

Modellierung und Prognose der Feinstaubkonzentration in Graz-Mitte für die Zeitperiode Herbst/Winter

Endbericht

Dezember 2004

Auftraggeber:

Magistrat Graz, Umweltamt

Mag. Siegfried Hörmann¹

Univ.-Prof. DI Dr. Ernst Stadlober

1. Grundlagen und Ausgangspunkt	3
1.1. Was soll prognostiziert werden?	3
1.2. Wie gut sind die meteorologischen Prognosen?	4
1.3. Wie sieht ein Prognosemodell aus?	4
1.4. Datenmaterial	5
2. Eintagesprognosen	6
2.1. Daten der Wintersaison 2002/03, explorative Analyse	6
2.2. Daten der Wintersaison 2003/04, explorative Analyse	11
2.3. Eintagesprognosemodell errechnet aus den Daten der Wintersaison 2002/03 (Prognosemodell 1)	14
2.3.2. Statistische Zusammenfassung	14
2.3.3. Residuenstatistik	15
2.3.4. Graphische Darstellung der Zeitreihen	16
2.3.5. Test der Stabilität des Modells und statistische Inferenz	18
2.4. Eintagesprognosemodell errechnet aus den Daten der Wintersaison 2003/04 (Prognosemodell 2)	22
2.4.1. Statistische Zusammenfassung	22
2.4.2. Residuenstatistik	23
2.4.3. Vergleich mit dem Prognosemodell 1	24
2.4.4. Stabilität des Modells	25
2.5. Kategorisierte Prognosen	28
2.6. Eintagesprognosemodelle errechnet aus den Daten der Wintersaisons 2002/03 und 2003/04 (Prognosemodell 3 und 4)	34
2.6.1. Statistische Zusammenfassung	34
2.7. Prognose extremer Werte	38
2.8. Prognosemodell für Graz Süd	41
2.8.1. Statistische Zusammenfassung	41
3. Überschreitungswahrscheinlichkeiten	43
4. Erweitertes Prognosemodell errechnet aus den Daten der Wintersaisons 2002/03 und 2003/04	46
4.1. Statistische Zusammenfassung	47
5. Reduktionspotential durch Verkehrsregulation	50
6. Skalierung zum Vergleich unterschiedlicher Jahre	55
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	57
Literaturverzeichnis	61
ANHANG	62

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und Hinzufügen, veröffentlicht werden. Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden, so ist vorher die schriftliche Genehmigung der Ersteller einzuholen.

1. Grundlagen und Ausgangspunkt

Die erhöhte Feinstaubbelastung in der Stadt Graz, die vor allem durch regelmäßige Überschreitung des von der EU vorgegebenen PM10 Grenzwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Tagesmittelwert hohe mediale und politische Aufmerksamkeit erzielte, ist Anlass dafür, dass seit Mai 2003 statistische Analysen an unserem Institut durchgeführt werden. Entsprechende explorative Untersuchungen über den Zusammenhang von PM10 mit meteorologischen Parametern und dem Verkehrsaufkommen wurden bereits in einigen Berichten von Univ.-Prof. Dr. Stadlober und Frau Pfeiler dokumentiert (siehe [1], [2], [3], [4]). Die in [4] verwendeten Daten für das Winterhalbjahr 2003/04 (1. Oktober 2003 bis 31. März 2004) sind auch Teil der Datengrundlage der vorliegenden Untersuchung. Weiters stehen uns für die Erstellung von Prognosemodellen auch Daten der Winterperiode 2002/03 zur Verfügung.

Wir beschränken uns im weiteren primär auf Daten des Messortes *Graz-Mitte*, der die Feinstaubbelastung im Stadtzentrum wieder gibt. Unsere explorativen Untersuchungen haben aber gezeigt, dass sich die Feinstaubbelastung in Graz-Mitte auf einem ähnlichen Niveau befindet wie die Belastung an den verkehrsreichen Stellen Graz-Don Bosco und Graz-Süd. Da für die Untersuchungszeiträume die Niederschlagswerte von Graz-Mitte nur lückenhaft vorhanden sind, werden für die Prognose stattdessen die entsprechenden Werte von Graz-Nord verwendet. (Die genaue Zusammensetzung der Daten wird in Abschnitt 1.4 beschrieben.)

1.1. Was soll prognostiziert werden?

Das grundsätzliche Ziel ist, ausgehend vom Informationsstand am *laufenden Tag x* (PM10 Tagesmittelwert, meteorologische Prognosewerte für den Tag $x+1$) den PM10 Tagesmittelwert für den *nächsten Tag $x+1$* möglichst genau zu prognostizieren. Der berechnete Prognosewert soll (i) anschließend einer bestimmten Kategorie (z.B.: niedrige Belastung, mittlere Belastung, hohe Belastung) zugeordnet werden oder (ii) die Grundlage dafür sein, dass man angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit am nächsten Tag ein vorgegebener Schwellwert überschritten wird. Darauf basierend können dann entsprechende kurzfristige Maßnahmen zur Reduktion der Feinstaubbelastung eingeleitet werden. Beispielsweise könnte die Richtlinie lauten:

Wird der Schwellwert von $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 50% überschritten, dann treten die in ... angeführten Maßnahmen in Kraft.

1.2. Wie gut sind die meteorologischen Prognosen?

Primär ist festzustellen, dass die Brauchbarkeit des PM10 Prognosemodells in der Praxis von der Güte einiger meteorologischer Prognosen für den Folgetag abhängt.

Ohne Einbeziehung von meteorologischen Prognosen kann unseres Erachtens kein ausreichend genaues PM10 Prognosemodell ermittelt werden.

Die drei wesentlichen klimatischen Einflussgrößen sind

- Inversionswetterlage (Temperaturdifferenz Graz – Kalkleiten)
- Mittlere Windgeschwindigkeit
- Niederschlag

Liegen zuverlässige Prognosen dafür vor, dann kann man erwarten, dass die Aussagekraft der Prognosemodelle zufrieden stellend ist.

1.3. Wie sieht ein Prognosemodell aus?

Unsere Prognosemodelle werden erstellt mittels Methoden der multiplen linearen Regression. Der Prognosewert (= PM10 Tagesmittelwert) ist somit eine Linearkombination von numerischen Faktoren mit zuvor errechneten Koeffizienten. Ein praktikables Modell könnte beispielsweise lauten:

$$\text{PM10 Prognose} = a_0 + a_1 * \text{Wind} + a_2 * \text{Niederschlag} + a_3 * \text{Inversion} + a_4 * (24\text{h PM10})$$

Die Koeffizienten a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 werden aus den Daten der Wintersaisons 2002/03 und 2003/04 berechnet und sind damit festgelegt. In die Modellgleichung für PM10 Prognose müssen lediglich die meteorologischen Vorhersagewerte für Wind, Niederschlag und Inversion, sowie der gemessene PM10 Mittelwert der letzten 24 Stunden eingesetzt werden.

Aus statistischen Gründen (Rechtfertigung der Modellannahmen) wird es sich als notwendig erweisen eine Wurzeltransformation der Variablen PM10 durchzuführen, und wir werden entsprechende Modelle für $\text{Sqrt}(\text{PM10})$ erstellen. Zur Prognose verwenden wir anschließend das Quadrat dieses Modellwertes. Die Verzerrung dieses Schätzers ist dabei vernachlässigbar.

1.4. Datenmaterial

Im Anhang sind die von uns betrachteten Modelle zusammen mit den Bestimmtheitsgraden und den Schwankungsbreiten angegeben.

Alle Berechnungen und Graphiken wurden mittels des Statistikpaketes SPSS 12.0 erstellt.

Die Basisdaten stammen vom Untersuchungsort Graz-Mitte aus den Wintersaisons 2002/03 (182 Tage) und 2003/04 (183 Tage). Die Messungen von PM10 Mittelwerten und meteorologischen Parametern standen dabei in folgenden Zeiträumen zur Verfügung:

1. Wintersaison 2002/03: (178 Beobachtungen)

- 1.-13. Oktober
3 fehlende Tage
- 17. Oktober – 15. November
1 fehlender Tag
- 17. November – 31. März

2. Wintersaison 2003/04: (171 Beobachtungen)

- 1. Oktober -10. März
12 fehlende Tage
- 23. März -31. März

Bei der Modellierung war es zusätzlich notwendig, Daten mit Messungen aller im Modell auftretenden Variablen zu haben. Dadurch verringerte sich die Datenbasis für 2002/03 auf 157 Tage (86 %) und für 2003/04 auf 169 Tage (92 %).

