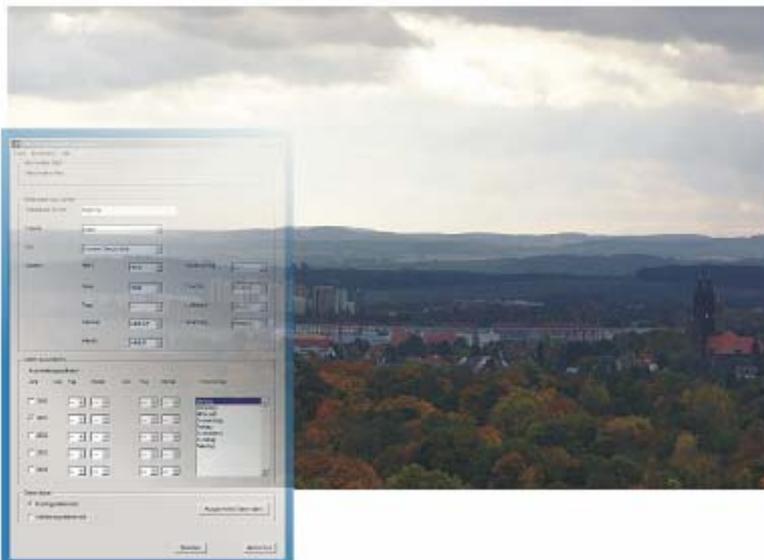




Fraunhofer Institut
Verkehrs- und
Infrastruktursysteme

PM10-Prognosemodell



Dr. M. Klingner
M. Voigtländer
K. Anke
E. Sähn

Im Auftrag des
Landesamtes für Umwelt und
Geologie

Dresden, März 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Datengrundlage	3
2.1	PM10-Daten des Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG).....	3
2.2	Meteorologische Daten	6
3	Grundlagenuntersuchungen - Modellvoraussetzung	7
3.1	PM10-Immissionskonzentration	7
3.2	Meteorologie	8
3.3	Verkehr	10
3.4	Einflussfaktoren auf die Prognosequalität	12
4	Prognoseprogramm	16
4.1	Programmstruktur	16
4.2	Datenbankaufbau und -aktualisierung	17
4.3	Entwicklung der Neuronalen Netze und des Prognosetools	18
4.3.1	Neuronale Netze	18
4.3.2	Prognosetool.....	19
5	Entwicklungs- und Verbesserungsmöglichkeiten	20
5.1	Prognosequalität	20
5.2	PM10-Minderung - Maßnahmeabschätzung.....	20
6	Zusammenfassung	22
	Anhang	23

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der derzeitigen Grenzwertvorgaben sind die Kommunen verpflichtet, zur Minderung der Immissionsbelastung Aktions- und Maßnahmepläne zu erstellen.

Eigene bisherige Untersuchungen, vor allem die Auswertungen zahlreicher PM10-Episoden über einen Zeitraum von 5 Jahren^{*)} haben allerdings gezeigt, dass es hinsichtlich der PM10-Konzentration nicht ausreicht, die Emittenten losgelöst von standortspezifischen Ausbreitungsbedingungen und Meteorologie zu betrachten.

Am Fraunhofer IVI wurde deshalb auf der Basis von Langzeitimmissionsmessreihen, meteorologischen Daten und einer aktuellen Wetterprognose ein Modell entwickelt, das diese komplexen Zusammenhänge berücksichtigt und auf die meist nicht vorhandenen detaillierten Verkehrsparameter verzichtet.

Um der im Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) derzeit vorhandenen groben Wetterprognose gerecht zu werden, wurde der Detaillierungsgrad des Modells bewusst einfach gehalten.

2 Datengrundlage

2.1 PM10-Daten des Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG)

Die für die Entwicklung des Prognosemodells notwendigen PM10-Daten wurden durch das LfUG als ½-h-Werte der PM10-Automaten vom Typ TEOM von den folgenden Regionen zur Verfügung gestellt und auf Plausibilität untersucht.

- Leipzig (drei Stationen)
- Dresden (drei Stationen)
- Chemnitz (drei Stationen)
- Borna, Görlitz, Zittau und Plauen (jeweils eine Station)

Datenverfügbarkeit und Qualität

Die Datenverfügbarkeit ist eines der wichtigsten Merkmale zur Entwicklung des Prognosemodells. Je mehr Daten der PM10-Immissionskonzentration und der Meteorologie zur Verfügung stehen, desto besser ist die Qualität der PM10-Prognose.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Fehlwerte pro Station und Jahr in Prozent. Mindestbedingung für die Erstellung einer Prognose sind Daten im Umfang von zwei vollständigen Jahren mit nur wenigen Fehlwerten. Rot markiert sind die Stationen bzw. Jahre, die nicht für die Prognose genutzt werden können. Auf Grund der stufenweisen Einführung der TEOM-Messgeräte erfolgte zwangsläufig an einzelnen Stationen einige Jahre keine Messung. Die Stationen Dresden, Bergstraße und Chemnitz, Leipziger Straße scheidern grundsätzlich aus den Betrachtungen aus, da nicht ausreichend viele Daten zur Verfügung stehen. Das Jahr 2001 konnte nur Werte der Stationen Chemnitz-Nord, Dresden-Nord, Leipzig, Lützner Straße und Leipzig-Mitte in das Training einbezogen werden.

^{*)} Anke, K.; Sähn, E.; John, D.; Klingner, M.: Hierarchische Gliederung von Überschreitungsepisoden – erweiterte und detaillierte Analyse für Schwebstaub (PM10). Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Dresden, Dezember 2005.

Tabelle 1: Prozentualer Anteil der PM10-Fehlwerte für die Prognosestationen

	2001	2002	2003	2004	2005
Borna	100	12	1	1	2
Chemnitz, Leipziger Straße	100	100	100	99	19
Chemnitz-Mitte	100	100	3	3	2
Chemnitz-Nord	0	1	1	1	31
Dresden, Bergstraße	100	100	100	99	12
Dresden-Nord	3	2	1	1	31
Dresden, Postplatz	100	100	4	1	5
Leipzig, Lützner Straße	1	1	3	20	2
Leipzig-Mitte	2	1	2	1	27
Leipzig-West	100	96	2	3	3
Plauen-Süd	100	6	2	1	11
Zittau	100	96	2	2	2
Görlitz	100	2	1	1	2

Zur Beurteilung der PM10-Datenqualität wurde eine statistische Analyse mit den Kenngrößen Maximum, Minimum, Mittelwert und den Häufigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der Höhe der PM10-Konzentration pro Station und Jahr vorgenommen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass an vielen der Stationen Maximalwerte im Bereich $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auftreten, was zu einer Verschlechterung der Prognose führen kann.

Die Tabelle 2 zeigt am Beispiel Lützner Straße die Anzahl der PM10-Werte pro Klasse und Jahr. Es wird deutlich, dass hohe PM10-Konzentration über $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in teilweise beträchtlicher Menge vorkommen. Jede der in die Prognose einbezogenen Stationen besitzt eine andere Charakteristik / Verteilung und muss gesondert betrachtet werden.

Tabelle 2: PM10-Häufigkeitsverteilung an der Station Leipzig, Lützner Straße

Leipzig Lützner Straße	Klassen PM10-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]										
	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	≥ 300
Gesamtzeitraum	35025	31062	11560	3714	1129	384	170	67	36	17	53
2001	7856	5960	2362	845	217	81	27	11	4	0	4
2002	7046	6470	2568	908	264	67	30	5	2	1	9
2003	5818	6894	2800	890	335	121	63	34	20	14	20
2004	6290	5332	1687	478	141	39	17	3	3	1	2
2005	6233	5338	1718	449	121	59	26	7	6	1	18

Die sehr hohen PM10-Konzentrationen können die Prognosequalität erheblich beeinflussen (siehe auch Kapitel 3.4). Aus diesem Grund ist es notwendig, diese zu ermitteln, zu entfernen und gegebenenfalls zu ersetzen.

Datenaufbereitung

Fehlwerte

Fehlwerte werden automatisch festgestellt. Bis zu vier Fehlwerte hintereinander werden interpoliert, bei mehr als vier aufeinanderfolgenden Fehlwerten bleibt der gesamte Tag unberücksichtigt.

PM10-Ausreißer

Mit Hilfe des Screeningverfahrens^{*)} und einer statistischen Auswertung wurden die Daten jeder einzelnen Station detailliert untersucht. Die PM10-Häufigkeitsverteilungen und der Einfluss extrem hoher PM10-Konzentrationswerte auf die Prognosequalität sind unterschiedlich. Aus diesem Grund wurden für jede Station getestet, ab welchem Perzentilwert (90 bis 99,9 Perzentil) eine optimale Prognosequalität erreicht werden kann. Die beste Prognosequalität wurde mit Netzen erzielt, deren Datenumfang unterhalb des 99-Perzentilwertes lag (siehe Anhang). So konnten die größten Ausreißer eliminiert werden, ohne den Datenraum weitgehend zu beeinträchtigen. In Tabelle 3 sind zum Vergleich noch einmal die 99- und 98-Perzentilwerte gegenübergestellt.

Bis zu einer Höchstzahl von acht Ausreißern oberhalb des festgelegten Perzentilwertes werden diese durch den sich aus den Restdaten ergebenden Tagesmittelwert ersetzt, bei mehr als acht aufeinanderfolgenden extrem hohen Werten erfolgt die Entfernung des gesamten Tages.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der 99- und 98-Perzentilwerte

	99-Perzentilwert	98-Perzentilwert
Borna	106	92
Chemnitz-Mitte	111	92
Chemnitz-Nord	106	89
Dresden, Postplatz	121	101
Dresden-Nord	117	97
Görlitz	125	103
Leipzig, Lützener Straße	145	124
Leipzig-Mitte	116	99
Leipzig-West	86	73
Plauen-Süd	102	86
Zittau-Ost	131	101

Die Datenaufbereitung wird in Log-Dateien dokumentiert, die dem Auftraggeber auf CD zur Verfügung gestellt werden.

^{*)} Anke, K.; Klingner, M.; Sähn, E.; Löschau, G.: Screeningverfahren und Immissionsmodelle zur Auswertung von PM10-Langzeitmessungen. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 05/2003, Springer-VDI-Verlag, S. 201-208.

2.2 Meteorologische Daten

Die für die Entwicklung des Prognosemodells notwendigen meteorologischen Größen wurden ebenfalls vom Landesamt für Umwelt und Geologie zur Verfügung gestellt.

Da an keiner der LfUG-Stationen der Niederschlag gemessen wird, wurden ergänzend Daten des Deutschen Wetterdienstes für Forschungszwecke (DWD) für die Auswertzeiträume bestellt. Nicht für jede Schadstoffmessstation des LfUG gibt es auch eine Messstation des DWD. Die folgende Tabelle 4 zeigt, welche DWD-Station der entsprechenden Station des LfUG zugeordnet wird.

Tabelle 4: Zuordnung der PM10-Prognoseorte zu den vorhandenen Messstationen des DWD

DWD Station	LfUG Station
Leipzig-Schkeuditz	Leipzig, Lützner Straße, Leipzig-Mitte, Leipzig-West, Borna
Chemnitz	Chemnitz-Mitte, Chemnitz-Nord
Dresden-Klotzsche	Dresden-Nord, Dresden, Postplatz
Plauen	Plauen
Görlitz	Görlitz, Zittau

Um eine PM10-Prognose durchführen zu können, sind Wetterprognosen für die kommenden Tage notwendig. Deren Qualität ist entscheidend für die Güte der PM10-Prognose.

Abgesehen vom Niederschlag werden die meteorologischen Größen an jeder einzelnen Messstation erfasst, im Gegensatz dazu basiert die Wetterprognose großräumig auf Daten des DWD (siehe auch Tabelle 4). Die Windgeschwindigkeit wird beim DWD in einer Höhe von 10 Metern im freien Gelände gemessen und entspricht in ihrer Intensität nicht den lokal zugrunde liegenden Werten. In Absprache mit dem Auftraggeber wurde deshalb ein Korrekturfaktor eingeführt (Tabelle 5), der durch eine Gegenüberstellung der an der jeweiligen Station gemessenen und den vom DWD erhaltenen Windgeschwindigkeiten des gleichen Zeitraumes ermittelt wurde.

Tabelle 5: Korrekturfaktoren Windgeschwindigkeit

LfUG Station	Windfaktor
Borna	2.5
Chemnitz-Mitte	4
Chemnitz-Nord	4
Dresden, Postplatz	2
Dresden-Nord	3
Görlitz	2.5
Leipzig, Lützener Straße	5
Leipzig-Mitte	2.5
Leipzig-West	4
Plauen-Süd	3
Zittau-Ost	2.5

3 Grundlagenuntersuchungen - Modellvoraussetzung

Das Prognosemodell beruht auf gemessenen Langzeitdatenreihen der PM10-Immissionskonzentration und der dazugehörigen meteorologischen Größen. Auf Basis des Informationsgehaltes dieser Datenreihen werden Neuronale Netze antrainiert und validiert.

Da jede meteorologische Größe in Art und Maß eine unterschiedliche Wirkung auf die PM10-Immissionskonzentration hat, muss im Detail ausgetestet werden, welche Größe, in welcher Auflösung und damit mit welchem Gewicht in die Prognose eingehen muss. Je detaillierter die Informationen des Trainingsdatensatzes sind, desto besser kann auch das zu entwickelnde Netz sein. Um eine möglichst robuste und breite Anwendung in der Praxis zu ermöglichen, ist es wichtig, das richtige Maß für den Detaillierungsgrad zu wählen.

Die Prognose des PM10-Tagesmittelwertes basiert also auf Langzeitmessreihen von PM10 und mehrerer meteorologischer Größen sowie der aktuellen und vorhergesagten Wetterlage. Verkehrszahlen sind für das Modell nicht notwendig. Sie werden durch die Unterscheidung zwischen Werktagen und Wochenenden berücksichtigt.

Im Folgenden werden die Bestandteile des Prognosemodells im Einzelnen erläutert.

3.1 PM10-Immissionskonzentration

Wichtigste Grundlage für das Antrainieren der Neuronalen Netze ist neben der Meteorologie die PM10-Immissionskonzentrationen der letzten Jahre. Sie beinhaltet Informationen über Einflussfaktoren, Entwicklungen und Trends.

Die historischen Daten der letzten Jahre dienen dem Antrainieren des Neuronalen Netzes. Um eine PM10-Prognose zu erstellen, ist es aber nicht ausreichend, nur Wetterprognosedaten einzubeziehen, sondern auch den PM10-Wert der Vortage.

