmaßnahmen:

- Einsatz empfohlener Messprinzipien (Referenzmethoden)
- Verwendung geprüfter und empfohlener Messgeräte
- Rückführung der Messung auf nationale und internationale Normale
- Teilnahme an Ringversuchen

Die Verwendung empfohlener Messprinzipien<sup>[25]</sup> bildet die Basis einer guten Vergleichbarkeit von Messresultaten verschiedener Messinstitutionen. Für die Entwicklung der Messtechnik im Immissionsbereich ist jedoch der Test und Einsatz von neuen Messverfahren von grosser Bedeutung. Bevor ein neues Messverfahren im Messnetz verwendet werden kann, ist es unerlässlich, umfassende Parallelmessungen zwischen der Referenzmethode und der neuen Methode durchzuführen. So kann die Vergleichbarkeit der alten und neuen Methode dokumentiert und die Messdaten beider Methoden zu einer Zeitreihe vereinigt werden. Der Einsatz von typengeprüften Geräten (EPA, TÜV etc.) ist ebenfalls eine gute Voraussetzung zur Vergleichbarkeit von Messresultaten. Verschiedene Beispiele aus dem Alltag des NABEL zeigen allerdings, dass auf eigene Tests jedes einzelnen Geräts nicht verzichtet werden kann. Die regelmässige Teilnahme an nationalen und internationalen Ringversuchen ist eine ausgezeichnete Kontrolle über die Vergleichbarkeit und Qualität der eingesetzten Messtechnik.

### 4.2. Primärnormale

Alle Messungen im NABEL werden auf die Primärnormale des NABEL zurückgeführt. Diese befinden sich im thermostatisierten Kalibrierlabor. Nur in Ausnahmefällen (bei internationalen und nationalen Ringversuchen von Primärnormalen) verlassen die Primärnormale das Kalibrierlabor. Die Primärnormale des NABEL werden ihrerseits auf nationale oder internationale Normale zurückgeführt.

### Primärnormale des NABEL

Primärnormal	Referenzmaterial	Konzentration/ Messbereich
<b>SO<sub>2</sub></b>	VSL: Primary Reference Material	5 ± 0.06 µmol/mol
<b>NO</b>	VSL: Primary Reference Material	20 ± 0.1 µmol/mol
<b>CO</b>	NPL: Standard Reference Material	4.983 ± 0.02 µmol/mol
<b>O<sub>3</sub></b>	NIST: Standard Reference Photometer (SRP #15)	0 – 1000 ppb
<b>CH<sub>4</sub></b>	NPL: Secondary Gas Standard	5.004 ± 0.041 ppm
<b>VOC-Gemisch</b>	NPL: Primary Reference Gas Mixture (30 species)	4 ± 0.8 ppb
<b>Halogenierte VOC</b>	Maritime Hintergrundluft	0.01 - 0.54 nmol/mol (je nach Komponente)
<b>Volumenstrom</b>	DHI Molbloc/Molbox1	1 ml/min – 10 l/min

#### 4.2.1. Primärnormal für Ozon

##### Standard Referenz Photometer (SRP)

Ozon ist ein reaktives Gas, welches man nicht als Kalibriergas lagern oder aufbewahren kann. Die für Kalibrationen benötigten Ozonkonzentrationen müssen mit einem Ozongenerator jeweils neu hergestellt werden. Die Ozonkonzentration kann mit Hilfe eines Photometers unter Verwendung des bekannten Absorptionskoeffizienten mit dem Gesetz von Lambert-Beer bestimmt werden.

Als Ozon Primärnormal wird ein vom NIST (National Institute of Standards and Technology) hergestelltes Standard Referenz Photometer (SRP #15) verwendet. Im Rahmen von qualitätssichernden Massnahmen wird jährlich mindestens eine Vergleichsmessung gegen ein baugleiches Standard Referenz Photometer durchgeführt, spätestens nach drei Jahren findet eine Vergleichsmessung gegen das Schweizerische Primärnormal (SRP #14) des METAS (Bundesamt für Metrologie) statt.

##### Messprinzip des SRP

Das SRP#15 besteht aus zwei Messzellen, einer Lichtquelle und zwei Detektoren. Der von der Quecksilberdampfampe ausgesandte Lichtstrahl wird über einen Strahlteiler und einen Spiegel in die beiden Zellen geführt. Anschliessend fällt der Lichtstrahl durch einen Interferenzfilter auf die beiden Detektoren (siehe Abb. 4-1). Die Druck- und Temperaturmessung erfolgt im Messgasausgang der Zelle 1. Während der Messung wird die Nullluft und die ozonhaltige Luft im 30 Sekundenintervall zwischen den beiden Zellen gewechselt. Die Ozonkonzentration wird aus den vier Signalen: Detektor Zelle 1, Detektor Zelle 2, Druck- und Temperatursensor nach dem Gesetz von Lambert-Beer (siehe Abb. 4-2) berechnet.

Das SRP wird nur im Kalibrierlabor verwendet.



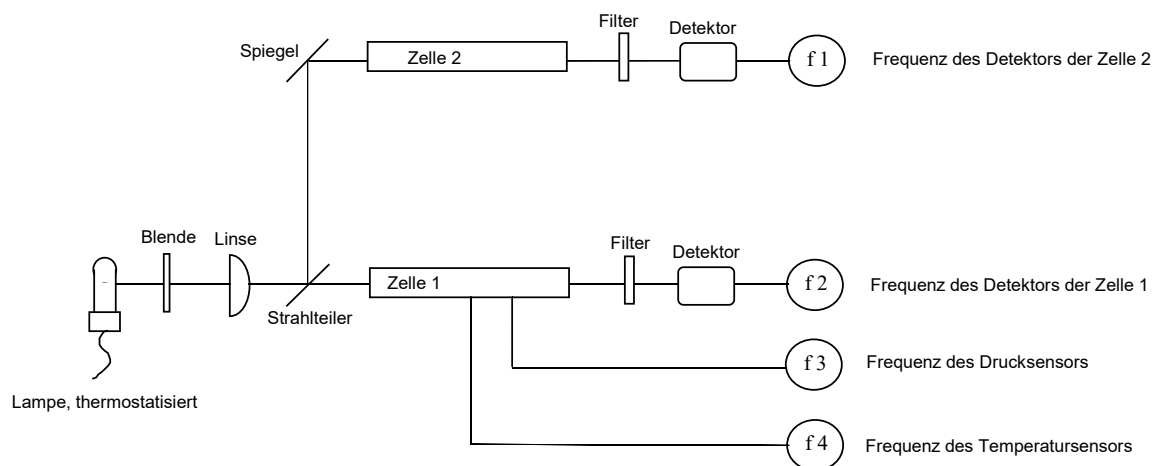


Abb. 4-1: Schematische Darstellung eines SRP

In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten des SRP#15 aufgeführt.

SRP#15	
Anzahl der Zellen	2
Zellenlänge:	89.70 cm
Optische Länge	89.70 cm
Zellendurchmesser	12 mm
Anzahl Detektoren	2
Messmodus	alternierend (sequentiell)
Volumenstrom	2 Liter/min (je Zelle)
Zelleninhalt	ca. 100 ml
Verweilzeit	ca. 3 s

Insgesamt sind mehr als 40 Standard Referenz Photometer gebaut worden, davon werden 4 in der Schweiz betrieben (METAS, Empa).

$$C = \frac{1}{k \cdot 2 \cdot L} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot 10^9 \cdot \log \frac{I_{01} \cdot I_{02}}{I_1 \cdot I_2}$$

C = Ozonkonzentration in ppb  
 T = Gastemperatur in Kelvin  
 T<sub>0</sub> = Standardtemperatur: 273 K  
 P = Druck in mbar  
 P<sub>0</sub> = Standarddruck: 1013 mbar  
 I<sub>01</sub> = Lichtintensität mit Nullluft (1. Zyklus)  
 I<sub>02</sub> = Lichtintensität mit Nullluft (2. Zyklus)  
 I<sub>1</sub> = Lichtintensität mit Ozon (1. Zyklus)  
 I<sub>2</sub> = Lichtintensität mit Ozon (2. Zyklus)  
 k = Absorptionskoeffizient 134 atm<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> [26]-[28]  
 L = Optische Länge in cm

Abb. 4-2: Berechnungsgrundlage SRP nach Lambert-Beer

## 4.2.2. Primärnormal für den Volumenstrom

### DHI Molbloc/Molbox1

Das DHI Molbloc/Molbox1-System stellt zurzeit das Primärnormal für die Volumenstrommessung im NABEL dar.

Das Messprinzip (Abb. 4-3) besteht darin, dass in einer Messstrecke (Molbloc) bei einem laminaren Fluss durch einen Drosselkörper eine Differenz des statischen Druckes zwischen dem Ein- und Auslauf des Drosselkörpers erzeugt wird.

Der Durchfluss wird aus der gemessenen Druckdifferenz, der Dichte des Fluids und den Betriebsbedingungen (Temperatur, Druck) mittels einer Mess- und Auswerteeinheit (Molbox1) berechnet.

Alle drei Jahre wird dieses Gerät durch Rückführung auf das Normal des METAS rekali-  
briert.

Messbereich: 1 ml/min bis 10 l/min (mit 4 Molbloc's)

Messunsicherheit:  $\pm 0.2\%$  vom Messwert

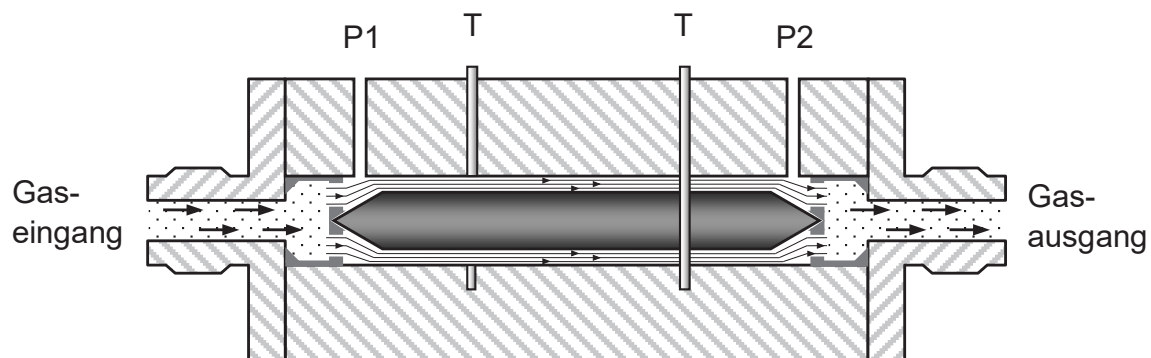


Abb. 4-3: Schema des Messprinzips des DHI Molbloc/Molbox1

### 4.3. TransfERNormale

Alle TransfERNormale, die für die Kalibrierung der Messgeräte auf den 16 Stationen verwendet werden, sind kommerziell erhältliche Gasflaschen, die vor und nach dem Einsatz auf der Station mit dem NABEL-Primärnormal verglichen werden. Im thermostatisierten Kalibrierlabor befindet sich ein Kalibrierstand mit je einem betriebsbereiten SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, THC- und CO-Monitor.

#### TransfERNormale des NABEL

Gas	Reinheit	Trärgas	Konz.	Hersteller	Messunsicherheit	Stabilität
SO <sub>2</sub>	3.8	Stickstoff (5.0)	5 ppm	Messer Schweiz	+/- 3% rel.	1 Jahr
NO	2.8	Stickstoff (5.0)	5 ppm 20 ppm	Messer Schweiz	+/- 2% rel. +/- 2% rel.	1 Jahr 1 Jahr
CO	4.7	Synt. Luft	4 ppm	Messer Schweiz Pangas Schweiz	+/- 2% rel.	2 Jahre
CH <sub>4</sub>	4.5	Synt. Luft	4.5 ppm	Messer Schweiz	+/- 2% rel.	2 Jahre
CO	4.7	Synt. Luft	4 ppm	Messer Schweiz	+/- 2% rel.	2 Jahre
CH <sub>4</sub>	4.5		4.5 ppm			
CO <sub>2</sub>	4.5		800 ppm			
O <sub>3</sub>		Photometer		Thermo 49i-PS	Vergleich mit SRP#15	0.5 Jahre
VOC-Gemisch		Stickstoff	30 Komp. je 4 ppb	NPL (England)	+/- 0.08 ppb	2 Jahre
Volumenstrom			10 ml/min – 10 l/min	DryCal, BIOS red-y smart	+/- 2 % +/- 2 %	

Bei den in obiger Tabelle erwähnten Unsicherheiten handelt es sich um Qualitätsangaben der jeweiligen Hersteller.

Zur Bestimmung der Messunsicherheiten der einzelnen Monitormessungen im NABEL-Messnetz wurden die Beiträge der TransfERNormale durch Vergleichsmessungen mit dem Primärnormal bestimmt (siehe Kap. 5.2.).

#### 4.3.1. TransfERNormal für Ozon (Thermo 49i-PS)

Für die Kalibrierung des Ozon Monitors auf der Station, welche alle 6 Monate durchgeführt wird, werden als TransfERNormal zwei Thermo Scientific 49i-PS Geräte verwendet. Diese Geräte werden 2x jährlich mit dem SRP#15 kalibriert. Für die Kalibration muss die Messanordnung so gewählt werden, dass für beide Geräte dieselbe Nullluft verwendet wird (Abb. 4-4).

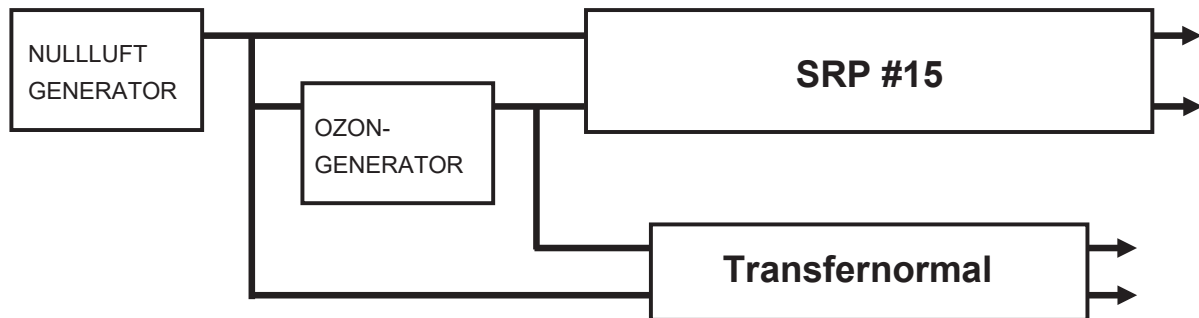


Abb. 4-4: Messanordnung für den Vergleich des Ozon-Transfernormal mit dem SRP

### Messprinzip des Transfernormal Thermo 49i-PS

Im Gerät wird die zugeführte Nullluft in zwei Gasflüsse aufgeteilt, von denen der eine direkt als Referenzgas in die Messzelle B gelangt. Der zweite Teilstrom, das Probegas, fließt zunächst durch einen Ozongenerator und dann in die Messzelle A. Mit Hilfe von Magnetventilen durchströmen Referenz- und Probegas alternierend Zelle A und B. Die UV-Licht Intensität jeder Zelle wird vom Detektor A und B gemessen (Abb. 4-5). Das Gerät berechnet die Ozonkonzentration für jede Zelle und ermittelt anschliessend die Durchschnittskonzentration.

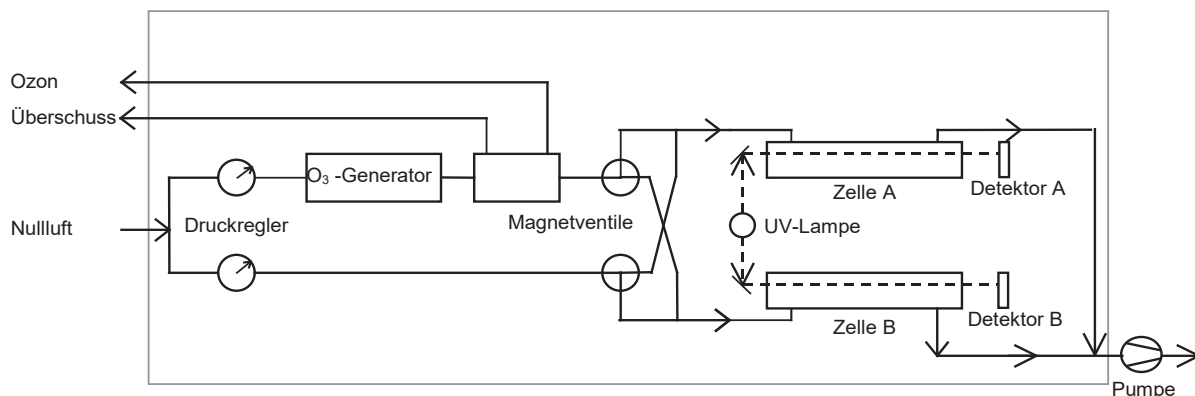


Abb. 4-5: Schematische Darstellung des Thermo 49i-PS

## 4.3.2. Transfernormal für den Volumenstrom

### MesaLabs Definer 220 und Defender 530+

Der Definer 220 und der Defender 530+ sind mobile Volumenstrommessgeräte, welche im NABEL als Transfernormal eingesetzt werden. Sie basieren auf dem Messprinzip der Volumenverdrängung. Durch den Gasfluss wird ein Kolben in einem Rohr nach oben geschoben



und die Zeit gemessen, die benötigt wird, um eine bestimmte Distanz zurückzulegen. Daraus kann der Volumenstrom berechnet werden. Die verwendete DryCal-Technologie zeichnet sich durch eine flüssigkeits- und eine nahezu reibungsfreie Konstruktion aus, die eine genaue und schnelle Durchflussmessung ermöglicht. Die im Gerät enthaltenen Druck- und Temperatursensoren ermöglichen die Umrechnung des Volumenstroms auf Normbedingungen.

Folgende Durchfluss-Messzellen werden im NABEL verwendet:

Low Flow:	5 - 500 ml/min
High Flow:	300 - 30'000 ml/min

### **Massendurchflussmesser (MFM) red-y smart**

Der MFM red-y smart (Vögtlin) ist ein mobiles Volumenstrommessgerät, welches im NABEL als TransfERNormal eingesetzt wird. Das Messprinzip des MFM red-y smart basiert auf der thermischen Massemessung, die weitgehend Druck und Temperaturunabhängig ist. Da die thermische Massemessung gasartabhängig ist, wird nebst der spezifischen Wärme auch die Normdichte (0°C, 1.01325 bar a) für die Umrechnung nach Normvolumen verwendet.

Folgende MFM red-y smart werden im NABEL verwendet:

MFM red-y smart (Vögtlin)	2 - 100 ml/min
MFM red-y smart (Vögtlin)	0.4 - 20 l/min
MFM red-y smart (Vögtlin)	0.02 - 1.0 l/min

## 4.4. Rückverfolgbarkeit (Traceability)

### 4.4.1. Ozon

Das vom NIST gebaute Standard-Referenzphotometer (SRP#15)<sup>[29]</sup> wird jährlich durch eine Vergleichsmessung mit einem baugleichen Gerät (z.B. SRP#14 beim Bundesamt für Metrologie (METAS)), auf Konformität überprüft. Der Konformitätsnachweis darf die festgelegten, vorgegebenen maximalen Abweichungen zwischen den beiden Photometern nicht überschreiten. Zwei Photometer des Typs Thermo 49C-PS resp. 49i-PS, welche der Empa als TransfERNormal für O<sub>3</sub> dienen, werden regelmässig (1/2-jährlich) durch eine Mehrpunkt-Vergleichsmessung mit dem SRP kontrolliert (Abb. 4-6). Die kontrollierten TransfERNormale für O<sub>3</sub> werden für die Kalibrierung der Messgeräte auf den 16 Stationen verwendet.

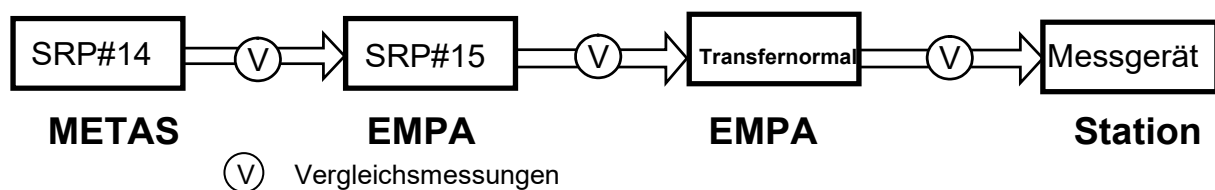


Abb. 4-6: Rückverfolgbarkeit von Ozon (Primärnormale: SRP#14 + SRP#15)

### 4.4.2. Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Kohlenmonoxid und Methan

Für jede Messkomponente befindet sich auf jeder einzelnen Station ein TransfERNormal, welches vorher im Labor mit dem Primärnormal des NABEL-Messnetzes verglichen wurde (Abb. 4-7). Bei einem Restdruck von 20 bar wird das TransfERNormal wieder ins Kalibrierlabor zurückgenommen und nochmals mit dem Primärnormal verglichen. Mit dem TransfERNormal werden die Messgeräte auf der Station manuell alle 2 - 4 Wochen kalibriert. Zusätzlich wird das TransfERNormal für den automatischen SPAN-Check der NO- und SO<sub>2</sub>-Geräte alle 25 Stunden verwendet.

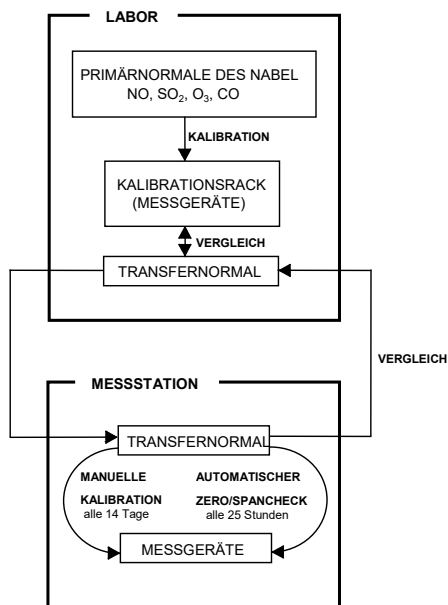


Abb. 4-7: Rückverfolgbarkeit Komponenten CO, NO, O<sub>3</sub> und SO<sub>2</sub>

#### 4.4.3. Volumenstrom

Zur Überprüfung des TransfERNORMALs BIOS DryCal und MFM red-y smart wird jährlich eine Vergleichsmessung mit dem Primärnormal DHI Molbloc/Molbox1-System im Kalibrierlabor vorgenommen.

## 4.5. Kalibrationen

### Automatische Nullpunkt- und Spanpunkt-Überprüfung auf der Station

Alle 25 Stunden wird auf der Station automatisch eine Null- und Spanpunkt-Überprüfung für die Messgrößen  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{O}_3$  ausgelöst. Die Resultate dieser Kontrolle werden in der Kalibrierdatei der Betriebs- sowie der Minizentrale abgelegt. Sie stehen so jederzeit zur Überwachung des Betriebszustandes der einzelnen Messgeräte zur Verfügung. Es erfolgt keine automatische Korrektur der Messwerte aufgrund der Null- und Spanpunkt-Überprüfung. Um den Messdatenausfall möglichst gering zu halten (34 Min.) wird für diese Kontrolle der folgende Zeitablauf gewählt (Abb. 4-8):

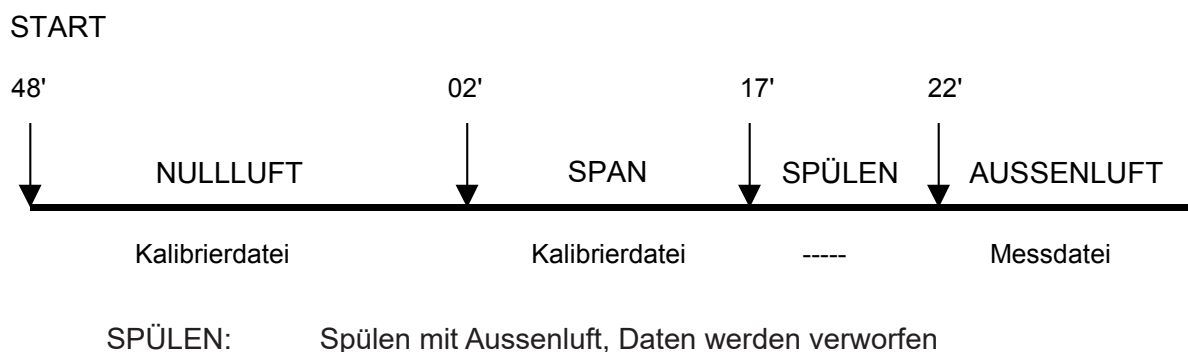


Abb. 4-8: Zeitablauf der automatischen Nullpunkt- und Spanpunkt-Überprüfung ( $\text{NO}$  und  $\text{SO}_2$ )

### Manuelle Kalibration auf der Station

Die manuelle Kalibration (Zweipunkt-Kalibration) der einzelnen Messgeräte erfolgt auf allen Stationen regelmässig alle 2 - 4 Wochen. Die resultierenden Änderungen der Geräteeinstellungen werden protokolliert. Aufgrund dieser manuellen Kalibration werden die Messdaten bereinigt.

### Aufbau Kalibriereinrichtung

Die Kalibriereinrichtung ist modular aufgebaut (Abb. 4-9), d.h. jedem Messgerät ist eine Kalibriereinheit zugeordnet. Es werden drei Typen eingesetzt: Module, bei denen das Prüfgas mit Nullluft verdünnt wird, Einheiten mit Ozongeneratoren sowie Dosiereinheiten für die direkte Aufgabe von Prüfgas aus der Flasche.

Die Standardkonfiguration des Kalibrators enthält folgende Massenflussregler:

Kanal	Max. Durchfluss
• $\text{SO}_2$ - Prüfgas	50 ml/min
• $\text{SO}_2$ - Verdünnung (Nullluft)	5 l/min
• $\text{NO}$ - Prüfgas	50 ml/min
• $\text{NO}$ - Verdünnung (Nullluft)	5 l/min
• $\text{O}_3$ (Nullluft)	5 l/min



Der Durchfluss des CO- und CH<sub>4</sub>- Prüfgases wird mit Hilfe eines Nadelventils geregelt.

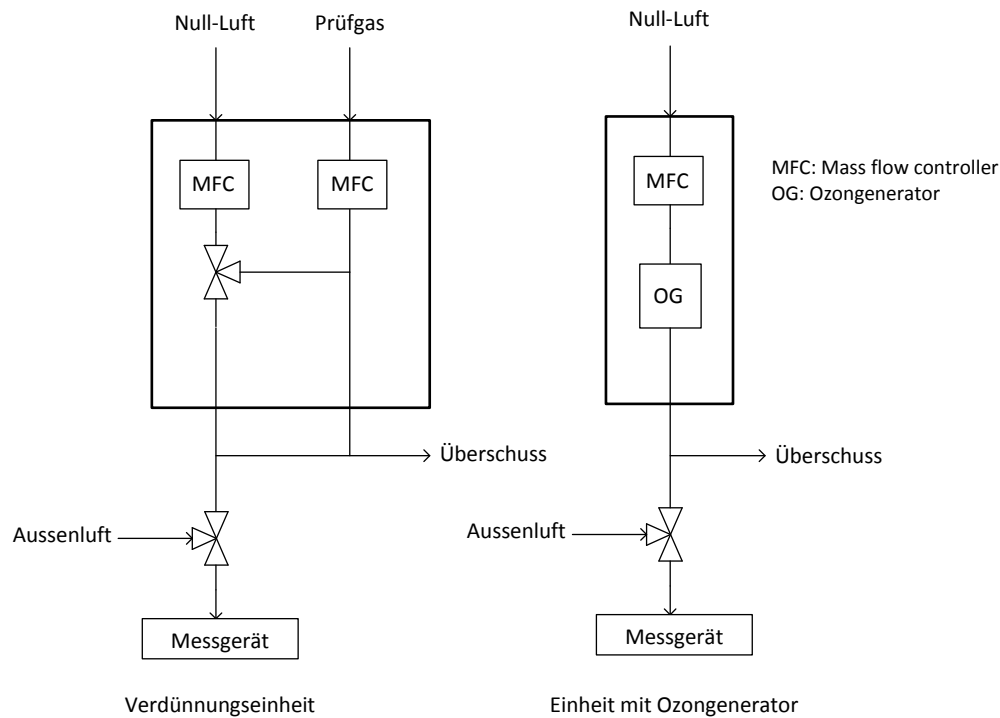


Abb. 4-9: Schematische Darstellung einer Kalibriereinrichtung

Beim Verdünnungsmodul hängt die Wahl der Durchflussraten von folgenden Faktoren ab:

- gewünschte Spangaskonzentration
- Messgerätefluss (mind. 0.5 l/min Überschuss)
- Konzentration des Transfernormal
- Regelbereich des Massenflussreglers: Die Durchflussrate sollte zwischen 5-100% des maximalen Bereiches liegen.