2. Eintagesprognosen

Für die folgenden Abschnitte legen wir nachstehende Bezeichnungen fest.

Variable	Beschreibung	Einheit	Sonstiges
wige	mittlere Windgeschwindigkeit	m/s	Prognosewert für Tag x+1
ltusg_k	Temperaturunterschied zwischen Graz und Kalkleiten	Grad Celsius	Prognosewert für Tag x+1
tag	Unterteilung in Mo - Fr, Samstag, Sonntag/Feiertag	1 = Mo-Fr 2 = Sa 3 = So/Fe	
nied_01	Kodierte Niederschlagswerte	0 = kein NS 1 = NS	Prognosewert für Tag x+1
mittel_xx	PM10 Mittelwert der letzten 24 Stunden, um xx Uhr errechnet	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Messwert
lute_kat_xx	Mittlere Lufttemperatur (MW) der letzten 24 Stunden, um xx Uhr errechnet; kodiert	0 = $\text{MW} > 0$ 1 = $\text{MW} \leq 0$	Messwert

Bei der Variable **tag** wurden in Kategorie 3 (So/Fe) alle Sonn- und Feiertage sowie der 24.12. aufgenommen.

2.1. Daten der Wintersaison 2002/03, explorative Analyse

Im Folgenden wird der Einfluss der oben angeführten Faktoren auf den PM10 Tagesmittelwert durch explorative Auswertungen deutlich gemacht. Es werden die PM10 Tagesmittelwerte mit den einzelnen Einflussfaktoren durch Streudiagramme (Scatterplots) graphisch miteinander verglichen, um den Grad und den Charakter der Abhängigkeit zu veranschaulichen. Dadurch erhält man einen guten Eindruck der zweidimensionalen Zusammenhänge.

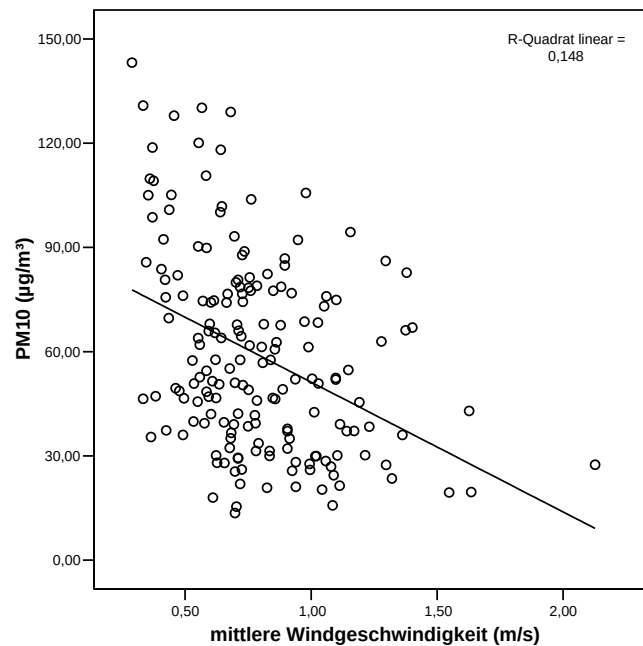


Diagramm 1: Scatterplot PM10 vs. mittlere Windgeschwindigkeit.

Es ist zwar eine deutliche Verringerung der PM10 Tagesmittelwerte bei zunehmender mittlerer Windgeschwindigkeit zu beobachten, aber die große Streuung der Daten reduziert den Grad der Anpassung der Regression auf ca. 15%. Dies lässt sich nur durch andere signifikante Einflussfaktoren erklären.

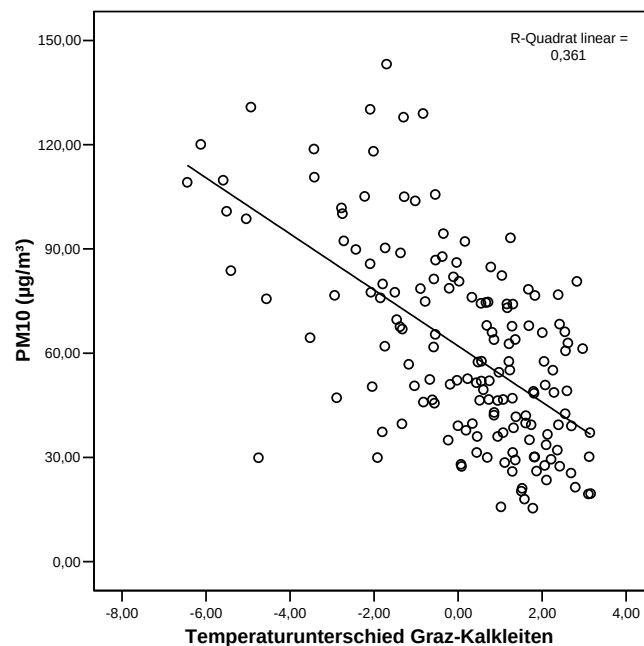


Diagramm 2: Scatterplot PM10 vs. Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten.

Den deutlichsten Einfluss auf den PM10 Tagesmittelwert hat die Temperaturdifferenz zwischen Graz und Kalkleiten. Negative Werte von `ltusg_k` bedeuten Inversionswetterlage. Je kleiner dieser Wert ist, desto schlechter ist der Luftaustausch zwischen den einzelnen Höhengschichten. Der Anpassungsgrad liegt bei 36%.

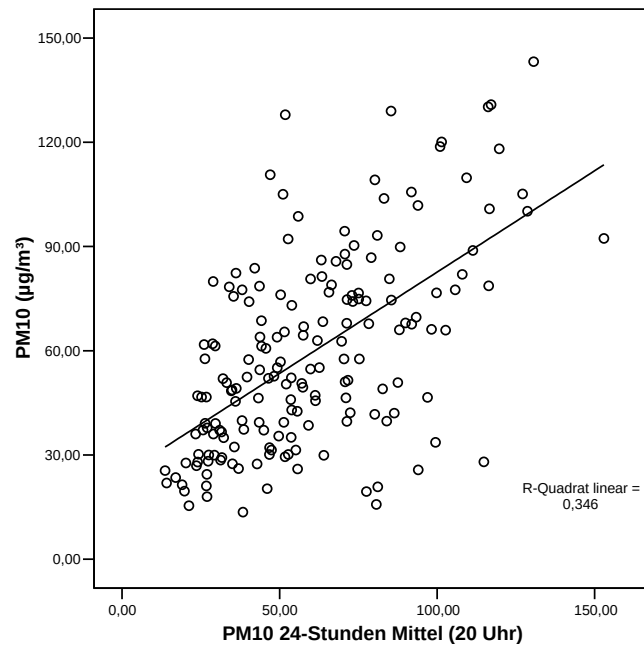


Diagramm 3: Scatterplot PM10 vs. PM10 24 Stundenmittel (20 Uhr).

Einen deutlichen Einfluss hat natürlich auch der Vortagesmittelwert von PM10. Da für das Erstellen der Prognose Mittelwerte von 0:00–24:00 noch nicht zur Verfügung stehen, werden in unseren Modellen PM10 Mittelwerte von 20:00–20:00 (PM10 24-Stundenmittel (20 Uhr)), 16:00–16:00 und 12:00–12:00 verwendet. Der Mittelwert 20 Uhr (`mittel_20`) liefert eine Anpassung von 35%.