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der PM10-Konzentration während einer sogenannten PM10-Episode. Hier wird deutlich, wie wichtig die vorangegangenen PM10-Daten sind. Aufbauend auf den Vortagswert schaukelt sich die PM10-Konzentration aufgrund der Emissionen und der herrschenden meteorologischen Bedingungen immer weiter auf.

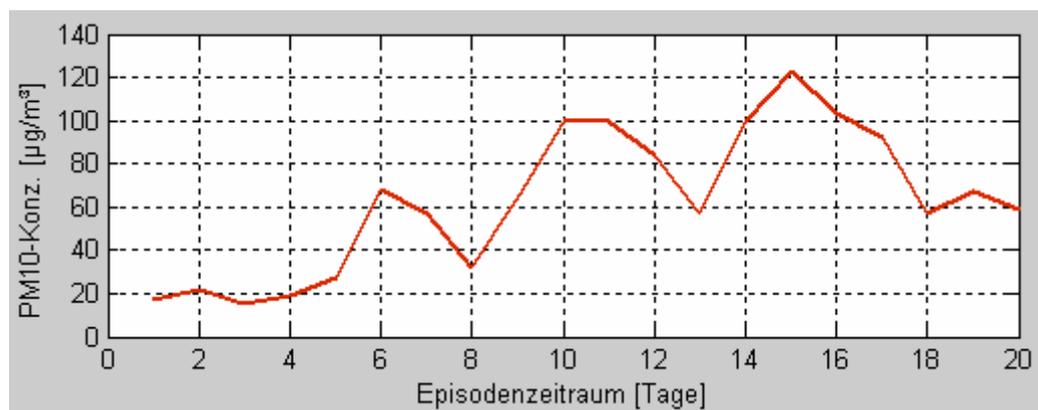


Abbildung 1: Verlauf der PM10-Konzentration während einer Episode

3.2 Meteorologie

Vorangegangene Untersuchungen am Fraunhofer IVI haben ergeben, dass die Meteorologie einen erheblichen Einfluss auf die PM10-Immissionsbelastung hat und damit eine wichtige Größe für die Entwicklung des Prognosemodells darstellen muss.

Die meteorologischen Parameter wie auch die Emittentenstruktur variieren räumlich und zeitlich teilweise erheblich. Jede meteorologische Größe besitzt eine eigene Charakteristik und wirkt sich in unterschiedlichem Maß auf die PM10-Immissionskonzentration aus. All diese Dinge müssen bei der Entwicklung des Prognosemodells berücksichtigt werden.

Folgende Größen haben sich als für die PM10-Belastung bedeutend herausgestellt:

- Temperatur
- Windgeschwindigkeit
- relative Luftfeuchte
- Niederschlag
- Globalstrahlung
- Luftdruck

Nicht alle der einflussreichen meteorologischen Größen werden an den Messstationen des LfUG erfasst. Eine der wichtigsten, der Niederschlag, wird beispielsweise an keiner der Stationen ermittelt. Die Auswahl der in die Prognose eingehenden meteorologischen Größen muss deshalb auch von der Datenverfügbarkeit abhängig gemacht werden.

Wichtig ist nicht nur das Vorhandensein historischer Daten sondern auch die der Wetterprognose. Da die Angaben zur Wettervorhersage nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen, gehen in das Prognosemodell nur folgenden meteorologischen Größen ein:

- Niederschlag
- Windgeschwindigkeit
- Temperatur.

Aufgrund der geringen Anzahl an Eingangsgrößen kann es zu einer eingeschränkten Prognosequalität im Vergleich zu einem komplexen Netz kommen.

Im Folgenden soll der Einfluss dieser drei meteorologischen Parameter kurz erläutert werden.

Der **Niederschlag** ist eine der wichtigsten Einflussgrößen auf die PM10-Immissionskonzentration. Er kann PM10 in der Luft binden und teilweise abtransportieren.

Folgende Abbildung 2 zeigt am Beispiel Leipzig, Lützner Straße 2003 bis 2005, welchen gravierenden Einfluss der Niederschlag auf die PM10-Konzentration haben kann. Je länger es nicht regnet, desto höher ist die mittlere PM10-Konzentration der Luft. Sie kann im Mittel im ungünstigsten Fall auf über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ansteigen.

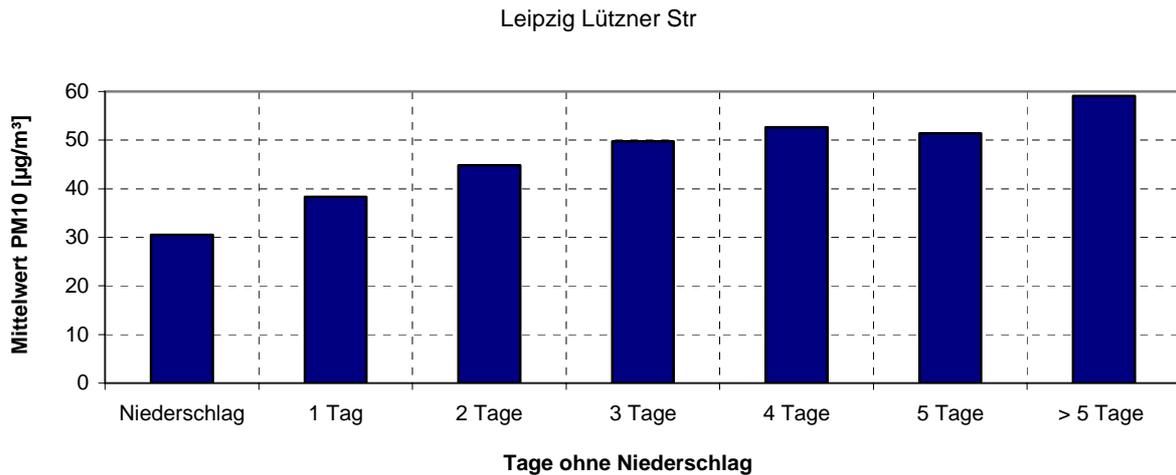


Abbildung 2: PM10-Konzentration in Abhängigkeit von der Anzahl der Tage ohne Niederschlag

Die Temperatur spielt als meteorologische Größe eine wichtige Rolle. Sie beeinflusst die Entstehung von Hoch- und Tiefdruckgebieten und damit die Windgeschwindigkeiten, thermischen Luftbewegungen und Transportprozesse. Die folgende Abbildung zeigt die mittlere PM10-Konzentration der Jahre 2003 bis 2005 in Abhängigkeit von der Temperatur. Bei hohen, aber auch bei niedrigen Temperaturen, werden die höchsten Werte gemessen.

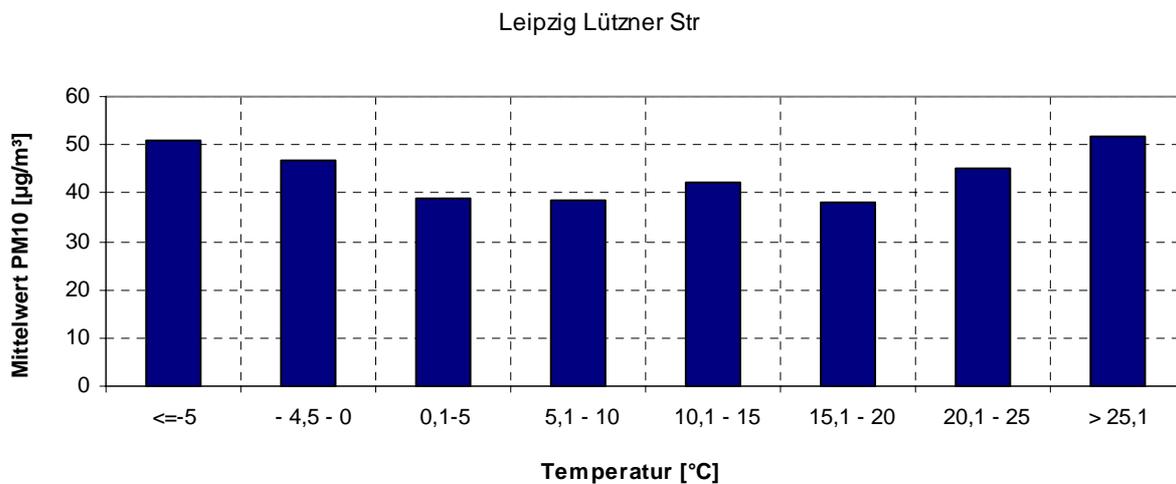


Abbildung 3: Abhängigkeit der PM10-Konzentration von der Temperatur

Die Windgeschwindigkeit, als Ergebnis von Luftdruckunterschieden, kann die Verteilung bzw. den Abtransport den Luftschadstoffen beeinflussen. Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die PM10-Konzentration. Mit fallender Windgeschwindigkeit erhöht sie sich von ca. 10 µg/m³ auf fast 50 µg/m³.

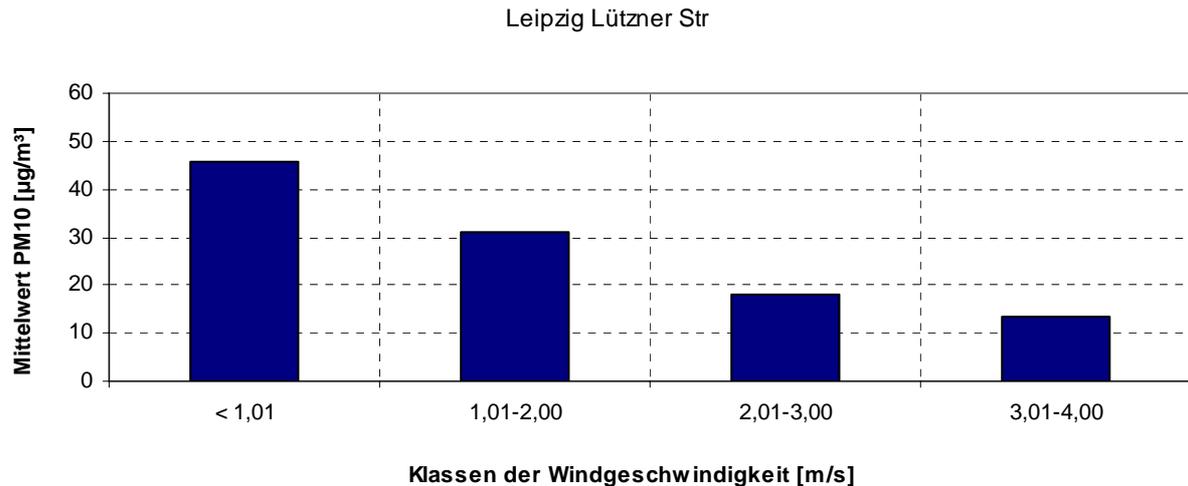


Abbildung 4: Abhängigkeit der PM10-Konzentration von der Höhe der Windgeschwindigkeit

Auch andere meteorologische Größen prägen die Höhe der PM10-Konzentration und können erheblich zur Verbesserung der Prognosequalität beitragen. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit der meteorologischen Größen vor allem bei der Wetterprognose musste das Modell bzw. die angelernten Netze vereinfacht werden.

Die Untersuchungsergebnisse zur Wirkung meteorologischer Größen und anderer Einflussfaktoren auf die PM10-Immissionen sind im Detail in

- Anke, K.; Sähn, E.; Klingner, M.: Pilotprojekt zur Auswertung von Immissionsdatensätzen auf Basis von Screeningfunktionen. Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Dresden, September 2002.
- Anke, K.; Klingner, M.; Sähn, E.: Statistische Quellgruppenanalyse für die PM10-Belastung in sächsischen Ballungsräumen. Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Dresden, Mai 2004.
- Anke, K.; Illgen, A.; Sähn, E.; Klingner, M.: Auswertung von Immissionsdatensätzen aus automatischen Messstationen in Baden-Württemberg auf Basis von Screeningfunktionen. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, November 2003.
- Anke, K.; John, D.; Klingner, M.; Sähn, E.: Quellgruppenanalyse für Schwebstaub und Stickoxide in Ballungsräumen Baden-Württembergs. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Dresden, Mai 2005.

zu finden.

3.3 Verkehr

Zu einem der PM10-Emittenten im städtischen Bereich gehört der Straßenverkehr. Verkehrszählungen in Verbindung mit der Messung von Luftschadstoffen sind i.d.R. nur sehr selten vorhanden. Um das Prognosemodell in der Praxis breit und unkompliziert anwenden zu können, musste ein einfacher Weg zur Berücksichtigung des Verkehrs ohne Daten der Verkehrszählung gefunden werden.

An der Messstation Leipzig, Lützner Straße werden Verkehrszahlen erfasst und die Messung von Luftschadstoffen vorgenommen. Die folgende Abbildung zeigt den mit Hilfe der Singulärwertzerlegung ermittelten Wochengang der Verkehrszählung und der PM10-Konzentration für das Jahr 2003. Das linke Diagramm beschreibt eine mit dem mittleren Wochengang vergleichbare Ganglinie und das rechte Diagramm die dazugehörigen Scores, d.h. die Gewichte des Wochenganges im betrachteten Jahr.