Alle 3 Monate werden die Volumenströme der Verdünnungseinheiten (MKAL-VM) für SO<sub>2</sub> und NO auf den Stationen mit dem Transfernormal kalibriert.

### Kalibrierbereiche

Der Kalibrierpunkt sollte einerseits den vorherrschenden Aussenluftkonzentrationen angepasst sein, andererseits hängt er auch vom Messbereich des verwendeten Geräts ab.

### Nullluft

Die Nulllufteinheit (Abb. 4-10) setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- ölfreier Kompressor mit 25l Drucklufttank (Ausgangsdruck 4 bar)
- beheizter CO/CO<sub>2</sub>-Konverter
- Purafilpatrone (4 bar)
- Aktivkohlepatrone (4 bar)

**Achtung:** Um Kondensation in den Schläuchen zu vermeiden, wird der Druck der Nullluft in der Station auf 2.5 bar reduziert.  
Die Nullluft für die CO-Messung (CO-freie Nullluft) muss vor der Aktivkohle entnommen werden.

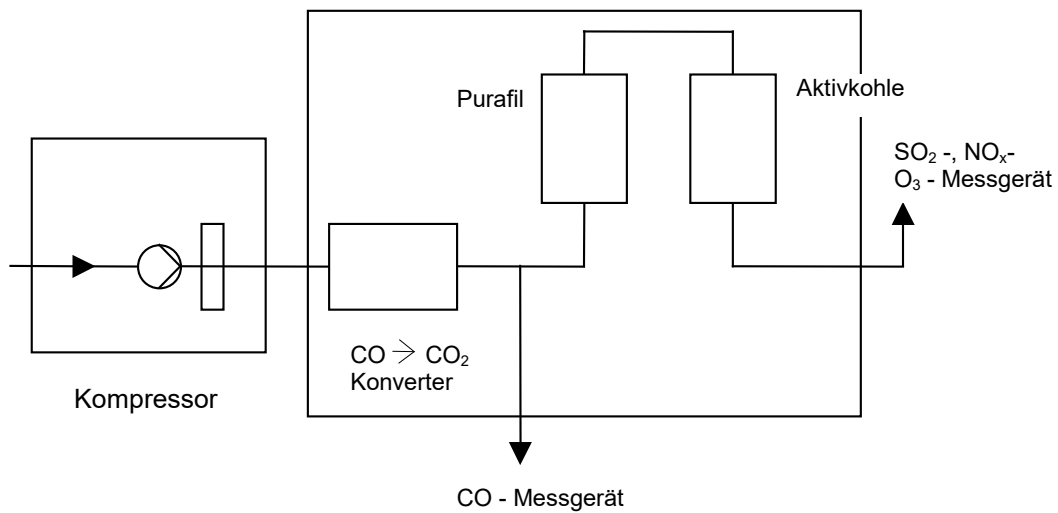


Abb. 4-10: Schematische Darstellung einer Nullluftanlage

## 4.6. Gerätetests

Alle Messgeräte durchlaufen im Kalibrierlabor (Abb. 4-11) vor dem ersten Einsatz im Messnetz eine Eingangskontrolle.

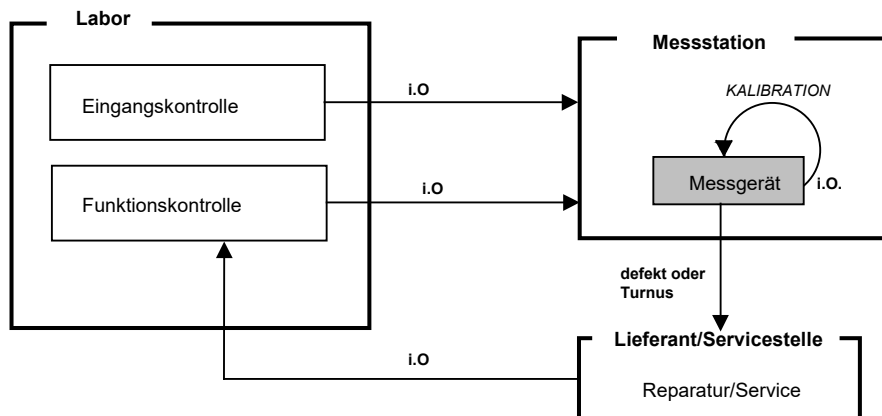


Abb. 4-11: Schematische Darstellung der Gerätetests

Nach jedem Service durch den Hersteller wird als Funktionskontrolle eine ausgewählte Anzahl von Geräteprozeduren durchgeführt.

### 4.6.1. Übersicht über die Gerätetestprozeduren

Prozeduren	Geräte			Test nach Service (Funktionskontrolle)		
	CO, O <sub>3</sub> THC	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO, O <sub>3</sub> THC	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Mehrpunktkalibration	X	X	X	X	X	X
Drift	X	X	X			
Signalrauschen (Null- und Spannpunkt)	X	X	X	X	X	X
zeitabhängiges Verhalten	X	X	X			
Wiederholgrenze	X	X	X	X	X	X
Querempfindlichkeit auf H <sub>2</sub> O	X	X	X	X	X	X
Querempfindlichkeit auf NO		X			X	
Konverterwirkungsgrad			X			X
Schnelle NO-Änderung			X			

## 4.7. Bestimmung der Verfahrenskenngrößen

Bei Geräteevaluationen, Eingangs- und Gerätekontrollen werden die folgenden Kenngrößen bestimmt.

- Kalibrierfunktion (Linearität)
- Drift (Stabilität)
- Signalrauschen
- Totzeit, Einstellzeit
- Nachweisgrenze
- Bestimmungsgrenze
- Wiederholbarkeit
- Selektivität (Querempfindlichkeit)

Bei einzelnen Geräten oder Messverfahren werden noch zusätzliche Tests durchgeführt:

- Konverterwirkungsgrad (siehe Kap. 3.2) (NO<sub>x</sub>-Gerät)
- Einfluss von schnellen NO-Änderungen (NO<sub>x</sub>-Gerät)

Die Gerätetests werden am dafür eingerichteten Gerätetestplatz (Abb. 4-12) im Kalibrierlabor mehrheitlich automatisch durchgeführt.

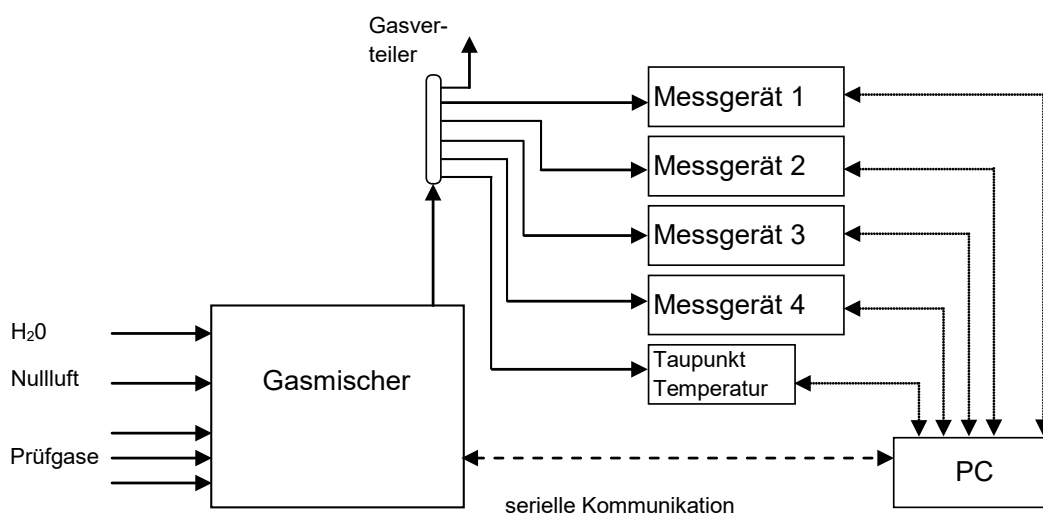


Abb. 4-12: Gerätetestplatz im Kalibrierlabor

Im Rahmen der durchgeführten Gerätetests werden bei den eingesetzten Immissionsmessverfahren diverse Kenngrößen bestimmt <sup>[30],[31]</sup>. Die nachfolgende Beschreibung ist auf Messgeräte zur kontinuierlichen Bestimmung von gasförmigen Komponenten in Aussenluft (SO<sub>2</sub>, NO/NO<sub>2</sub>, Ozon, CO und CH<sub>4</sub>/NMVOC) ausgelegt. Es werden die in der Praxis wichtigsten Kenngrößen ermittelt. Das Messverfahren wird jedoch nicht vollständig charakterisiert.



### 4.7.1. Kalibrierfunktion

Die Kalibrierfunktion beschreibt die Abhängigkeit des Ausgangssignals von der Konzentration der zu analysierenden Substanz.

#### Mehrpunktkalibration

Bei einer Mehrpunktkalibration werden Wiederholungsmessungen von mindestens fünf über den Messbereich gleichmässig verteilten Konzentrationen (einschliesslich Nullpunkt) durchgeführt. Die Abfolge der Konzentrationsstufen sollte sich nach der in Abb. 4-13 skizzierten Vorgehensweise richten oder kann wie bei der Ozonkalibration in zufälliger Folge ablaufen.

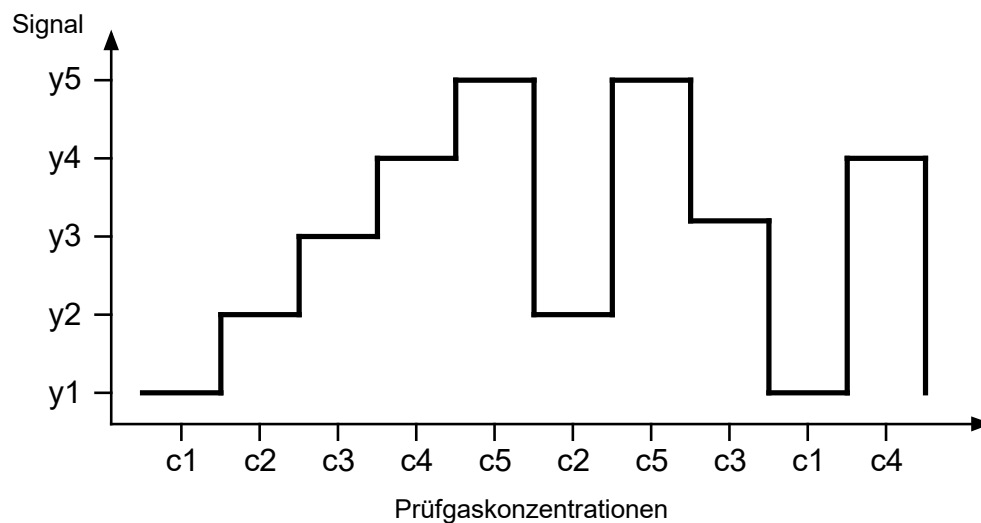


Abb. 4-13: Konzentrationsstufenfolge für Mehrpunktkalibration

Die Kalibrierfunktion erhält man aus der Regression über alle Wertepaare. Für die erwähnten Messgeräte verwendet man den linearen Ansatz:

$$\hat{y} = m \cdot c + b$$

$\hat{y}$	Erwartungswert (am Messgerät) aufgrund der Kalibrierfunktion
$m$	Steigung der Kalibrierfunktion
$b$	Achsenabschnitt der Kalibrierfunktion
$c$	Gaskonzentration (Sollwert)

In der Regel wird das Messgerät mittels der Kalibrierfunktion so eingestellt, dass die Gaskonzentration ( $c$ ) dem Messwert ( $y$ ) entspricht.

Für die Auswertung der Kalibrierfunktion werden folgende Grössen berechnet:

- Gaskonzentration (Sollwert)  $c_j$  der Stufe  $j$ . Sie wird aus der Konzentration des verwendeten Prüfgases und der allfälligen Verdünnung berechnet. Bei der Ozon-Kalibration ist es der Messwert des Ozon-TransfERNormals.
- Mittlerer Messwert  $\bar{y}_j$  jeder Stufe  $j$ :  
( $n$  = Anzahl Messungen pro Stufe) 
$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ji}}{n}$$
- Abweichung  $\Delta_j$  vom Sollwert: 
$$\Delta_j = \bar{y}_j - c_j$$
- Koeffizienten  $m$  und  $b$  der Kalibrierfunktion: 
$$\hat{y} = m \cdot c + b$$
- Residuen  $d_j$  (Abweichung des Messwerts vom Erwartungswert): 
$$d_j = \bar{y}_j - \hat{y}_j$$
- Standardabweichung  $s_{\bar{y}_j}$  der Messwerte jeder Stufe  $j$ : 
$$s_{y_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1}}$$

### Linearität

Anhand der Mehrpunktkalibration lässt sich die angenommene Linearität überprüfen. Der Linearitätsfehler wird aufgrund der Residuen  $d_j$  ermittelt.

Die Nichtlinearität wird für jede Konzentrationsstufe berechnet:

$$L_j = \frac{d_j}{y_{\max}} \cdot 100\%$$

( $L_j$  = Nichtlinearität der Stufe  $j$  in %,  $y_{\max}$  = höchster Messwert)

Massgebend ist der betragsmässig grösste Linearitätsfehler  $L_j$ . Um von einer linearen Kalibrierfunktion ausgehen zu können, sollte der Linearitätsfehler eines Analysators  $< 1\%$  sein. Ist dies nicht der Fall, muss die Kalibration durch eine nichtlineare Funktion beschrieben werden.

### Beurteilung

- Nichtlinearität  $L$ :  $\leq \pm 0.5 \%$

## 2-Punktkalibration

Ist die Kalibrierfunktion bekannt und kann der lineare Ansatz verwendet werden, so kann für die Routinemessung das vereinfachte Verfahren der 2-Punktkalibration eingesetzt werden. Mit der Messung am Null- und an einem Kalibrierpunkt (Spanpunkt) wird das Messgerät überprüft und gegebenenfalls auf den Sollwert abgestimmt.

Dazu wird Nullluft und Prüfgas verwendet, das unverdünnt ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) oder zusätzlich mit Nullluft verdünnt wird ( $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ). Die Ozonkalibration erfolgt mit einem Transferstandard. Werden Prüfgase mit einer Gasmischeinheit verdünnt, so müssen die Durchflüsse mit einem Volumenstrommessgerät ermittelt werden. Man verwendet dazu entweder das Primärnormal (DHI Molbloc/Molbox1) oder das Transfernormal.

Die 2-Punktkalibration wird nach Bedarf, aber mindestens 14-täglich durchgeführt.

### 4.7.2. Drift (Stabilität)

Als Drift bezeichnet man die Änderung von Null- und Kalibrierpunkt über eine gegebene Zeitdauer, innerhalb der nicht justiert wird. Er wird als Messwertänderung pro Zeit angegeben.

- Aus mindestens drei (14-täglichen) 2-Punktkalibrationen wird der Drift berechnet (Abb. 4-14).

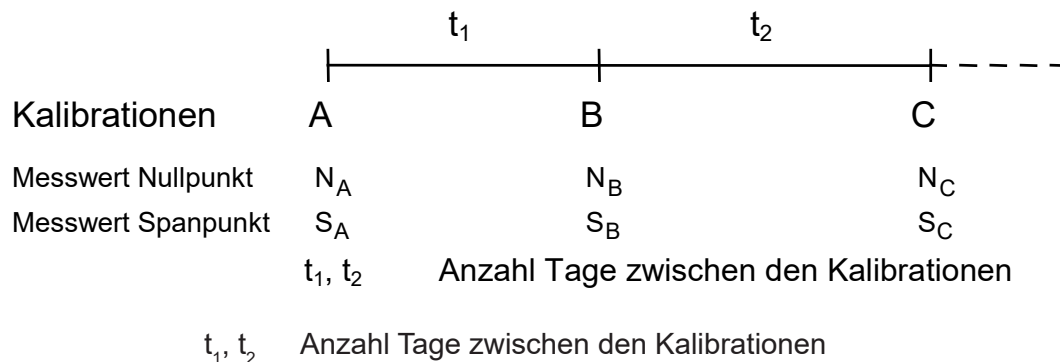


Abb. 4-14: Schema zur Berechnung des Drifts

- Der tägliche Nullpunktdrift  $D_{N1,24h}$  für das Intervall 1 wird wie folgt berechnet:

$$D_{N1,24h} = \frac{N_B - N_A}{t_1}$$

Entsprechend werden die Drifts für die weiteren Kalibrierintervalle berechnet.

- Die Spanpunktdrifts  $D_{S1,24h}$  werden in Prozent der Kalibriergaskonzentration berechnet:

$$D_{S1,24h} = \frac{S_B - S_A}{t_1 \cdot c_S} \cdot 100\%$$

$c_S$                       Spangaskonzentration

- Aus dem mittleren täglichen Drift von Null- und Spanpunkt wird auf 14 Tage hochgerechnet.

$$D_{N,24h} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{Ni,24h}}{n}$$

mittlerer täglicher Nullpunktdrift

$$D_{N,2W} = 14 \cdot D_{N,24h}$$

Nullpunktdrift in 2 Wochen

## Beurteilung

- maximaler Nullpunktdrift  $D_{N,2W}$  in 2 Wochen:
 

$\text{SO}_2$	$\pm 0.2 \text{ ppb}$
$\text{NO/NO}_x$	$\pm 0.2 \text{ ppb}$
$\text{O}_3$	$\pm 0.3 \text{ ppb}$
$\text{CO}$	$\pm 0.02 \text{ ppm}$
$\text{CH}_4/\text{THC}$	$\pm 0.01 \text{ ppm}$
- maximaler Spanpunktdrift  $D_{S,2W}$  in 2 Wochen für alle Gase:  $\pm 2\%$

### 4.7.3. Signalrauschen

Das Signalrauschen wird mit einer definierten Zeitkonstante oder Signalfiltereinstellung (in der Regel gleich wie für die Aussenluftmessung) am Nullpunkt und bei einer geeigneten Konzentration ermittelt. Dazu werden während  $\frac{1}{2}$  - 1 Stunde die Einzelwerte (z.B. alle 10 s) gespeichert. Dabei ist wichtig, dass die Gaskonzentration über die ganze Periode konstant bleibt.

Aus den Einzeldaten wird die Standardabweichung berechnet. Dazu muss die Konzentration und die verwendete Zeitkonstante, Signalfiltereinstellung oder Integrationszeit angegeben werden. Aus dem Zeitverlauf der Einzelwerte ist auch der Bereich ersichtlich, innerhalb dem das Signal schwankt. Liegen keine Ausreisser vor, so beträgt die Bandbreite des Rauschens ca. die 5-fache Standardabweichung (Abb. 4-15).

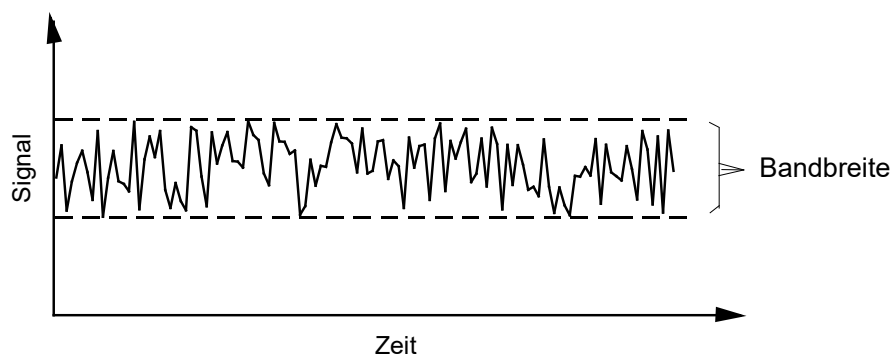


Abb. 4-15: Signalrauschen und Bandbreite

Standardabweichung am Nullpunkt:

$$s_{(c=0)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

Standardabweichung am Spanpunkt:

$$s_{(c=\text{Span})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$



## Beurteilung

Da das Signalrauschen von der Signalfilterung des Gerätes abhängig ist, ist eine Beurteilung nur zusammen mit dem zeitabhängigen Verhalten des Analysators möglich.

### 4.7.4. Zeitabhängiges Verhalten

Unter dem zeitabhängigen Verhalten versteht man die Charakteristik des Ausgangssignals bezüglich einer zeitlichen Änderung des Eingangssignals (Abb. 4-16). In der Praxis genügt

es häufig, die Sprungantwort zu ermitteln und durch empirische Kenngrößen zu beschreiben.

Die Totzeit  $T_{10}$  ist der Zeitabstand zwischen der sprunghaften Änderung der Schadstoffkonzentration und dem Anstieg auf 10% des Endwertes.

Die Einstellzeit  $T_{90}$  gibt an, wie rasch bei einer sprunghaften Änderung der Probegaskonzentration das Messsignal auf 90% des Endwertes ansteigt.

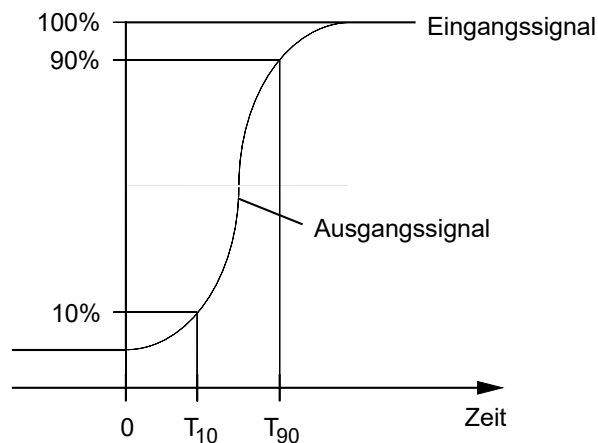


Abb. 4-16: Sprungfunktion; Tot- und Einstellzeit

Ermittelt werden die beiden Größen, indem man von der Nullluft, mit Hilfe eines Ventils, ohne Verzögerung auf eine konstante Probengaskonzentration umschaltet. Das Messsignal wird auf einem Schreiber oder einem Datenlogger (1 s Einzelwerte) registriert. Aus der Aufzeichnung können die  $T_{10}$ - und  $T_{90}$ -Werte herausgelesen werden. Zu den Kenngrößen muss die verwendete Zeitkonstante, Signalfiltereinstellung oder Integrationszeit angegeben werden.

## Beurteilung

Die Totzeit  $T_{10}$  sollte 2 Minuten nicht überschreiten.

Die Einstellzeit  $T_{90}$  sollte 2.5 Minuten nicht überschreiten.

### 4.7.5. Nachweisgrenze / Bestimmungsgrenze

#### Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze ist die kleinste Schadstoffkonzentration, die qualitativ mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% vom Zustand Null unterschieden werden kann.

Die Nachweisgrenze  $\underline{c}$  wird aus der Standardabweichung der Nullpunktmessung berechnet:

$$\underline{c} = \frac{1}{m} \cdot t_{J-1;0.95} \cdot s_{(c=0)}$$

$m$	Steigung der Kalibrierfunktion
$t_{J-1;0.95}$	t-Faktor, 95% Sicherheit (P) für J - 1 Messwerte
$s_{(c=0)}$	Standardabweichung der Messwerte bei c = 0

Ist  $m = 1$  und liegen 60 Einzelwerte am Nullpunkt vor, so ergibt sich für  $\underline{c}$  mit  $P = 0.975$

Die Nachweisgrenze ist somit die doppelte Standardabweichung des Nullpunktrauschens.

Gemäss den „Empfehlungen über die Immissionsmessung von Luftfremdstoffen“ (BAFU)<sup>[25]</sup> sollte die Nachweisgrenze 10% des Langzeitimmissionsgrenzwertes nicht übersteigen. Das ergibt folgende maximale Nachweisgrenzen:

$$\begin{aligned} \text{SO}_2: \quad \underline{c} &\leq 1.1 \text{ ppb} \\ \text{NO}_2: \quad \underline{c} &\leq 1.6 \text{ ppb} \end{aligned}$$

Für NO, O<sub>3</sub> und CO bestehen keine Langzeitimmissionsgrenzwerte.

#### Beurteilung

Je nach Belastung der Station werden für die SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Messung Monitore mit unterschiedlicher Nachweisgrenze eingesetzt.

tolerierte Nachweisgrenze

SO <sub>2</sub>	0.1 resp. 0.2 ppb
NO	0.1 resp. 1.0 ppb
NO <sub>2</sub>	0.1 resp. 1.5 ppb
O <sub>3</sub>	0.5 ppb
CO	0.025 ppm
CH <sub>4</sub> /THC	0.025 ppm

#### Bestimmungsgrenze

Die Bestimmungsgrenze  $\underline{C}$  ist die kleinste Schadstoffkonzentration, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% von der Nachweisgrenze unterschieden werden kann.

Sie wird ebenfalls aus der Standardabweichung der Nullpunktmessung berechnet:

$$\underline{C} = \frac{1}{m} \cdot 2t_{J-1;0.95} \cdot s_{(c=0)} \quad \text{oder} \quad \underline{C} = 2 \cdot \underline{c}$$

### Beurteilung

Je nach Belastung der Station werden für die SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Messung Monitore mit unterschiedlicher Bestimmungsgrenze eingesetzt.

maximale Bestimmungsgrenze  $\underline{C}$ :

SO <sub>2</sub>	0.2 resp. 0.4 ppb
NO	0.2 resp. 2.0 ppb
NO <sub>2</sub>	0.3 resp. 3.0 ppb
O <sub>3</sub>	1.0 ppb
CO	0.05 ppm
CH <sub>4</sub> /THC	0.05 ppm

### 4.7.6. Wiederholbarkeit oder Wiederholgrenze r

Die Wiederholgrenze r bezeichnet den Betrag, um den sich zwei Messwerte, die unter Wiederholbedingungen ermittelt wurden, höchstens unterscheiden (mit einer Wahrscheinlichkeit von 95%):

$$r = t_{N-1;0.95} \cdot \sqrt{2} \cdot s_r$$

$t_{N-1;0.95}$     t-Faktor für N - 1 Messwerte, 95% Sicherheit (P)  
 $s_r$             Standardabweichung, ermittelt unter Wiederholbedingungen

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad n = \text{Anzahl Messungen}$$

Für den Fall, dass 16 Wiederholungen vorliegen, kann mit  $r = 3 \cdot s_r$  gerechnet werden.

Das Messgerät wird abwechselungsweise mit Nullluft und Prüfgas beaufschlagt (Abb. 4-17). Es werden in der Regel 16 bis 20 Wiederholungen durchgeführt und dabei Mittelwerte (10 Min.) für die Null- ( $y_{N,i}$ ) und Spanpunkte ( $y_{S,i}$ ) registriert.

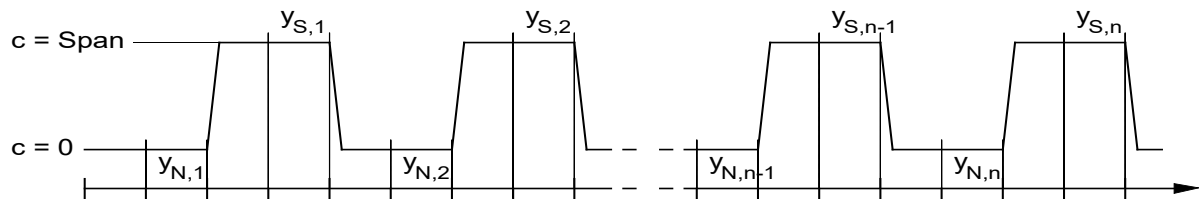


Abb. 4-17: Wiederholgrenze: Konzentrationsfolge

Aus den Standardabweichungen der Mittelwerte wird  $r$  für den Null- und Spanpunkt berechnet.

### Beurteilung

Je nach Belastung der Station werden für die  $\text{NO}_x$ -Messungen Monitore mit unterschiedlicher Wiederholgrenze eingesetzt.