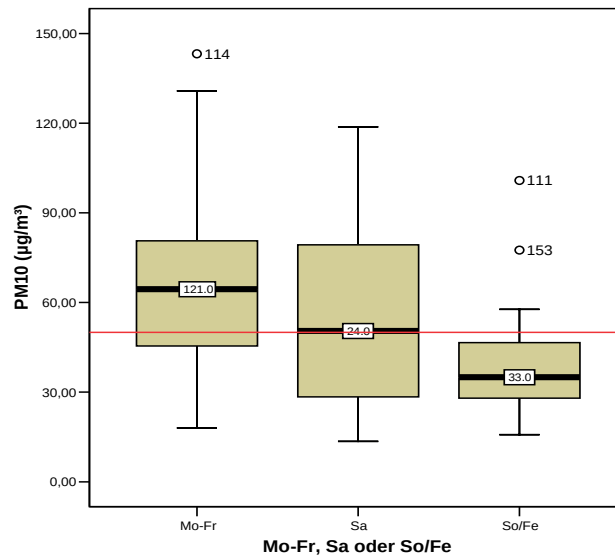


Diagramm 4: Boxplotserie bzgl. Wochentag.

Die Boxplots zeigen eine deutliche Reduktion der PM10 Belastung an Wochenenden. Die rote Bezugslinie markiert den Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Man erkennt, dass an mehr als 75% der Sonn- und Feiertage keine Überschreitung des Tagesgrenzwertes vorliegt. An Samstagen wird der Grenzwert an etwa 50% der Wintertage überschritten. In der übrigen Zeit, an Werktagen, finden Überschreitungen an deutlich über 50% der Tage statt. Die nahe liegende Vermutung, ob diese Reduktion hauptsächlich auf den verringerten LKW/PKW-Verkehr an Wochenenden zurück zu führen ist, wurde getrennt untersucht (siehe [4]).

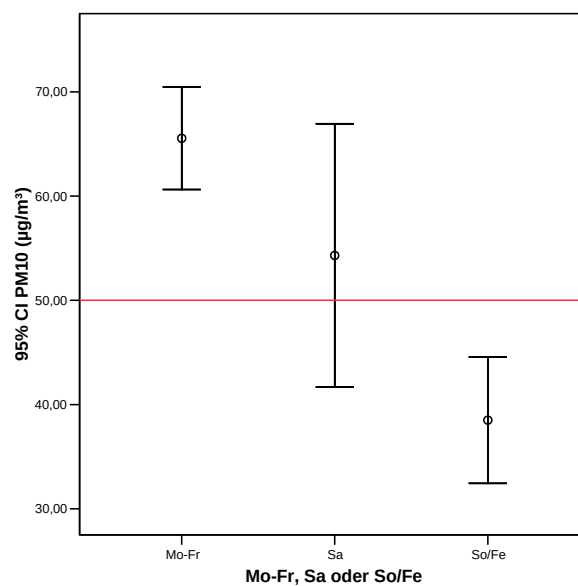


Diagramm 5: Fehlerbalken bzgl. Wochentag.

Die Fehlerbalken zeigen einen deutlichen Abfall der durchschnittlichen PM10 Belastung von $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an Werktagen auf $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an Samstagen, schließlich auf nur mehr $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 58 % des Werktageswertes) an Sonn- und Feiertagen.

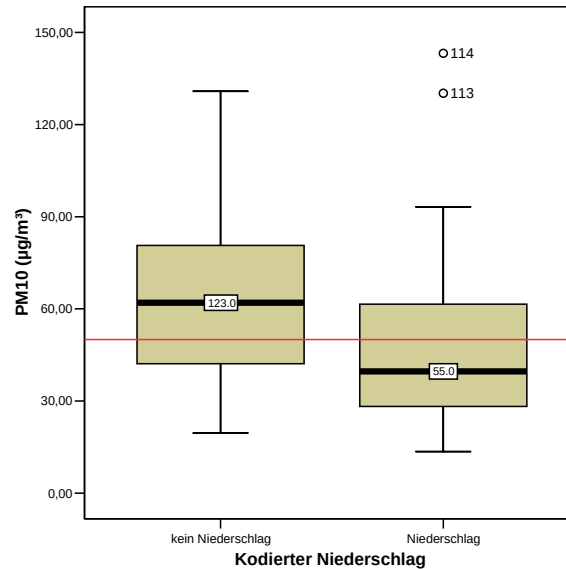


Diagramm 6: Boxplots bzgl. Niederschlag.

Die rote Bezugslinie markiert den Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wesentlich mehr als die Hälfte der untersuchten Tage ohne Niederschlag weisen erhöhte PM10 Tagesmittel auf. Im Gegensatz dazu liegt die Anzahl der Überschreitungen bei Tagen mit Niederschlag (31% der 178 Tage an denen PM10 Werte vorliegen) deutlich unter 50%.

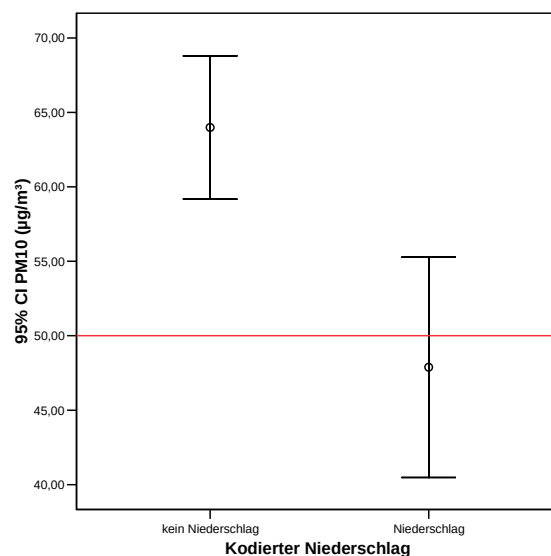


Diagramm 7: Fehlerbalken bzgl. Niederschlag.

Die Fehlerbalken zeigen den Abfall der durchschnittlichen PM10 Belastung an Tagen ohne Niederschlag gegenüber Tagen mit Niederschlag. Im Mittel ist bei Niederschlag eine Reduktion des PM10 Tagesmittels um $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu erwarten. Diese Reduktion ist einigermaßen konstant und hängt nicht linear vom Ausmaß des Niederschlags ab, was wir durch andere Analysen feststellen konnten.