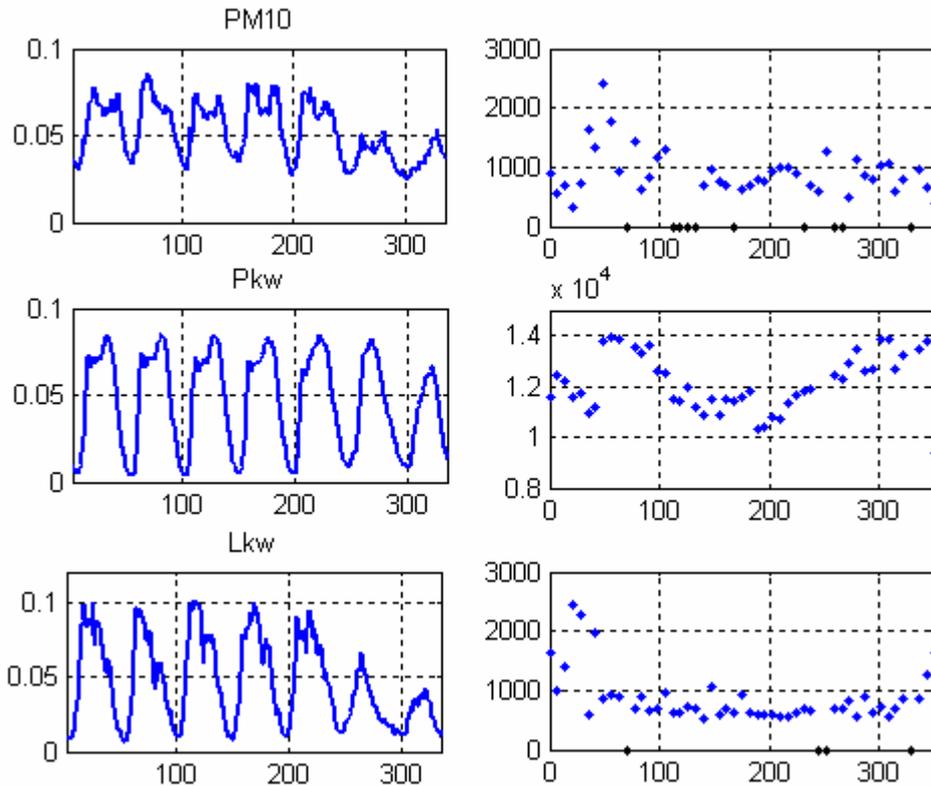


Abbildung 5: Mittlerer PM10-Wochengang (oben) und mittlerer Pkw-Wochengang (Mitte), mittlerer Lkw-Wochengang (unten), Leipzig, Lützner Straße 2003

Während der PM10-Verlauf einem deutlichen Wochengang unterliegt, sind die lokalen Schwankungen im Verkehrsaufkommen unmittelbar an der Lützner Straße weit weniger ausgeprägt. Vor allem der PM10-Jahresgang lässt sich nicht allein auf Variationen im Verkehrsaufkommen zurückführen. Bereits im Rahmen vergangener Untersuchungen^{*)} konnte belegt werden, dass Standortbedingungen und meteorologische Einflüsse die PM10-Konzentration weit mehr dominieren als Verkehrsmenge und -zusammensetzung.

Somit erschien es sinnvoll, im Modell eine Trennung nach Werktagen, Samstagen und Sonntagen vorzunehmen, was der großräumigen Immissionsituation entspricht und zugleich der Tatsache Rechnung trägt, dass Verkehrsdaten im Allgemeinen nicht zur Verfügung stehen.

^{*)} Anke, K.; John, D.; Klingner, M.; Sähn, E.: Quellgruppenanalyse für Schwebstaub und Stickoxide in Ballungsräumen Baden-Württembergs. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Dresden, Mai 2005.

3.4 Einflussfaktoren auf die Prognosequalität

Die Prognosequalität ist entscheidend für die Bewertung des Modells und wird vor allem von folgenden Faktoren bestimmt:

- Aufbau des Neuronalen Netzes
- Vorhandensein historischer PM10-Daten und meteorologischer Parameter
- Verfügbarkeit guter Prognosedaten der Meteorologie.

Besonders beeinträchtigt werden kann die Prognosequalität durch

- ein zu einfaches / zu komplexes Netz
- eine zu geringe Datenqualität,
- eine zu geringe Datenmenge,
- eine schlechte Wetterprognose oder
- außergewöhnliche Ereignisse, wie langanhaltenden Baustellen usw.

Komplexität des Neuronalen Netzes:

Die Komplexität der zur Prognose verwendeten Neuronalen Netze ist eine diffizile Problemstellung. Wird ein Neuronales Netz mit einer großen, hochaufgelösten Datenmenge und einer Vielzahl von Einflussfaktoren trainiert, ist es möglich, so gut wie jeden Wert dieses Trainingsdatensatzes mit hoher Genauigkeit zu prognostizieren. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass die Prognose der dem Netz unbekannt Daten zu größeren Abweichungen vom realen Wert führen kann. Das bedeutet also nicht unbedingt, dass eine Prognose umso besser wird, je komplexer das Netz ist. Es ist deshalb wichtig, das richtige Maß dafür zu finden, wie komplex ein Netz sein muss bzw. sein kann, um eine gute Prognose zu erstellen.

Die zum Training herangezogenen meteorologischen Größen sind entscheidend für die Prognosequalität. So besitzt jede einen anderen Wirkmechanismus und ein Gewicht. Die Ermittlung der optimalen Eingangsgrößen ist sehr komplex und mit der Erprobung einer Vielzahl von Variationsmöglichkeiten verbunden. Ziel sollten breit anwendbare Neuronale Netze mit guter Prognosequalität sein.

Da dem LfUG die zur PM10-Prognose notwendigen Wettervorhersagedaten nur sehr eingeschränkt zu Verfügung stehen, mussten die Neuronalen Netze sehr vereinfacht werden. Damit verbunden sein kann auch eine Verschlechterung der Prognosequalität.

Datenqualität:

Anhand von Häufigkeitsverteilungen wurde bewertet, in welchen Bereichen bzw. Spektren PM10-Konzentrationen an der jeweiligen Station gemessen werden. Von großer Bedeutung sind dabei die außergewöhnlich hohen PM10-Konzentrationen und deren Häufigkeit (siehe Tabelle 2). Sie können entscheidend für die Prognosegüte sein. Folgendes Beispiel soll dies demonstrieren.

Die PM10-Konzentrationen am Schwartenberg für das Jahr 2004 wurden mit Hilfe der Singulärwertzerlegung zeitlich zerlegt. Das linke Diagramm der Abbildung 6 zeigt den mittleren Tagesgang und das rechte Diagramm das Gewicht des Tagesganges in Jahr. Für die Zerlegung wurden die auf Plausibilität überprüften Originaldaten des LfUG verwendet. Es ist kein üblicher Tagesgang mit Anstieg der PM10-Konzentration in den Morgenstunden auf ihr Maximum und einem Absinken am Abend zu erkennen. Die Ursache dafür sind die einzelnen extrem hohen PM10-Konzentrationen im ersten Drittel des Jahres (rosa). Sie haben einen bedeutenden Einfluss.

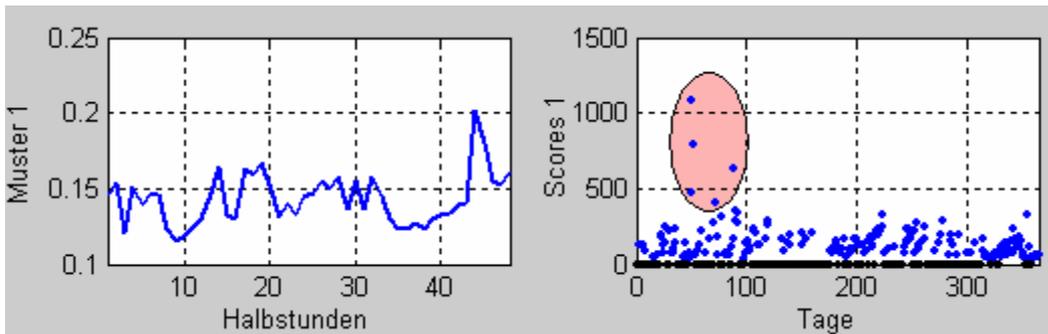


Abbildung 6: PM10-Tagesgang mit Ausreißern

Dies bestätigt auch Abbildung 7. Hier wurden dieselben Daten ohne die extrem hohen PM10-Konzentrationen zerlegt. Es ergibt sich ein ganz anderes Bild. Die PM10-Konzentration verläuft in ihrem üblichen Tagesgang.

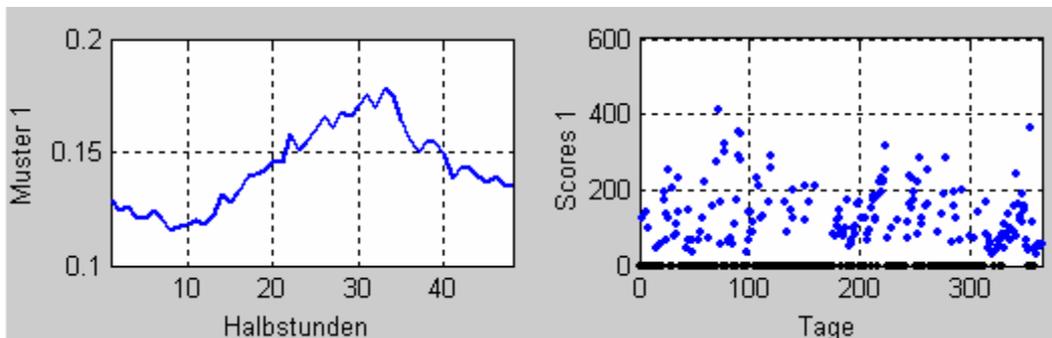


Abbildung 7: PM10-Tagesgang ohne Ausreißer

Der große Einfluss dieser hohen Werte wirkt sich aber nicht nur bei der Singulärwertzerlegung aus, sondern bestimmt auch die Prognosequalität.

Die Abbildung 8 zeigt den realen PM10-Verlauf (blau) und den prognostizierten PM10-Tagesmittelwert (grün) für das Jahr 2005 der Station Dresden-Nord. Die zum Training und zum Validieren verwendeten Daten enthalten alle gemessenen PM10-Werte. Die außergewöhnlichen hohen PM10-Konzentrationen wurden nicht entfernt bzw. ersetzt.

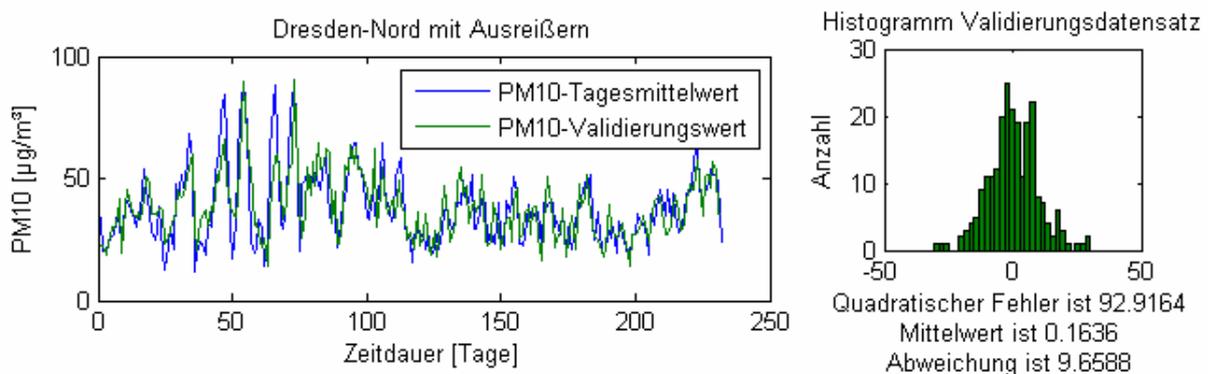


Abbildung 8: Realer (blau) und prognostizierter (grün) Verlauf der PM10-Tagesmittelwert für Dresden-Nord 2005, Originaldaten des LfUG

Die Abbildung 9 entspricht der vorhergehenden, allerdings beruhen das Training und das Validieren auf Datenreihen, bei denen die Ausreißer oberhalb des 99-Perzentilwertes entsprechend der im Kapitel 2.1. beschriebenen Vorgehensweise behandelt wurden.

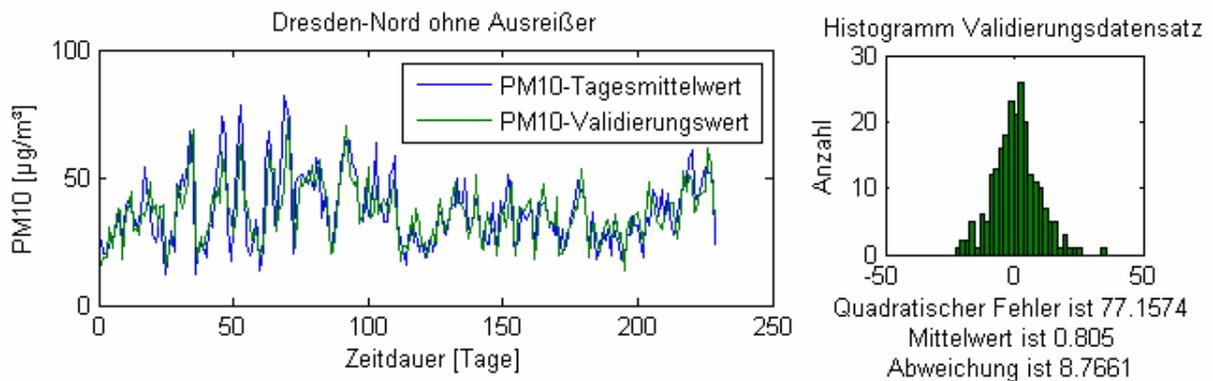


Abbildung 9: Realer (blau) und prognostizierter (grün) Verlauf der PM10-Tagesmittelwert für Dresden-Nord 2005, ohne die extrem hohen PM10-Werte

Zur Gütebestimmung des Neuronalen Netzes werden statistischen Größen wie

- Quadratischer Fehler
- Mittelwert und
- Abweichung

herangezogen und im Histogramm grafisch dargestellt. Ziel beim Trainieren der Netze ist es, einen möglichst kleinen quadratischen Fehler zu erreichen. Die Konzentration des Mittelwertes um 0 sowie eine geringe Streuung der Abweichung stehen für eine gute PM10-Vorhersage. Eine detaillierte Darstellung der Güteparameter findet man in Abbildung 10.

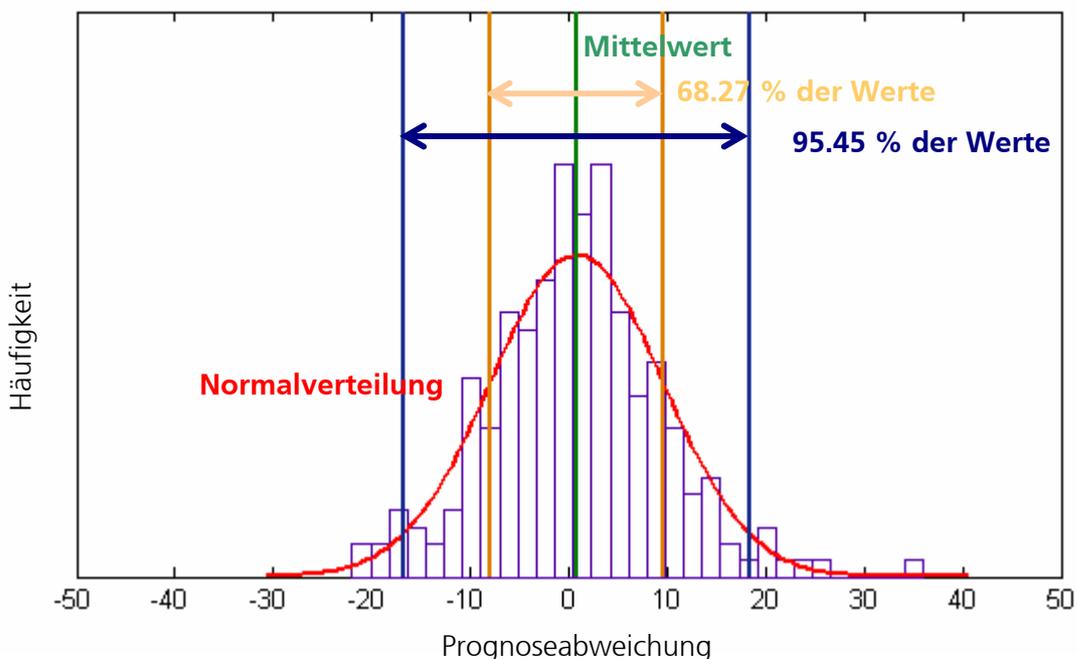


Abbildung 10: Güteparameter des Neuronalen Netzes

Vergleicht man nun beide Prognosen, so wird deutlich, dass die Qualität ohne die extremen Werte besser wird.