- maximale Wiederholgrenze  $r$  am Nullpunkt:

$\text{SO}_2$	0.1 ppb
NO	0.05 resp. 0.5 ppb
$\text{O}_3$	0.4 ppb
CO	0.02 ppm
$\text{CH}_4/\text{THC}$	0.02 ppm

- maximale Wiederholgrenze  $r$  am Spanpunkt für alle Gase: 0.7% von  $\bar{y}_s$

$$\bar{y}_s = \frac{\sum_{i=1}^n y_{s,i}}{n} \quad \text{mittlerer Spanmesswert}$$

### 4.7.7. Querempfindlichkeit / Selektivität

Bestimmte Stoffe können einen Einfluss auf das Messverfahren haben. Die Störung durch Querempfindlichkeit kann entweder zu einer Zunahme oder Verminderung des Messsignals führen. Untersucht werden solche Komponenten, die aufgrund des Messprinzips einen Einfluss auf den Messwert erwarten lassen. Zu beachten ist auch eine mögliche Kombinationswirkung verschiedener Stoffe.

Folgende beispielhaft aufgeführte Komponenten können einen Einfluss ausüben:

- Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , Benzol, Ethen etc.

Die Untersuchungen werden bei einer Messkomponentenkonzentration von Null und in der

Höhe des Kurzzeitgrenzwertes durchgeführt. Die Testkonzentrationen der Störgrößen sollen möglichst einem im Untersuchungsgebiet üblichen maximalen Halbstundenmittelwert entsprechen.

Die Querempfindlichkeit wird als prozentuale Änderung der Messgrösse bezogen auf die Störgrössenkonzentration angegeben:

$$q = \frac{y_{\text{St}} - y}{c_{\text{St}}} \cdot 100\%$$

q	Querempfindlichkeit in %
y	Messwert ohne Störkomponente
y <sub>St</sub>	Messwert mit Störkomponente
c <sub>St</sub>	Störgrössenkonzentration

Bei einer Geräteevaluation werden in der Regel je nach Gerätetyp folgende Querempfindlichkeiten untersucht:

Störgrösse	H <sub>2</sub> O	NO	HNO <sub>3</sub>	HNO <sub>2</sub>	PAN	NH <sub>3</sub>	Benzol	CO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
SO <sub>2</sub> -Analysator	X	X							
NO/NO <sub>x</sub> -Analysator	X		X	X	X	X			
O <sub>3</sub> -Analysator	X						X		
CO-Analysator	X							X	X
THC-Analysator	X								

Bei den regelmässigen durchgeführten Gerätetests wird immer der Einfluss der Luftfeuchtigkeit überprüft. Beim SO<sub>2</sub>-Analysator wird zusätzlich die Querempfindlichkeit von NO bestimmt.



## 4.8. Wartung

Ein wichtiges Element der Qualitätssicherung ist die minuziöse **Wartung der Messstation**. Ähnlich den bisherigen Checklisten werden die anfallenden Angaben elektronisch erfasst und in einer Datenbank abgelegt (Wartungstool).

Die Wartungsarbeiten umfassen neben den manuellen Kalibrationen (siehe Kapitel 4.5.) auch das Reinigen der Geräte oder das Austauschen einzelner Bestandteile oder ganzer Messgeräte. Das Zeitintervall für diese Arbeiten richtet sich nach Erfahrungswerten der Standzeiten dieser Einzelkomponenten. Die folgende Zusammenstellung umfasst Schwerpunkte der unterschiedlichen **Wartungsintervalle bei Immissionsanalysatoren**:

Messgrösse	Wartung	Wartungsintervall
<b>Ozon</b>	• Drucksensor überprüfen	3 Monate
	• mit Transferstandard kalibrieren	6 Monate
	• Messzelle reinigen	6 Monate
	• Service durchführen lassen	2 Jahre
	• Scrubber ersetzen	2 Jahre/nach Bedarf
<b>NO<sub>x</sub></b>	• Konverterwirkungsgrad überprüfen	1 Jahr
	• Service durchführen lassen	1 - 2 Jahre
<b>CO</b>	• Service durchführen lassen(Horiba Geräte)	1 Jahr
<b>THC</b>	• mit Propan prüfen	6 Monate
	• Service durchführen lassen	1 Jahr
<b>SO<sub>2</sub></b>	• Drucksensor überprüfen	6 Monate
	• Service durchführen lassen	2 Jahre
<b>Feinstaub</b>	• Fidas 200: Überprüfung mit Referenzstaub	4 Monate
	• Fidas 200: Durchflussskalibration	6 Monate
	• HIVOL: Durchfluss überprüfen	6 Monate
<b>Kalibratoren</b>	• Verdünnungseinheit: Durchfluss der MFC messen	6 Monate
<b>Nullluft</b>	• Aktivkohle ersetzen	6 Monate
	• Purafil ersetzen	2 Jahre
<b>allgemein</b>	• Stichleitungen auf Verluste prüfen	6 Monate
	• Ringleitung reinigen + Durchfluss messen	0.5 -1 Jahr

Wie bereits erwähnt, wird alle 25 Stunden eine automatische Nullpunkt- und Spanpunktüberprüfung ausgelöst, dessen Resultat auf der Zentrale jederzeit verfügbar ist. Dies erlaubt auch zwischen den Besuchen der Station eine Kontrolle über den Zustand der Messgeräte.

Die Wartung der meteorologischen Messgeräte ist stark von der jeweiligen Messgrösse abhängig. Daher sind in der folgenden Tabelle die Wartungsarbeiten nach einzelnen Meteorologiegrossen gegliedert.

**Wartung der meteorologischen Messgeräte**

<b>Messgrösse</b>	<b>Wartung</b>	<b>Wartungsintervall</b>
<b>Wind</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtkontrolle</li> <li>• Service + Funktionskontrolle durch Hersteller</li> </ul>	2- 4 Wochen 10 Jahre
<b>Niederschlag/ Lamprecht 1518 H3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigung des Trichters</li> <li>• Reinigung der Wippe</li> <li>• Kalibration des Regenmessers (200ml)</li> <li>• Service</li> </ul>	4 Wochen / bei Bedarf 2 Monate / bei Bedarf 2 Jahre 10 Jahre
<b>Niederschlag/ Pluvio<sup>2</sup>S und L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigung/Entleeren des Behälters</li> <li>• Frostschutz einfüllen</li> <li>• Kalibration des Regenmessers (200 ml)</li> <li>• Service</li> </ul>	bei Bedarf Oktober/November 2 Jahre 10 Jahre
<b>Globalstrahlung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigung der Glashaube</li> <li>• Filtermatte reinigen/ersetzen</li> <li>• Abdeckung vom Gehäuse reinigen</li> <li>• Rekalibration</li> </ul>	2/4 Wochen 3 Monate 6 Monate 10 Jahre
<b>Druck</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geber überprüfen (Druckkalibrator)</li> <li>• Service und Kalibration</li> </ul>	4 Jahre 10 Jahre
<b>Relative Feuchte + Temperatur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle Ventilator vom Gehäuse</li> <li>• Schutzkappe Fühler ersetzen</li> </ul>	2/4 Wochen 1 Jahr

Die folgende Tabelle zeigt die diversen Verbrauchsmaterialien, die zur Wartung der Immissionsanalysatoren verwendet werden.

**Verbrauchsmaterial (kontinuierliche Messung)**

<b>Verbrauchsmaterial</b>		<b>Hersteller</b>
<b>EingangsfILTER (Messgeräte)</b>		
SO <sub>2</sub> (Thermo)	Membranfilter TE38 (5 µm; Whatman Switzerland PTFE, Stützgewebe: PES)	
NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> (Thermo)	Membranfilter TE47, (5 µm; Whatman Switzerland PTFE, Stützgewebe: PES)	
NO <sub>x</sub> , THC (Horiba)	Teflonfilter, (3 µm)	Horiba
CO (Horiba)	Papierfilter	Horiba
<b>Chemikalien für Nullluft</b>		
Aktivkohle	4*8 mesh, Aqua/Ecosorb	Schneider Umwelttechnik AG
Purafil II	Chemisorbant 4% KMnO <sub>4</sub>	MANN+Hummel Vokes Air AG
<b>Ventile für Kalibrier gases</b>		<b>Hersteller</b>
NO, CO, synthetische Luft	Doppelstufenreduzierventil RVVUD	Lüdi
SO <sub>2</sub>	Druckreduzierventil Ucar HTS-200-5	Praxair/ Pan Gas

Um eine optimale Stationswartung zu gewährleisten, wird ein- und dieselbe Station über einen längeren Zeitraum (2 Jahre) vom selben Servicetechniker betreut. Dieser ist dann auch in der Lage, kleine Veränderungen wahrzunehmen und unverzüglich die entsprechenden Massnahmen einzuleiten.

Eine sorgfältig durchgeführte, prophylaktische Wartung trägt wesentlich zu einer lückenlosen Messreihe bei.

## 4.9. Ringversuche

Ringversuche sind geeignet, um quantitative Aussagen über die Zuverlässigkeit von Analyseverfahren zu gewinnen. Mit der Durchführung von Ringversuchen können verschiedene Zwecke verfolgt werden:

- Bestimmung von Vergleichsgrenzen verschiedener Labors
- Ermittlung von verfahrensspezifischen Präzisionsdaten
- Vergleich verschiedener Messverfahren
- Ausbildung der Teilnehmer
- Bestimmung von Messunsicherheiten

Entsprechend der angestrebten Zielsetzung muss die Planung des Ringversuches vorgenommen werden.

Es gibt zwei verschiedene Typen von Ringversuchen:

- Ringversuche Typ I: Teilnehmer verschiedener Institute führen an einem gemeinsamen Ort mit ihrer eigenen Messtechnik Parallelmessungen durch.
- Ringversuche Typ II: Im Normalfall werden identische Proben von mehreren Instituten unabhängig voneinander mit der eigenen Messtechnik analysiert.

### Teilnahme an Ringversuchen

Die Teilnahme an nationalen und internationalen Ringversuchen ist ein wichtiges Element der Qualitätssicherung und bietet immer wieder eine willkommene Gelegenheit, allfällige Schwachstellen der verwendeten Messmethoden zu erkennen. Eine Teilnahme sollte - wenn immer möglich - in regelmässigen Abständen wiederholt werden. An folgenden Ringversuchen wurde im Rahmen des NABEL teilgenommen:

Thema / Komponenten	Veranstalter	Jahr/Zeitraum	Typ
<p>Regen:</p> <p>pH, Leitfähigkeit, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup></p> <p>G-samples (precipitation) – Resultate (Labor ID: 21, Switzerland) sind unter: <a href="http://www.nilu.no/projects/ccc/intercomparison/">http://www.nilu.no/projects/ccc/intercomparison/</a> verfügbar</p>	EMEP/NILU	jährlich	II
<p>Regen:</p> <p>pH, Leitfähigkeit, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup></p> <p>STUDY RESULTS (LABOR ID: 700035, Switzerland) sind unter: <a href="http://www.gasac-america.org/">http://www.gasac-america.org/</a> verfügbar</p>	WMO	2 x / Jahr*	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	TU Berlin	1995	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	IUHT Lausanne	1996	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	IUHT Lausanne	1998	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	EUSAAR	2008	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	JRC Ispra	2008/09	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	EUSAAR	2010	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	GGD Amsterdam	2010	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	AQUILA	2011	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	ACTRIS	2011	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	GGD Amsterdam	2012	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	ACTRIS	2014	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	ACTRIS/EMEP	2015	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	ACTRIS/EMEP	2016	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	ACTRIS/EMEP	2018	II
Russ: EC- und OC-Analytik auf Filtern	ACTRIS/EMEP	2023	II

\*2020 wurde wegen COVID-19 nur ein RV durchgeführt



**GASE und FEINSTAUB:**

Thema / Komponenten	Veranstalter	Jahr/Zeitraum	Typ
NO, NO <sub>2</sub>	EMEP/NILU/UBA	1991	I
O <sub>3</sub>	LANUV	1992	I
NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	LANUV	1992	I
NO, NO <sub>2</sub> , CO	LANUV	1993	I
VOC: C2 – C8	EMEP	1993	II
VOC: C2 – C8, Aromaten	JRC/Ispra	1994	II
VOC C2 – C8, Aromaten	Cercl' Air	1996	II
VOC: C2 – C6, Benzol	IFU, NPL, NILU	1997	II
VOC: C2 – C8, Aromaten	Cercl' Air	1998	II
VOC: C2 – C9, Aromaten	IFU, NPL, NILU	1998	II
NO, NO <sub>2</sub> , CO	WHO, UBA	1998	I
VOC: C2 – C9, Aromaten	IFU, NPL, NILU	1999	II
VOC: C2 – C9, Aromaten	IFU, NPL, NILU	2000	II
NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub>	JRC/Ispra	2000	I
Feinstaub PM10	Cercl' Air	2001	I
NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO	JRC/Ispra	2005	I
VOC: C2 – C8, Aromaten	JRC/Ispra	2007	II
VOC: C2 – C8, Aromaten	IFU	2007	II
NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub>	JRC/Ispra	2008	I
CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> (CRDS)	NOAA/WMO	2010	II
N <sub>2</sub> O (GC-ECD)	NOAA/WMO	2010	II
H <sub>2</sub> (GC-RGA)	NOAA/WMO	2010	II
VOC: C2 – C8, Aromaten	ACTRIS	2012	II
NO	ACTRIS	2012	II
NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub>	JRC/Ispra	2013	I
OVOC	ACTRIS/DWD	2012	I
CO (CRDS)	NOAA/WMO	2014	II
SF <sub>6</sub> (GC-MS Medusa)	NOAA/WMO	2014	II
CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	UEA	Jährlich (seit 2012)	II
Feinstaub PM10, PM2.5	JRC/Ispra	2015	I
CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	ICOS	2015	I
VOC: C2 – C7, Aromaten	WCC-VOC/KIT	2017	II
VOC: Propan, Hexan, Benzol; OVOC	HPB	2018	II
Feinstaub PM10, PM2.5	JRC/Ispra	2022	I
VOC: C2 – C7, Aromaten; OVOC	MetClim VOC	2023	II

## 4.10. Stationsaudits und Ringversuche im Rahmen des GAW Programms

Unabhängige Qualitätskontrollen werden auch im Rahmen des Global Atmosphere Watch (GAW) Programms durchgeführt. Das GAW-Programm, welches von der Weltmeteorologieorganisation (WMO) koordiniert wird, ist ein weltweites Programm zur Messung der Luftqualität an unbelasteten Standorten. Das NABEL trägt mit der globalen GAW-Station Jungfraujoch und den regionalen GAW-Stationen Rigi, Payerne und Beromünster zum GAW-Messnetz bei. Mehrere Weltkalibrierzentren (World Calibration Centres; WCCs) wurden für das GAW-Programm etabliert, die in regelmässigen Intervallen die GAW Messstationen vor Ort auditieren. Die Audits beinhalten Vergleichsmessungen von komprimierten Gasen (für CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, VOCs) bzw. Vergleichsmessungen mit einem Transfergerät (für O<sub>3</sub>) sowie eine Evaluation der gesamten Infrastruktur, des Datenmanagements und der Qualitätskontrollen. An NABEL-Stationen wurden bisher die folgenden Stationsaudits durchgeführt:

### Stationsaudits:

Station	Jahr	Komponenten	Organisation
JUN	1999	CO, O <sub>3</sub>	WCC-Empa
JUN	2006	N <sub>2</sub> O	WCC-N <sub>2</sub> O
JUN	2006	CO, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub>	WCC-Empa
RIG	2007	VOCs	WCC-VOC (IMK-IFU)
JUN	2007	VOCs	WCC-VOC (IMK-IFU)
JUN	2011	VOCs	WCC-VOC (IMK-IFU)
JUN	2015	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub>	WCC-Empa
JUN	2017	VOCs	WCC-VOC (IMK-IFU)
JUN	2021	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	WCC-Empa

Die Auditreports von WCC-Empa und WCC-N<sub>2</sub>O für Jungfraujoch und Rigi sind unter <https://www.empa.ch/web/s503/wcc-empa> verfügbar.

### Ringversuche:

Die GAW Station Jungfraujoch nimmt regelmässig an WMO Ringversuchen für Treibhausgase, organisiert von der NOAA, teil.

Station	Jahr	Komponenten	Organisation
JUN	2010	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub>	WMO/NOAA
JUN	2014	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub>	WMO/NOAA
JUN	2023	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O	WMO/NOAA

Die Resultate der WMO/IAEA Round Robin Comparison Experimente sind unter <https://gml.noaa.gov/ccgg/wmor/index.html> verfügbar.

## 5. MESSUNSICHERHEITEN

### 5.1. Allgemeines

Die Angabe der Unsicherheit einer Messung ist ein fester Bestandteil eines Messergebnisses. Nur mit Kenntnis der Messunsicherheiten können Messwerte beurteilt und miteinander verglichen werden.

#### Definition Messunsicherheit

Die Messunsicherheit ist der dem Messergebnis zugeordnete Parameter, der die Streuung der jeweiligen Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden <sup>[32]</sup>.

Mit dem *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM)* <sup>[32]</sup> steht eine umfassende Anleitung zur Ermittlung der Unsicherheit von Messungen zur Verfügung. Im NABEL wird das darin empfohlene Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten eingesetzt.

Der *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM)* empfiehlt für die Ermittlung der Messunsicherheit ein Vorgehen in mehreren Schritten (leicht gekürzt):

1. Beschreibung der Beziehung der Messgrösse und allen relevanten Einflussgrössen bzw. Unsicherheitskomponenten.
2. Ermittlung der Standardunsicherheit jeder Einflussgrösse. Bei korrelierten Einflussgrössen müssen die Kovarianzen bestimmt und berücksichtigt werden.
3. Bestimmung der kombinierten Standardunsicherheit und der erweiterten Unsicherheit des Messergebnisses.
4. Dokumentation der ermittelten Messunsicherheiten.

Beim *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM)* liegt der Schwerpunkt auf dem so genannten indirekten Ansatz, d.h. es werden die Standardunsicherheiten aller Einflussgrössen getrennt ermittelt. Typische Einflussgrössen bei Luftschadstoffmessungen sind:

- Unsicherheit des Referenznormal
- Unsicherheit des TransfERNormal
- Linearität des Messgerätes
- Wiederholbarkeit des Messgerätes
- Messgeräteraustausch und Messgerätedrift
- Abhängigkeit des Messwertes von Luftdruck und Lufttemperatur
- Querempfindlichkeit gegenüber Wasser und anderen Verbindungen
- Unsicherheit durch Restgehalt in der Nullluft

Alternativ oder ergänzend kann auch der direkte Ansatz verfolgt werden (EN ISO 20988, Air quality – Guidelines for estimating measurement uncertainty, 2007) <sup>[33]</sup>. Dabei wird z.B. durch

- Wiederholte Messungen von Referenzmaterialien, oder
- Vergleichsmessungen mit identischen Messeinrichtungen

die kombinierte Unsicherheit von mehreren Einflussgrössen bestimmt. Unsicherheiten durch Einflussgrössen die bei einem direkten Ansatz nicht variiert werden, müssen hierbei getrennt berücksichtigt werden.

Für die verschiedenen kontinuierlichen Messungen werden im NABEL typischerweise Messgeräte basierend auf dem jeweiligen Referenzverfahren (siehe Kap. 3) eingesetzt. Die Bestimmung der Messunsicherheit in diesen Referenzverfahren beruht auf der Europäischen Norm EN ISO 14956 (Luftbeschaffenheit; Beurteilung der Eignung eines Messverfahrens durch Vergleich mit einer geforderten Messunsicherheit, 2003) <sup>[34]</sup>.

Im NABEL werden die Messunsicherheiten analog dem indirekten Ansatz der entsprechenden Norm bestimmt. Zusätzlich wurde der Unsicherheitsparameter „Unsicherheit bezüglich Änderung des Differenzdrucks“ in die Berechnung aufgenommen, da an der Station Davos aufgrund der langen Messleitungen ein Einfluss zu erwarten ist.

In Kapitel 5.2 wird die Berechnung der Messunsicherheit am Beispiel von Ozon ausführlich beschrieben, in Kapitel 5.3 finden sich Tabellen mit den Messunsicherheiten der kontinuierlich gemessenen gasförmigen Luftschadstoffe.

Die ermittelten Messunsicherheiten werden durch Unsicherheitsabschätzungen anhand von Vergleichsmessungen mit identischen Messeinrichtungen (Parallelmessungen) verglichen (direkter Ansatz).

Es ist schliesslich wichtig zu erwähnen, dass die Messunsicherheit eine Angabe über die Unsicherheit der Richtigkeit eines Messergebnisses nach der Korrektur aller bekannter systematischer Fehler darstellt. Die Umsetzung der im Kapitel 4 beschriebenen Elemente der Qualitätssicherung ermöglicht das Erkennen und Korrigieren von systematischen Fehlern. Da eine vollständige Korrektur von allen systematischen Fehlern nicht möglich ist, tragen unvollständig korrigierte systematische Fehler zur Messunsicherheit bei.

## 5.2. Berechnung der Messunsicherheit am Beispiel Ozon

Die Berechnung der Messunsicherheit von Ozon folgt in weiten Teilen dem Referenzverfahren CEN Norm EN 14625<sup>[6]</sup>. Anstelle des Unsicherheitsbeitrages „Unsicherheit Kalibriergas“ im Referenzverfahren werden im NABEL die beiden Unsicherheitsbeiträge „Unsicherheit des Primärnormals für Ozon“ und „Unsicherheit des Empa TransfERNormals (TN)“ verwendet.

### 5.2.1. Unsicherheit des Primärnormals für Ozon

Das NABEL setzt ein Standard-Referenzphotometer (SRP#15) als primäres Ozonnormal ein (siehe Kap. 4.2.1). Dieses wird regelmässig mit baugleichen Geräten (z.B. beim Bundesamt für Metrologie METAS) verglichen.

Die Abschätzung der Unsicherheit eines SRP ist in der Publikation von Viallon et al. (2012)<sup>[35]</sup> beschrieben. Bei der Berechnung der Standardunsicherheit  $u_{\text{SRP}}$  wurde die Unsicherheit des Absorptionskoeffizienten ( $u_a = 1.06\%$ )<sup>[36]</sup> berücksichtigt und folgende kombinierte Standardunsicherheit für ein SRP ermittelt:

$$u_{\text{SRP}} = \sqrt{(0.31\text{ppb})^2 + (0.011 \cdot c)^2}, \text{ mit } 0 \leq c \leq 250\text{ppb}.$$

#### Kontrolle des Primärnormals

Das SRP der Empa (SRP#15) wird kontrolliert, indem es mit einem zweiten SRP, d.h. mit einem zweiten Primärnormal verglichen wird. Das SRP#15 wird jährlich mit mindestens einem anderen SRP verglichen, eine Vergleichsmessung beim BIPM (International Bureau of Weights and Measures) in Paris wird mindestens alle 4 Jahre vorgenommen.

Unter der Annahme, dass beide baugleichen SRP die gleiche erweiterte Messunsicherheit  $U_{\text{SRP}}$  aufweisen sollten 95% der Differenzen der erhobenen Messwerte ( $_{\text{SRP}}, \Delta_{\text{SRP}}$ ) folgende Bedingung erfüllen:

$$|\Delta_{\text{SRP,SRP}}| \leq \sqrt{2} \cdot U_{\text{SRP}}$$

### 5.2.2. Unsicherheit des Empa-TransfERNormals (TN)

Als TransfERNormal (TN) dient ein Photometer des Typs 49C-PS der Firma Thermo. Dieser Standard wird halbjährlich durch eine Mehrpunkt-Vergleichsmessung mit dem SRP kalibriert.

Für das TN sind die Standardunsicherheiten der Einflussgrössen auf die Ozonmessung nicht bekannt, die kombinierte Messunsicherheit wird aufgrund von Herstellerangaben und durch Vergleichsmessungen bestimmt<sup>[37]</sup>. Die kombinierte Standardunsicherheit des TN kann wie folgt angegeben werden:

$$u_{\text{TN}} = \sqrt{(0.43\text{ppb})^2 + (0.0034 \cdot c)^2}, \text{ mit } 0 \leq c \leq 200\text{ppb}.$$

Die erweiterte Messunsicherheit ist

$$U_{\text{TN}} = k \cdot u_{\text{TN}}, \text{ mit } k = 2 \text{ (Vertrauensbereich von 95\%)}$$



### Kontrolle des Transfornormal

Durch Vergleich des TN mit dem Primärnormal wird regelmässig überprüft, ob die Unsicherheit des TN den angegebenen Wert nicht überschreitet. Dazu wird geprüft, ob 95% der Differenzen der Messwerte von TN und SRP ( $_{TN,SRP}$ ) folgende Bedingung erfüllen:

$$|\Delta_{TN,SRP}| \leq \sqrt{U_{TN}^2 + U_{SRP}^2}$$

### 5.2.3. Messunsicherheit des Ozonmessgerätes

Die Berechnung der Standardunsicherheiten beruht auf dem in der CEN Norm EN ISO 14956 festgelegten Verfahren. Zusätzlich zu den in der CEN Norm EN 14625 aufgeführten Unsicherheitskomponenten werden die beiden Standardunsicherheiten  $u_{PN}$  (Primärnormal) und  $u_{TN}$  (Transfer Normal) in die Berechnung aufgenommen. In Tabelle 5-1 sind die ermittelten Standardunsicherheiten der wesentlichen Unsicherheitskomponenten für Ozon-Stundenwerte mit dem im NABEL eingesetzten Gerätetyp (Thermo 49i) aufgeführt.

### 5.2.4. Kombinierte Messunsicherheit der Ozonmessungen

Die kombinierte Messunsicherheit  $u_{O_3}$  der Ozonmessungen wird durch Fehlerfortpflanzung der Standardunsicherheiten der einzelnen Einflussgrössen wie folgt berechnet.

$$u_{O_3} = \sqrt{u_{r,z}^2 + u_{r,l}^2 + u_{l,lh}^2 + u_{gp}^2 + u_{gt}^2 + u_{st}^2 + u_v^2 + u_{H_2O}^2 + u_{int}^2 + u_{av}^2 + u_{r,f}^2 + u_{d,l,z}^2 + u_{d,l,s}^2 + u_{\Delta sc}^2 + u_{cg}^2 + u_{tn}^2 + u_{srp}^2 + u_{zg}^2 + u_{\Delta p}^2}$$

$u_{r,z}$	Standardunsicherheit für die Wiederholpräzision bei Null
$u_{r,l}$	Standardunsicherheit für die Wiederholpräzision bei Ct*
$u_{l,lh}$	Standardunsicherheit für die Abweichung von der Linearität
$u_{gp}$	Standardunsicherheit für die Änderung des Probegasdrucks
$u_{gt}$	Standardunsicherheit für die Änderung der Probegastemperatur
$u_{st}$	Standardunsicherheit für die Änderung der Umgebungstemperatur
$u_v$	Standardunsicherheit für die Änderung der elektrischen Spannung
$u_{H_2O}$	Standardunsicherheit für die Querempfindlichkeit $H_2O$
$u_{int}$	Standardunsicherheit für die Querempfindlichkeiten (ohne $H_2O$ )
$u_{av}$	Standardunsicherheit für die Mittelung
$u_{r,f}$	Standardunsicherheit für die Vergleichspräzision im Feld*
$u_{d,l,z}$	Standardunsicherheit für den Langzeitdrift (Null)
$u_{d,l,s}$	Standardunsicherheit für den Langzeitdrift (Span)
$u_{\Delta sc}$	Standardunsicherheit für die Differenz Proben- und Kalibriereingang
$u_{cg}$	Standardunsicherheit für das Kalibriergas
$u_{tn}$	Standardunsicherheit für das Transfornormal**
$u_{srp}$	Standardunsicherheit für das Referenzphotometer**
$u_{zg}$	Standardunsicherheit für das Nullgas
$u_{\Delta p}$	Standardunsicherheit für die Änderung des Differenzdrucks

\* der höhere der Werte Standardunsicherheit für die Wiederholpräzision bei Ct oder Vergleichspräzision im Feld wird verwendet

\*\* Unsicherheitsbeitrag nur bei Ozon

Unter Annahme der Unabhängigkeit der einzelnen Einflussgrössen (Vernachlässigung der Kovarianzen) ergibt sich der in Tabelle 5-1 angegebene Wert. Es ist zudem die erweiterte Messunsicherheit  $U_{O_3}$  aufgeführt (Erweiterungsfaktor  $k=2$ ,  $U_{O_3}=2 \cdot u_{O_3}$ ). Für einen gemessenen Stundenmittelwert  $x$  bedeutet dies, dass der wahre Ozon-Stundenmittelwert mit einer Sicherheit von 95% innerhalb des Intervalls  $[x-U_{O_3}, x+U_{O_3}]$  liegt.

Es ist allerdings wichtig festzuhalten, dass  $u_{O_3}$  den kombinierten Messfehler angibt, der bei korrekter Realisierung der Messung resultiert. Der tatsächliche Messfehler kann beliebig grösser sein, wenn z.B. die eingesetzten Messeinrichtungen fehlerhaft sind, oder die Durchführung der Messung unsachgemäss ist.