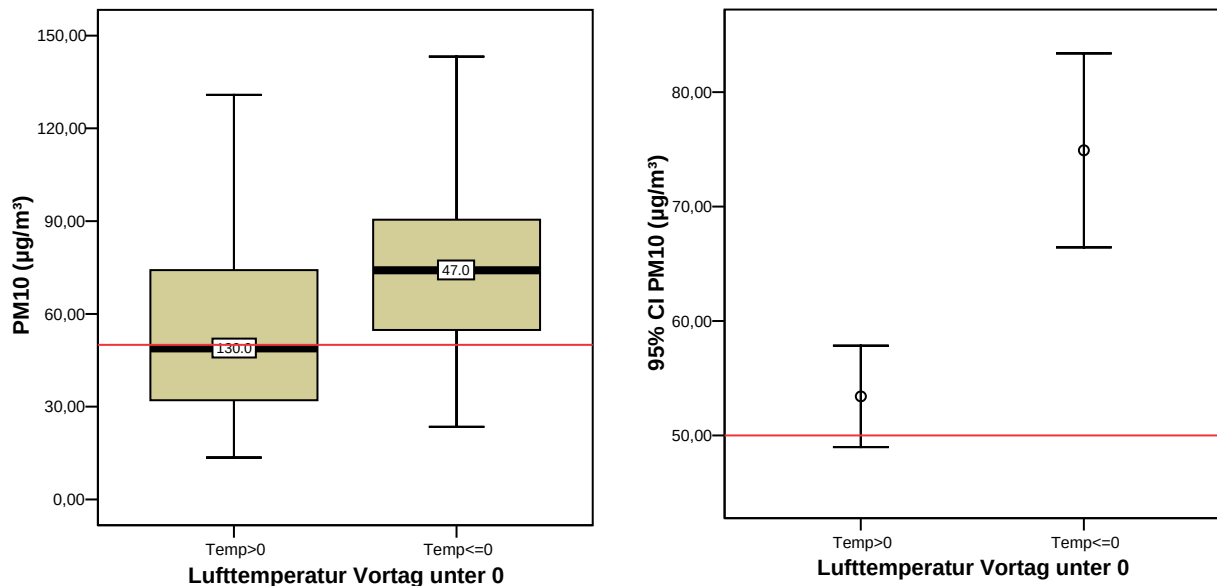
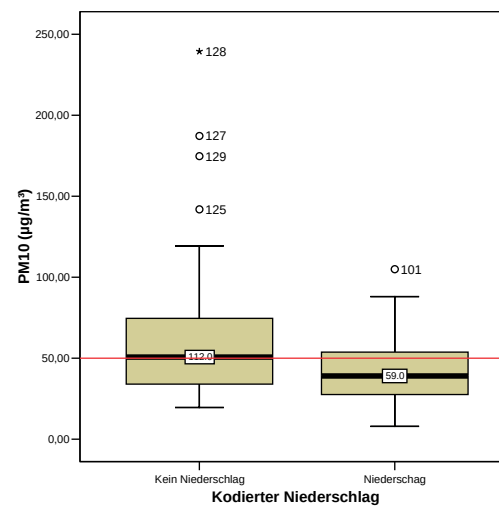
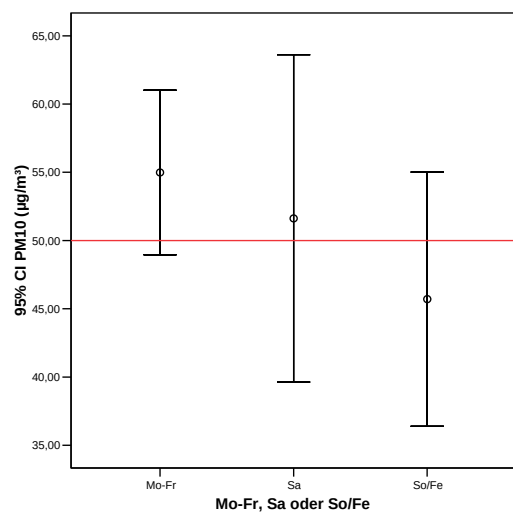
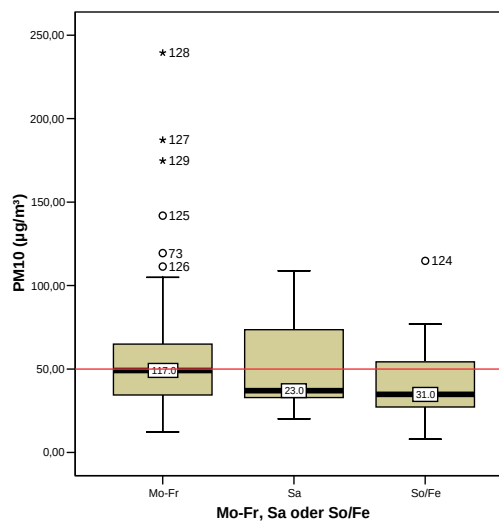
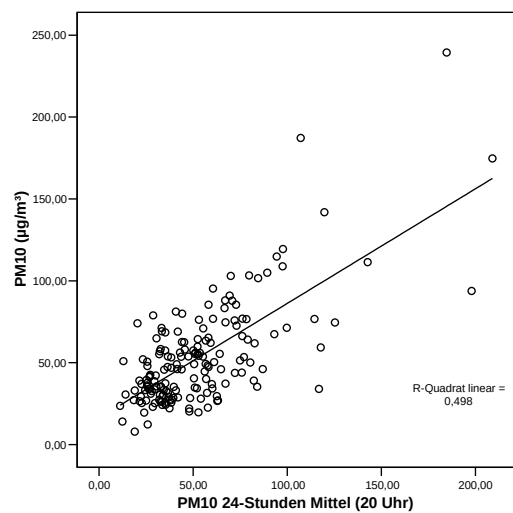
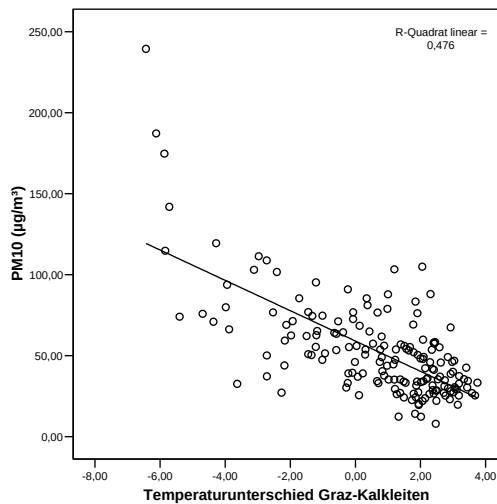
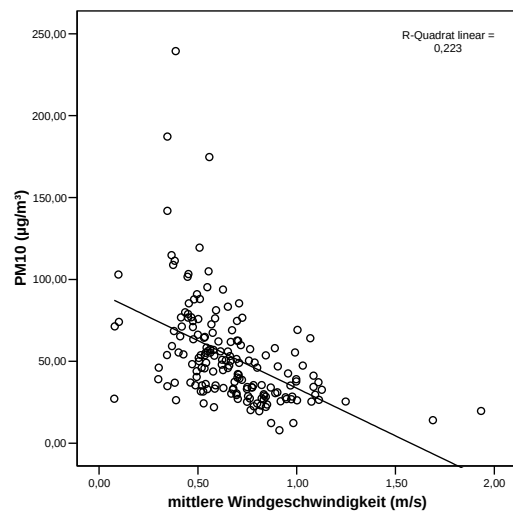


Diagramm 8: Boxplot und Fehlerbalken bzgl. Frosttage

Geht dem aktuellen Tag ein „Frosttag“ (ein Tag mit 24-Stunden Temperaturmittel < 0) voraus, so ist die PM10 Belastung im Mittel deutlich höher als im gegenteiligen Fall. Eine mögliche Ursache könnte im verstärkten Hausbrand an Frosttagen liegen.

2.2. Daten der Wintersaison 2003/04, explorative Analyse

Tendenziell ähnliche Bilder liefern die Daten der Wintersaison 2003/04. Interessant ist, dass sich der Einfluss der unterschiedlichen Faktoren deutlich stärker bemerkbar macht als in der Wintersaison 2002/03 (höhere Bestimmtheitsgrade). Weiters erkennt man einige extreme Ausreißer mit Werten größer als $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die auf eine extreme Inversionswetterlage Anfang Februar 2004 zurückzuführen sind.