Wetterprognosequalität:

Ein entscheidender Faktor für die Prognosequalität der PM10-Konzentration ist die Güte der Wetterprognose, die umso schlechter wird, je mehr Tage im voraus vorhergesagt werden.

Der Niederschlag gilt als die entscheidende Größe für die PM10-Prognose. Etwaige Fehler können die PM10-Prognose erheblich verschlechtern.

Außergewöhnliche Ereignisse:

Wichtig für das Trainieren der Netze ist ein konsistenter Datensatz. Singuläre Ereignisse können die Prognoseergebnisse erheblich verschlechtern.

Anhand eines Beispiels soll gezeigt werden, was ein solches Ereignis bewirken kann. Die folgende Abbildung 11 zeigt die originalen und die prognostizierten PM10-Konzentrationen vom 4.12.2000 bis zum 31.12.2001 für die Station Leipzig, Lützner Straße.

Im ersten Teil des Betrachtungszeitraumes kommt es zu einer deutlichen Überprognose für den PM10-Tagesmittelwert (rosa markierter Bereich). Der Gründe dafür waren eine Baustelle Ende 2000 bis Anfang 2001 (hellrosa) und die Weihnachtsfeiertage im Jahr 2000 (dunkelrosa). Beide Ereignisse hatten ein verringertes Verkehrsaufkommen zur Folge. Das Training des Netzes beruhte auf Datensätzen ohne besondere Vorkommnisse wie z. B. Baustellen mit verändertem Verkehrsaufkommen und prognostizierte aus diesem Grund höhere PM10-Werte.

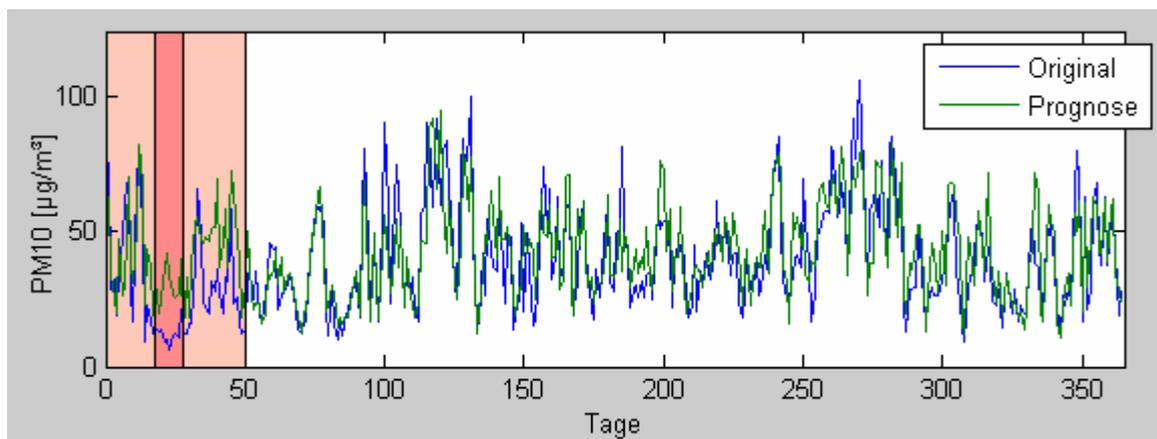


Abbildung 11: Gemessene und prognostizierte PM10-Konzentration an der Lützner Straße in Leipzig

Kommt es zu Veränderungen hinsichtlich der Verkehrsströme, der Verkehrsbelastung oder der Verkehrszusammensetzung, kann mit Hilfe von Adaptionungsverfahren das Modell kurzfristig der neuen Situation angepasst werden. Sind diese Veränderungen hinsichtlich der Emittenten nur temporär, muss je nach Umfang (z.B. Baustelle) entschieden werden, ob eine Adaption sinnvoll erscheint. Nach Eintreten der normalen Emittentenverhältnisse ist es notwendig, eine erneute Adaption vorzunehmen. Das Adaptionungsverfahren ist nicht Inhalt des derzeitigen Prognosemodells, kann aber auf Wunsch ergänzt werden.

Zur Steigerung der Prognosequalität ist es notwendig, die Datenbank zu pflegen und die Neuronalen Netze in bestimmten Abständen mit den ständig gemessenen Daten und den somit immer umfangreicher werdenden Daten erneut zu trainieren. Damit ist gewährleistet, dass neuere Entwicklungen in das Prognosemodell einfließen können und durch die größeren

Datenmengen die Prognosequalität ständig verbessert werden kann. Das neue Trainieren der Netze kann in halbjährlichen Abständen auf Wunsch durch das Fraunhofer IVI vorgenommen werden.

4 Prognoseprogramm

4.1 Programmstruktur

Das Gesamtkonzept des Prognoseprogramms ist in Abbildung 12 dargestellt und wird im Folgenden im Detail erläutert.

Das Prognosetool mit den trainierten Neuronalen Netzen basiert auf einer Datenbank (siehe Kapitel 4.2). Sie besteht aus drei Teilbereichen:

- Historie – Datenbank
- Aktualisierung der Datenbank
- Prognosewerte.

Die Historie – Datenbank beinhaltet alle PM10-Daten und meteorologischen Messgrößen der vergangenen Jahre. Dieser Datenbankteil dient dem Training der Neuronalen Netze. Die historische Datenbank muss fortwährend mit gemessenen Werten der Meteorologie und PM10 durch LfUG aktualisiert werden. Dies ist notwendig, da die Prognose auch Werte des vorangegangenen Tages in den Algorithmus einbezieht.

Im dritten Teilbereich der Datenbank werden alle Prognosewerte für PM10 und für die Meteorologie dokumentiert.

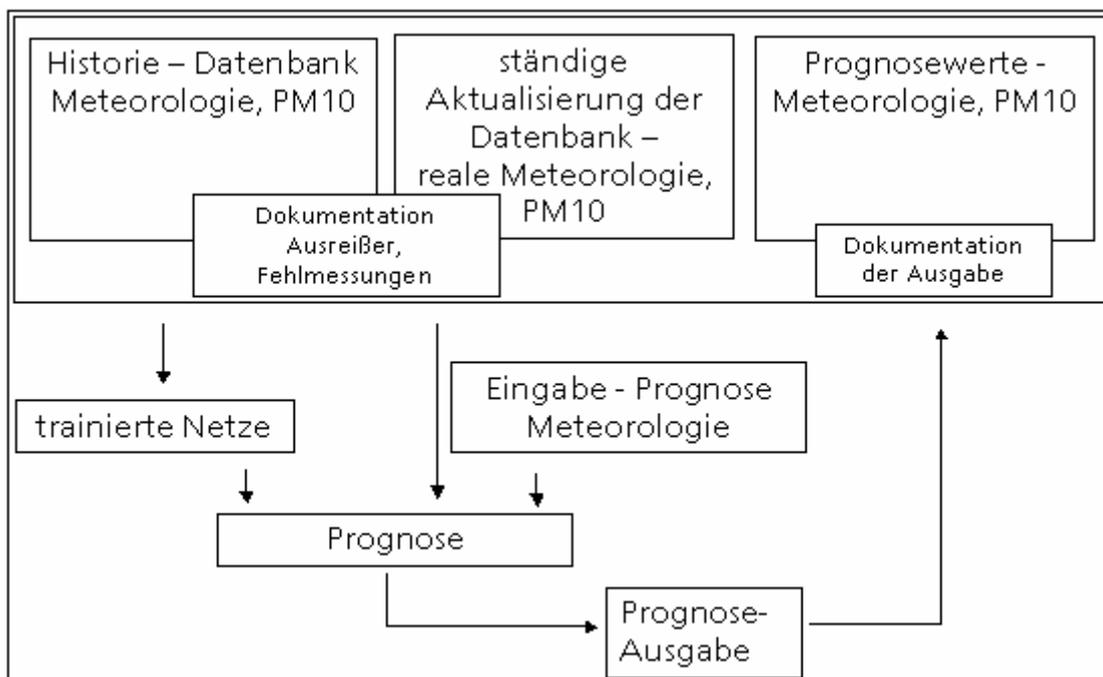


Abbildung 12: Gesamtkonzept des Prognoseprogramms

Das Training der Neuronalen Netze erfolgt auf Basis der historischen Daten aus der Datenbank.

Die Prognose der PM10-Konzentration der folgenden Tage setzt sich zusammen aus

- trainierten Neuronalen Netzen,
- Daten des Vortages und
- prognostizierten meteorologischen Größen.

Die prognostizierten PM10-Werte und meteorologischen Größen für die folgenden Tage werden in Diagrammen ausgegeben. Die Ausgabegrafik wird Handbuch zum Prognosemodell im Detail erläutert.

4.2 Datenbankaufbau und -aktualisierung

Die zur Entwicklung des PM10-Prognosemodells notwendigen Daten wurden in einer Datenbank zusammengestellt. Die Abbildung 13 zeigt den prinzipiellen Ausbau der Datenbank.

Die Datenbank ist eine MS-Access relationale Datenbank. Sie beinhaltet die Tabellen:

- „Daten“,
- „DWD_N_MEZ“
- „Ortstabelle“
- „Daten_Prognose“ und
- „Feiertage“.

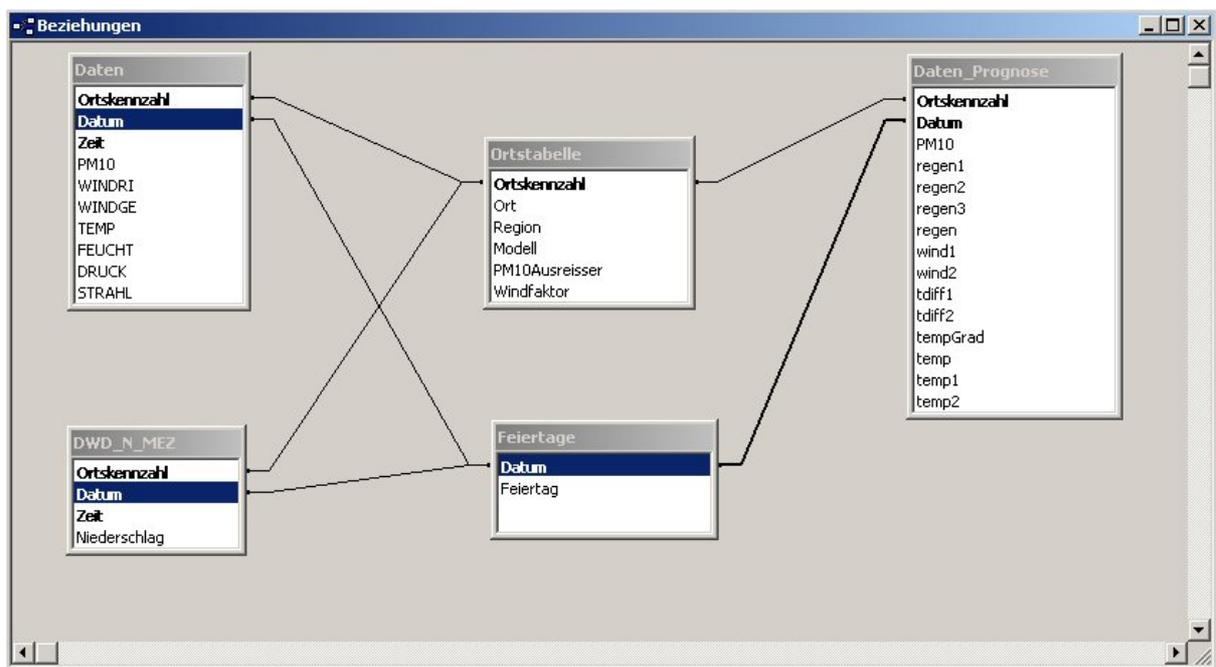


Abbildung 13: Datenbankstruktur

In der Tabelle „Daten“ sind die durch das LfUG gelieferten Datensätze integriert. Als Primärschlüssel sind die Felder „Ortskennzahl“, „Datum“ und „Zeit“ (fette Darstellung) definiert. Das Feld „Ortskennzahl“ kennzeichnet eine Messstation. Die genauere Messdurchführung wird in den Feldern „Datum“ und „Zeit“ gespeichert, wobei pro Tag jede halbe Stunde ein Messwert gespeichert wird, d.h. insgesamt 48 Werte. Die restlichen Felder der Tabelle sind selbsterklärend benannt und beinhalten die zur Durchführung der Prognose notwendigen Daten.

Die bei dem DWD bestellten Niederschlagsdaten sind in der Tabelle „DWD_N_MEZ“ eingefügt. Die gelieferten einstündigen Messwerte wurden vor dem Einfügen in der Datenbank in 48 halbstündige Werte pro Tag aufgeteilt. Da die Dokumentation der Messungen durch den DWD in UTC Zeiten erfolgt, sind die Originaldaten um eine Stunde verschoben, so dass eine einheitliche Zeitauflösung in MEZ gewährleistet ist.

Die Tabelle „Ortstabelle“ dient zur Ergänzung der Tabellen „Daten“, „DWD_N_MEZ“ und „Daten_Prognose“ und enthält folgende Zusatzinformationen zu jeder Messstation:

- Regionszugehörigkeit – es sind 5 Regionen (Ortskennzahl 1 bis 5) definiert (siehe Tabelle 4)
- Verweis auf dem relevanten PM10-Prognosemodell
- PM10-Ausreißer für den Trainingsdatensatz
- Windfaktor zur Anpassung der DWD-Prognosewerte.