Tab. 5-1: Bestimmung der Messunsicherheit von Ozon ( $O_3$ ) für Stundenmittelwerte

Unsicherheitsparameter		$O_3$ Thermo 49i ppb
Wiederholpräzision bei Null	$u_{r,z}$	0.0449
Wiederholpräzision bei Ct	$u_{r,l}$	
Abweichung von der Linearität	$u_{l, lh}$	$0.0006 \cdot c$
Probengasdruck	$u_{gp}$	$0.0011 \cdot c$
Probengastemperatur	$u_{gt}$	$0.0083 \cdot c$
Umgebungstemperatur	$u_{st}$	$0.0005 \cdot c$
Elektrische Spannung	$u_v$	$0.0004 \cdot c$
Querempfindlichkeit $H_2O$	$u_{H_2O}$	$0.0082 \cdot c$
Querempfindlichkeit (ohne $H_2O$ )	$u_{int}$	$0.0001 \cdot c$
Mittelungsfehler	$u_{av}$	0.0000
Vergleichspräzision im Feld	$u_{r,f}$	$0.0060 \cdot c$
Langzeitdrift (Null)	$u_{d,l,z}$	0.1732
Langzeitdrift (Spanpunkt)	$u_{d,l,s}$	$0.0040 \cdot c$
Differenz Proben-/Kalibriereingang	$u_{\Delta sc}$	$0.0000 \cdot c$
Kalibriergas	$u_{cg}$	$0.0000 \cdot c$
Transfornormal	$u_{tn}$	$0.0079 \cdot c$
Referenzphotometer	$u_{srp}$	$0.0122 \cdot c$
Nullgas	$u_{zg}$	0.0000
Änderung des Differenzdrucks	$u_{\Delta p}$	$0.0000 \cdot c$
<b>Totale Messunsicherheit</b>	<b><math>u_{O_3}</math></b>	<b><math>[(0.179 \text{ ppb})^2 + (0.020 \cdot c)^2]^{1/2}</math></b>
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	<b><math>U_{O_3}</math></b>	<b><math>2 \cdot u_{O_3}</math></b>

Tab. 5-2: Standardunsicherheit  $u$  und erweiterte Unsicherheit  $U$  von  $O_3$  für Stundenmittelwerte

Konzentration	$u$	$U (2 u)$
ppb	ppb	ppb
0	0.60	1.21
10	0.64	1.28
20	0.72	1.43
40	0.94	1.88
60	1.22	2.43
80	1.51	3.03
100	1.82	3.65
120	2.14	4.28
140	2.46	4.98
160	2.79	5.57

### 5.3. Bestimmung der Messunsicherheiten von CO, SO<sub>2</sub>, NO und NO<sub>2</sub> für Tagesmittelwerte

Die Bestimmung der Messunsicherheiten für CO, SO<sub>2</sub>, NO und NO<sub>2</sub> wurden gemäss dem im Kapitel 5.1 beschriebenen Konzept durchgeführt.

Tab. 5-3: Bestimmung der Messunsicherheit von CO für Tagesmittelwerte

Unsicherheitsparameter		CO APMA 370 ppm
Wiederholpräzision bei Null	$u_{r,z}$	0.0022
Wiederholpräzision bei Ct	$u_{r,l}$	
Abweichung von der Linearität	$u_{l,lh}$	$0.0006 \cdot c$
Probengasdruck	$u_{gp}$	$0.0000 \cdot c$
Probengastemperatur	$u_{gt}$	$0.0003 \cdot c$
Umgebungstemperatur	$u_{st}$	$0.0005 \cdot c$
Elektrische Spannung	$u_v$	$0.0003 \cdot c$
Querempfindlichkeit H <sub>2</sub> O	$u_{H_2O}$	$0.0028 \cdot c^2$
Querempfindlichkeit (ohne H <sub>2</sub> O)	$u_{int}$	$0.0021 \cdot c$
Mittelungsfehler	$u_{av}$	0.0000
Vergleichspräzision im Feld	$u_{r,f}$	$0.0275 \cdot c$
Langzeitdrift (Null)	$u_{d,l,z}$	0.0115
Langzeitdrift (Spanpunkt)	$u_{d,l,s}$	$0.0029 \cdot c$
Differenz Proben-/Kalibriereingang	$u_{\Delta sc}$	$0.0000 \cdot c$
Kalibriergas	$u_{cg}$	$0.0025 \cdot c$
Nullgas	$u_{zg}$	0.0100
Änderung des Differenzdrucks	$u_{\Delta p}$	$0.0000 \cdot c$
<b>Totale Messunsicherheit</b>	<b><math>u_{co}</math></b>	<b><math>[(0.015 \text{ ppm})^2 + (0.028 \cdot c)^2]^{1/2}</math></b>
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	<b><math>U_{co}</math></b>	<b><math>2 \cdot u_{co}</math></b>

Tab. 5-4: Standardunsicherheit u und erweiterte Unsicherheit U von CO für Tagesmittelwerte

Konzentration	u	U (2 u)
ppm	ppm	ppm
0	0.02	0.05
1	0.04	0.07
2	0.06	0.12
3	0.09	0.17
4	0.11	0.23
5	0.14	0.28
6	0.17	0.34
7	0.20	0.39
8	0.22	0.45
9	0.25	0.50
10	0.28	0.56

Tab. 5-5: Bestimmung der Messunsicherheit von SO<sub>2</sub> für Tagesmittelwerte

Unsicherheitsparameter		SO <sub>2</sub> Thermo 43i TLE ppb
Wiederholpräzision bei Null	$u_{r,z}$	0.0043
Wiederholpräzision bei Ct	$u_{r,l}$	
Abweichung von der Linearität	$u_{l, lh}$	0.0012·c
Probengasdruck	$u_{gp}$	0.0003·c
Probengastemperatur	$u_{gt}$	-0.0048·c
Umgebungstemperatur	$u_{st}$	0.0004·c
Elektrische Spannung	$u_v$	-0.0001·c
Querempfindlichkeit H <sub>2</sub> O	$u_{H_2O}$	-0.0100·c
Querempfindlichkeit (ohne H <sub>2</sub> O)	$u_{int}$	0.0048·c
Mittelungsfehler	$u_{av}$	0.0000
Vergleichspräzision im Feld	$u_{r,f}$	0.0390·c
Langzeitdrift (Null)	$u_{d,l,z}$	0.0577
Langzeitdrift (Spanpunkt)	$u_{d,l,s}$	0.0115·c
Differenz Proben-/Kalibriereingang	$u_{\Delta sc}$	0.0000·c
Kalibriergas	$u_{cg}$	0.0025·c
Nullgas	$u_{zg}$	0.0250
Änderung des Differenzdrucks	$u_{\Delta p}$	0.0000·c
<b>Totale Messunsicherheit</b>	$u_{SO_2}$	$[(0.063 \text{ ppb})^2 + (0.043 \cdot c)^2]^{1/2}$
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	$U_{SO_2}$	$2 \cdot u_{SO_2}$

Tab. 5-6: Standardunsicherheit u und erweiterte Unsicherheit U von SO<sub>2</sub> für Tagesmittelwerte

Konzentration	u	U (2 u)
ppb	ppb	ppb
0	0.26	0.53
10	0.45	0.91
20	0.85	1.70
30	1.27	2.55
40	1.70	3.41
50	2.14	4.27
60	2.27	5.14
70	3.01	6.01
80	3.44	6.88
90	3.88	7.75
100	4.31	8.63



Tab. 5-7: Bestimmung der Messunsicherheit von NO<sub>2</sub> für Tagesmittelwerte

Unsicherheitsparameter		NO <sub>2</sub> APNA 370 ppb	NO <sub>2</sub> Thermo 42i TL ppb
Wiederholpräzision bei Null	$u_{r,z}$	0.0242	0.0024
Wiederholpräzision bei Ct	$u_{r,l}$		
Abweichung von der Linearität	$u_{l, lh}$	$0.0006 \cdot c$	$0.0017 \cdot c$
Probengasdruck	$u_{gp}$	$0.0008 \cdot c$	$0.0004 \cdot c$
Probengastemperatur	$u_{gt}$	$0.0047 \cdot c$	$-0.0075 \cdot c$
Umgebungstemperatur	$u_{st}$	$0.0001 \cdot c$	$0.0003 \cdot c$
Elektrische Spannung	$u_v$	$0.0001 \cdot c$	$0.0002 \cdot c$
Querempfindlichkeit H <sub>2</sub> O	$u_{H_2O}$	$0.0255 \cdot c$	$0.0567 \cdot c$
Querempfindlichkeit (ohne H <sub>2</sub> O)	$u_{int}$	$0.00009 \cdot c$	$0.0001 \cdot c$
Mittelungsfehler	$u_{av}$	0.0000	0.0000
Vergleichspräzision im Feld	$u_{r,f}$	$0.0194 \cdot c$	$0.0385 \cdot c$
Langzeitdrift (Null)	$u_{d,l,z}$	0.1732	0.1732
Langzeitdrift (Spanpunkt)	$u_{d,l,s}$	$0.0046 \cdot c$	$0.0046 \cdot c$
Differenz Proben-/Kalibriereingang	$u_{\Delta sc}$	$0.0000 \cdot c$	$0.0000 \cdot c$
Kalibriergas	$u_{cg}$	$0.0050 \cdot c$	$0.0050 \cdot c$
Nullgas	$u_{zg}$	0.1000	0.1000
Änderung des Differenzdrucks	$u_{\Delta p}$		
Konverterwirkungsgrad	$u_{EC}$	$0.0200 \cdot c$	$0.0200 \cdot c$
<b>Totale Messunsicherheit</b>	$u_{NO_2}$	$[(0.201 \text{ ppb})^2 + (0.039 \cdot c)^2]^{1/2}$	$[(0.200 \text{ ppb})^2 + (0.072 \cdot c)^2]^{1/2}$
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	$U_{NO_2}$	$2 \cdot u_{NO_2}$	$2 \cdot u_{NO_2}$

Tab. 5-8: Standardunsicherheit u und erweiterte Unsicherheit U von NO<sub>2</sub> (Tagesmittelwerte) für Thermo 42i TL

Konzentration ppb	u ppb	U (2 u) ppb
0	0.31	0.62
10	0.89	1.79
20	1.56	3.11
30	2.23	4.46
40	2.90	5.80
50	3.58	7.16
60	4.25	8.51
80	5.61	11.28
100	6.91	13.92
120	8.32	16.63

Tab. 5-9: Standardunsicherheit  $u$  und erweiterte Unsicherheit  $U$  von  $\text{NO}_2$  (Tagesmittelwerte) für APNA 370

Konzentration	$u$	$U$ (2 $u$ )
ppb	ppb	ppb
0	0.70	1.40
10	0.84	1.69
20	1.06	2.12
30	1.31	2.62
40	1.58	3.16
50	1.86	3.79
60	2.15	4.30
80	2.74	5.48
100	3.34	6.67
120	3.94	7.88

## 5.4. Zusammenfassung der Messunsicherheiten der automatischen Messverfahren

Es folgt nun eine Zusammenfassung aller Messunsicherheiten (erweiterte Unsicherheiten) der Monitormessungen im NABEL-Messnetz. Bei den angegebenen Messunsicherheiten handelt es sich jeweils um Werte, die analog Kapitel 5.2. und 5.3. bestimmt und zum Schluss noch aufgerundet wurden.

Grösse	Immissionsgrenzwert Mittelungsintervall	Erweiterte Messunsicherheit	Fehler bei Grenzwert
O <sub>3</sub>	120 µg/m <sup>3</sup> Stundenmittelwert	$2 \cdot [(0.179 \text{ ppb})^2 + (0.020 \cdot c)^2]^{1/2}$	4.86 µg/m <sup>3</sup> (4.1 %)
CO	8 mg/m <sup>3</sup> Tagesmittelwert	$2 \cdot [(0.015 \text{ ppm})^2 + (0.028 \cdot c)^2]^{1/2}$	0.45 mg/m <sup>3</sup> (5.6%)
SO <sub>2</sub>	100 µg/m <sup>3</sup> Tagesmittelwert	$2 \cdot [(0.063 \text{ ppb})^2 + (0.043 \cdot c)^2]^{1/2}$	8.51 µg/m <sup>3</sup> (8.5%)
	30 µg/m <sup>3</sup> Jahresmittelwert		2.66 µg/m <sup>3</sup> (8.9%)
NO <sub>2</sub> APNA 370	80 µg/m <sup>3</sup> Tagesmittelwert	$2 \cdot [(0.201 \text{ ppb})^2 + (0.039 \cdot c)^2]^{1/2}$	6.24 µg/m <sup>3</sup> (7.8%)
	30 µg/m <sup>3</sup> Jahresmittelwert		3.67 µg/m <sup>3</sup> (12.2%)
NO <sub>2</sub> Thermo 42iTL	80 µg/m <sup>3</sup> Tagesmittelwert	$2 \cdot [(0.200 \text{ ppb})^2 + (0.072 \cdot c)^2]^{1/2}$	11.58 µg/m <sup>3</sup> (14.5%)
	30 µg/m <sup>3</sup> Jahresmittelwert		4.85 µg/m <sup>3</sup> (16.2%)
CH <sub>4</sub>	Tagesmittelwert	$2 \cdot [(0.0116 \text{ mg/m}^3)^2 + (0.0091 \cdot c)^2]^{1/2}$	
NMHC	Tagesmittelwert	$2 \cdot 2^{1/2} [(0.0116 \text{ mg/m}^3)^2 + (0.0091 \cdot c)^2]^{1/2}$	

## 6. DATEN

### 6.1. Datenfluss

Jede NABEL-Station ist mit einem Stationsrechner ausgerüstet. Die Daten werden mit dem Programm Easycomp erfasst und für das Datenvisualisierungsprogramm Anavis aufbereitet. Die Daten können so als Tabellen, Grafiken oder Listen visuell dargestellt werden.

Mit einer Abtastrate von 2 bis 5 Sekunden (je nach Messgerät) werden bei den kontinuierlich messenden Schadstoffmonitoren Messwerte erfasst. Aus diesen Momentanwerten werden 1- und 10-Minutenmittelwerte gebildet, die auf dem Stationsrechner gespeichert werden. Alle 16 Stationen sind vom NABEL-Zentralrechner des BAFU beim BIT in Bern und von einer Minizentrale in Dübendorf über das Internet erreichbar. Die Minizentrale besteht aus einem PC, welche mit dem Datenvisualisierungsprogramm Anazent 32 alle 16 Stationen verwaltet. Die 10-Minutenmittelwerte werden zusammen mit verschiedenen Parametern zur Geräteüberwachung alle 10 Minuten zur Messnetzzentrale und zur Minizentrale übertragen. Die Datenkontrolle wird an der Empa durchgeführt, dabei wird via Netzwerkverbindung auf die Daten der Messnetzzentrale in Bern zugegriffen.

Die Minizentrale dient einzig der Messstationsüberwachung und -steuerung und ist nicht mit der Messnetzzentrale verbunden.

Informationen, die während der Stationswartung anfallen (Metadaten), werden direkt elektronisch erfasst und später offline in die Datenzentrale eingelesen.

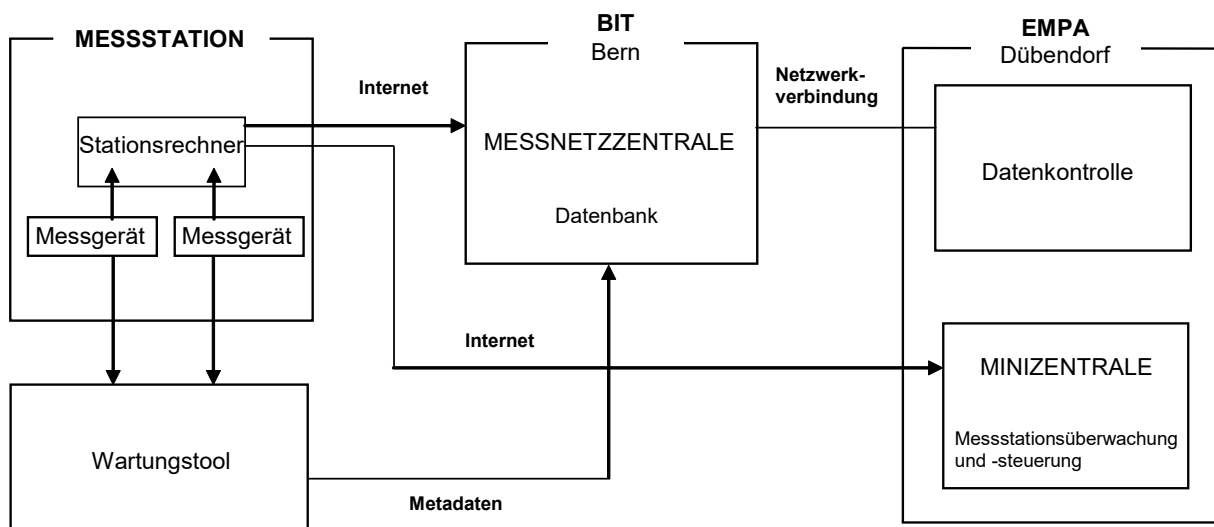


Abb. 6-1: Schematische Darstellung des Datenflusses

## 6.2. Datenverwaltung

Alle Daten des NABEL werden in der Messnetzzentrale in Bern mit Hilfe einer relationalen Datenbank (ORACLE) verwaltet. Das kleinstmögliche Mittelungsintervall für die Messwerte ist 10 Minuten. Für grössere Intervalle (Stunde, Tag, Monat, Jahr) können die 10-Minutenmittelwerte gemittelt werden. Die Messwerte werden erst nach eingehender Datenkontrolle freigegeben. Die Mittelwertbildung unterliegt grundsätzlich dem 80 % -Kriterium. Das Messnetz verwendet immer Winterzeit (MEZ).

Alle Daten, die bei der analytischen Bestimmung von Messgrössen im Labor anfallen (Feinstaub, Regen, Staubniederschlag), werden einmal jährlich als Labordaten in die Datenbank eingelesen.

## 6.3. Datenkontrolle

Die Daten der automatischen Messgeräte werden täglich einem ersten Plausibilitätscheck unterzogen. In einer zweiten Phase werden die Daten mit Hilfe von Kontrollgrafiken eingehend geprüft und falls notwendig aufgrund der manuellen Kalibrationen korrigiert. Die Kontrolle der Daten wird nach folgenden Gesichtspunkten durchgeführt:

- |                                  |                                                                                                                  |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>- Plausibilitätsgrenzen</b>   | Liegen die Messwerte innerhalb der stations-spezifischen Maximal- bzw. Minimalwerte?                             |
| <b>- Verlauf</b>                 | Entspricht der Tages-, Wochen-, Jahresgang dem erwarteten Verlauf?                                               |
| <b>- Variabilität</b>            | Ist die Variabilität (Sprung von aufeinander-folgenden Werten) realistisch?                                      |
| <b>- abhängige Messgrössen</b>   | Ist der Verlauf von abhängigen Substanzen (chemische Reaktion, gleiche Quellen) kon-sistent?                     |
| <b>- vergleichbare Standorte</b> | Verhalten sich Stationen unter vergleichba-ren Bedingungen (gleicher Belastungstyp, gleiche Wetterlage) ähnlich? |
| <b>- Vollständigkeit</b>         | Passen die Daten vor und nach einer Lücke (Anlaufzeit eines Gerätes) in die Messreihe?                           |

Für diese Kontrollen und für weitere Auswertungen stehen spezielle Software-Anwendungen zur Verfügung, welche auf die ORACLE-Datenbank zugreifen. Damit lassen sich schad-stoffspezifische Auswertungen in grafischer und tabellarischer Form erstellen.



## 6.4. Datenpublikation

Die Datenpublikation wird durch das BAFU wahrgenommen. Die Daten werden regelmässig wie folgt publiziert:

### Internet

- individuelle Abfrage von Stundenmittelwerten und Tageswerten von  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , CO, NMVOC, PM10, PM2.5, Russ (EC in PM2.5), Partikelanzahl, Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/datenabfrage-nabel.html>
- Zahlreiche weitere Auswertungen in tabellarischer und grafischer Form

### Teletext (S. 521)

- 24h Mittelwert (gleitend) für  $NO_2$ , PM10
- Stundenmittelwerte (max. 1h-Mittel des aktuellen Tages) für  $O_3$
- Jahresmittelwerte (gleitend) für  $NO_2$ , PM10, PM2.5
- Anzahl Grenzwertüberschreitungen (1-Stundenwert) für  $O_3$  (12 Monate gleitend)

### Monatsberichte

- Monatsmittelwerte und Maximalwerte für  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ , PM10 und CO
- Anzahl Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte für  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ , PM10 und CO
- Monatsverläufe für  $NO_2$ ,  $O_3$  und PM10
- Jahresmittelwerte (gleitend) für  $SO_2$ ,  $NO_2$ , PM10, PM2.5, CO,  $O_3$  und 95 %-Werte (gleitend) für  $NO_2$
- Anzahl der Überschreitungen des Immissionsgrenzwertes pro Jahr (gleitend) von  $NO_2$ , PM10,  $O_3$

### Jahresbericht

- Kommentar zur aktuellen Situation der Luftverschmutzung in der Schweiz für alle Messgrössen mit Grenzwerten in der LRV
- Detaillierte Daten des entsprechenden Jahres
- Jahresmittelwerte der letzten Jahre

Die Daten stehen grundsätzlich allen für spezielle Auswertungen zur Verfügung:

Monatsberichte:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung--historische-daten/jahres--und-monatsberichte-nabel.html>

Jahresberichte:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/dokumentation/publikationen/luft.html>

Weitere Datenanfragen sind an das BAFU in Bern zu richten.

Kontaktperson:

Dr. Michael Schibig  
Bundesamt für Umwelt BAFU  
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien  
CH – 3003 Bern  
[michael.schibig@bafu.admin.ch](mailto:michael.schibig@bafu.admin.ch)

## 7. LITERATUR

- [1] BAFU 2023: Luftqualität 2022. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Umwelt-Zustand Nr. UZ-2316-D, Bundesamt für Umwelt, Bern, 29 S, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/nael-luftqualitaet.html>
- [2] Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 1994, Empa Dübendorf, 1994.
- [3] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand 1. Januar 2023), [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208\\_208\\_208/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/de)
- [4] EN 14212:2012, Aussenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Schwefeldioxid mit Ultraviolett-Fluoreszenz, 2012.
- [5] EN 14211:2012, Aussenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz, 2012.
- [6] EN 14625:2012, Aussenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie, 2012.
- [7] Meyer C.P., Elsworth C.M. and Galbally I.E., Water vapour interference in the measurement of ozone in ambient air by ultraviolet absorption, Rev. Sci. Instrum. 62, No 1, 223-228, 1991.
- [8] EN 14626:2012, Aussenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Kohlenmonoxid mit nicht-dispersiver Infrarot-Photometrie, 2012.
- [9] Empa, Vergleich von TSP-, PM10- und PM2.5-Schwebstaubmessungen im NABEL 1997 und 1998, Nr. 168 107, 1999.
- [10] SN EN 12341:2014, Aussenluft - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10 - oder PM2.5 - Massenkonzentration des Schwebstaubes, 2014.
- [11] VDI-Richtlinie 2463 Bl.11 (10.96), Messen von Partikeln - Messen der Massenkonzentration (Immission) – Filterverfahren - Filterwechsel Digital DA-80H, 1996.
- [12] Prüfung des Digital Staubsammlers DA-80H mit PM10-Einlass nach EN 12341, UMEG Karlsruhe; Bericht Nr. 33-10/99, 1999.
- [13] SN EN 16450:2017, Aussenluft - Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM10; PM2.5), 2017.
- [14] Gehrig, R., Hueglin, C., Schwarzenbach, B., Seitz, T. and Buchmann, B. (2005). A new method to link PM10 concentrations from automatic monitors to the manual gravimetric reference method according to EN12341. Atmos. Environ. 39 (12): 2213-2223
- [15] Müller M. und Hüglin Ch. (2015). Evaluation von Methoden zur Korrektur von kontinuierlichen Feinstaubmesswerten (PM10) im NABEL. Projektbericht. <https://www.empa.ch/documents/56101/246436/Korrektur+von+kontinuierlich+gemessenem+PM10/2ea8a30e-12a2-4938-8445-eccdb683ddb6f>.
- [16] DIN EN 16909:2017, Außenluft - Messung von auf Filtern gesammeltem elementarem Kohlenstoff (EC) und organisch gebundenem Kohlenstoff (OC), 2017
- [17] Weingartner E., Saathoff H., Schnaiter M, Streit N., Bitnar B. and Baltensperger U., Absorption of light by soot particles: Determination of the absorption coefficient by means of aethalometers, J. Aerosol Sci. 34, 1445-1463, 2003.
- [18] EN 15549:2008, Air Quality - Standard method for the measurement of the concentration of benzo(a)pyrene in ambient air, 2008.

- [19] EU Directive 2004/107/EC of the European parliament and the council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official Journal of the European Communities L 23, 26 January 2005: 3-16, 2004.
- [20] Fischer A. und Hüglin Ch., Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone - Messbericht 2022, Empa, Dübendorf, <https://www.empa.ch/documents/56101/246436/PAK+Bericht+2022/c9921244-87aa-4be8-9e38-0499348818f2>, 2023.
- [21] Schauer C. et al., Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air particulate matter: Decadal and seasonal trends, chemical degradation, and sampling artifacts. *Environ. Sci. Technol.* 37(13): 2861 - 2868, 2003.
- [22] VDI 4320 Bl. 2 (2012-01), Messung atmosphärischer Depositionen - Bestimmung des Staubbiederschlags nach der Bergerhoff-Methode, 2012.
- [23] Gehrig R., Fäsi C. und Hofer P., Staub - Reinhaltung der Luft 53, 1233 – 1240, 1993.
- [24] Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2006, Anhang, Empa Dübendorf, 2006.
- [25] BAFU: Immissionsmessung von Luftfremdstoffen, Messempfehlungen. Stand 2021. 2. aktualisierte Auflage 2021. Erstausgabe 1990. BAFU, Bern, <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/uv-umwelt-vollzug/immissionsmessungvonluftfremdstoffenmessempfehlungen.pdf.download.pdf/immissionsmessungvonluftfremdstoffenmessempfehlungen.pdf>, 2021.
- [26] Hampson R.F. (ed.), Survey of Photochemical Rate Data for Twenty-Eight Reactions of Interest in Atmospheric Chemistry, *J. Phys. Chem Ref. Data* 2, 267, 1973.
- [27] Daumont D., Brion J., Charbonnier J. and Malicet J., Ozone UV spectroscopy I: Absorption cross-section at room temperature, *J. Atmos. Chem.* 15, 145-155, 1992.
- [28] Molina L. T. and Molina M. J., Absolute Absorption Cross Sections of Ozone in the 185- to 350-nm Wavelength Range, *J. Geophys. Res.* 91(D13), 14501-14508, 1986.
- [29] Paur R.J., Bass A.M., Norris J.E., Buckley T.J., Standard Reference Photometer for the Assay of Ozone in Calibration Atmospheres, NISTIR 6963, NIST Gaithersburg, 2003.
- [30] VDI 2449 Bl. 1 (2.95), Prüfkriterien von Messverfahren - Ermittlung von Verfahrenskenngrößen für die Messung von gasförmigen Schadstoffen, 1995.
- [31] VDI 2449 Bl. 2 (1.87), Grundlagen zur Kennzeichnung vollständiger Messverfahren, Begriffsbestimmungen, 1987.
- [32] ISO/IEC Guide 98-3: 2008 [JCGM/WG1/100], Messunsicherheit - Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen; Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), International Organization for Standardisation (ISO) 120 pp., Genf, Schweiz, 2008.
- [33] EN ISO 20988, Air quality – Guidelines for estimating measurement uncertainty, 2007.
- [34] EN ISO 14956:2002, Luftbeschaffenheit - Beurteilung der Eignung eines Messverfahrens durch Vergleich mit einer geforderten Messunsicherheit. 2003.
- [35] Viallon J., Moussay P., Idrees F., Wielgosz R., and Zellweger C., Final report, ongoing key comparison BIPM.QM-K1: Ozone at ambient level, comparison with EMPA (June 2012), *Metrologia*, 49, 08011, 2012.
- [36] Viallon J., Moussay P., Norris J. E., Guenther F. R., and Wielgosz, R. I., A study of systematic biases and measurement uncertainties in ozone mole fraction measurements with the NIST Standard Reference Photometer, *Metrologia*, 43, 441-450, 2006.