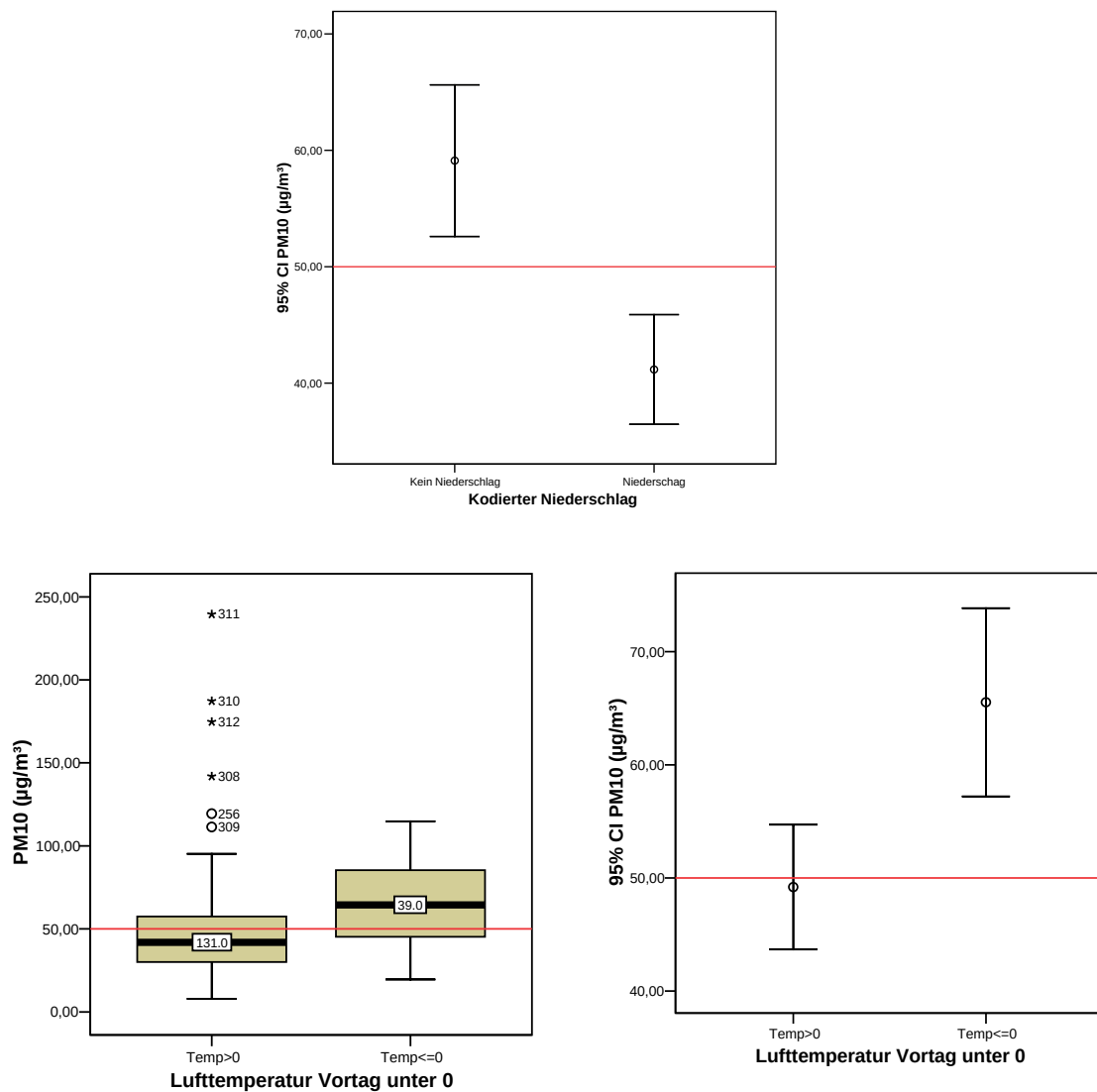


Diagramm 9: Graphische Übersicht der eindimensionalen Analysen für die Wintersaison 2003/04.

Die Unterschiede der PM10 Belastung zwischen den drei Tagestypen sind viel geringer als in der Wintersaison 2002/03. Der durchschnittliche Tagesmittelwert an Werktagen verringert sich von 64 auf 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 86%), während diese Werte am Samstag mit 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gleich bleiben und sich an Sonn- und Feiertagen von 40 auf 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ leicht erhöhen.

Beim Vergleich der Tage ohne Niederschlag hat man eine Reduktion von 64 auf 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und bei Tagen mit Niederschlag von 47 auf 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, d.h. die relativen Unterschiede zwischen den Tagen ohne Niederschlag und den Tagen mit Niederschlag (35% aller Tage an denen PM10 Messwerte vorliegen) bleiben in der Wintersaison 2003/04 annähernd gleich.

2.3. Eintagesprognosemodell errechnet aus den Daten der Wintersaison 2002/03 (Prognosemodell 1)

In diesem Abschnitt wird ein Modell für die Prognose des PM10 Tagesmittelwertes des Folgetages angegeben, das auf den Daten der Wintersaison 2002/03 basiert. Es wird als Prognosemodell sowohl für 2002/03 als auch für 2003/04 eingesetzt, und die Tragfähigkeit des Modells an Hand verschiedener vergleichender Untersuchungen getestet.

2.3.1. Statistische Zusammenfassung

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,821 ^a	,674	,663	16,36802

a. Einflußvariablen : (Konstante), Kodierter Niederschlag, mittlere Windgeschwindigkeit (m/s), Mo-Fr, Sa oder So/Fe, PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr), Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten

b. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Die abhängige Variable `pm10` hängt am stärksten von `mittel_20` (PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr)), `tag` (kategoriale Variable mit 3 Ausprägungen) und `ltusg_k` (Temperaturdifferenz Graz-Kalkleiten) ab; einen etwas schwächeren Einfluss haben `wige` (mittlere Windgeschwindigkeit) und `nied_01` (Kodierter Niederschlag mit 2 Ausprägungen). Der Bestimmtheitsgrad (korrigiertes r^2) des Modells beträgt ca. 66% und die Streuung der Regression ist 16,37.

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	78,804	6,689		11,781	,000
	Mo-Fr, Sa oder So/Fe	-13,111	1,688	-,367	-7,767	,000
	mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	-20,960	5,183	-,216	-4,044	,000
	Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten	-4,108	,763	-,305	-5,387	,000
	PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr)	,359	,051	,361	6,993	,000
	Kodierter Niederschlag	-11,027	3,034	-,176	-3,634	,000

a. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2.3.2. Residuenstatistik

Die Verteilung der Residuen ist im Zentrum symmetrisch mit 2 Ausreißern nach oben (Boxplot, Diagramm 10). Der Residuenplot weist eine leichte Trichterform, aber sonst eine annähernd zufällige Struktur auf. Dies deutet darauf hin, dass eine Transformation der abhängigen Variablen pm10 angebracht sein könnte. Auf diese Problematik werden wir weiter unten in Abschnitt 2.6.1 eingehen. Im Plot sind noch 5 auffällig große und ein auffällig kleiner Wert außerhalb des Bereichs von 2 Standardabweichungen (rote Bezugslinien) zu erkennen.

Residuenstatistik^a

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	N
Nicht standardisierter vorhergesagter Wert	7,6764	123,0266	61,3589	23,14888	157
Nicht standardisierte Residuen	-39,21190	47,87576	,00000	16,10357	157
Standardisierter vorhergesagter Wert	-2,319	2,664	,000	1,000	157
Standardisierte Residuen	-2,396	2,925	,000	,984	157

a. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

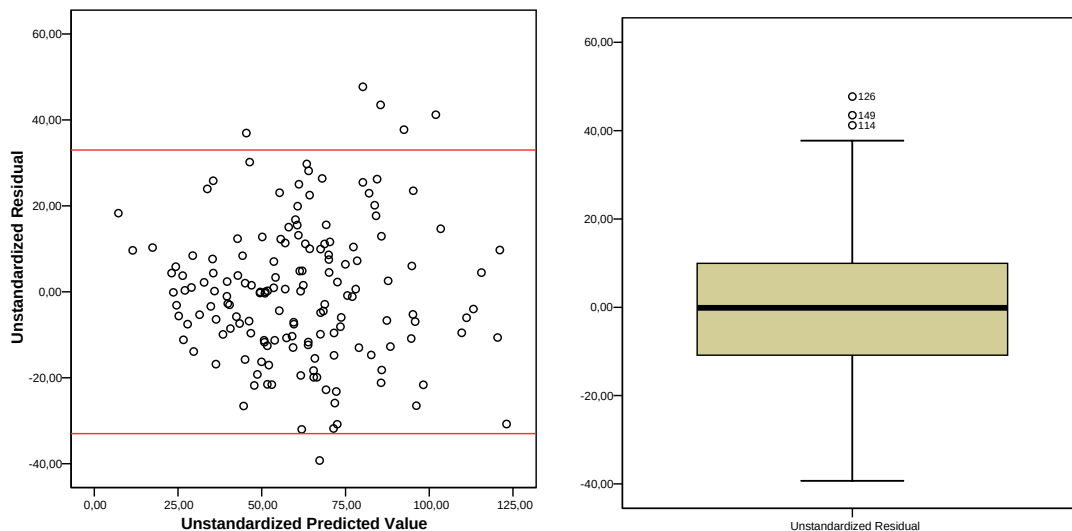


Diagramm 10: Analyse der Residuen mittels Scatterplot und Boxplot.