In der Tabelle „Daten_Prognose“ werden die für die Erstellung einer Prognose eingegebenen Daten und die prognostizierten PM10-Werte gespeichert. Die Tabelle ist ähnlich der Tabelle „Daten“ aufgebaut. Als Primärschlüssel sind die Felder „Ortskennzahl“ und „Datum“ definiert. Auf das Feld „Zeit“ wurde verzichtet, da pro Tag nur ein Prognosewert eingetragen wird. Das Feld „PM10“ ist für den berechneten Prognosewert vorgesehen. Die Felder „regen1“, „regen2“, „regen3“, „wind1“, „wind2“, „temp1“ und „temp2“ werden mit Daten gefüllt, die durch den Benutzer zur Berechnung einer Prognose eingegeben werden sollen. Dies entspricht den Eingaben der Niederschlagsmenge in [mm] mittags, abends und morgens, der Windgeschwindigkeit in [km/h] mittags und morgens und der Temperatur Maximum bzw. Minimum in [Grad °C]. Die Werte für alle anderen Felder werden automatisch während der Prognoseberechnung berechnet. Die Tabelle „Feiertage“ dient zur Bestimmung der gesetzlichen Feiertage, die im Prognosemodell und in der Prognose Berücksichtigung finden.

Die Datenbank, d.h. die Tabellen „Daten“ und „DWD_N_MEZ“ müssen täglich mit real gemessenen Werten der Meteorologie und PM10 aktualisiert werden, da das Prognosemodell auch Werte des Vortags in die Prognose einbezieht. Das Einlesen in die Datenbank erfolgt über eine entsprechende Excel – Datei.

Die Tabelle „Daten_Prognose“ wird automatisch bei der Prognoseberechnung mit den eingegebenen Werten aktualisiert. Die Tabelle „Ortstabelle“ soll nur bei dem Hinzufügen bzw. Entfernen einer Station, bei der Änderung der Regionszugehörigkeit oder bei der Aktualisierung des Prognosemodells geändert werden.

4.3 Entwicklung der Neuronalen Netze und des Prognosetools

4.3.1 Neuronale Netze

Ziel bei der Entwicklung des Prognosemodells ist es, die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Meteorologie und PM10 in eine allgemeingültige, die PM10-Konzentration bestmöglich beschreibende Struktur zu fassen. Dies geschah auf der Basis bisher am IVI gewonnener Kenntnisse zu Quellgruppen und Einflussfaktoren. Eingangsgrößen für das Netz sind PM10-Daten und meteorologischen Größen. Zusätzlich findet eine Trennung zwischen Werktagen, Samstagen bzw. Sonn- und Feiertagen statt.

Wie im Kapitel 3.4 schon erwähnt wurde, ist die Datenqualität für die Prognosegüte von großer Bedeutung. Aus diesem Grund erfolgt für die Trainings- und Validierungsdaten eine Ausreißer- und Fehlwertbehandlung. Alle Vorgänge werden in einer Log-Datei festgehalten und dem Auftraggeber übergeben (siehe Anhang).

Singuläre Ereignisse wie Baustellen usw. haben ebenfalls Einfluss auf die PM10-Prognosequalität. Aus diesem Grund sind Informationen diesbezüglich sehr wichtig.

Für das Jahr 2005 erfolgte eine Dokumentation von besonderen Ereignissen in der Umgebung der Stationen, wobei es keine kontinuierliche Überwachung gab, sondern nur sporadisch oder die am LfUG aufgrund von Hinweisen gesammelt wurden.

In Borna wurden unmittelbar an der Messstelle bereits im Dezember 2004 diverse Baucontainer aufgestellt. Vor März 2005 war die zu dem Bauhofsgelände führende Straße gesperrt. Baubeginn war am 13.01.2005, Bauende am 30.06.2005.

Die Messergebnisse an der Station Leipzig, Lützner Straße wurden ab April 2005 von unmittelbar am Container stattfindenden Straßenbaumaßnahmen stark beeinflusst. Im Nahbereich des Messcontainers erfolgte die schichtweise Einbringung und Verdichtung von Schüttgütern. Emissionen können durch die Schüttgüter selbst entstehen, aber auch durch die erforderlichen Baumaschinen. Die Bauarbeiten dauerten wahrscheinlich bis zum 20. Mai 2005 an. Vom 11.07.05 bis 23.12.2005 erfolgten wieder Bauarbeiten auf der Lützner Straße. Die Folge war eine halbseitige Straßensperrung in stadtauswärtiger Richtung. Der stadteinwärts fließende Verkehr wurde über die linke Fahrbahnseite geführt.

Ab dem 26.4.2005 wurden in der Umgebung der Station Leipzig-Mitte am Willi-Brandt-Platz (Bahnhofsvorplatz) umfangreiche Bauarbeiten durchgeführt. An der Station Leipzig-Mitte existierten zwischenzeitlich mehrere Baustellen. Eine Vollsperrung der Ringfahrbahn in Richtung Westen wegen Gleisbauarbeiten vor dem Bahnhof erfolgte vom 21.08.05 bis 28.08.05. An der Station Dresden, Postplatz wurde ein Bauvorhaben vom 30.05.2005 bis 25.11.2005 durchgeführt.

An der Station Chemnitz-Nord kam es zu Fahrbahneinschränkungen auf je einen Richtungsfahrestreifen durch Gleisbauarbeiten auf der Straße der Nationen zwischen Brückenstraße und Georgstraße vom 29.08.2005 bis 05.11.2005.

In Plauen-Süd trat seit 12.09.2005 ein erhöhtes Verkehrsaufkommen aufgrund der Freigabe der B 173 stadteinwärts (nach Vollsperrung wegen Straßenbaumaßnahmen) in Richtung Oelsnitzer Straße (B 92) auf.

Im November 2005 kam es zum Abbruch eines großen Altbaugebäudes ca. 200 m westlich vom Stationsstandort Zittau verbunden mit erheblichen Staubaufkommen.

Dies sind einige Beispiele außergewöhnlicher Ereignisse für nur ein Jahr. Es ist davon auszugehen, dass es auch während der anderen Jahre zu Baumaßnahmen an vielen der Stationen kam. Leider gibt es für diese Zeiträume keine Dokumentation.

4.3.2 Prognosetool

Zur Anwendung der Prognose wird dem LfUG ein PC-Programm installiert. Es beinhaltet

- eine anwenderfreundliche Benutzeroberfläche,
- die Ausgabegrafik,
- die trainierten Neuronalen Netze für jede Station und
- den Datenbankzugriff auf die Datenbank.

Über die Benutzeroberfläche werden durch das LfUG für jeden Tag ausgewählte meteorologische Prognosedaten eingegeben und durch Anwendung des trainierten Neuronalen Netzes die Vorhersage als Wert und in einer Grafik ausgegeben. Für nähere Informationen siehe Programm-Handbuch.

Für die kontinuierliche Aktualisierung der historischen Datenbank durch das LfUG mit den gemessenen PM10-Daten und meteorologischen Größen ist zusätzlich ein Programmtool implementiert, das über eine Excel-Tabelle mit festgelegtem Format die Daten in die Datenbank einliest.

5 Entwicklungs- und Verbesserungsmöglichkeiten

5.1 Prognosequalität

Das entwickelte Prognoseprogramm ist eine erste Testversion.

Drei Möglichkeiten zur Verbesserung der Prognosequalität sind

- die Integration von Adaptionenverfahren,
- die Pflege und Aktualisierung der Neuronalen Netze und
- die Verbesserung der Wettervorhersage.

Zur Verbesserung der Prognosequalität bei temporären Veränderungen, z. B. des Emittenteneinflusses während einer Baustelle, ist es sinnvoll, ein Adaptionenverfahren zu integrieren. Die ermöglicht es kurzzeitige Veränderungen bei der Prognose zu berücksichtigen, um so Fehlprognosen zu vermeiden.

Eine größere Datenmenge beinhaltet auch mehr Informationen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, in Abständen von einem halben Jahr die Neuronalen Netze mit den neuen Daten zu trainieren.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Prognosequalität bietet die Verbesserung der Wettervorhersagedaten von Seiten des LfUG. Damit können komplexere Neuronale Netze entwickelt, eingesetzt und so die Prognose optimiert werden.

5.2 PM10-Minderung - Maßnahmeabschätzung

Eine sinnvolle Erweiterung des Prognosemodells bietet eine Zusatzkomponente zur Wirkabschätzung von Minderungsmaßnahmen im Bereich Verkehr. Es ermöglicht, quantitative Abschätzungen der PM10-Immissionen für beliebige Zeiträume und verschiedene meteorologische Situationen vorzunehmen, falls großräumig der Verkehr

- am Folgetag auf „Samstagsverkehr“, d.h. im Wesentlichen ein stark verminderter Lkw-Verkehr,
- am Folgetag auf „Sonn- und Feiertagsverkehr“, d.h. zusätzliche Reduktion des Pkw-Verkehrs,
- über mehrere Tage auf „Samstagsverkehr“ und
- über mehrere Tage auf „Sonn- und Feiertagsverkehr“

beschränkt würde.

Abbildung 14 zeigt eine solche Prognose. Während die obere Grafik die PM10-Reduktion einer jeweils eintägigen Verkehrsbeschränkung auf „Samstagsniveau“ (grün) und „Sonntagsniveau“ (rot) im Vergleich zu den gemessenen PM10-Immissionen darstellt, demonstriert die untere Abbildung, dass durch mehrtägige verkehrsbeschränkende Maßnahmen ein höheres Reduktionspotential erschlossen wird.

Vor allem in Schwellensituationen würde das Tool eine Entscheidungshilfe für eine Abschätzung geben, ob bei zu erwartenden PM10-Grenzwertüberschreitungen verkehrsbeschränkende Maßnahmen gerechtfertigt und vertretbar sind und zu welchem Zeitpunkt sie eingeleitet werden sollten.

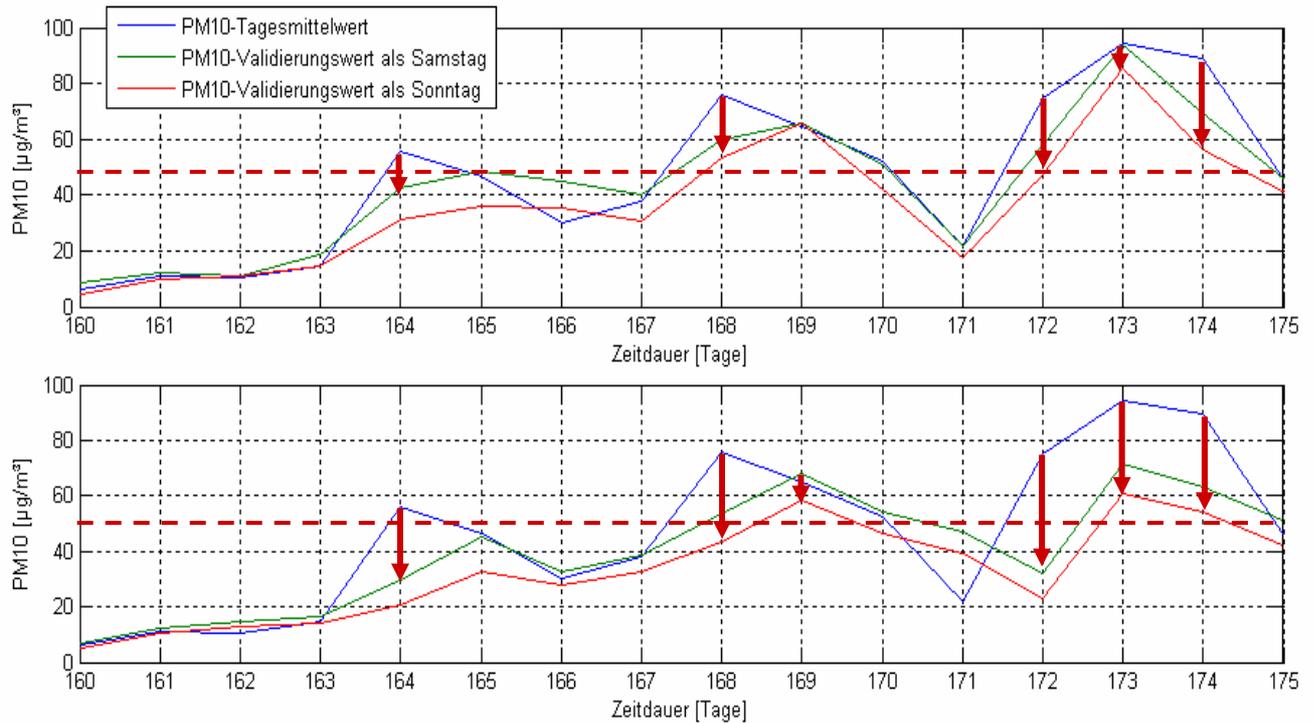


Abbildung 14: Modellgestützte Wirkabschätzung, Eintagessperrung (obere Grafik), und Mehrtagessperrung (untere Grafik) im Vergleich

6 Zusammenfassung

Die Wechselwirkungen zwischen Emission – Transmission – Immission – Deposition, meteorologischen Einflussfaktoren und chemischen Prozessen ist ein komplexer Vorgang, der ständigen Variationen unterliegt. Erst die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von PM10-Messreihen machte es möglich, ihn so nachzubilden, dass eine verlässliche PM10-Prognose entstehen konnte.

Das Modell basiert auf gemessenen Langzeitimmissionsdaten und nutzt geeignet strukturierte Neuronale Netze zur Vorhersage der Schadstoffkonzentrationen. Von besonderer Bedeutung dabei ist, dass neben der aktuellen und der vorhergesagten Wetterlage auch die Daten der vergangenen Tage bestimmter meteorologischer Faktoren einfließen. Angaben über Verkehrszahlen sind nicht erforderlich. Unterschieden wird nach Werktagen, Samstagen sowie Sonn- und Feiertagen. Voraussetzung für das Modell sind PM10-Datenreihen über mindestens zwei Jahre, dabei wird ein Jahressatz für das Training, der andere zum Validieren benötigt.

Voraussetzung für eine gute Prognosequalität sind folgende Faktoren:

- hochaufgelöste, vollständige und homogene Immissions- und Wetterdatenreihen
- gute Wetterprognose.