- [37] Klausen J., Zellweger C., Buchmann B. and Hofer P., Uncertainty and bias of surface ozone measurements at selected Global Atmosphere Watch sites, *Journal of Geophysical Research* 108 (D19), 4622, doi:10.1029/2003JD003710, 2003.

## 8. Verzeichnis der Abkürzungen

ART	Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BIT	Bundesamt für Informatik und Telekommunikation
Cercl' Air	Schweizerische Gesellschaft der Lufthygieniker
ECE	Economic Commission of Europe
EMEP/NILU	UN/ECE European Monitoring + Evaluation Programme/Norwegian Institute for Air Research, Kjeller (N)
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPA	Environmental Protection Agency, USA
IFU	Institut Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch
IUHT	Institut universitaire de l'hygiene du travail, Lausanne
JRC	European Community, Joint Research Centre, Ispra (I)
LRV	Luftreinhalte Verordnung
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen, Essen (früher: LUA)
METAS	Bundesamt für Metrologie
MeteoSchweiz	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
NBS	National Bureau of Standards, USA
NILU	Norwegian Institute for Air Research
NIST	National Institute of Standards and Technology, USA (früher: NBS)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington, UK
SMN	SwissMetNet, automatisches meteorolog. Messnetz der Meteo-Schweiz
SRM	Standardreferenzmaterial (Standard reference material)
SRP	Standard Reference Photometer
TU Berlin	Technische Universität Berlin
TÜV	Technischer Überwachungs Verein
VSL	Dutch Metrology Institute, Delft, The Netherlands
UBA	Deutsches Umweltbundesamt
UEA	University of East Anglia, Norwich, GB
WCC-N <sub>2</sub> O	World Calibration Centre for Nitrous Oxide, hosted by the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Meteorology and Climate Research (IMK-IFU), Garmisch-Partenkirchen, Germany
WMO	World Meteorological Organisation, Genf



## Anhang A: Spezielle Untersuchungen

### A1 Berechnung von Russ (BC) durch Vergleich von optischem Messverfahren mit EC-Messungen (thermisch-optisches Referenzverfahren)

Russemissionen von unterschiedlichen Quellen können sich in ihrer chemischen Zusammensetzung stark unterscheiden. Russ kann fast vollständig aus graphitähnlichem Kohlenstoff bestehen, oder aber einen wesentlichen Anteil an organischen Verbindungen beinhalten. Die quantitative Bestimmung der Russmenge im Feinstaub ist daher kaum möglich. Bei Immissionsmessungen wird oftmals die Menge an graphitähnlichem Kohlenstoff mit der Bezeichnung Russ gleichgesetzt, wohl wissend, dass damit die gesamte Russmenge etwas unterschätzt wird. Abhängig vom Messverfahren wird die Menge an graphitähnlichem Kohlenstoff entweder als EC (elemental carbon) bei thermisch-optischen Messverfahren oder als BC (black carbon) bei optischen Messverfahren bezeichnet.

Für die Messung von EC wurde in Europa ein Referenzverfahren eingeführt DIN EN 16909 (2017). Beim Referenzverfahren handelt es sich um eine Labormethode, bei der PM<sub>2.5</sub> Filterproben mittels thermisch-optischem Messverfahren analysiert werden. Dieses Referenzverfahren wird im NABEL mit einem Stichprobenkonzept (Analyse von PM<sub>2.5</sub> Filterproben von jedem zwölften Tag) für die Bestimmung von EC eingesetzt.

Optische Messverfahren ermöglichen eine automatische und kontinuierliche Messung der Lichtabsorption (Lichtabsorptionskoeffizient  $b_{\text{abs}}$ ) von PM<sub>2.5</sub>. Die gemessene Lichtabsorption kann in eine Konzentration von BC umgerechnet werden, ein zugehöriger Umrechnungsfaktor ist in den Messgeräten häufig voreingestellt.

Die Lichtabsorption von PM<sub>2.5</sub> hängt jedoch nicht nur von der Menge von graphitähnlichem Kohlenstoff ab, sondern allgemein von den optischen Eigenschaften des Feinstaubes. Daher ist der Zusammenhang zwischen Lichtabsorption und BC standortabhängig und zeitlich variabel. Zudem ist die Lichtabsorption von der Wellenlänge des Lichtes  $\lambda$  abhängig, d.h.  $b_{\text{abs}} = b_{\text{abs}}(\lambda)$ .

Um die mit Aethalometern oder früher mit MAAP Instrumenten gemessenen Lichtabsorptionskoeffizienten in Russkonzentrationen umzurechnen, werden diese im NABEL ständig mit den thermisch-optisch bestimmten EC-Konzentrationen vom selben Standort verglichen. Abbildung A1-1 zeigt exemplarisch ein Streudiagramm von 2019 an der Station Lugano-Universität mit einem MAAP gemessenen  $b_{\text{abs}}(\lambda = 670\text{nm})$  gegen EC. Eine lineare Regressionsrechnung von  $b_{\text{abs}}(\lambda)$  gegen EC weist typischerweise einen kleinen und vernachlässigbaren Achsenabschnitt auf. Die Steigung der Regressionsgeraden wird als Massenabsorptionskoeffizient (MAC) bezeichnet und mit  $\sigma(\lambda)$  gekennzeichnet. Mit  $\sigma(\lambda)$  kann das gemessene  $b_{\text{abs}}(\lambda)$  in einen Wert umgerechnet werden, welcher äquivalent zum thermisch-optisch gemessenen EC ist und daher als equivalent black carbon (EBC) bezeichnet wird. Es gilt:

$$\text{EBC} = b_{\text{abs}}(\lambda) / \sigma(\lambda)$$

Die Einführung des Begriffes EBC erleichtert die Vergleichbarkeit von Messungen mit unterschiedlichen optischen Messverfahren. Die beiden Begriffe Russkonzentration und EBC werden synonym verwendet.

Um mögliche zeitliche Änderungen der Abhängigkeit von Lichtabsorption und Russkonzentration zu erkennen und zu berücksichtigen, wird  $\sigma(\lambda)$  für jeden Tag neu berechnet. Dies wird mit

wird mit einer gleitenden Regression mit einer Fensterweite von 181 Tagen erreicht. D.h., für jeden Tag  $t$  wird  $\sigma(\lambda, t)$  aus der Steigung einer Regression von  $b_{\text{abs}}(\lambda)$  gegen EC mit allen Messwerten in der Zeit von 90 Tagen vor  $t$  bis 90 Tagen nach  $t$  bestimmt.

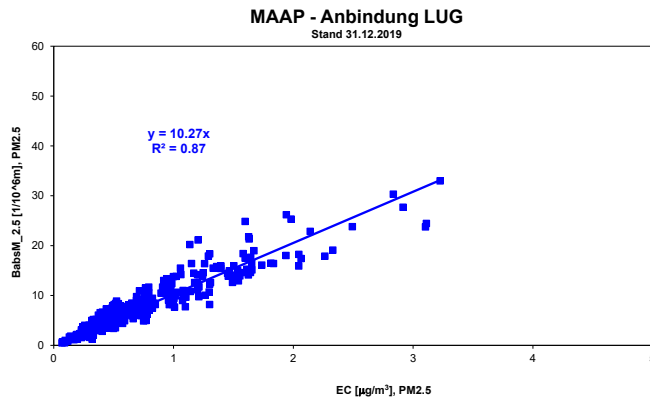


Abb. A1-1: Vergleich von kontinuierlichen MAAP-Messungen mit EC-Messungen (TOT Messungen am Standort Lugano (Messperiode: 1.1.2011 - 31.12.2019))

## **A2 Aerosol und gasförmige Stickstoffverbindungen an den NABEL-Stationen Rigi, Payerne und Magadino**

**Weiterentwicklung und Validierung der Minidenudermethode, Oktober 2009**

### **Einleitung**

Zur Erfüllung der internationalen Verpflichtungen, welche aus der UNECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution und den nachgeordneten Protokollen resultieren, müssen auch in der Schweiz Messungen von aerosol- und gasförmigen Stickstoffverbindungen durchgeführt werden (Messprogramm EMEP). Diese Messungen erfolgen an ausgewählten Standorten des NABEL. Auch unter nationalen Gesichtspunkten (übermässiger Stickstoffeintrag in Ökosysteme) sind solche Daten von grosser lufthygienischer Bedeutung.

Die ursprünglich an der NABEL-Station Payerne im Rahmen von EMEP durchgeführten Summen-Messungen von Ammonium+Ammoniak und Salpetersäure+Nitrat mit imprägnierten Filtern (Tagesproben) wurden zu Beginn des Jahres 2000 auf die Station Rigi verlegt, welche als für EMEP (weiträumige Verfrachtung von Luftschadstoffen) geeigneter erschien. Im Lichte der Bedeutung übermässiger Stickstoffeinträge in den Boden war es aber notwendig, zusätzlich zur voralpinen Station Rigi-Seebodenalp auch über Daten von einer typischen ländlichen Station des schweizerischen Mittellandes zu verfügen. Die Immissionsmessungen von Ammonium/Ammoniak und Salpetersäure/Nitrat wurden deshalb an der Station Payerne 2004 wieder aufgenommen.

Die Messungen mit imprägnierten Filtern erfassen die Summen von Ammonium+Ammoniak sowie Salpetersäure+Nitrat und geben somit keine Informationen über die Gas-Partikel-Verteilung. Die getrennte Messung der Gase und Partikel erfordert die viel aufwendigere Denudertechnik, welche mit Tagesauflösung sehr aufwendig wäre. Mit vertretbarem Aufwand lässt sich hingegen die separate Messung von Gas- und Aerosolphase mit sogenannten Minidenudern mit einer Zeitauflösung von z.B. 14-Tagen realisieren. Da Informationen über die Gas-Partikel-Verteilung nützlich sind und von der Schweiz im Rahmen des EMEP-Programms auch erwartet werden, wurde diese Methode im NABEL eingeführt und an den Stationen Rigi-Seebodenalp und Payerne betrieben. Damit in Zukunft auch Informationen über die Belastungen an einer ländlichen Station auf der Alpensüdseite zur Verfügung stehen, wurden die Denudermessungen in Rigi-Seebodenalp und Payerne ab Januar 2009 durch analoge Denudermessungen an der NABEL-Station Magadino ergänzt.

### **Messprogramm, Messmethodik**

Die Summen-Messungen von Ammonium+Ammoniak und Salpetersäure+Nitrat mit imprägnierten Filtern erfolgen nach dem im "EMEP manual for sampling and analysis" vorgeschriebenen Verfahren auf Cellulosefiltern des Typs Whatman 40 mit Tagesproben. Das Messprinzip ist in Abbildung A2-1 dargestellt. Abbildung A2-2 zeigt die Installation an der NABEL-Station Rigi, welche durch automatische Ansteuerung parallel aufgehängter Filterelemente einen unbeaufsichtigten Probenahmebetrieb über 2 Wochen gestattet.

Die nach Gas- und Aerosolphase getrennte Messung von Salpetersäure und Nitrat, resp. Ammoniak und Ammonium wurde mit einer Zeitauflösung von 2 Wochen mit der vom CEH Edinburgh entwickelten DELTA-Minidenudermethode in Payerne und Rigi eingeführt und betrieben. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in dem auf der EMEP Webseite zugänglichen Protokoll. Abbildung A2-3 zeigt schematisch die Anordnung der Denuder und Filter bei der Probenahme. Diese Elemente sind in einem Kasten an der Aussenseite der Stationen montiert, der zur Vermeidung von Kondensationsfeuchte auf ca. 4 Grad über Aussentemperatur beheizt wird.

Nachdem die in Kapitel 3 näher beschriebenen Probleme mit Minderbefunden mit dem DEL-TA-Minidenudersystem auftraten, wurden folgende Modifikationen am Minidenudersystem vorgenommen:

- Separierung der Messung von Ammoniak/Ammonium und Salpetersäure/Nitrat in zwei unabhängige Minidenudersysteme.
- Sauer imprägniertes Filter für Ammonium: Whatman 1 ersetzt durch Sartorius 11306-25-N Zellulosenitratfilter (0.45  $\mu\text{m}$ ). Wässrige Imprägnierlösung ohne Methanol.
- Basisch imprägniertes Filter für Nitrat: 2 imprägnierte Filter Whatman 1 in Serie.

Die neue Anordnung der Minidenuderkomponenten, die nun im NABEL/EMEP in Payerne und Rigi und seit Januar 2009 auch in Magadino angewandt wird, ist in Abbildung A2-4 illustriert.

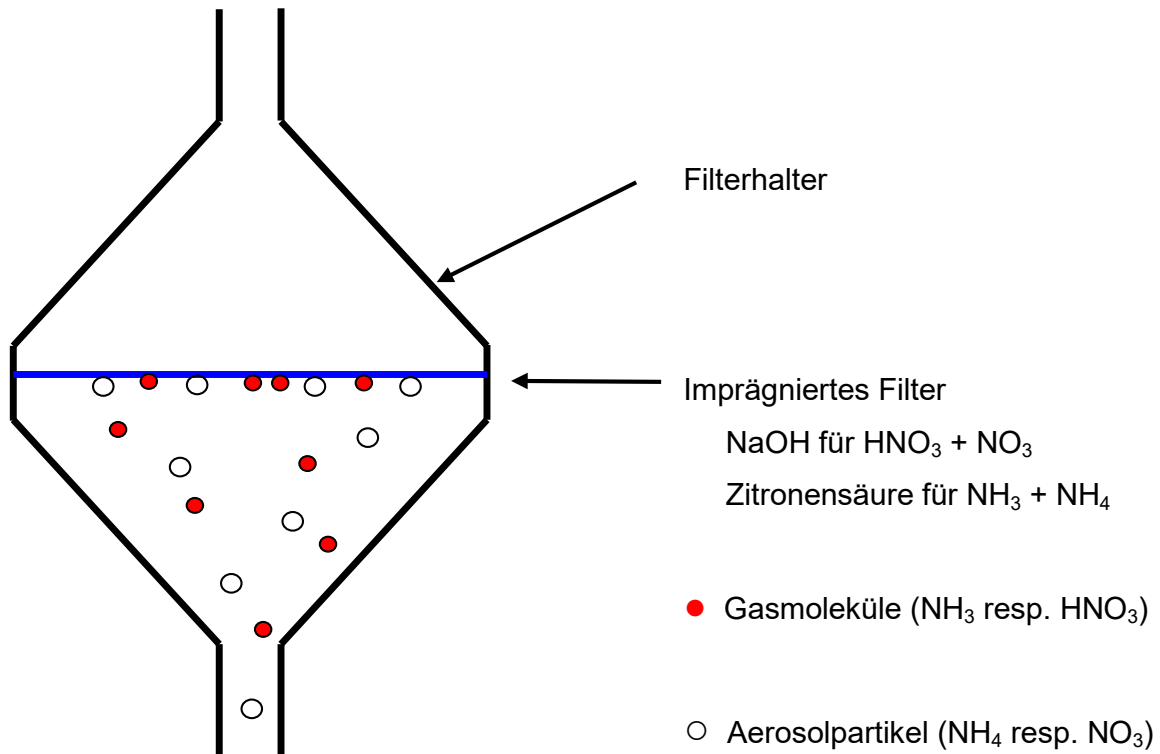


Abb. A2-1: Schematische Darstellung des Messprinzips mit imprägnierten Filtern zur Messung der Summen von Salpetersäure+Nitrat, resp. Ammoniak+Ammonium



Abb. A2-2: Anordnung der Probenahme mit imprägnierten Filtern an der NABEL-Station Rigi

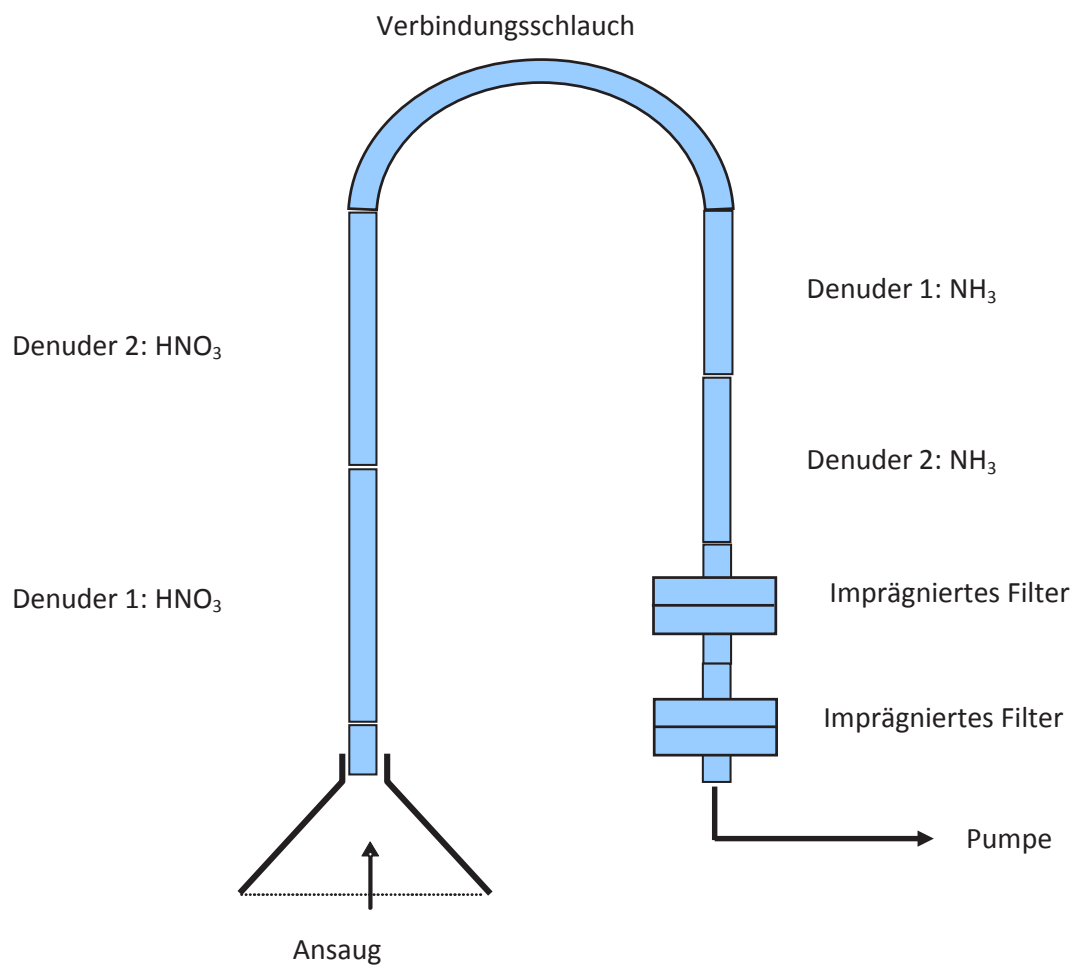


Abb. A2-3: Anordnung der Komponenten im DELTA-Minidenudersystem



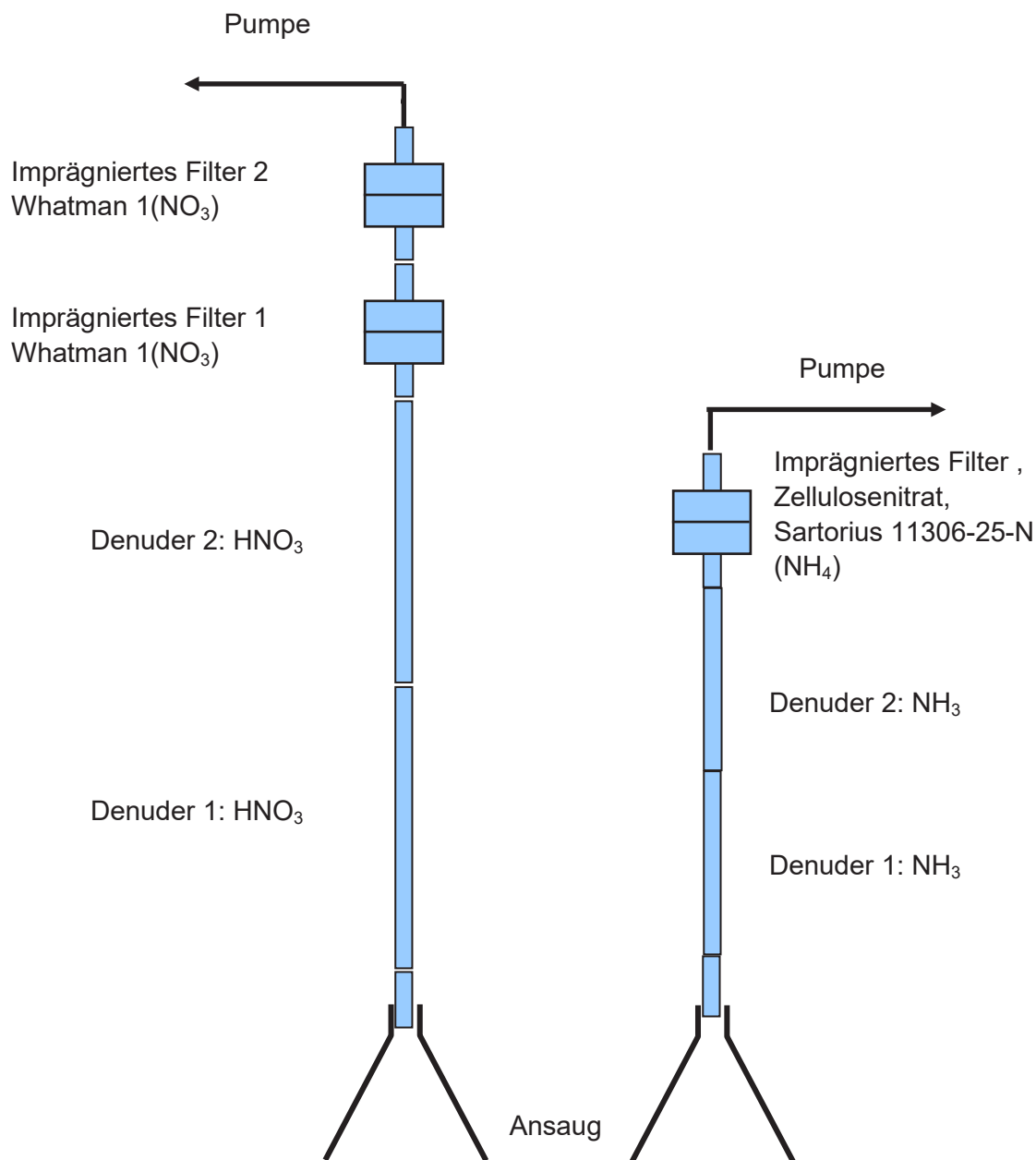


Abb. A2-4: Anordnung der Komponenten im modifizierten Minidenudersystem mit getrennten Linien für Salpetersäure/Nitrat und Ammoniak/Ammonium

### Resultate der Vergleichsmessungen zwischen der Minidenudermethode und den Summenmessungen mit imprägnierten Filtern

Ausgedehnte Vergleichsmessungen des DELTA-Minidenudersystems mit der Summenmessung auf imprägnierten Filtern an den EMEP-Stationen Rigi und Payerne zeigten die Gefahr von z.T. erheblichen Sammelverlusten in den Minidenudersystemen auf. Folgende Probleme konnten identifiziert werden:

- Ein Teil von Ammonium und Nitrat lagerte sich im U-förmigen Verbindungsschlauch zwischen den beiden Denuderblöcken ab.
- Die Abscheideeffizienz des Nitratfilters (Whatman 1) war ungenügend so dass ein Teil auf das folgende Filter für Ammonium verschleppt wurde.
- Ein geringer Teil des Nitrats lagerte sich in den Ammoniakdenudern ab.

Diese Effekte führten zu deutlichen Minderbefunden beim Minidenudersystem im Vergleich mit den imprägnierten Filtern (Abb. A2-5 und Abb. A2-6). Abbildung A2-7 zeigt das mittlere Ausmass dieser Verluste. Wurden die an den "falschen" Orten abgelagerten Mengen von Ammonium und Nitrat mitberücksichtigt, so ergab sich zwar eine durchaus befriedigende Übereinstimmung der beiden Methoden, aber der analytische Aufwand war stark erhöht.

Zur Verbesserung der Situation wurden die in Kapitel 2 beschriebenen Modifikationen am Minidenudersystem durchgeführt. Danach war die Übereinstimmung der Daten aus den Messungen mit den modifizierten Minidenudersystemen mit der Messung auf imprägnierten Filtern sowohl für die Summen von Ammoniak+Ammonium (Abb. A2-8) wie auch für die Summen von Salpetersäure+Nitrat (Abb. A2-9) sehr gut.

Für die Stationen Payerne und Magadino war es auch möglich, die Resultate der Messung des gasförmigen Ammoniaks mit den modifizierten Minidenudersystemen mit den Messungen von photoakustischen Ammoniakmonitoren zu vergleichen. Auch hier ergab sich eine gute Übereinstimmung (Abb. A2-10).

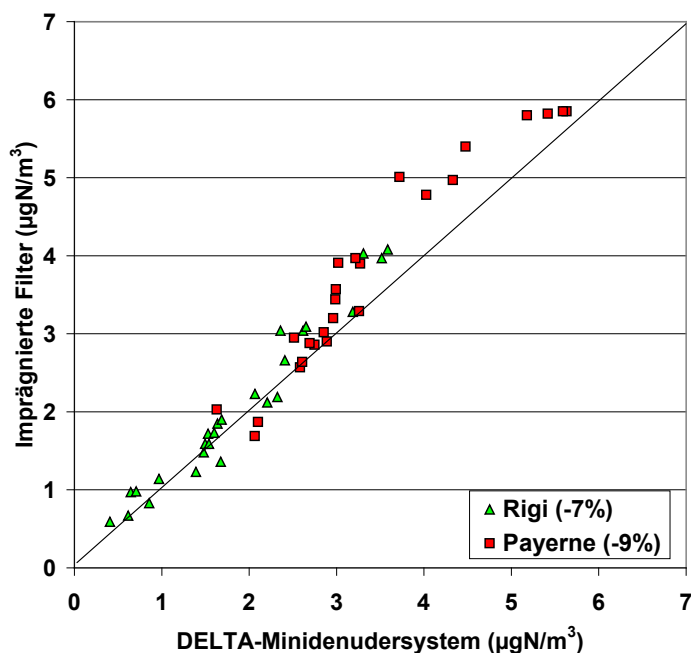


Abb. A2-5: Vergleich der Messungen von Ammoniak+Ammonium mit dem DELTA-Minidenudersystem mit den parallelen Summenmessungen auf imprägnierten Filtern.

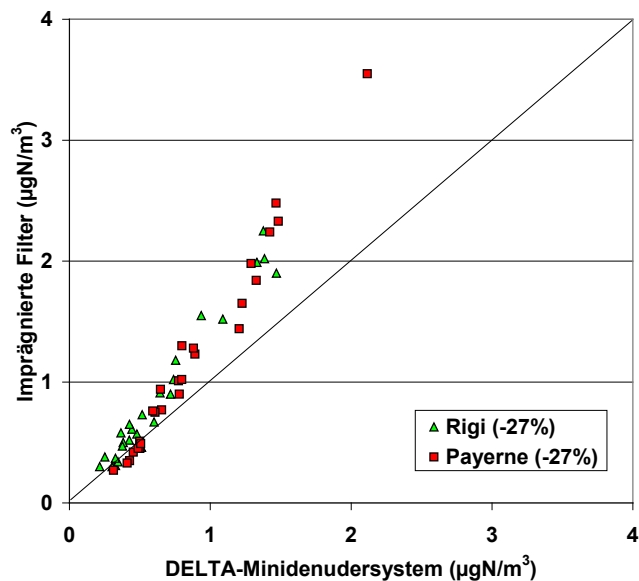


Abb. A2-6: Vergleich der Messungen von Salpetersäure+Nitrat mit dem DELTA-Minidenudersystem mit den parallelen Summenmessungen auf imprägnierten Filtern.