2.3.3. Graphische Darstellung der Zeitreihen

Im folgenden Diagramm werden die Prognosewerte für PM10 (grün), basierend auf den Daten der Wintersaison 2002/03, mit den beobachteten PM10 Werten (blau) der Wintersaison 2002/03 verglichen. Im Zeitreihenplot sind auch noch die Residuen = beobachtete Werte – Prognosewerte in hellgrün dargestellt. Die Linie charakterisiert den für die Tagesmittelwerte relevanten Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der sehr häufig überschritten wird. Die Residuen schwanken per definitionem um die Nulllinie, die das Zentrum des Bereichs zwischen -20 und +20 darstellt. Werte innerhalb dieses Bereichs besagen, dass die Prognosewerte um weniger als $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vom tatsächlich beobachteten Wert abweichen. Die größten Abweichungen der Prognosewerte liegen bei ca. $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dies ist speziell bei abrupten Änderungen des beobachteten PM10 Tagesmittelwertes der Fall.

Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist, in welcher Form solche Abweichungen die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Prognosen beeinträchtigen können. Dieser Frage werden wir im Rahmen der weiteren Analysen nachgehen.

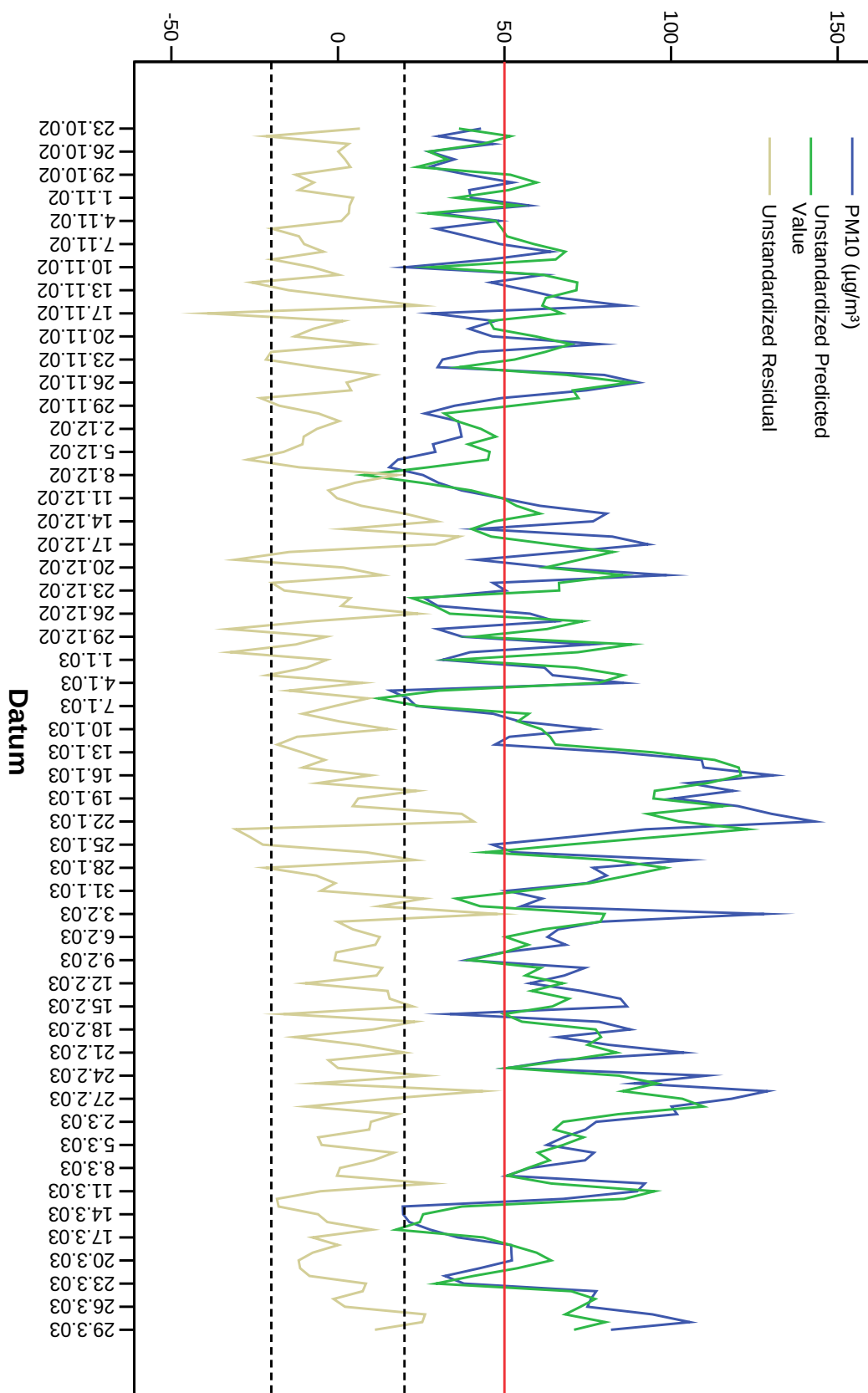


Diagramm 11: Zeitreihendarstellung der Residuen, Prognosen (Predicted Value) und der PM10 Werte.

2.3.4. Test der Stabilität des Modells und statistische Inferenz

Aus den explorativen Untersuchungen geht hervor, dass die beobachteten PM10 Tagesmittelwerte eine Abhängigkeitsstruktur aufweisen, was einer Verletzung der Modellannahme entspricht. Wir werden im Folgenden überprüfen, ob sich dies auf die Aussagekraft des Modells auswirkt. Die Adäquatheit des Prognosemodells kann man über die Verteilung der Residuen, der Differenz der beobachteten von den prognostizierten Werten, charakterisieren. Über entsprechende Diagnoseplots wird überprüft, ob bestimmte Verteilungseigenschaften verletzt sind (Normalverteilung, konstante Varianz).

Um die Anwendbarkeit des Modells auf *zukünftige Daten* zu überprüfen, benutzen wir die aus den Daten der Wintersaison 2002/03 ermittelten Modellkoeffizienten, berechnen damit die Prognosewerte für die Wintersaison 2003/04 und vergleichen diese mit den beobachteten Werten. Die Differenz zwischen den beobachteten Werten und den prognostizierten Werten bezeichnen wir als *Prognoseresiduen* und analysieren deren Eigenschaften.

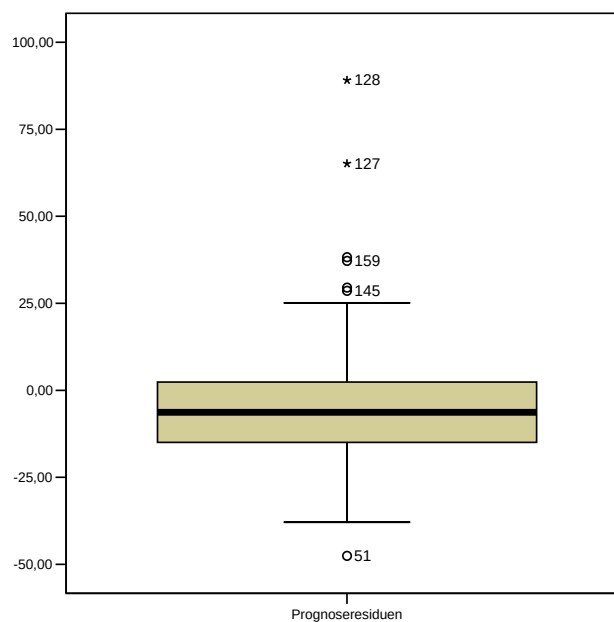


Diagramm 12: Boxplot der Prognoseresiduen.

Der Boxplot zeigt die Verteilung der Prognoseresiduen, der Differenz zwischen den beobachteten PM10 Werten im Herbst/Winter 2003/04 und den aus dem Prognosemodell 1 errechneten Werten. Der Median ist leicht nach unten verschoben. Der interquartile Bereich (durch die Box gekennzeichnet), der die zentralen 50 % der Prognoseresiduen umfasst, ist aber sehr kompakt.

Die prognostizierten Werte sind im Mittel etwas zu hoch (ca. $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Insgesamt ergibt sich aber ein recht gutes Gesamtbild. Einige der Ausreißer beziehen sich auf extreme Beobachtungen über $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Anfang Februar 2004.