Kommt es zu Veränderungen hinsichtlich der Verkehrsströme, der Verkehrsbelastung oder der Verkehrszusammensetzung, kann – bei entsprechender Erweiterung - mit Hilfe von Adaptionungsverfahren das Modell der neuen Situation angepasst werden. Je nach Umfang der Abweichung vom Ausgangsnetz dauert dieser Prozess eine Woche bis einen Monat.

Anhang

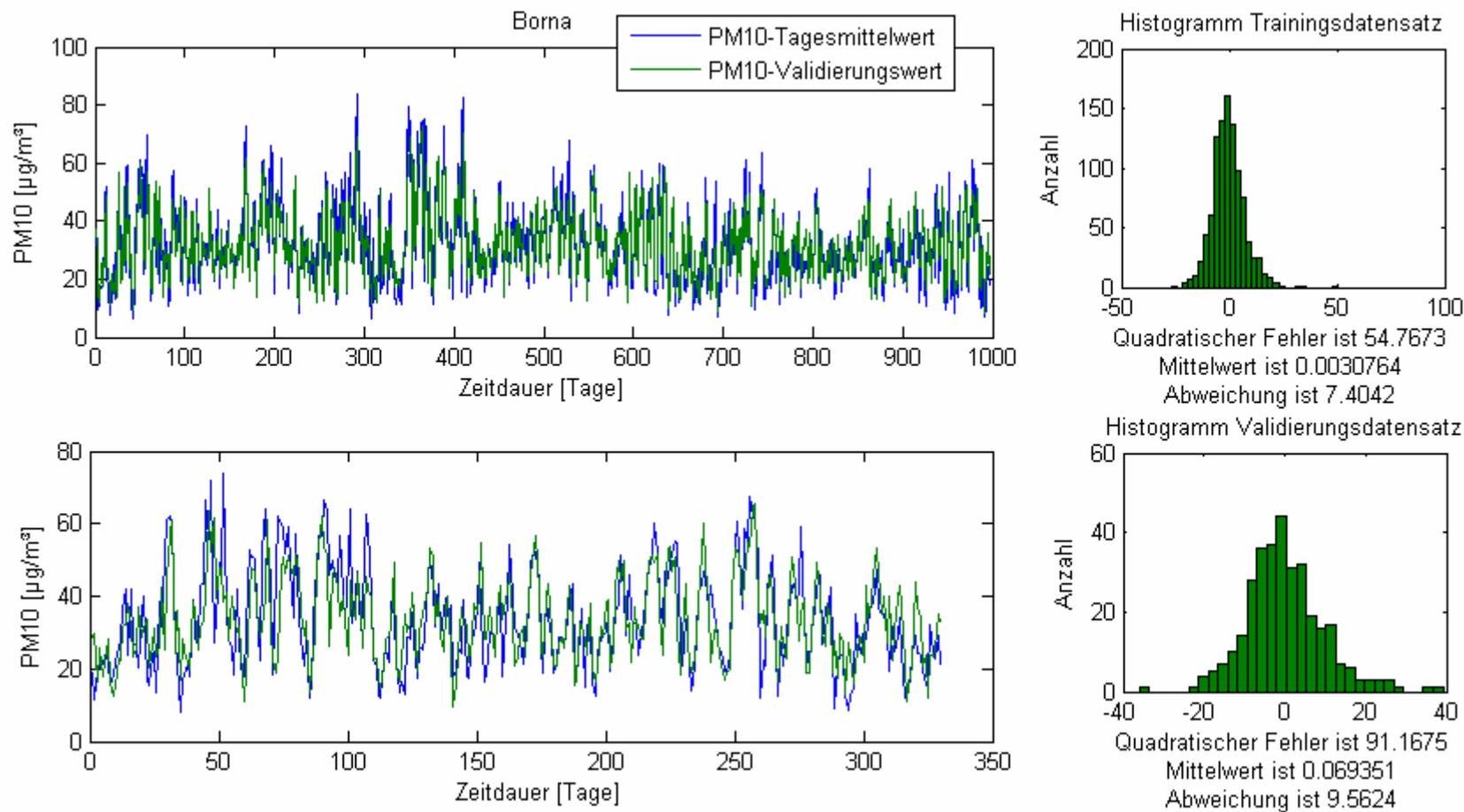


Abbildung A 1: Netz Borna

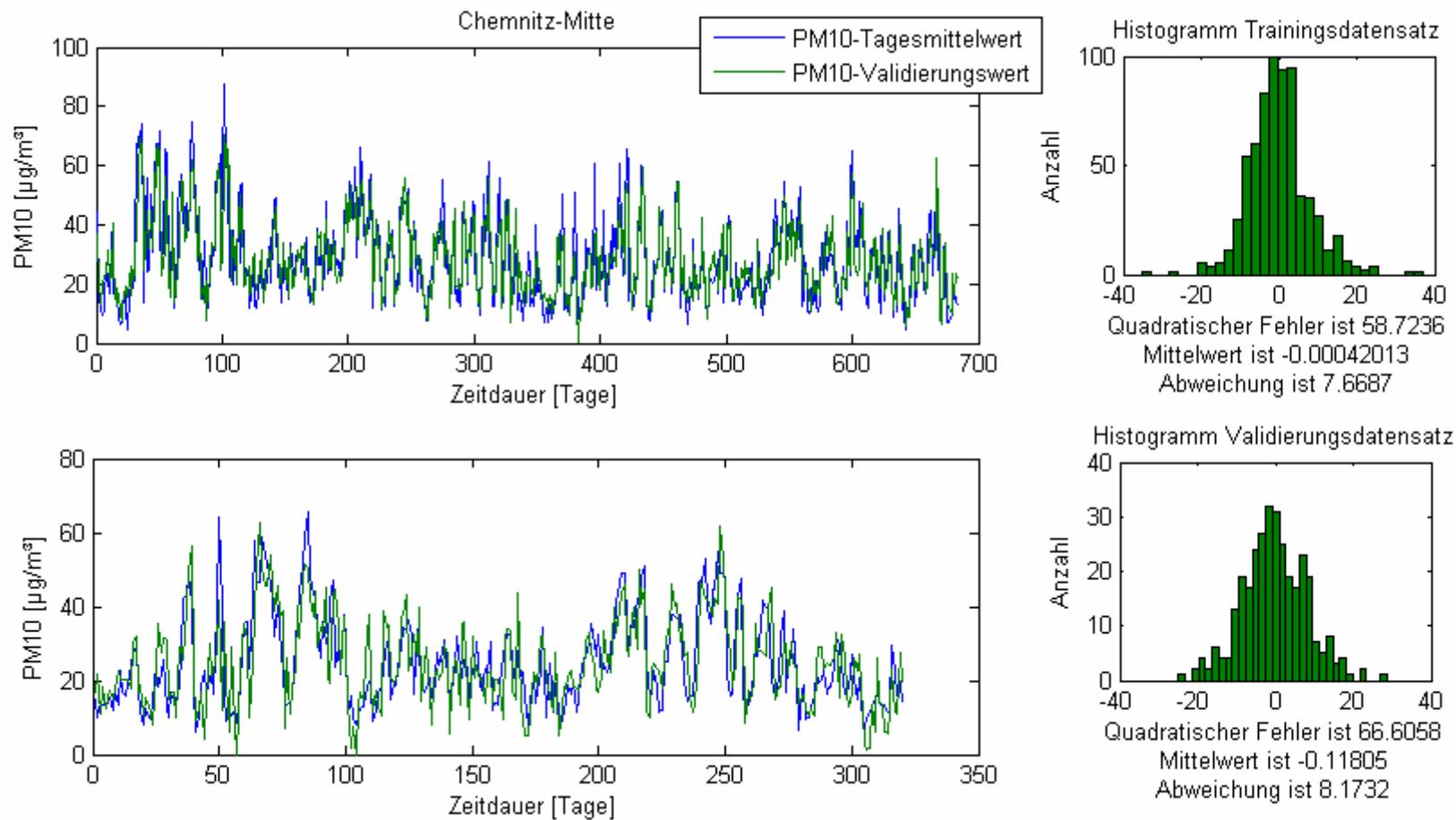