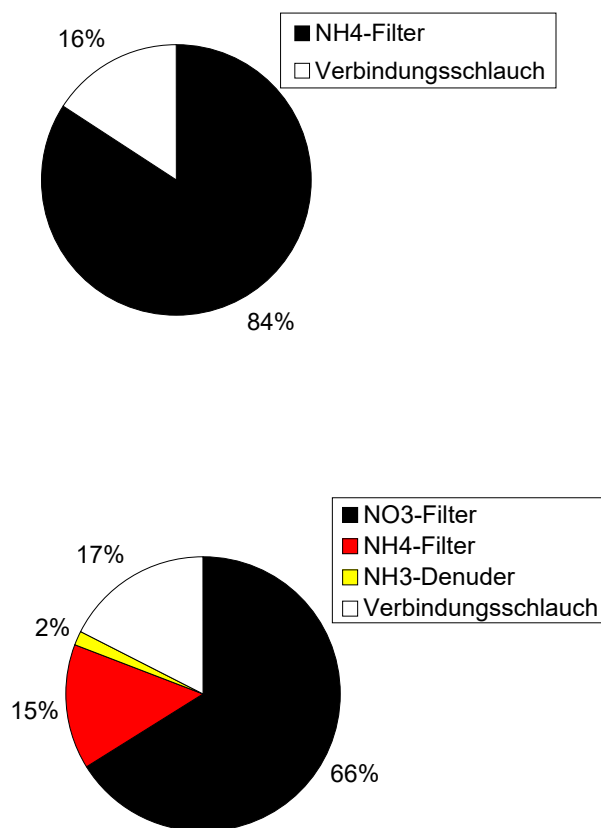


Abb. A2-7: Deposition von Ammonium (oben) und Nitrat (unten) beim DELTA-Minidenudersystem. Schwarz: Abscheidung am richtigen Ort, auf dem dafür vorgesehenen imprägnierten Filter. Farbig/Weiss: Abscheidung auf anderen Komponenten des Systems (Depositionsverluste im System).

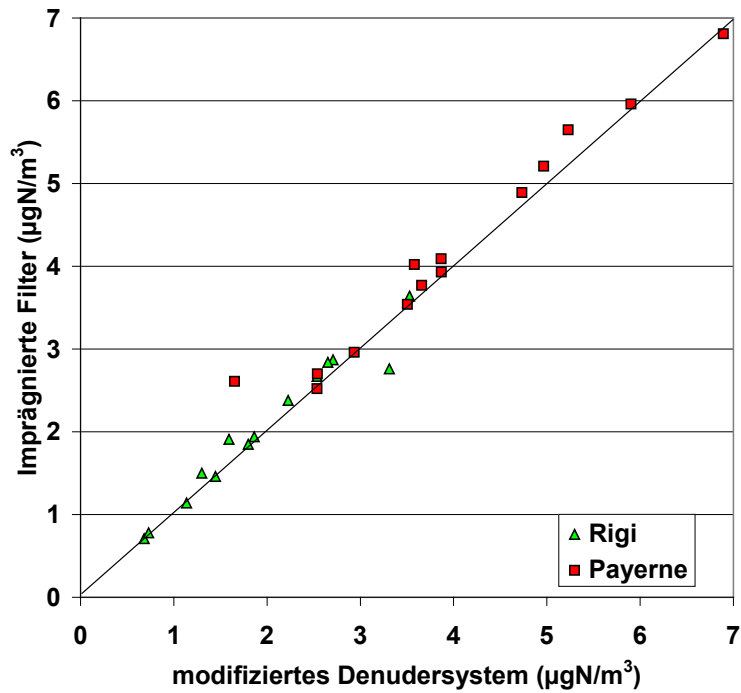


Abb. A2-8: Vergleich der Messungen von Ammoniak+Ammonium mit dem modifizierten Denudersystem mit den parallelen Summenmessungen auf imprägnierten Filtern.

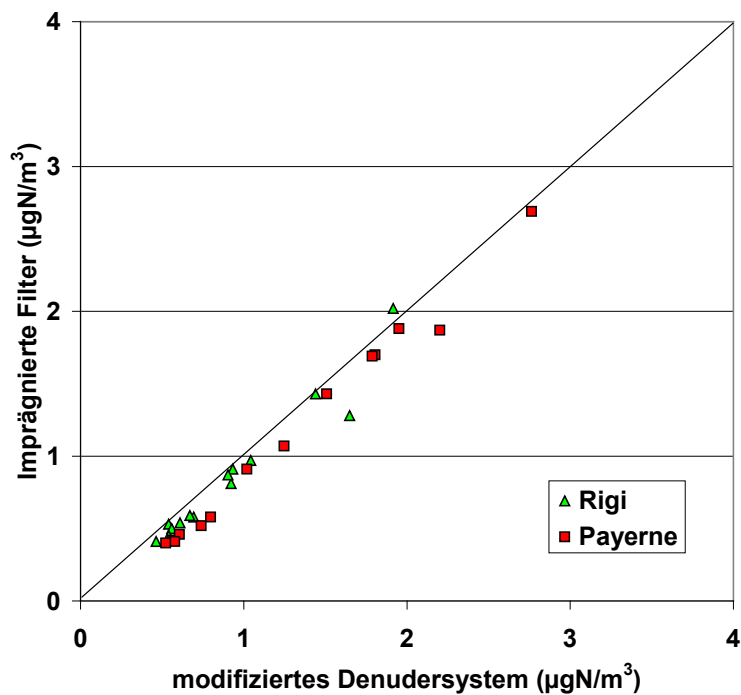


Abb. A2-9: Vergleich der Messungen von Salpetersäure+Nitrat mit dem modifizierten Denudersystem mit den parallelen Summenmessungen auf imprägnierten Filtern.

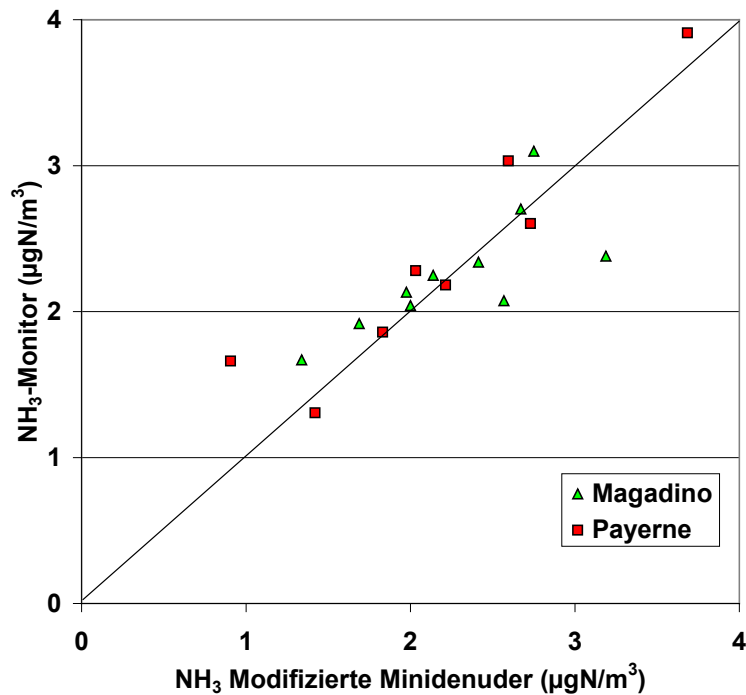


Abb. A2-10: Vergleich von gasförmigem Ammoniak, gemessen mit modifizierten Minidenudern und dem photoakustischen Monitor (TGA310 Omnisens).

### Messunsicherheiten

Da jede Messung mit dem Minidenudersystem 2 Wochen dauert und zudem ziemlich aufwendig ist, ist eine Bestimmung der Messunsicherheit aus Doppelbestimmung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Hingegen ist es ohne weiteres möglich, für die Summen  $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$  resp.  $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3$  durch Vergleich mit den in Payerne und Rigi durchgeführten täglichen Summenmessungen mit imprägnierten Filtern eine Messunsicherheit abzuschätzen. Abbildung A2-11 zeigt grafisch diese Vergleiche für die Messwerte der Jahre 2009 und 2010 in Payerne und Rigi.

Aus der Standardabweichung aus Doppelbestimmungen lassen sich folgende Messunsicherheiten für einzelne 2-Wochenwerte (95% Vertrauensintervall) ermitteln:

Summe $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$ :	0.30 µgN/m <sup>3</sup>
Summe $\text{HNO}_3 + \text{NO}_3$ :	0.18 µgN/m <sup>3</sup>



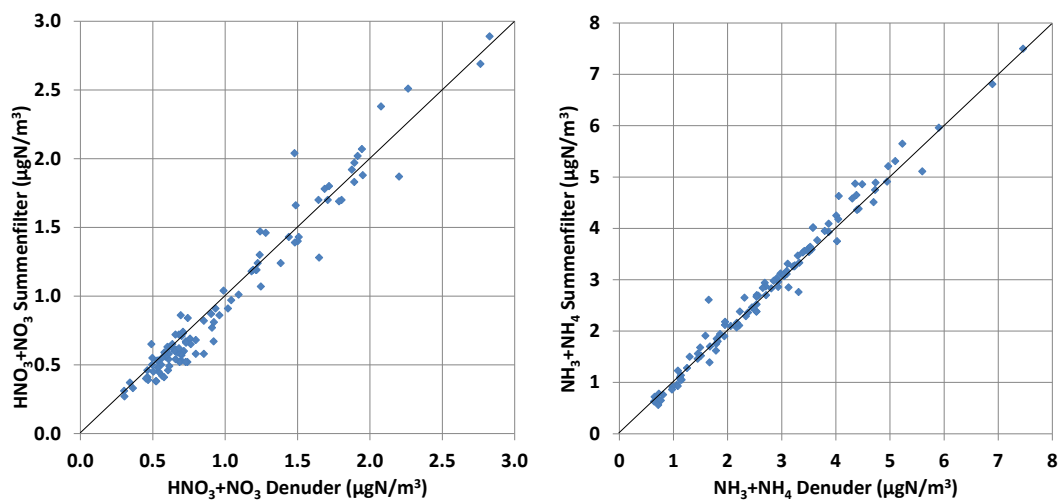


Abb. A2-11: Vergleich der mit dem Minidenudersystem gemessenen Summen  $\text{NH}_3+\text{NH}_4$  resp.  $\text{HNO}_3+\text{NO}_3$  mit den täglichen Summenmessungen mit imprägnierten Filtern in Payerne und Rigi 2009 und 2010.

Wie erwähnt stehen für die Abschätzung der Messunsicherheit der Aufteilung auf die Gas- und Partikelphase keine Vergleichsdatensätze aus Empa-Messungen zur Verfügung. Hingegen wurden von der FUB, Forschungsstelle für Umweltbeobachtung Rapperswil in Payerne und Rigi zeitweise ebenfalls Messungen von  $\text{NH}_3$  und  $\text{NH}_4$  mit einem ähnlichen Minidenudersystem durchgeführt. Abbildung A2-12 zeigt einen Vergleich dieser Messungen mit den Messungen der Empa.

Aus der Standardabweichung aus Doppelbestimmungen lassen sich folgende Messunsicherheiten für einzelne 2-Wochenwerte (95% Vertrauensintervall) ermitteln:

$\text{NH}_3$ :	$0.49 \mu\text{gN}/\text{m}^3$
$\text{NH}_4$ :	$0.65 \mu\text{gN}/\text{m}^3$

Da es sich hierbei um Messungen verschiedener Laboratorien handelt, sind die abgeschätzten Messunsicherheiten wohl eher zu hoch. Für die Abschätzung der Messunsicherheit der Aufteilung auf die Gas- und Partikelphase von  $\text{HNO}_3$  und  $\text{NO}_3$  stehen keine Vergleichsdatensätze zur Verfügung.

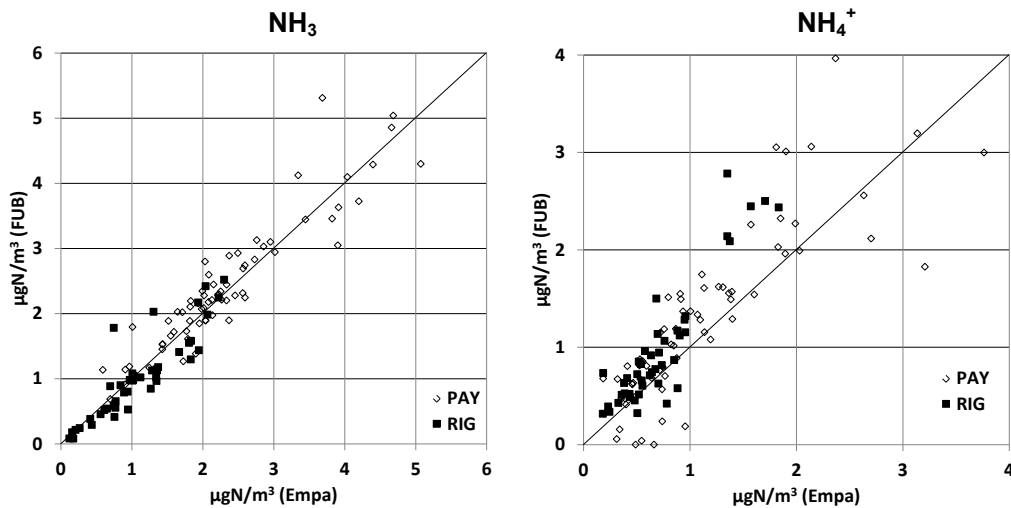


Abb. A2-12: Vergleich der mit dem Minidenudersystemen von Empa und FUB gemessenen Konzentrationen von  $\text{NH}_3$  (links) und  $\text{NH}_4$  (rechts) in Payerne und Rigi.

### Zusammenfassung

Untersuchungen in Payerne und Rigi zeigten, dass bei Messungen von Salpetersäure/Nitrat resp. Ammoniak/Ammonium mit dem DELTA-Minidenudersystem wegen ungenügender Filtereffizienz sowie Depositionsverlusten im System z.T. erhebliche Minderbefunde auftreten. Durch die Trennung des Systems in zwei separate Linien für Salpetersäure/Nitrat und Ammoniak/Ammonium sowie durch Verbesserungen bei den Filtern konnten diese Probleme relativ einfach behoben werden und eine gute Vergleichbarkeit mit alternativen, im EMEP eingesetzten Methoden erreicht werden.

## A3 Homogenisierung von Messreihen der Station Bern

Die Station Bern-Bollwerk ist seit dem 1. Februar 1991 in Betrieb und wurde am 22. Juli 1997 an einen provisorischen Standort, etwa 100 m nördlich auf der gleichen Strassenseite, verlegt. Am 6. Dezember 1999 wurden die Messungen in die neue Station auf der Strassenseite gegenüber dem provisorischen Standort verlegt (siehe Seite 7 Abb. 2-4). Die Feinstaubmessungen (PM10) blieben seit Beginn der Messungen am 9. April 1991 am selben Standort.

Während die zweite Verlegung der Messgeräte im Dezember 1999 keine nachweisbaren Sprünge in den Zeitreihen bewirkte, hatte die erste Stationsverlegung im Juli 1997 deutliche Brüche in den Messreihen zur Folge. Diese Inhomogenitäten wurden nach folgendem Verfahren korrigiert. Vor und nach dem Standortwechsel vom 22. Juli 1997 wurde an die Tagesmittel einer Messgrösse eine Exponentialfunktion angepasst, welche die mehrjährige Abnahme der Messwerte beschreibt. Das Verhältnis der beiden Funktionen am Tag des Standortwechsels wurde als Korrekturfaktor zur Homogenisierung der alten Daten an den neuen Standort verwendet. Es ergaben sich folgende Faktoren:

- |                 |      |                                                       |
|-----------------|------|-------------------------------------------------------|
| • $\text{NO}_x$ | 0.71 | (berücksichtigter Zeitraum: 23.7. 1991 bis 22.7.2003) |
| • $\text{NO}_2$ | 0.87 | (berücksichtigter Zeitraum: 23.7. 1991 bis 22.7.2003) |
| • $\text{O}_3$  | 1.2  | (berücksichtigter Zeitraum: 23.7. 1992 bis 22.7.2002) |

Das Stickstoffmonoxid NO wurde als Differenz der korrigierten  $\text{NO}_x$  und  $\text{NO}_2$  Werte berechnet. Für CO und  $\text{SO}_2$  wich der Faktor nur wenig von 1 ab und es wurde deshalb für diese beiden Messgrössen keine Korrektur vorgenommen.

In der NABEL Datenbank befinden sich weiterhin (Stand 2010) die Originaldaten der Station Bern. Bei der Verwendung von langjährigen Zeitreihen wird empfohlen die Messdaten mit den obengenannten Korrekturfaktoren jeweils zu homogenisieren.

## Anhang B: Wartungstool und Arbeitsanweisungen

### B1 Wartungstool

Bei jeder Stationswartung werden periodisch anfallende Arbeiten durchgeführt und dokumentiert (Metadaten). Seit 2006 wird zu diesem Zweck das Wartungstool eingesetzt, mit dessen Hilfe die Dokumentation elektronisch erfolgt. Vorher erfolgte die Dokumentation mittels Papier-Checklisten.

Die zentrale Datenbank des Wartungstools befindet sich wie die Messwertzentrale auf dem Nabel-Server. Mit einer Client-Version wird ein aktueller Auszug aus der Wartungstool-Datenbank auf ein Notebook geladen. Die Client-Version zeigt an, welche Tätigkeiten bei einer Stationswartung durchzuführen sind. Der Stationsverantwortliche nimmt das Notebook mit auf die Station, erledigt die durchzuführenden Tätigkeiten und macht dazu die verlangten Eingaben. Nach der Rückkehr von der Station findet ein Datenabgleich mit dem Nabel-Server in Bern statt. Die Wartungstool-Zentrale plant anschliessend die erledigten Tätigkeiten für die nächste Stationswartung neu.

Die Client-Version des Wartungstools hat folgende Funktionen:

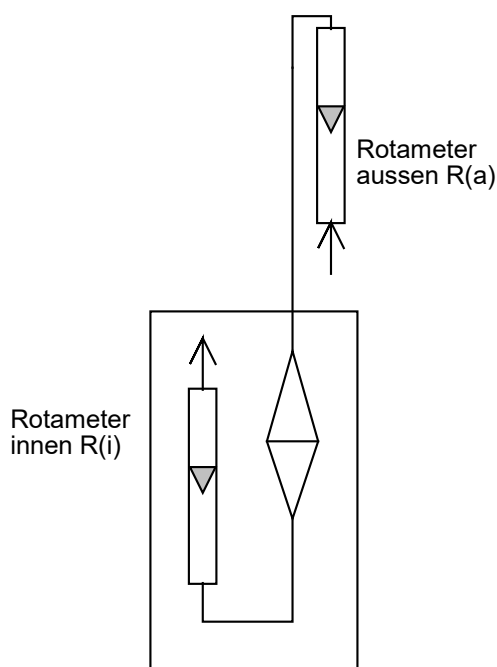
- Hilfsmittelliste: Für jede Station wird eine Liste mit Hilfsmitteln für die zu erledigenden Tätigkeiten angezeigt.
- Stationsliste: Für jede Station werden alle aktuellen Geräte aufgelistet.
- Logblatt: Für jedes Gerät kann ein Logblatt aufgerufen und editiert werden.
- Tätigkeiten: Die fälligen Tätigkeiten werden angezeigt, zu welchen in einem Formular Eingaben gemacht werden können.
- Grafiken zur Diagnose: Für jede Kontrollgrösse eines Messgerätes kann eine Grafik erstellt werden.
- Gerätewechsel: Es können Gerätewechsel durchgeführt werden.
- Archiv: Es können die Daten von früheren Wartungen (Archivdaten) abgerufen werden.

## B2 Anleitung für HIVOL-Kalibrationen mit einem zweiten Rotameter im NABEL-Messnetz

Die für die Kalibrationsarbeiten in den Stationen effektiv benötigten Anweisungen und Informationen sind **fett** gedruckt. Die dazu gehörenden Herleitungen und Erklärungen sind in normaler Schrift.

### 1. Erstkalibration des HIVOL-Rotameters R(i)

Diese Kalibration soll sicherstellen, dass die verstellbare Skala des des internen HIVOL-Rotameters R(i) richtig justiert ist. Wie bei den mobilen Rotametern R(a) muss die Skala so stehen, dass sie bei den Kalibrierbedingungen des Rotameters (15°C und 1013 mbar) richtig anzeigt. Dies geschieht durch einen einfachen Abgleich von R(i) mit R(a) mit einem leeren Filterhalter.



Vorgehen bei der Erstkalibration:

- Mobiles Rotameter R(a) auf HIVOL aufstecken
- Skalakontrolle beim mobilen Rotameter R(a). Überprüfen ob Skala gemäss Etikette auf Rotameter richtig justiert ist.
- HIVOL mit leerem Filterhalter laufen lassen. Volumeneinstellung im HIVOL so justieren, dass R(a) 700 l/min anzeigt.
- HIVOL-Rotameter R(i) muss jetzt 705 l/min anzeigen. Wenn nicht, Skala justieren.

Anmerkung: Die kleine Differenz kommt daher, dass zwischen R(a) und R(i) auch ohne Filter ein Druckabfall von ca. 4 mbar und eine Lufterwärmung um ca. 4°C stattfindet. Zur Beziehung zwischen R(a) und R(i) siehe Formel (6).

- Den zur Skala bei 500 l/min gehörigen Wert auf der Glasskala von R(i) ablesen und auf einer Klebetikette notieren (500 l/min = x Skalateile). Diese Etikette in der Nähe des Rotameters R(i) aufkleben (aber keinesfalls auf das Glasrohr). Dieses Wertepaar dient in Zukunft als Kontrolle, ob sich die Skala verschoben hat.



## 2. Stationsspezifische Einstellung des HIVOL-Rotameters R(i)

Diese Einstellung soll sicherstellen, dass bei den stationsspezifischen Bezugs- und Betriebsbedingungen das richtige Volumen angesaugt wird.

Vorgehen bei der stationsspezifischen Einstellung des HIVOL-Rotameters R(i)

- Es sind je nach Station und Messaufgabe die in Tabelle 1 angegebenen Volumenströme am HIVOL-Rotameter R(i) einzustellen.

Tabelle B1-1: Solleinstellung des HIVOL-Rotameters R(i) im Messbetrieb

Station	Filter	Volumenstrom bei Bezugsbed. p/T(Station) l/min	Einstellung R(i) l/min
Stationen < 1000 m ü.M.	Pall PM10/2.5	500	513
	Pall PM1	500	520
CHA, RIG 1000 -1200 m ü.M.	Pall PM10/2.5	500	499
	Pall PM1	500	507
DAV 1634 m ü. M.	Pall PM10	500	487
JUN 3570 m ü.M.	Pall PM10	747	676

Legende:

Pall= Pall Tissuequartz

Grundlagen für Rotameterkorrekturen:

Bei Rotametern verhalten sich die abgelesenen Durchflusswerte umgekehrt proportional wie die Wurzeln ihrer Dichten, also:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad \text{resp.} \quad Q_1 = Q_2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (1)$$

da die Dichte  $\rho$  proportional ist zu  $p/T$  gilt:

$$Q_1 = Q_2 \cdot \sqrt{\frac{p_2 \cdot T_1}{p_1 \cdot T_2}} \quad (2)$$

Folgende drei Gaszustände spielen eine Rolle:

T(ref), p(ref) Kalibrierbedingungen Rotameter, d.h. Temperatur und Druck bei der die Rotameterskala kalibriert wurde. Für die HIVOL-Rotameter stets 288 °K und 1013 mbar.

T(loc), p(loc) lokale Betriebsbedingungen im Rotameter bei der Ablesung

T(Station), Bezugsbedingungen für Volumenstrom, z.B. 282 °K und 950 mbar für  
p(Station) Mittellandstationen

Es bedeuten:

Q(Skala) = Abgelesener Volumenstrom am Rotameter

Q(loc) = Auf die Rotameterbedingungen T(loc), p(loc) bezogener Volumenstrom

Q(Station) = Volumenstrom bei Stationsbedingungen (am Ansaugkopf)

Es gilt:

$$Q_{loc} = Q_{Skala} \cdot \sqrt{\frac{T_{loc} \cdot p_{ref}}{T_{ref} \cdot p_{loc}}} \quad (3)$$

$$Q_{Station} = Q_{loc} \cdot \frac{T_{Station} \cdot p_{loc}}{T_{loc} \cdot p_{Station}} \quad (4)$$

Aus (1) und (2) ergibt sich:

$$Q_{Station} = Q_{Skala} \cdot \frac{T_{Station}}{p_{Station}} \cdot \sqrt{\frac{p_{ref} \cdot p_{loc}}{T_{ref} \cdot T_{loc}}} \quad (5)$$

$$Q_{Skala} = Q_{Station} \cdot \frac{p_{Station}}{T_{Station}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ref} \cdot T_{loc}}{p_{ref} \cdot p_{loc}}} \quad (6)$$

Formel (6) erlaubt es, die richtige Rotameterstellung im HIVOL für einen bestimmten Volumenstrom bei den gewünschten Bezugsbedingungen zu berechnen. In Tabelle 1 sind diese für alle im NABEL vorkommenden Fälle berechnet.

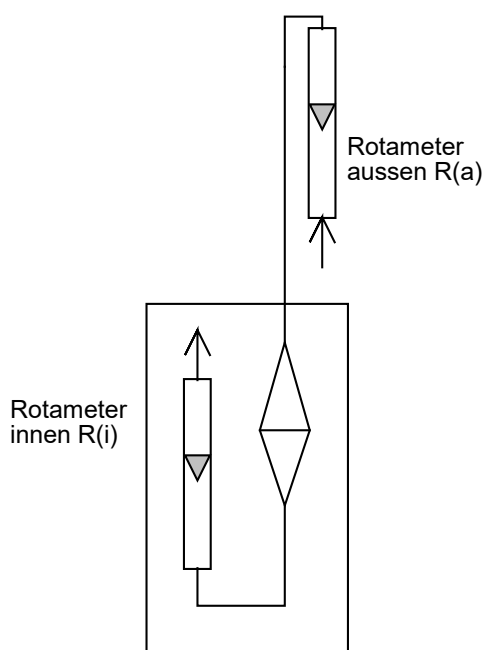
Dabei wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Bezugs- und Betriebsbedingungen verwendet. Die Bezugsbedingungen sind (gemäss den Immissionsmessempfehlungen des BAFU) die durchschnittlichen Stationsbedingungen. Die Betriebsbedingungen wurden abgeschätzt aus den durchschnittlichen Stationsbedingungen sowie den durch Messungen ermittelten mittleren Druckabfällen über das Filter und der Lufterwärmung im HIVOL.

Tabelle B1-2: Bezugs- und mittlere Betriebsbedingungen im normalen Messbetrieb mit Ausenluft

Station	Filter	Bezugsbedingungen $p/T(\text{Station})$ (mbar/K)	angenommene Betriebsbedingungen für HIVOL-Rotameter R(i) im normalen Messbetrieb $p/T(\text{loc})$ (mbar/K)
Stationen < 1000 m ü.M.	Pall PM10/2.5	950/282	895/292
	Pall PM1	950/282	870/292
CHA, RIG	Pall PM10/2.5	883/278	828/288
1000 -1200 m ü.M.	Pall PM1	883/278	803/288
DAV 1634 m ü. M.	Pall PM10	831/276	776/286
JUN 3570 m ü.M.	Pall PM10	653/265	600/285

Ab Januar 2015 werden die Betriebsbedingungen für das HIVOL-Rotameter  $p/T(\text{loc})$  erfasst und zusammen mit den gemessenen Umgebungsbedingungen  $p/T(\text{Station})$  für die Volumenkorrektur verwendet. Aus den Bezugsbedingungen wird ein Korrekturfaktor für das Volumen gerechnet; dieser liegt in der Regel im Bereich zwischen 0.95 und 1.05. Das Rotameter wird wie bisher gemäss der obigen Anleitung bezogen auf die durchschnittlichen Bedingungen eingestellt. Das erlaubt, bei einem Ausfall einer Bezugsgrösse den Korrekturfaktor 1 anzuwenden.