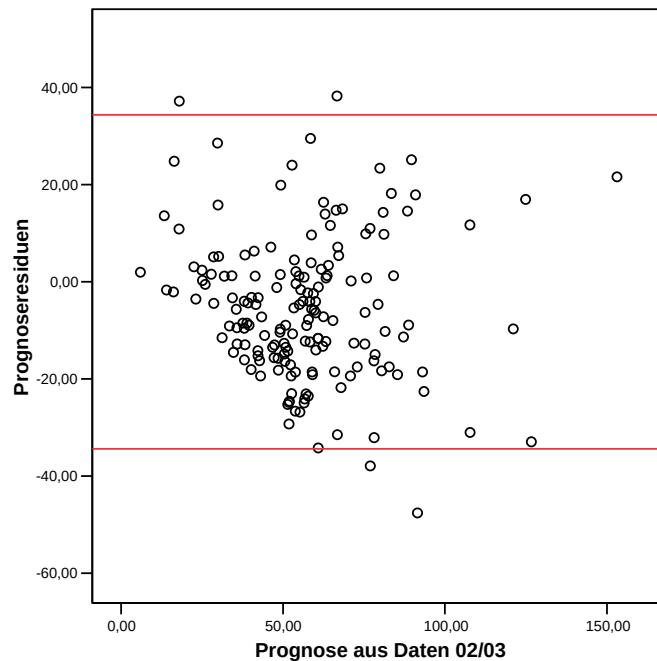


Diagramm 13: Scatterplot Prognoseresiduen vs. Prognosemodell 1.

Nach dem Entfernen von 2 Ausreißern ergibt der Plot der Prognoseresiduen gegen die Prognosewerte aus dem Prognosemodell 1 ein zufrieden stellendes Bild. Nur 4 Werte liegen außerhalb des Bereiches von 2 Standardabweichungen (rote Begrenzungslinien).

Univariate Statistiken

			Statistik	Standardfehler
Prognoseresiduen	Mittelwert		-4,5231	1,32605
	95% Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-7,1409	
		Obergrenze	-1,9052	
	5% getrimmtes Mittel		-5,4207	
	Median		-6,3111	
	Varianz		297,169	
	Standardabweichung		17,23859	
	Minimum		-47,57	
	Maximum		89,11	
	Spannweite		136,68	
	Interquartilbereich		17,59	
	Schiefte		1,461	,187
	Kurtosis		5,756	,371

Die folgende Zeitreihendarstellung (Daten der Wintersaison 2003/04 mit Modellbasis aus 2002/03) zeigt eine relativ zufällige Schwankung der Prognoseresiduen mit einem Mittelwert von $-4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $17,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (siehe Tabelle Univariate Statistiken; die eigentlichen Residuen des aus dem Datensatz 2002/03 errechneten Modells wiesen eine Standardabweichung von $16,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf). Der negative Mittelwert ist bedingt durch die durchschnittlich höhere PM10 Belastung von $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Wintersaison 2002/03 gegenüber der Wintersaison 2003/04.

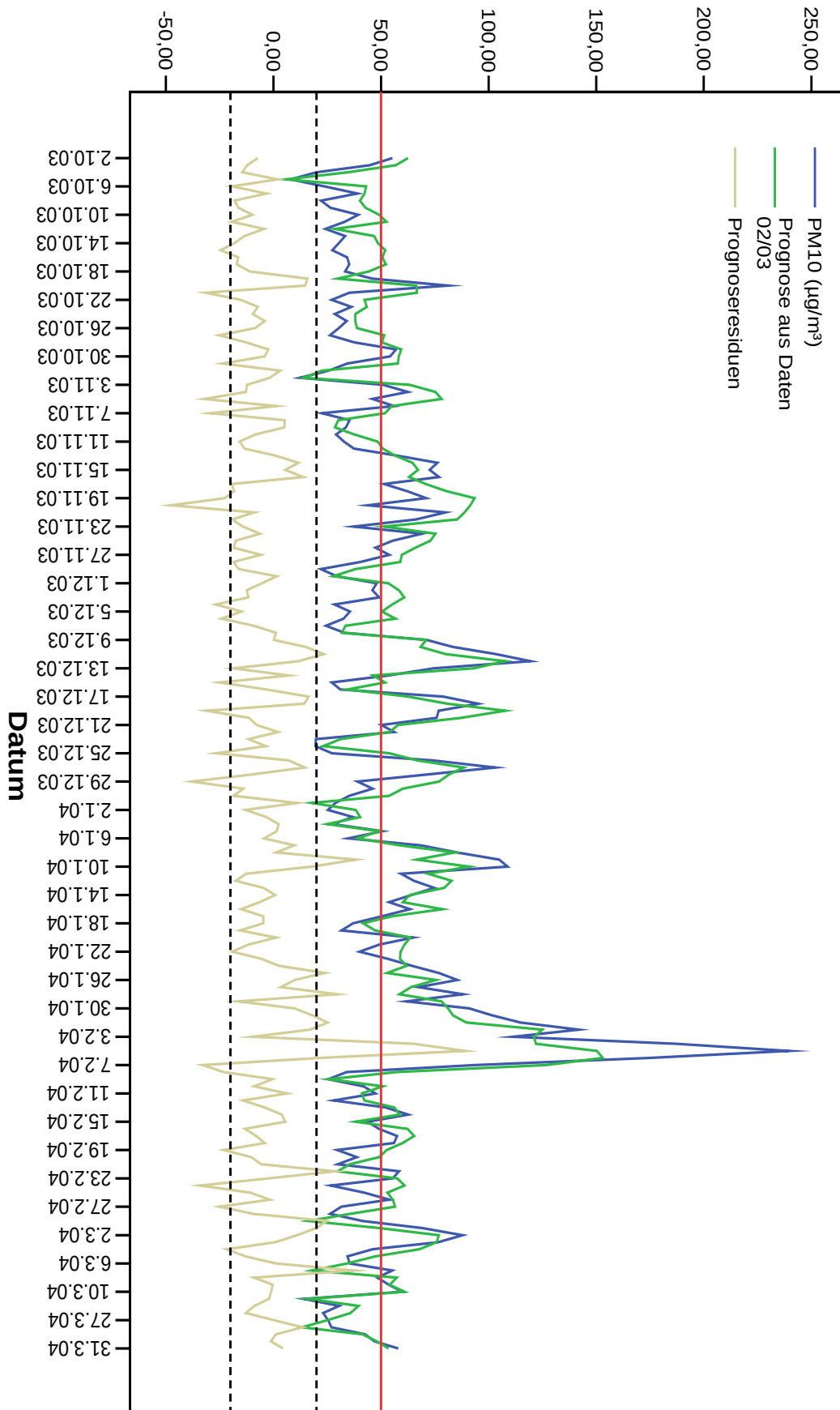


Diagramm 14: Zeitreihendarstellung der Prognoseresiduen, Prognosen und der PM10 Werte.

2.4. Eintagesprognosemodell errechnet aus den Daten der Wintersaison 2003/04 (Prognosemodell 2)

2.4.1. Statistische Zusammenfassung

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,850 ^a	,722	,714	16,72198

a. Einflußvariablen : (Konstante), Kodierter Niederschlag, mittlere Windgeschwindigkeit (m/s), Mo-Fr, Sa oder So/Fe, PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr), Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten

b. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Der Bestimmtheitsgrad mit ca. 71% ist hier leicht höher als bei Prognosemodell 1 (66%). Die Streuung der Regression mit 16,7 gegenüber 16,4 ist aber nahezu unverändert.

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	70,459	6,048		11,650	,000
	Mo-Fr, Sa oder So/Fe	-9,185	1,670	-,232	-5,500	,000
	mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	-27,861	5,701	-,226	-4,887	,000
	Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten	-4,529	,751	-,335	-6,034	,000
	PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr)	,420	,051	,423	8,218	,000
	Kodierter Niederschlag	-12,299	2,770	-,187	-4,440	,000

a. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Der Einfluss von tag ist in der Wintersaison 2003/04 viel geringer. Dies kann erklärt werden durch die deutlich kleineren Unterschiede zwischen den PM10 Werten an Werktagen und Sonn-/Feiertagen. Alle anderen Einflussgrößen weisen eine ähnliche Charakteristik wie in Prognosemodell 1 auf. Die Charakteristik dieser Einflussgrößen ist also sehr stabil in Bezug auf unterschiedliche Wintersaisons, was günstig für die Aussagekraft darauf basierender Vorhersagemodelle ist.