Abbildung A 2: Chemnitz-Mitte

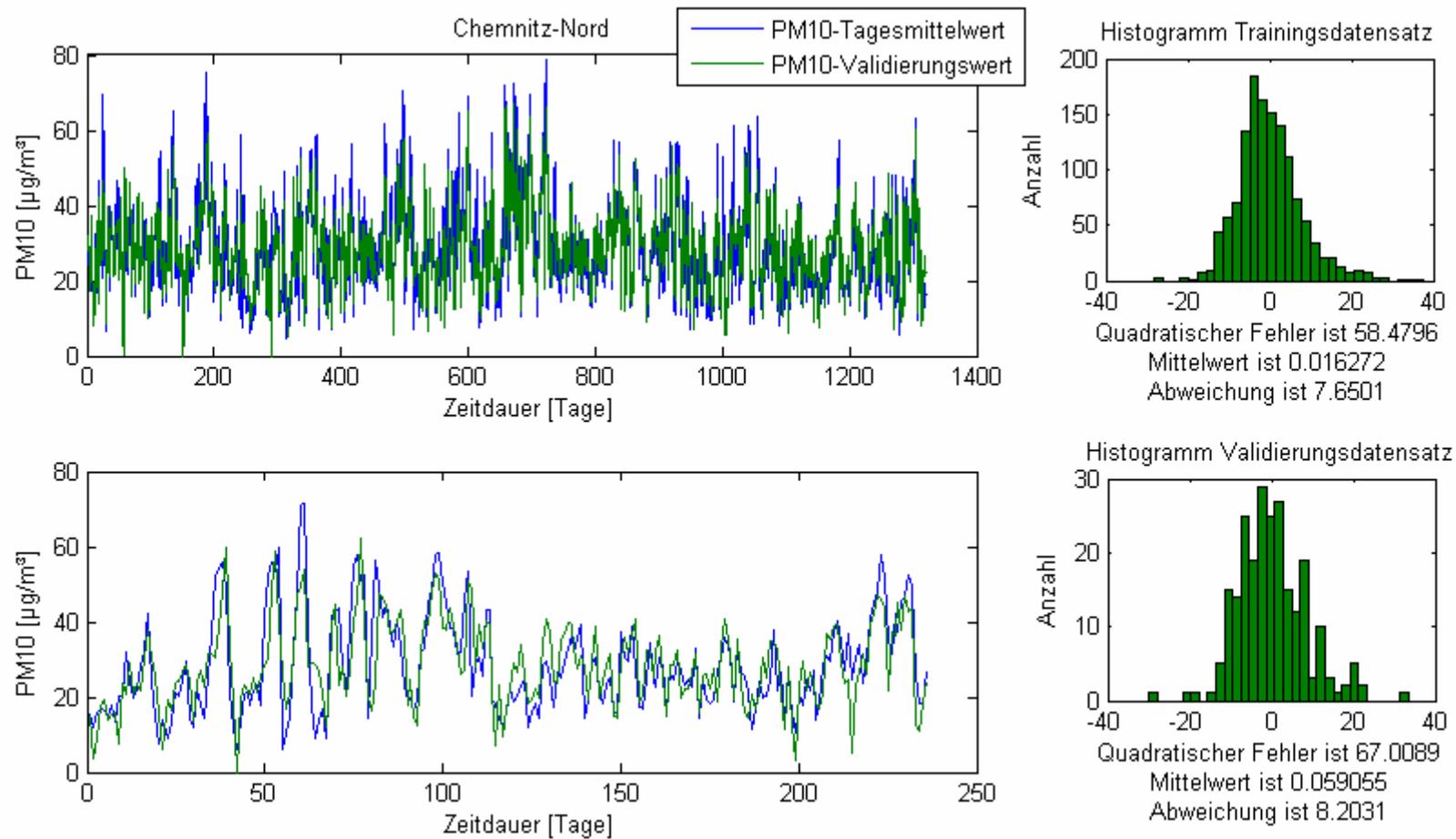


Abbildung A 3: Netz Chemnitz-Nord

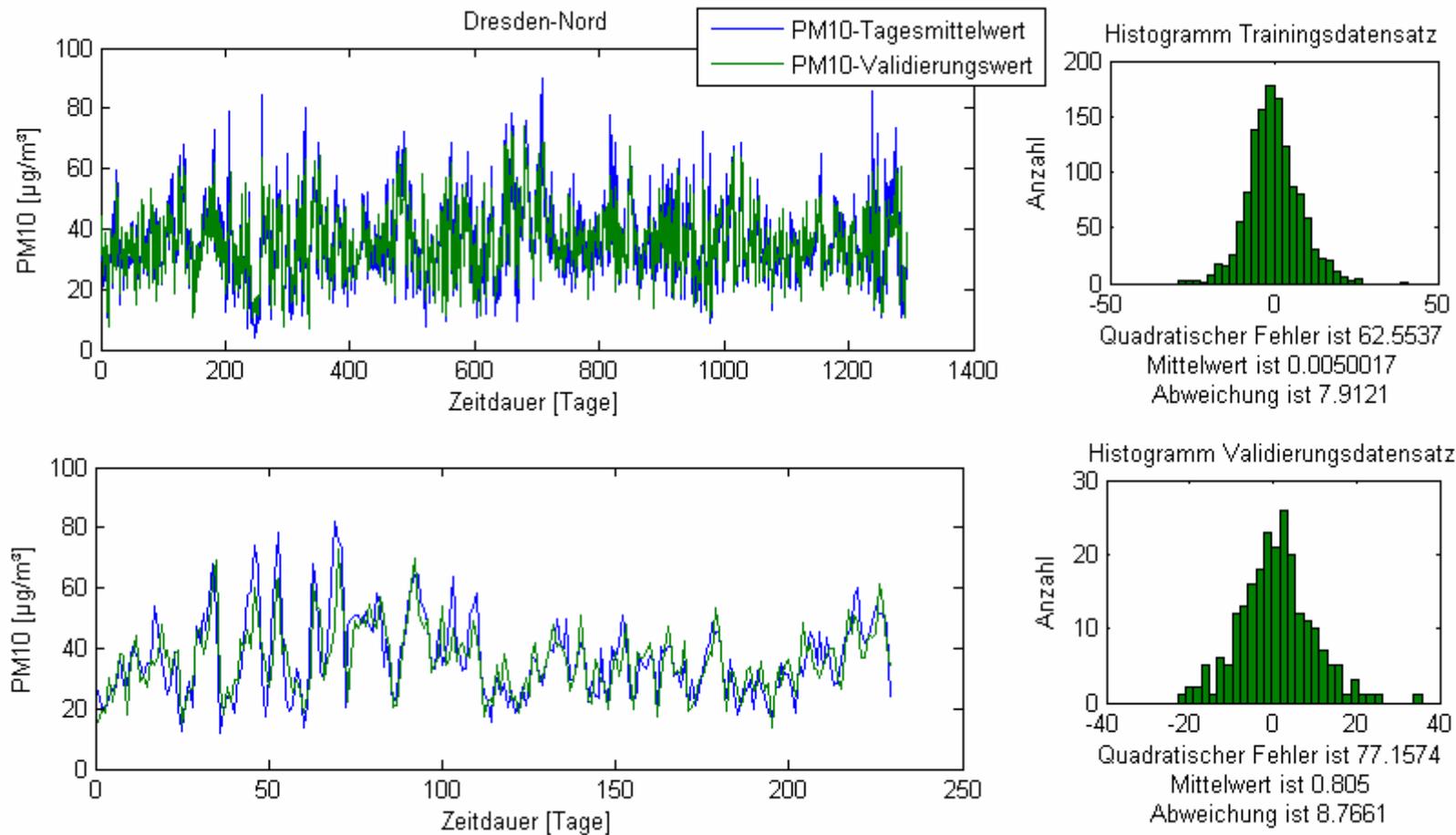


Abbildung A 4: Netz Dresden-Nord

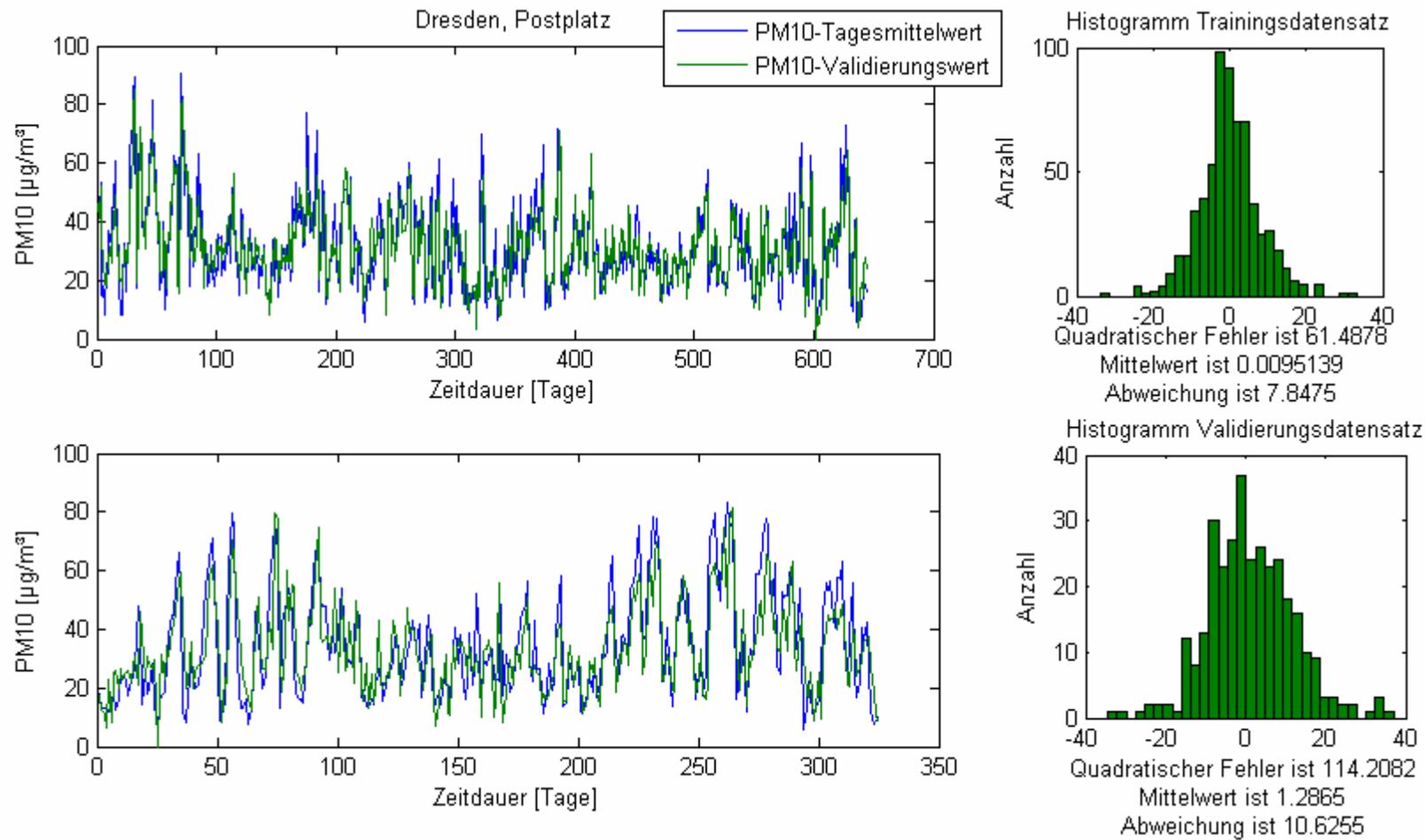


Abbildung A 5: Netz Dresden, Postplatz

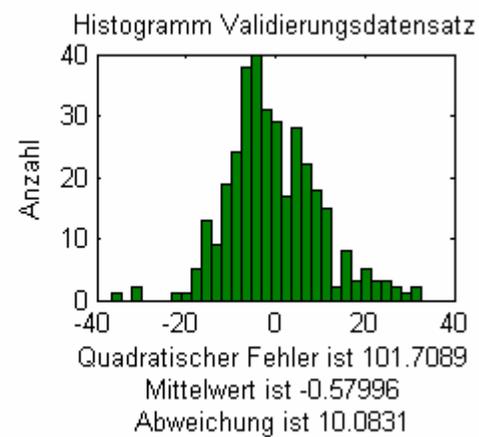
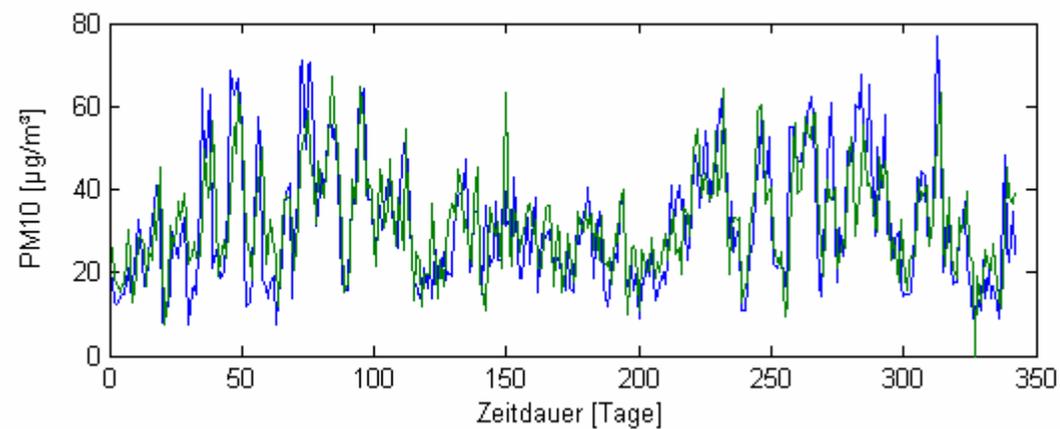
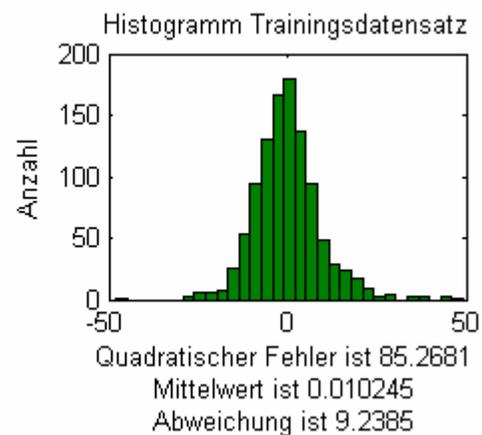
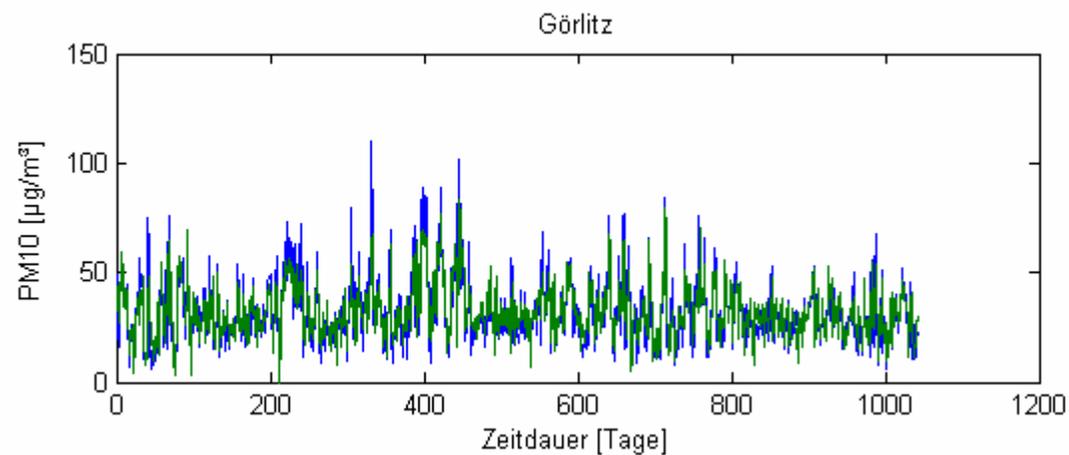