### 3. Leckkontrolle mit zweitem vorgeschaltetem Rotameter R(a)



## Vorgehen bei der Leckkontrolle:

- Mobiles Rotameter auf HIVOL aufstecken
- Skalakontrolle beim mobilen Rotameter R(a). Überprüfen ob Skala gemäss Etikette auf Rotameter richtig justiert ist.
- HIVOL mit eingelegtem Filter laufen lassen, ohne die bisherige Volumeneinstellung am HIVOL zu verändern.
- Aus der Tabelle 3 die Sollanzeige für R(a) ablesen und mit effektiver Anzeige R(a) vergleichen.
- Wenn Differenz zwischen Sollwert R(a) und Anzeige R(a) < 15 l/min: Leckkontrolle ok
- Wenn Differenz R(a) > 15 l/min:  
Überprüfen, ob die Betriebsbedingungen für R(a) und R(i) stark von den in Tabelle 4 aufgeführten Werten abweichen. Wenn ja, Sollwert R(a) nach Formel (6) berechnen.  
Wenn Differenz R(a) immer noch > 15 l/min:  
Fallunterscheidung vornehmen:

- Fall 1: Anzeige R(a) zu tief.  
Es besteht wahrscheinlich ein Leck. Wenn nicht, siehe Fall 2
- Fall 2: Anzeige R(a) zu hoch  
Skalenjustierung von R(a) und R(i) überprüfen  
Erstkalibration wiederholen

Tabelle B1-3: Sollanzeige von R(a) für gegebenes R(i)

Station	Filter	Einstellung R(i) l/min	Sollwert R(a) l/min
Stationen < 1000 m ü.M.	Pall PM10/2.5	513	491
CHA, RIG	Pall PM1	520	498
1000 -1200 m ü.M.	Pall PM10/2.5	499	477
DAV 1634 m ü. M.	Pall PM1	507	484
JUN 3570 m ü.M.	Pall PM10	487	462
		676	639

## Grundlagen für Rotametervergleich

Für zwei in Serie geschaltete Rotameter R(a) und R(i), die unter verschiedenen Betriebsbedingungen laufen gilt, wenn kein Leck vorhanden ist, für beliebige (aber einheitliche) Bezugsbedingungen:

$$Q_{\text{Bezug,a}} = Q_{\text{Bezug,i}} \quad (7)$$

Da beide Rotameter baugleich sind, folgt mit Hilfe von Gleichung (2):

$$Q_{\text{Skala,a}} = Q_{\text{Skala,i}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{loc,i}} \cdot T_{\text{loc,a}}}{p_{\text{loc,a}} \cdot T_{\text{loc,i}}}} \quad (8)$$

Diese Beziehung erlaubt es, das aussen aufgesteckte Rotameter R(a) mit dem HIVOL-Rotameter R(i) zu vergleichen, trotz unterschiedlicher Betriebsbedingungen.

Tabelle 3 zeigt die zu erwartende Anzeige von R(a) für die verschiedenen im NABEL vorkommenden Fälle, wobei die in Tabelle 4 aufgeführten Betriebsbedingungen zur Berechnung verwendet werden. Dabei wird angenommen, dass diese Vergleichsmessung mit ca. 22°C warmer Innenluft durchgeführt wird.

Tabelle B1-4: Betriebsbedingungen für R(a) und R(i) bei der Leckkontrolle

Station	Filter	angenommene Betriebsbed. p/T(loc,i) R(i)	angenommene Betriebsbed. p/T(loc,a) R(a)
Stationen	Pall PM10/2.5	895/303	950/295
< 1000 m ü.M.	Pall PM1	895*)/303	950/295
CHA, RIG	Pall PM10/2.5	828/303	883/295
1000 -1200 m ü.M.	Pall PM1	828*)/303	883/295
DAV 1634 m ü. M.	Pall PM10	776/303	831/295
JUN 3570 m ü.M.	Pall PM10	600/303	653/295

\*) Im Vergleich zu den in Tabelle 2 angegebenen Bedingungen ist hier der Betriebsdruck höher, da der durch den PM1-Kopf verursachte Druckabfall wegfällt (Lecktest wird ohne Kopf durchgeführt, bei den PM10- und PM2.5-Köpfen ist der Druckabfall über die Köpfe vernachlässigbar).



## 4. Anhang: Messungen im Zusammenhang mit HIVOL-Rotameterkalibrationen

### 4.1. Druckabfall und Erwärmung im HIVOL

Messungen Station Dübendorf vom 22.1.98 bis 7.2.98 (rü)

a) Drücke:

Filter/Kopf	Belegung Ende mg Staub	HIVOL. Anfang mbar	HIVOL Ende mbar	Raum. Anfang mbar	Raum Ende mbar
QF20/PM2.5	25.4	912	903	978	972
QF20/PM2.5	35.8	903	903	972	974
QF20/PM2.5	ca. 40.0	908	899	974	969
QF20/TSP	88.3	907	899	969	968
GF/TSP	104.5	943	930	968	964
GF/TSP	125.6	938	921	964	961
GF/TSP	200.8	935	908	961	973

b) Temperaturen

Filter/Kopf	HIVOL Anfang °C	HIVOL Ende °C	Aussen Anfang °C	Aussen Ende °C	Raum Anfang °C	Raum Ende °C
QF20/PM2.5	12.7	14.6	-2.7	-1	21	21.5
QF20/PM2.5	14.6	14.9	-1.1	-0.9	21.6	21.6
QF20/PM2.5	14.5	13.5	-1.1	-2.9	21.6	19.8
QF20/TSP	13.5	14.4	-2.9	-1.7	19.8	22.5
GF/TSP	8.9	10.4	-2.8	-0.9	21.3	20.1
GF/TSP	9.8	10.8	-1.1	-2	20.3	21.5
GF/TSP	9.3	11.8	-2.2	-4	21.3	19.2

Aus diesen Messungen wurden folgende mittlere Druckabfälle resp. Temperaturerhöhungen im HIVOL-Rotameter gegenüber der Aussenluft abgeschätzt:

QF20500 l/min	- 70 mbar	+10 Grad
GF 500 l/min	- 30 mbar	+10 Grad
GF 666 l/min	- 40 mbar	+10 Grad
(JUN: + 20 Grad wegen Sondenheizung)		

Die Erwärmung der Probeluft im HIVOL wird verursacht vom Wärmefluss aus den wärmeren Teilen des HIVOL sowie durch Reibungswärme im Filter. Der Anteil durch Reibung wurde wie folgt abgeschätzt:

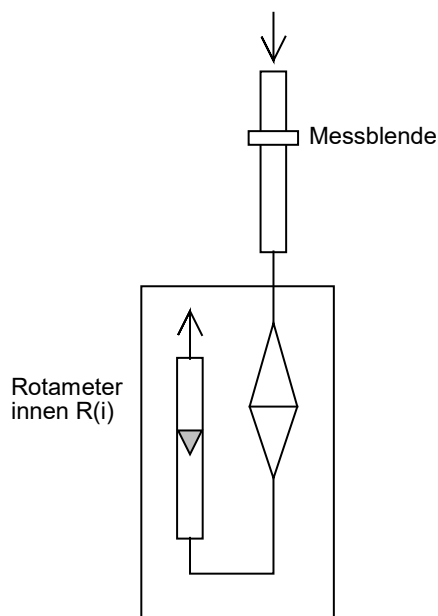
	Temp. Raum	Temp HIVOL
mit QF20, 500 l/min	22.8	29.0
leerer Filterhalter, 500 l/min	22.4	26.2

Erwärmung durch Reibung ca. 4 Grad

#### 4.2. Kalibration der beiden mobilen Rotameter mit der Blende

Datum: 18.2.98

Durchgeführt von R. Gehrig



Vorgehen:

Die Messblende wurde auf HIVOL aufgesteckt und der Volumenstrom so reguliert, dass  $\Delta p$  an der Blende 93 mm Alkohol betrug. Dies entspricht 700 l/min bei den bei der Messung herrschenden Betriebsbedingungen (984 mbar, 22 Grad).

Nun wurde die Messblende entfernt und das zu kalibrierende Rotameter aufgesteckt. Die verstellbare Skala des Rotameters wurde nun so justiert, dass sich eine Anzeige von 682 l/min ergab. Dies entspricht der Anzeige eines bei 1013 mbar und 15 Grad kalibrierten Rotameters für 700 l/min bei 984 mbar und 22 Grad (siehe Formel (1)).

Die Prozedur wurde für 600 l/min wiederholt, wobei sich dieselbe Skalastellung ergab.

Rotameter 1	500 l/min	=	13.0 (Glasskala)
Rotameter 2	500 l/min	=	12.9 (Glasskala)

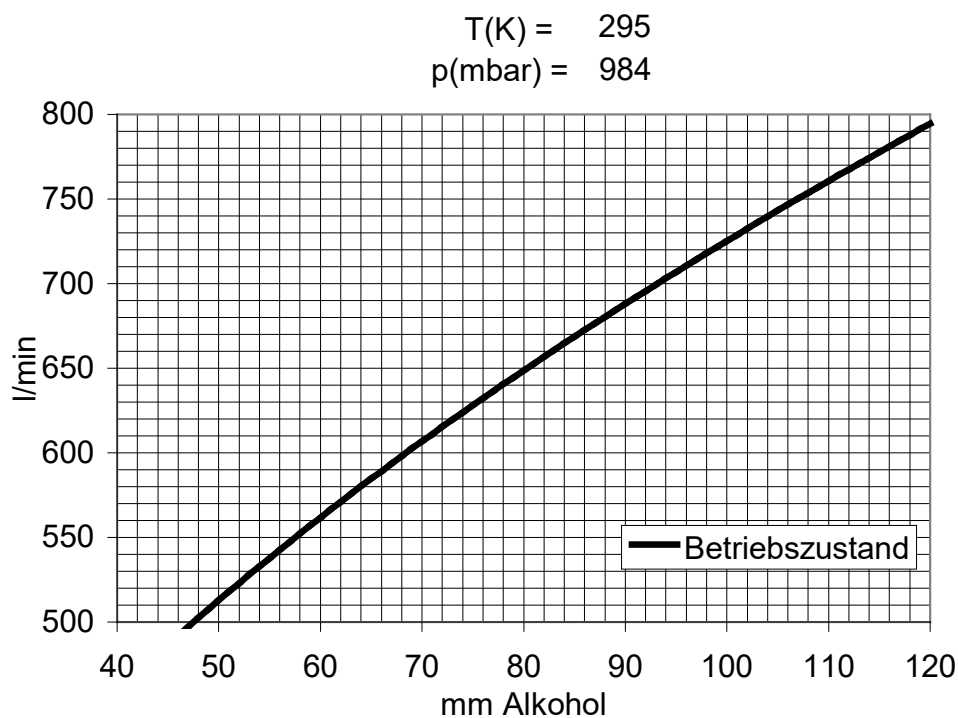
Die Blendenberechnung erfolgte nach DIN 1952

$$Q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho}$$

$\alpha$	Durchflusszahl	-	0.675	(aus Tabelle)
$\varepsilon$	Expansionszahl	-	0.99	(aus Tabelle)
$d$	Durchmesser Blendenöffnung	m	0.025	
$D$	Durchmesser Rohr	m	0.0405	
$\Delta p$	Wirkdruck (U-Rohr)	Pa	638.6	
$\rho$	Dichte des Gases vor Blende	kg/m <sup>3</sup>	1.127	
	Normdichte von Luft mit 2 vol% Wasser	kg/m <sup>3</sup>	1.276	

Blendennomogramm für die Messbedingungen bei der Rotameterkalibration am 18.2.98.



#### 4.3 Druckabfallmessungen mit den neuen Whatman QMA-Filtern

Messungen Thomas Seitz (Dezember 2005)

PM10 QMA 500 l/min	Druckabfall:	55 mbar
PM2.5 QMA 500 l/min	Druckabfall:	60 mbar
PM1 QMA 500 l/min	Druckabfall:	81 mbar

Die Unterschiede im Druckabfall zwischen PM10 und PM2.5 sind zu gering, um unterschiedliche Einstellungen der Rotameter notwendig zu machen. Deshalb: Gleiche Rotameter-einstel-

lungen für PM10 und PM2.5.

**Nachtrag:**

Druckabfallmessungen mit Pall Tissuquartzfiltern ergaben praktisch identische Druckabfälle wie mit den Whatman QMA-Filtern. Die Einstellungen mussten deshalb nicht verändert werden.

## Anhang C: Diverse Tabellen

### C1 Umrechnungsfaktoren von ppb in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Jeder Mittelwert, der als Stoffmengenanteil in ppb registriert wird, muss in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$c_i [\mu\text{g}/\text{m}^3](p, T) = c_i [\text{ppb}] \cdot \frac{p \cdot M_i}{T \cdot R}$$

$c_i [\mu\text{g}/\text{m}^3]$	=	Massenkonzentration des Gases i in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Druck p und Temperatur T
$c_i [\text{ppb}]$	=	Stoffmengenanteil des Gases i in ppb
p	=	atmosphärischer Druck in Pascal (1 mbar = 100 Pascal)
$M_i$	=	Molmasse des Gases i in kg/mol
T	=	absolute Umgebungstemperatur in K (= Temperatur in °C + 273.15)
R	=	molare Gaskonstante: 8.314 J/mol K

Man unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Höhenstufen<sup>[1]</sup>

- Stationen über 1500 m.ü.M. (Jungfraujoch, Davos)
- Stationen unter 1500 m.ü.M. (übrige Stationen)

Bei Stationen unter 1500 m.ü.M. beruhen die Umrechnungsfaktoren auf einer Temperatur von 293.15 K (20°C) und einem Druck von 1013.25 mbar. Für alpine Messstandorte über 1500 m.ü.M. erfolgt die Umrechnung mit dem langjährigen Jahresmittel von Temperatur und Luftdruck der jeweiligen Station.

Umrechnungsfaktoren			
	Stationen < 1500 m ü.M.	DAV	JUN
mittlere Jahrestemperatur	20°C	3 °C	-8 °C
mittlerer Luftdruck	1013.25 mbar	831 mbar	653 mbar
Schwefeldioxid	2.66	2.32	1.90
Stickstoffdioxid	1.91	1.67	1.36
Stickstoffmonoxid	1.25	1.09	0.89
Ozon	2.00	1.74	1.42
Kohlenmonoxid	1.16	1.01	0.83
Ammoniak	0.708		
Methan	0.667	0.58	0.48



## C2 Zusammenfassung der geographischen Daten der Stationen

Die Umrechnung der Neuen Schweizer Landeskoordinaten LV95 (E, N, Angabe in m) in Globale Koordinaten (L/B/H [° ' "]) erfolgte mittels der Koordinatentransformation (NAVREF) von swisstopo (Bundesamt für Landestopografie).

<https://www.swisstopo.admin.ch/de/karten-daten-online/calculation-services/navref.html>

Standort	Neue Schweizer Landeskoordinaten (LV95)		Geografische Koordinaten		Höhe
	Ost	Nord	Länge	Breite	m ü.M.
BAS	2610890	1265605	7° 34' 59.8"	47° 32' 27.9"	316
BER	2600170	1199990	7° 26' 27.1"	46° 57' 03.6"	536
BRM	2655840	1226780	8° 10' 31.6"	47° 11' 22.6"	797
CHA	2565085	1211040	6° 58' 44.9"	47° 02' 58.1"	1136
DAV	2784455	1187735	9° 51' 21.3"	46° 48' 54.7"	1637
DUE	2688300	1251105	8° 36' 30.5'	47° 24' 17.5"	430
HAE	2628875	1240180	7° 49' 13.8"	47° 18' 42.7'	431
JUN	2641910	1155280	7° 59' 06.3"	46° 32' 51.0"	3580
LAU	2538690	1152615	6° 38' 22.7'	46° 31' 19.3"	530
LUG	2717610	1096645	8° 57' 25.6'	46° 00' 40.0"	280
MAG	2715500	1113195	8° 56' 02.2"	46° 09' 37.2"	203
PAY	2562285	1184775	6° 56' 40.1"	46° 48' 47.0"	489
RIG	2677835	1213440	8° 27' 48.0"	47° 04' 02.7"	1031
SIO	2592545	1118745	7° 20' 31.3"	46° 13' 12.4"	483
TAE	2710500	1259810	8° 54' 16.9"	47° 28' 47.2"	538
ZUE	2682450	1247990	8° 31' 49.5"	47° 22' 39.3"	409

### C3 Standortwechsel im NABEL

Station	Schweizer Landeskordinaten		Standort		Sondenhöhe m
	Ost Y	Nord X	von	bis	
Bern 1	600140	199905	1.2.1991	22.7.1997	6.0
Bern 2	600145	200025	24.7.1997	6.12.1999	4.5
Bern 3	600170	199990	8.12.1999	-	3.7
Dübendorf 1	688675	250900	1.1.1970	31.12.2020	4.7/4.95
Dübendorf 2	688300	251105	1.1.2021	-	5.0
Lugano 1	717640	96650	5.8.1980	24.4.1991	6.5
Lugano 2	717580	96605	25.4.1991	2.11.1992	4.5
Lugano 3	717755	96635	4.11.1992	11.9.2001	4.5
Lugano 4	717610	96645	12.9.2001	-	2.7
Payerne 1	562195	184710	1.1.1980	20.3.1991	14.0 <sup>a</sup>
Payerne 2	562285	184775	21.3.1991	-	5.2
Sion 1	592220	118650	7.2.1980	8.4.1991	4.5
Sion 2	592545	118745	9.4.1991	-	5.2
Zürich 1	682465	247970	5.5.1980	6.8.1990	4.5
Zürich 2	682440	247855	10.8.1990	1.4.1997	4.5
Zürich 3	682450	247990	5.4.1997	-	3.3

<sup>a</sup> Payerne 1: Einlass für Ozonmessung 2.7 m über Grund.

## C4 Bergerhoff Staubniederschlag (Standortwechsel)

Station	Standort		
	von	bis	
BAS	Jan. 1981	14.8.2023	Meteofeld Wiese
	15.8.2023		Auf dem Dach der Messstation Basel
BER	1.2.1991	Aug. 1997	Auf dem Dach des Messcontainers Standort Bern 1 (Tabelle C3)
	Aug. 1997	Aug. 2000	Auf dem Dach des Messwagens Standort Bern 2 (Tabelle C3)
	Sep. 2000	Sept. 2006	Ausleger Fussgängerüberführung Bollwerk
	Okt. 2006		Ca. 20 m nördlicher; Standort ähnlich dem Standort Bern 1, aber über Strassenschlucht
LAU	Jan. 1991	Dez. 2003	Auf der Wiese neben der Ostseite des Bibliotheksgebäudes
	Jan. 2004		Am Geländer der Terrasse vis a vis Bibliothek
LUG	5.8.1980	23.4.1991	Auf Schulhausplatz neben Hauswirtschaftsgebäude
	24.4.1991	1.11.1992	Standort Lugano 2 (Tabelle C3)
	2.11.1992	11.9.2001	Auf dem Dach von Standort Lugano 3 (Tabelle C3)
PAY	1.1.1980	20.3.1991	Standort Payerne 1 (Tabelle C3)
	21.3.1991		Standort Payerne 2 (Tabelle C3)
RIG	Jan 1991	27.1.2009	Am Zaun Richtung Küssnacht
	12.2.2008	27.1.2009	Topf 1 neu ca. 1m von Topf 2 entfernt
	27.1.2009		Am Zaun Richtung Rigi Kulm
SIO	Jan. 1981	Sept. 1992	Standort Sion 1 (Tabelle C3)
	Okt. 1994	5.1.2000	Grasdach Hangar bei Standort Sion 2 (Tabelle C3)
ZUE	5.5.1980	6.8.1990	Standort Zürich 1 (Tabelle C3)
	7.8.1990	1.4.1997	Standort Zürich 2 (Tabelle C3)
	5.4.1997		Innerhalb Zaun von Standort Zürich 3 (Tabelle C3)

C5 Stationshöhen, Höhen Messgeräte und Anlagen

Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe **NABEL**  
Stationshöhen, Höhen Messgeräte und Anlagen

Messstationen		Höhenangaben in m.ü.M.															
Messgeräte, Anlagen		BAS	BER	BRM	CHA	DAV	DUE	HAE	JUN	LAU	LUG	MAG	PAY	RIG	SIO	TAE	ZUE
CH-Landeskoordinaten Ost		2'610'980	2'600'170	2'655'840	2'565'085	2'784'455	2'688'300	2'628'875	2'641'910	2'538'890	2'717'610	2'715'500	2'562'285	2'677'835	2'592'545	2'710'500	2'682'450
CH-Landeskoordinaten Nord		1'265'605	1'199'990	1'226'780	1'211'040	1'187'735	1'251'107	1'240'180	1'155'280	1'152'615	1'96'645	1'113'195	1'184'775	1'213'440	1'118'745	1'259'810	1'247'990
Meteomessegeber																	
Niederschlag		317.5	564.0	798.0	1137.1	1662.4	435.0	432.3		539.4	286.5	198.5	491.5	1033.4	483.5	540.5	410.5
Thermo/ Hygrometer		318.2	564.3	799.0	1137.6	1671.7	435.4	432.4	3584.0	539.4	275.0	199.0	492.0	1033.2	484.0	541.0	410.9
Barometer		317.3	535.3	802.0	1138.0	1639.8	432.2	432.4	3575.8	527.6	301.2	204.8	491.6	1032.6	483.6	540.4	407.5
Windmesser		334.5	572.2		1151.6	1673.1	466.4	441.9	3584.0	547.9	295.0	207.0	500.0	1042.5	492.0	549.0	443.5
Globalstrahlung		324.5	564.8	800.0	1138.7	1671.5	458.8	433.7	3584.0	539.6	287.0	199.0	492.0	1034.2	484.0	541.0	435.8
UK Ansaug BC (bei Rampe)			541.0														
Sonde PM (bei Rampe)			540.9														
Anlage																	
Messstation (OK Boden)		316.5	533.7	797.0	1136.5	1638.2	430.5	430.9	3577.6	526.1	277.5	203.7	489.1	1031.1	483.2	538.5	405.8
Messstation (Schild)		317.7	534.8		1137.4	1639.4		432.1		527.0	278.5	204.7	490.0	1031.9	484.1	539.3	407.0
Meteomast (Fusspunkt)		316.0	560.4		1135.9	1637.0		430.9	3580.0	535.5	273.0	197.0	490.0	1031.7	482.0	539.0	433.8
Luftansaugsonde		321.2	539.9	802.0	1141.2	1669.4	435.0	436.2	3585.7	532.8	283.0	208.5	493.9	1036.3	488.0	543.2	412.0
Mittl. Terranhöhe bei Sonde		316.0	536.2	797.0	1136.1	1636.7	430.0	430.6		529.7	280.3	203.4	488.7	1030.9	482.8	538.2	408.6
Strassenniveau im Bereich der Sonde			536.2					431.5		530.4					484.2		

Bemerkungen zu den Angaben in der Tabelle:

- BER, Meteomast (Fusspunkt):

- BER, Barometer

- BER, Strassenniveau im Bereich der Sonde

- BER, PM Sonde (bei Rampe)

- DUE, Windmesser und Globalstrahlung

- SIO, Strassenniveau bei Sonde:

- ZUE, Meteomast (Fusspunkt):

- MeteoSchweiz Stationen

OK Boden Dach = 560.35 m ü.M.

Station Bollwerk 27

Station Bollwerk 27

CH-LK 2'600'135/1'199'910

CH-LK 2'688'548/1'251'013

OK Fahrbahnbelag N 9 = 484.15 m ü.M.

OK Podest Dach = 433.80 m ü.M.

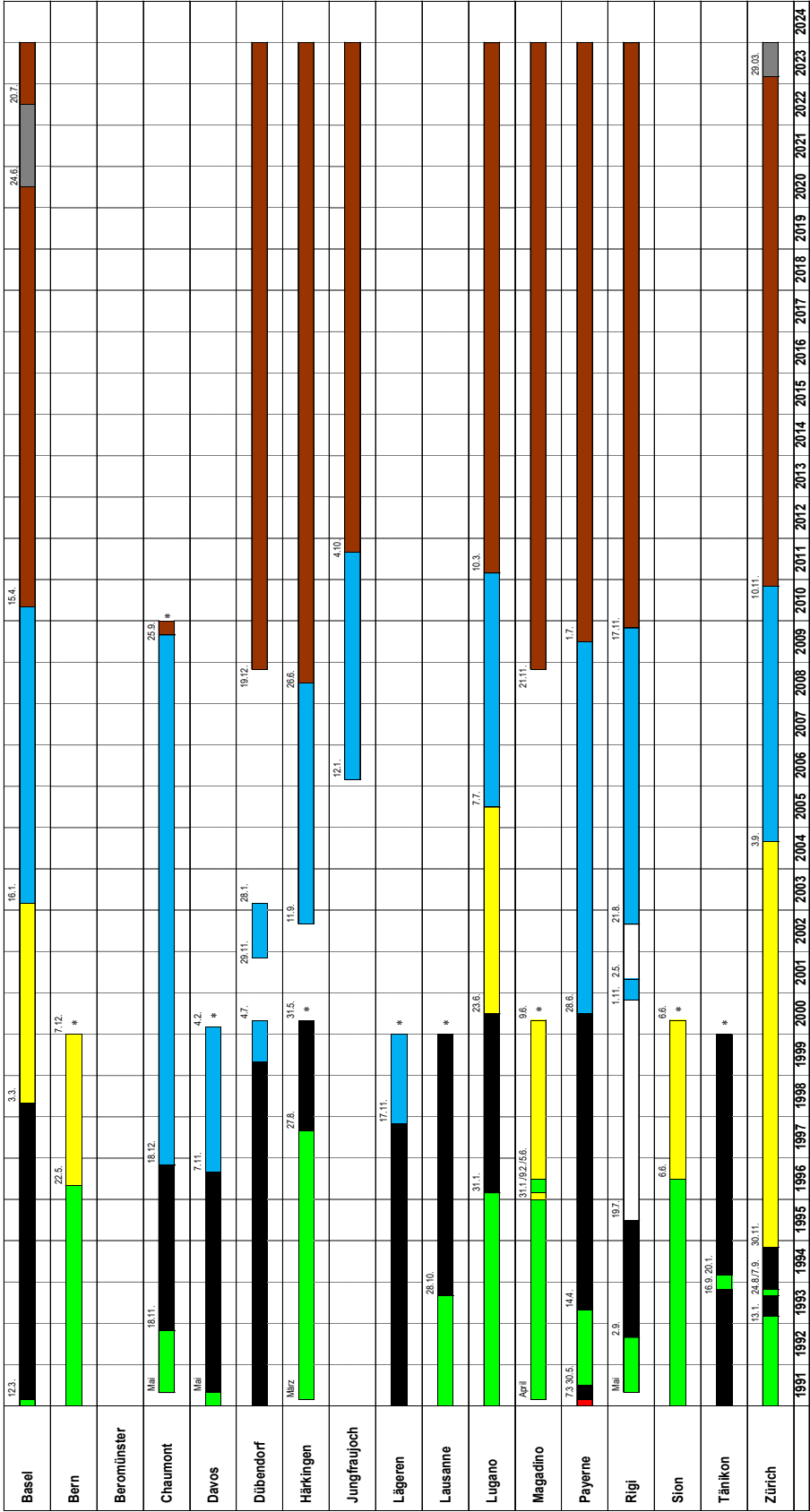
Meteomast Fusspunkt= Höhe Hauptmessfeld

Stationsinformationen von MeteoSchweiz

## **C6 Geräteübersicht**

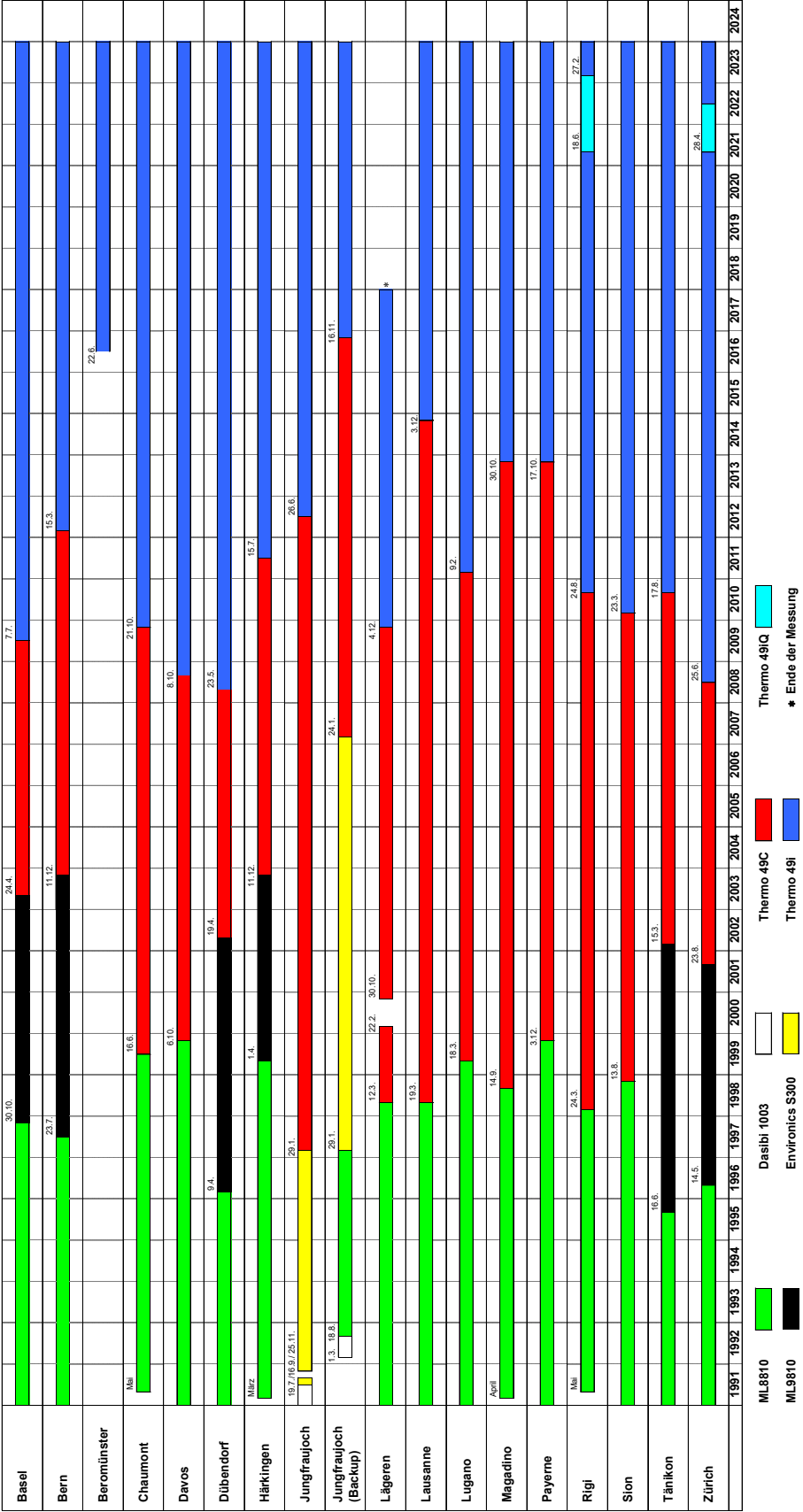
Die aktuellen Messverfahren werden in Kapitel 3 dieses Technischen Berichts beschrieben. Messverfahren die früher im Einsatz waren, sind in den jeweiligen Technischen Berichten der vergangenen Jahre zu finden (<https://www.empa.ch/web/s503/weitere-dokumente>).