Abbildung A 6: Netz Görlitz

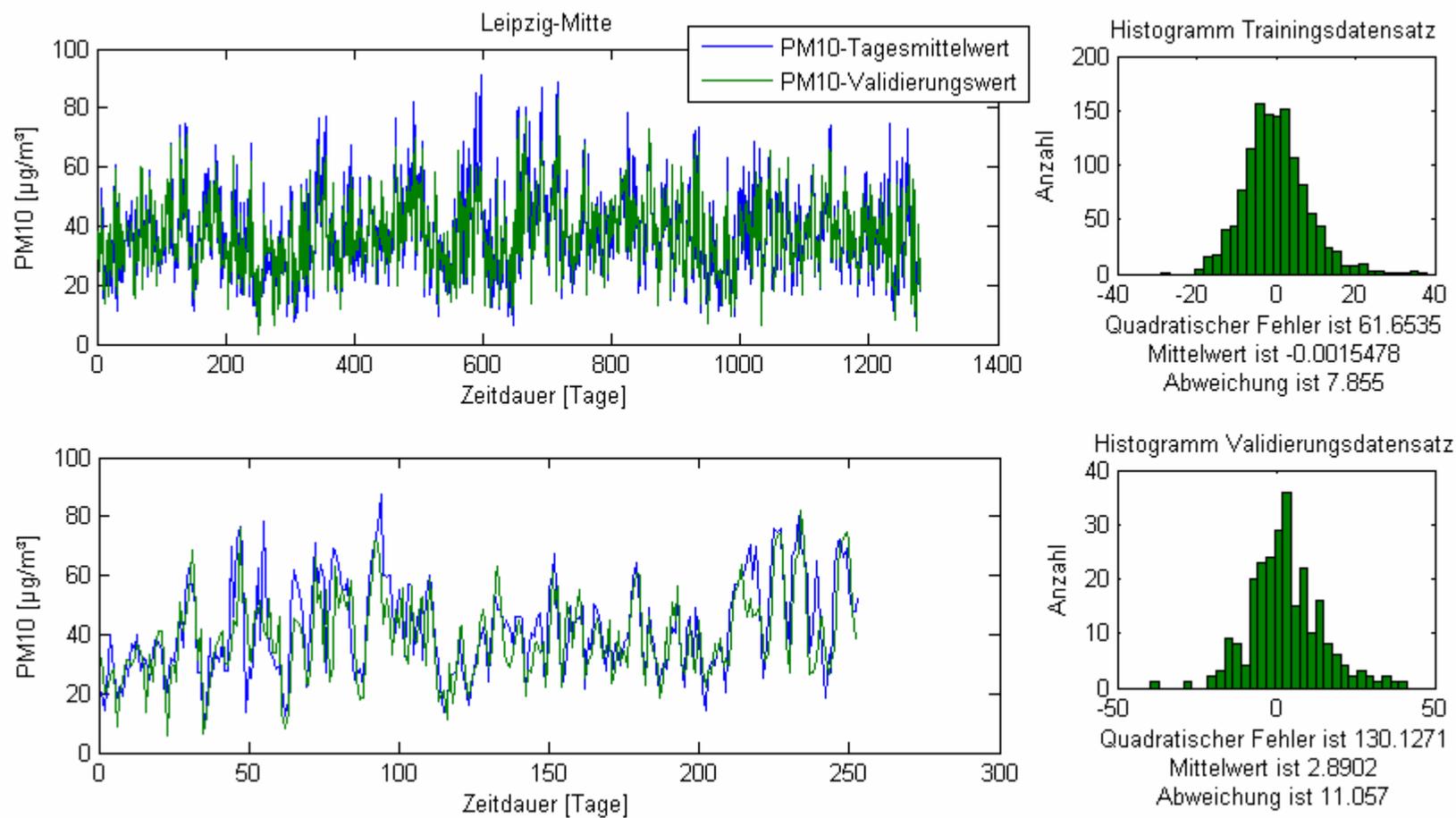


Abbildung A 7: Netz Leipzig-Mitte

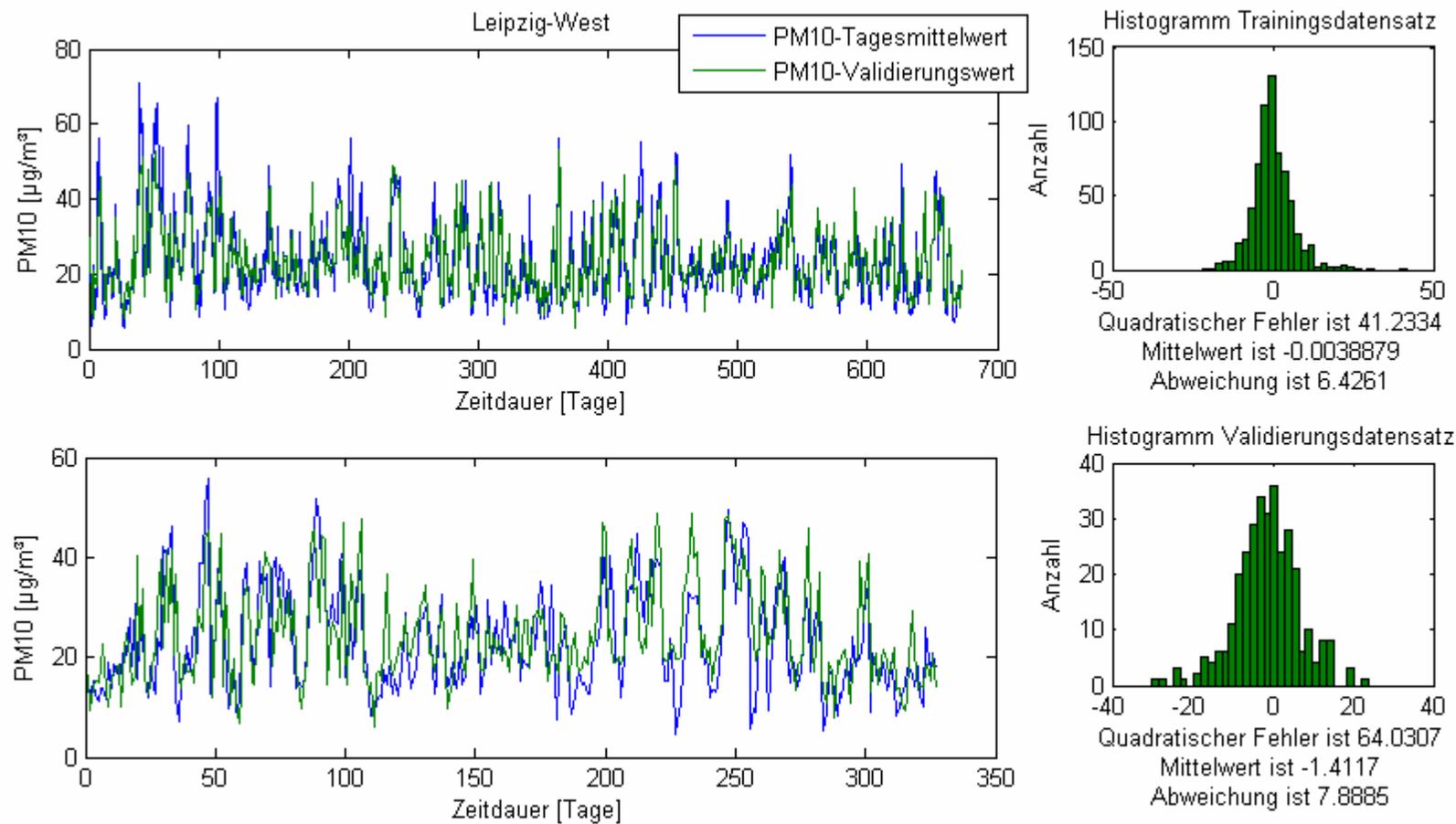


Abbildung A 8: Netz Leipzig-West

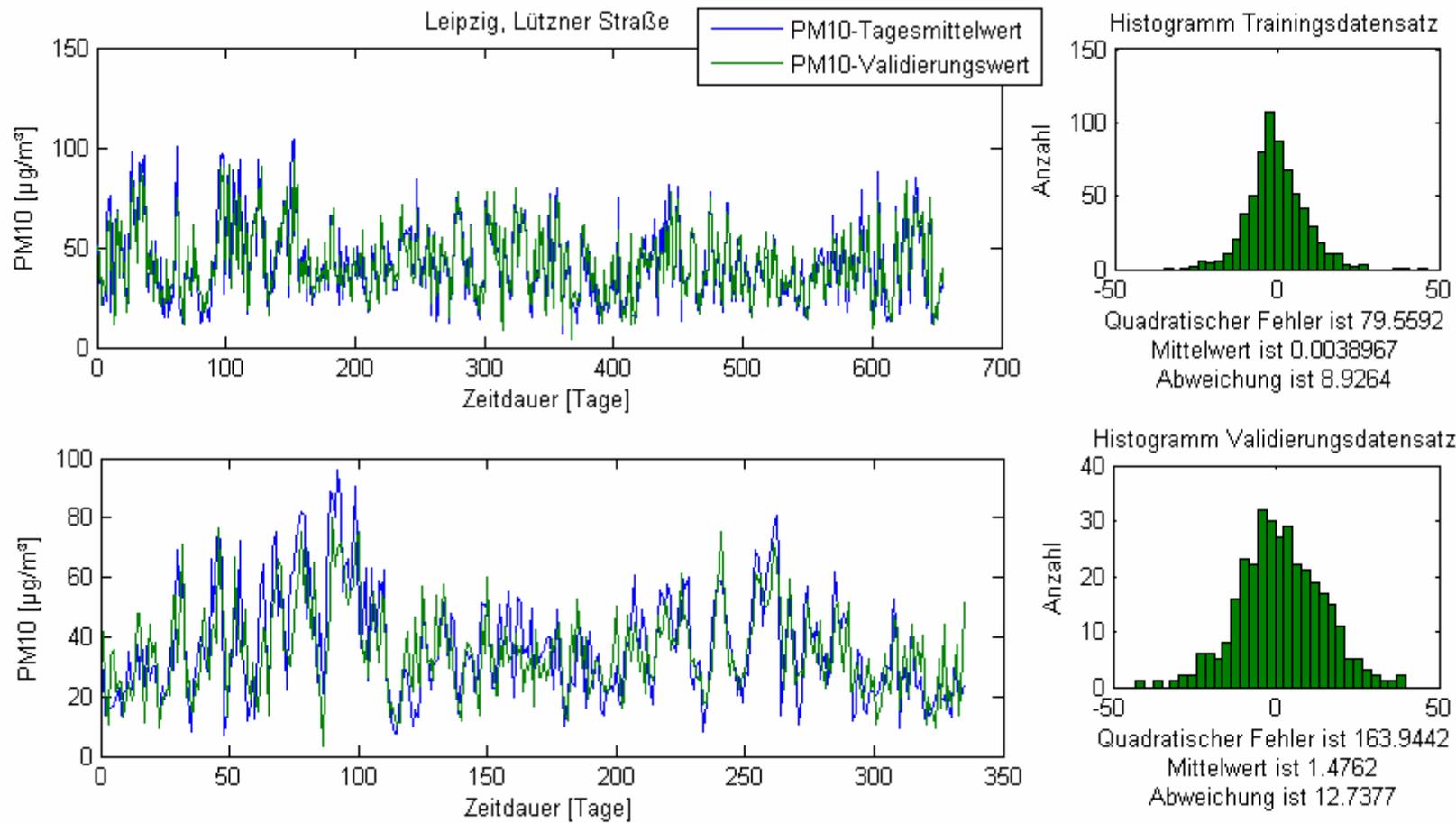


Abbildung A 9: Netz Leipzig, Lützner Straße

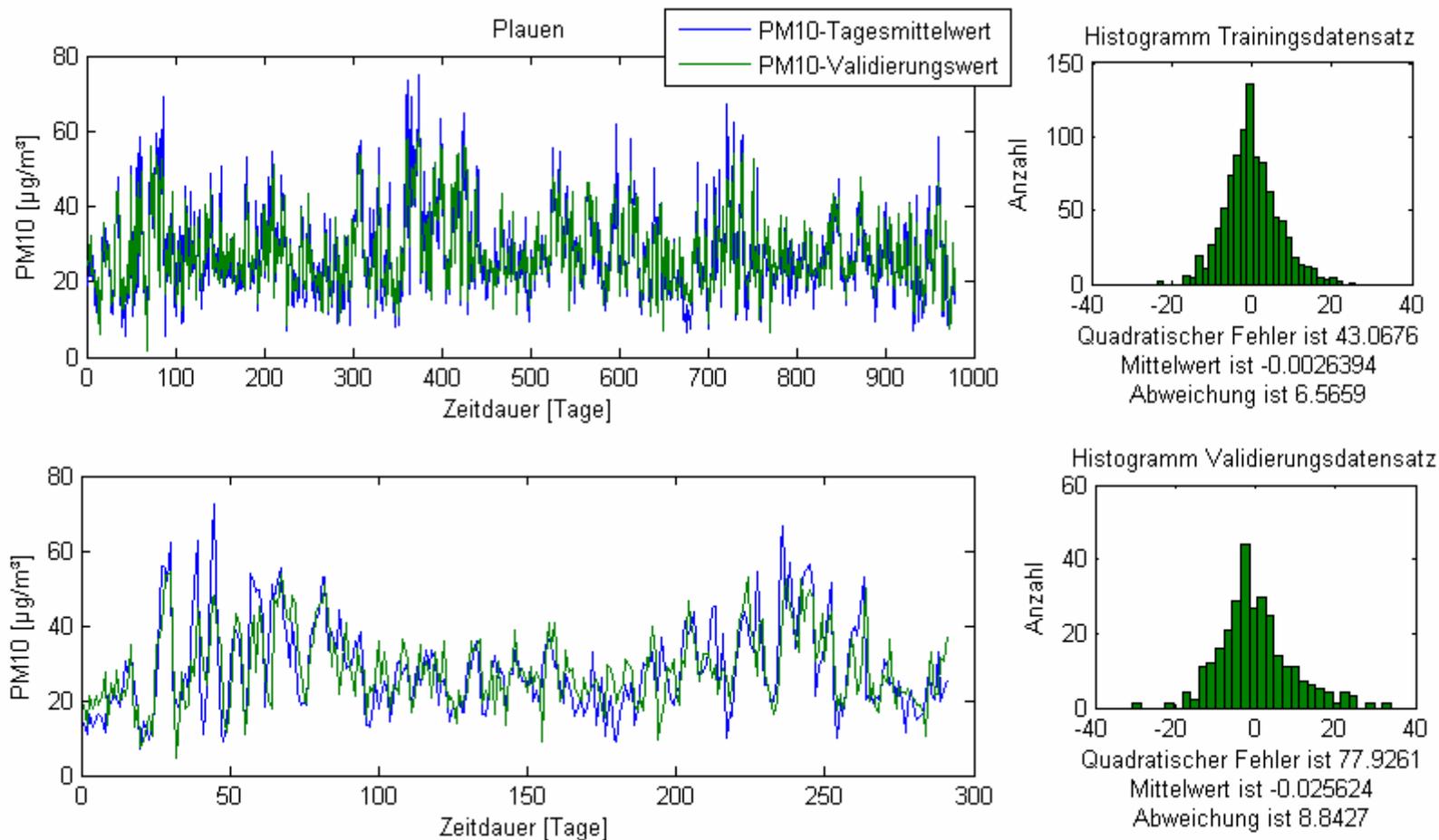


Abbildung A 10: Netz Plauen

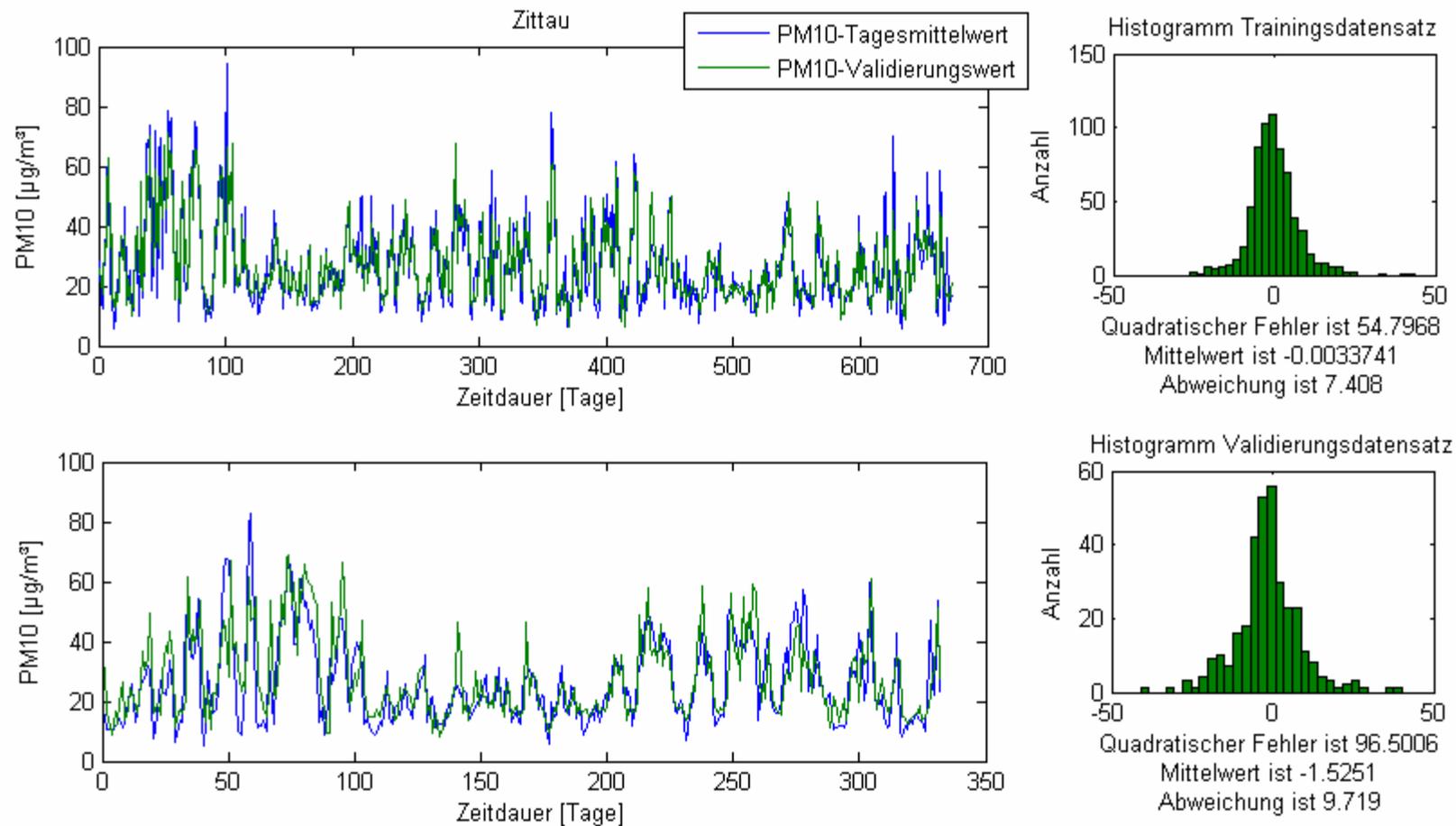


Abbildung A 11: Netz Zittau