SO<sub>2</sub> - Analysator

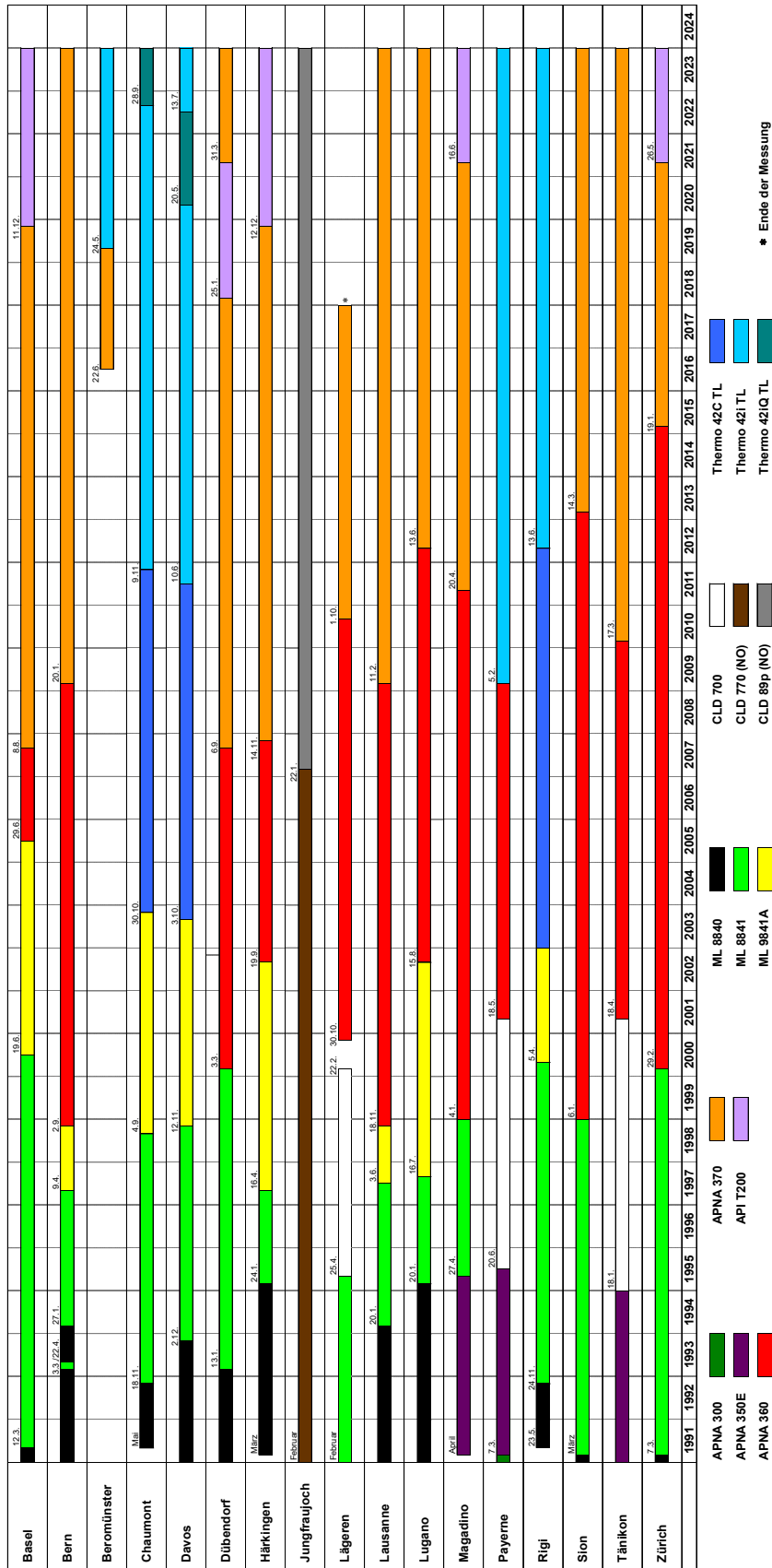




Ozon - Analysator



NO/NO<sub>x</sub> - Analysator





Basel	4.2	25.2	29.6	14.3
Bern	25.2	29.6	14.3	
Beromünster				
Chamont	22.1	*		
Davos				
Dübendorf	9.4	25.2	20.11	21.1
Härkingen	27.8	7.11	11.3	
Jungfraujoch	1.4	5.6	10.5	25.8
Lägeren				
Lausanne	9.9	24.2	20.10	
Lugano	1.9	20.10		
Magadino				
Payeme	17.12	17.10	28.8	14.7
Rigi	8.12	3.17	5.9	23.12
Sion	5.3	10.3	*	
Tänikon	19.12	*		
Zürich	18.12	11.5		
	100.4	100.3	100.4	100.3

APMA 350E	APMA 360	APMA 370	Picarro G2302	Picarro G2401
LGR 913-0015	Picarro G5310	* Ende der Messung		

CO<sub>2</sub> - Analysator



LI-7000      Picarro G1301      Picarro G2401      Picarro G2302

N<sub>2</sub>O - Analysator

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Basel																																			
Bern																																			
Beromünster																																			
Chamont																																			
Davos																																			
Dübendorf																																			
Härkingen																																			
Jungfraujoch															4.2																				
Lägeren																																			
Lausanne																																			
Lugano																																			
Magadino																																			
Payerne																																			
Rigi																																			
Sion																																			
Tänikon																																			
Zürich																																			

GC Agilent 6890N      LGR 913.0015      Picarro G5310

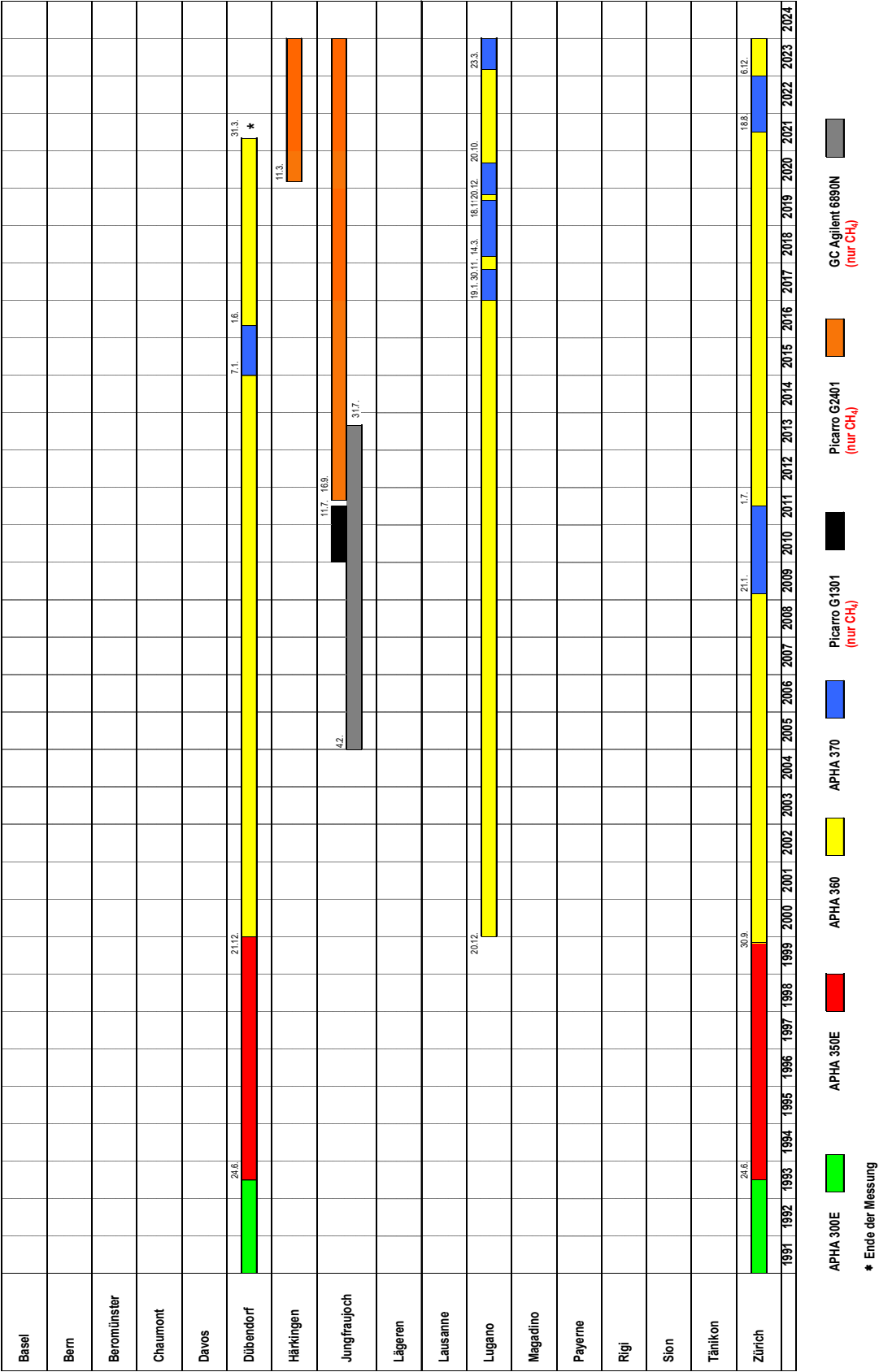




		abgeschlossene Messprogramme										aktuelles Messprogramm			
Standort		NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	NABEL	HALCLIM-Projekt	NABEL
Zeitraum		DUE	DUE	DUE	NABEL	ZUE	BER	DUE	ZUE	RIG	ZUE	BER	DUE	JUN	BRM
Zeitliche Erfassung		1992 -1999 1 h - MW	2000 1 h - MW	2001-2010 1 h - MW	HALCLIM-Projekt JUN	2000 - 2004 4 h - MW	2005-2008 4 h - MW	HALCLIM-Projekt JUN	1994 - 2001 2 h - MW	2001 - 2004 1 h - MW	2011-2012 1 h - MW	2011-2012 1 h - MW	2011-2012 1 h - MW	2009-2010 2 h - MW	ab 2018 1 h - MW
Benzol															
Toluol															
Ethylbenzol															
m/p-Xylol															
o-Xylol															
Ethan															
Ethin															
Propan															
Propen															
n-Butan															
Isobutan															
n-Pentan															
Isopentan															
n-Hexan															
Heptan															
1,3-Butadien															
Isopren															
Σ aller Butene															
Σ aller Pentene															
Σ aller Isohexane															
3-Methylpentan															
Σ aller Isoheptane															
Acetaldehyd															
Methanol															
Ethanol															
Σ Propanol + Isopropanol															
Aceton															
Butan-2-on (MEK)															
2-Methoxy-2-methylpropan (MTBE)															
Ethyl-acetat															
Acetonitril															
α-Pinen															
Limonen															

\* ab 2006

CH<sub>4</sub> / THC - Analysator



[illegible]

TGA 310

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Basel																																			
Bern																																			
Beromünster																																			
Chaumont																																			
Davos																																			
Dübendorf																																			
Härkingen																																			
Jungfraujoch																																			
Lägeren																																			
Lausanne																																			
Lugano																																			
Magadino																																			
Payerne																																			
Rigi																																			
Ston																																			
Tänikon																																			
Zürich																																			

$\Sigma$  (HNO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) / Tagesproben Filter

$\Sigma$  (NH<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) / Tagesproben Filter

★ Ende der Messung

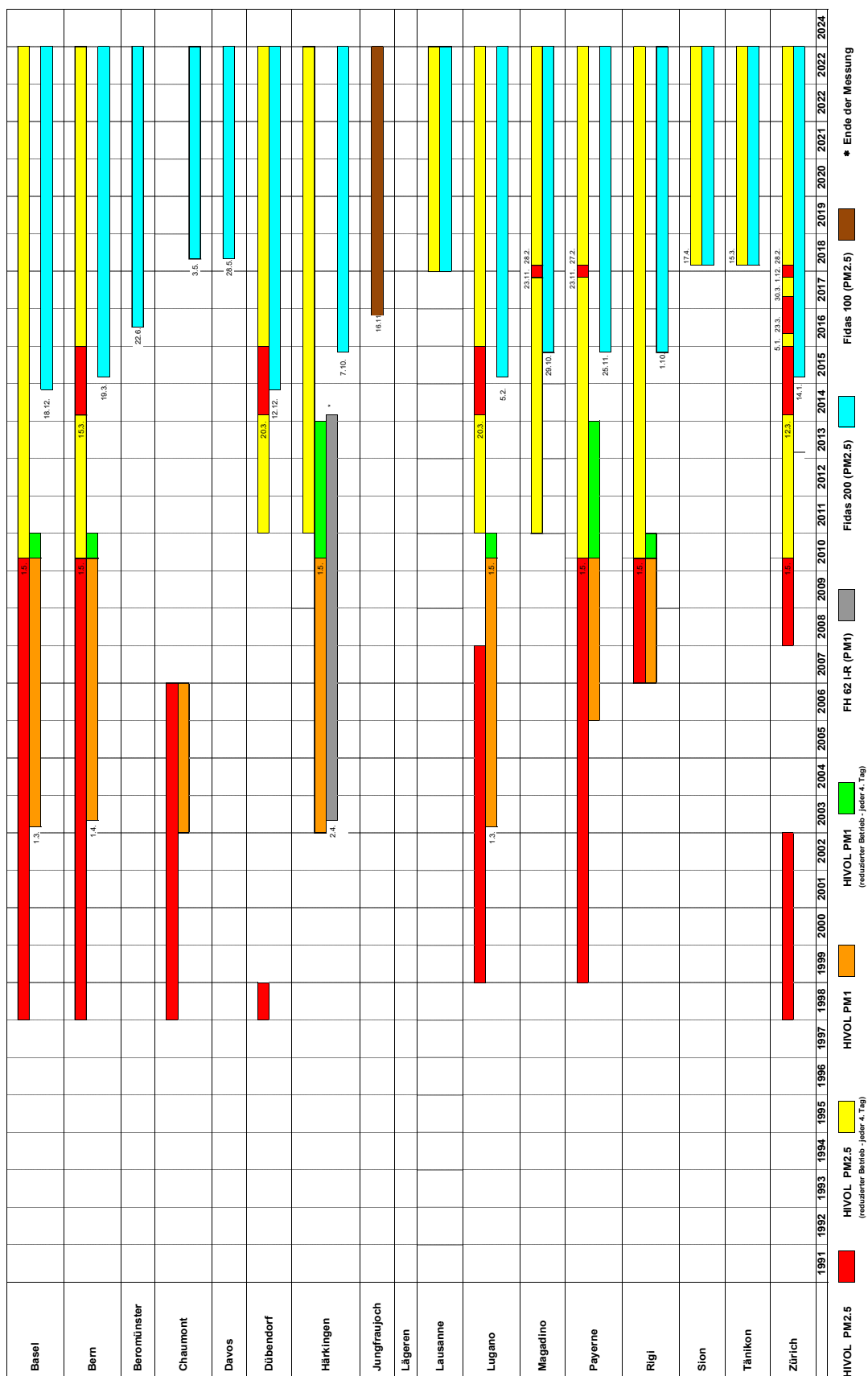
HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> / 14-Tages-Proben MD System

 $\Sigma (\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-) / \text{Tagesproben Filter}$  $\Sigma (\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+) / \text{Tagesproben Filter}$ 

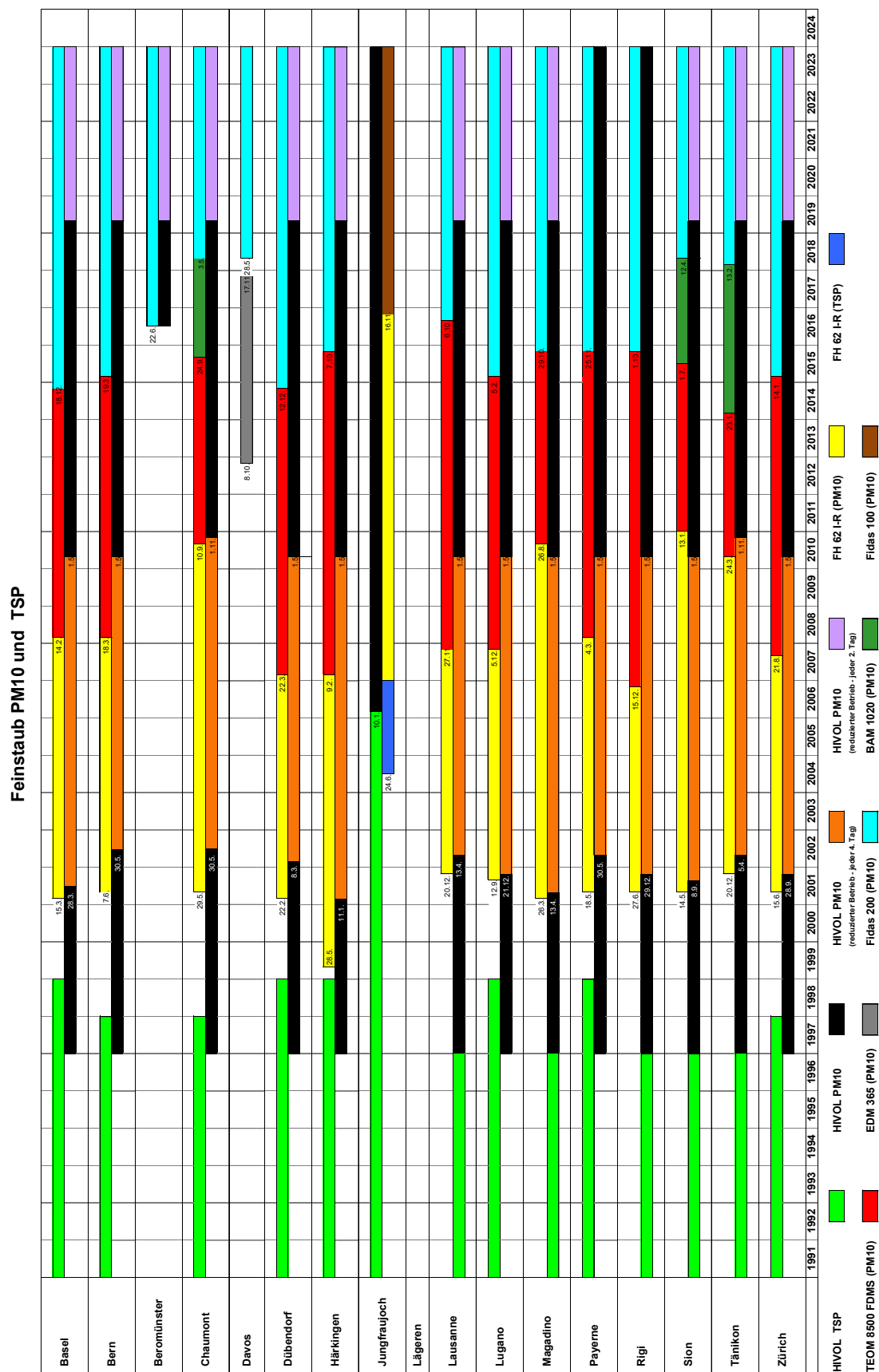
**\* Ende der Messung**

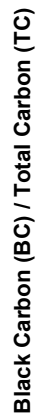
HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> / 14-Tages-Proben MD System

## Feinstaub PM2.5 und PM1



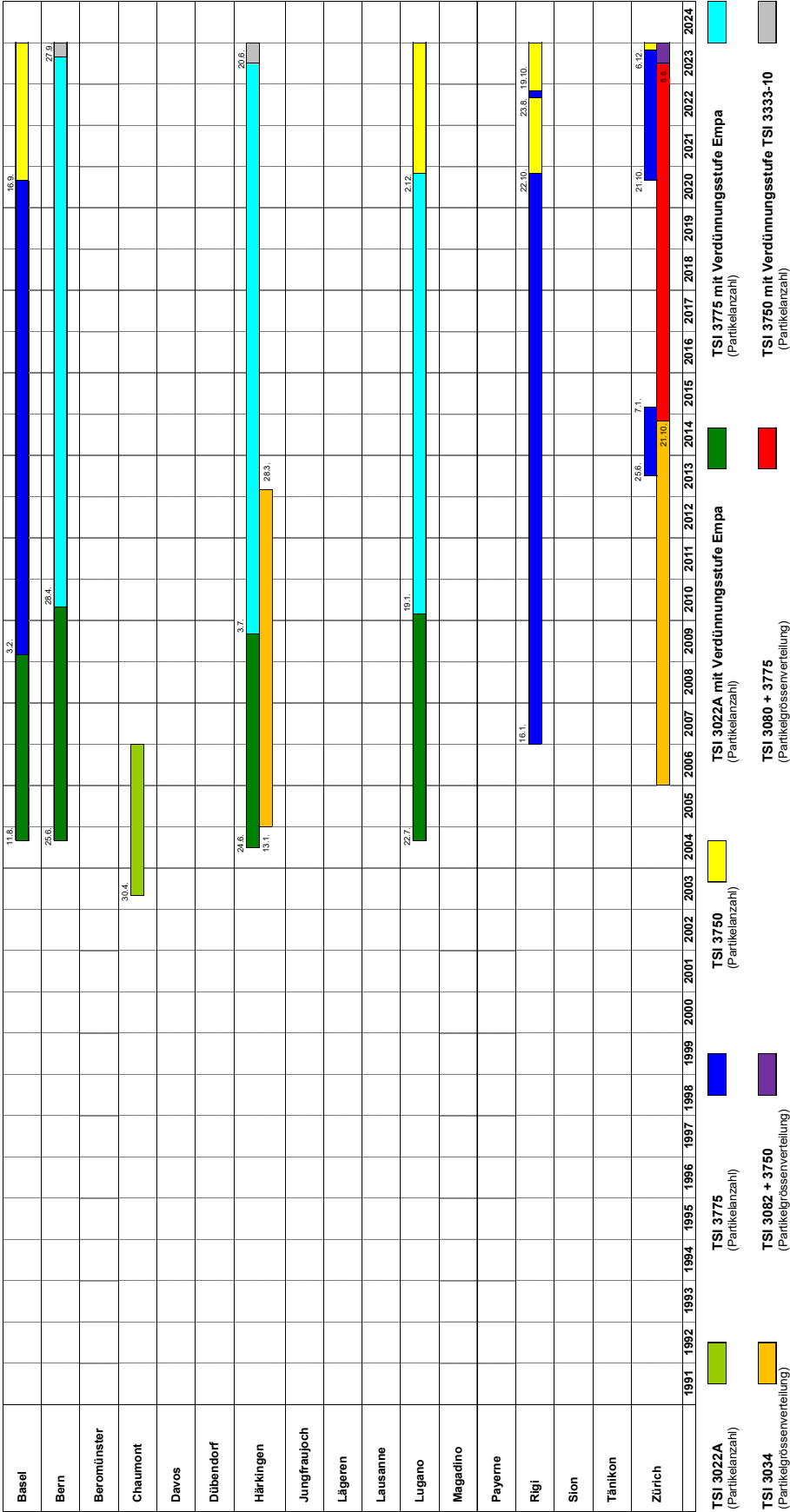








Partikelanzahl / Partikelgrößenverteilung



## C7 Standort Lägeren (bis Ende 2017 in Betrieb)

### LÄGEREN (2669780 / 1259025) 689 m

Die Station liegt mitten im Wald am südlichen Abhang der Lägeren. Rund 2 km südöstlich der Station beginnt die stark besiedelte und industriereiche Agglomeration Baden. Rund 3 bis 4 km südlich der Station verläuft mit der A1 (Zürich - Bern) die grösste Ost - West Hauptverkehrsachse der Schweiz. Die Ansaugsonde für die gasförmigen Luftschadstoffe befindet sich auf einem 45 m hohen Turm neben der Messstation. Auf diesem Turm werden auch die meteorologischen Parameter erfasst.

Die Station Beromünster ist seit Sommer 2016 in Betrieb und löst die Station Lägeren ab. Die Messungen an der Station Lägeren werden Ende 2017 eingestellt.



Abb. C7-1: Messstation Lägeren

## LÄGEREN



Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo

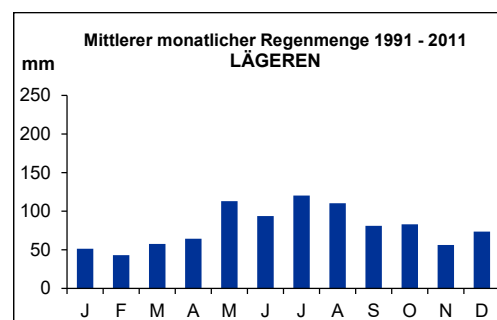
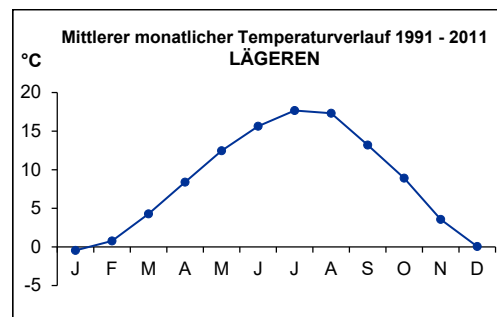
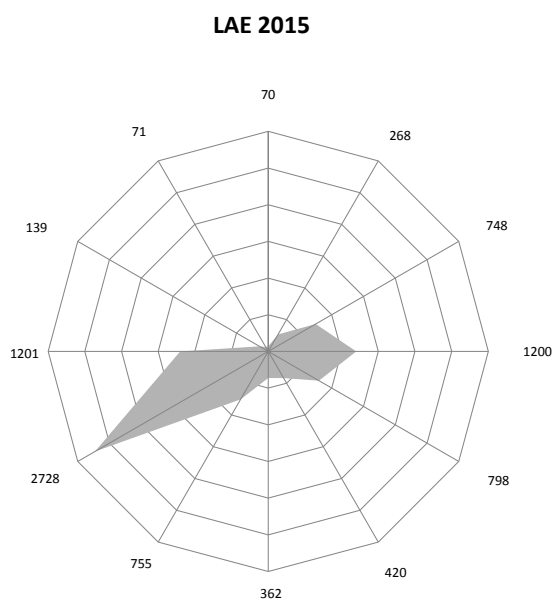


Abb. C7-2: Windrichtungsverteilung 2015, Mittlerer monatlicher Temperaturverlauf 1991-2011 und Mittlere monatliche Regenmenge 1991-2011



## **Empa**

### **CH-8600 Dübendorf**

Überlandstrasse 129

Telefon +41 58 765 11 11

Telefax +41 58 765 11 22

### **CH-9014 St. Gallen**

Lerchenfeldstrasse 5

Telefon +41 58 765 74 74

Telefax +41 58 765 74 99

### **CH-3602 Thun**

Feuerwerkerstrasse 39

Telefon +41 58 765 11 33

Telefax +41 58 765 69 90



# **Empa**

Materials Science and Technology

[www.empa.ch](http://www.empa.ch)