2.4.2. Residuenstatistik

Der Boxplot deutet – bis auf einige Ausreißer – auf eine akzeptable Verteilung der Residuen hin. Der Scatterplot weist allerdings auch hier eine Trichterform auf, die eine Transformation der PM10 Variablen nahe legt. Dieser Frage wird in Abschnitt 2.6.1 nachgegangen.

Residuenstatistik^a

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	N
Nicht standardisierter vorhergesagter Wert	-1,1789	160,0157	53,1814	26,55273	169
Nicht standardisierte Residuen	-45,27172	82,27639	,00000	16,47126	169
Standardisierter vorhergesagter Wert	-2,047	4,023	,000	1,000	169
Standardisierte Residuen	-2,707	4,920	,000	,985	169

a. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

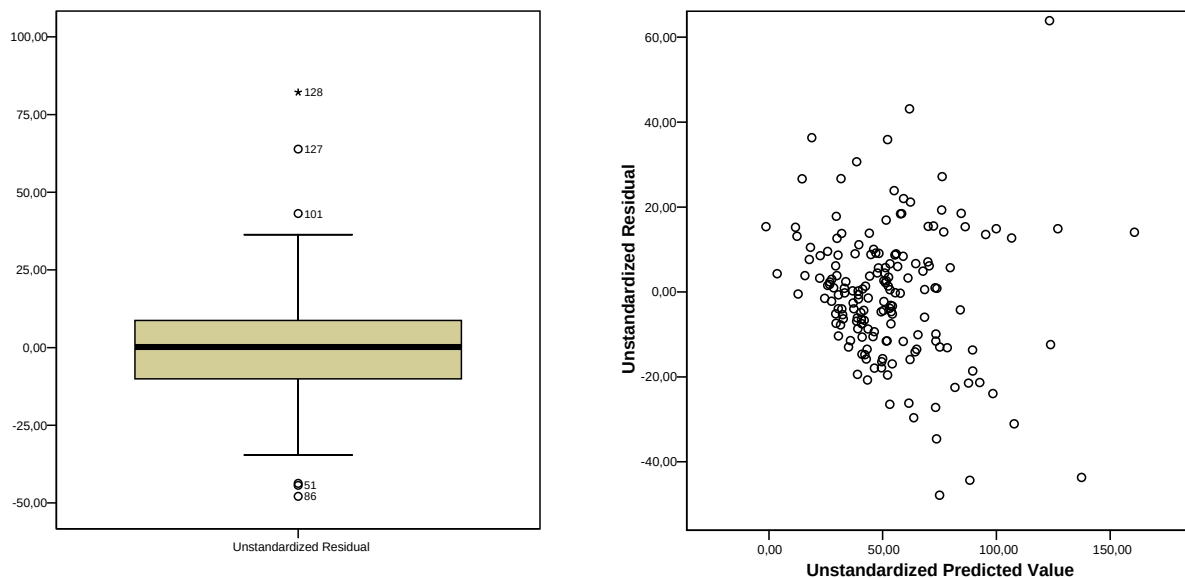


Diagramm 15: Boxplot und Scatterplot zur Analyse der Residuen.

2.4.3. Vergleich mit dem Prognosemodell 1

Der Vergleich von Boxplot und Scatterplot aus Abschnitt 2.3.4 (Prognosemodell 1) mit den obigen Graphiken (Prognosemodell 2) zeigt große Ähnlichkeiten. In der folgenden Tabelle werden die Parameter der beiden Modelle mit einander verglichen. Bei den Koeffizienten unterscheidet sich lediglich der Koeffizient von Faktor `tag` merkbar. Eine Begründung dafür wurde schon in Abschnitt 2.4.1 angegeben.

Modell	02/03			03/04		
	Koeffizienten	T-Wert	Beta	Koeffizienten	T-Wert	Beta
Konstante	78,8	11,8		70,5	11,7	
<code>tag</code>	-13,1	-7,8	-0,37	-9,2	-5,5	-0,23
<code>wige</code>	-21,0	-4,0	-0,22	-27,9	-4,9	-0,23
<code>ltusg_k</code>	-4,1	-5,4	-0,3	-4,5	-6,0	-0,33
<code>mittel_20</code>	0,36	7,0	0,36	0,42	8,2	0,42
<code>nied_01</code>	-11,0	-3,6	-0,18	-12,3	-4,4	-0,19

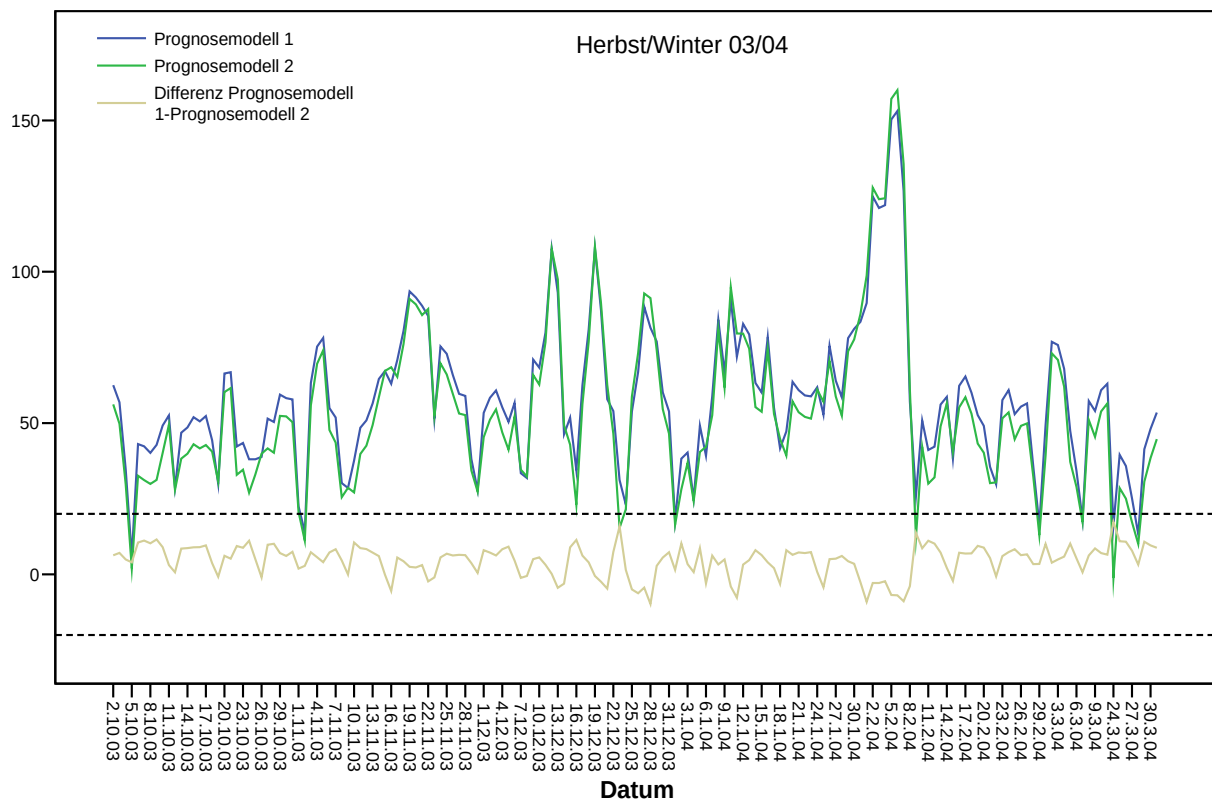


Diagramm 16: Vergleich der beiden Prognosemodelle.

Vergleicht man die Prognosewerte des Prognosemodells 1 (Daten aus 2002/03) mit den Prognosewerten des Prognosemodells 2 (Daten aus 2003/04) bezüglich der Wintersaison

2003/04, so sind etwas höhere Werte von Prognosemodell 1 zu erkennen, ansonsten sind aber ähnliche Verläufe und keine gravierenden weiteren Unterschiede auszumachen (siehe Diagramm 16).

2.4.4. Stabilität des Modells

Wir errechnen die Prognosewerte für Herbst/Winter 2002/03 und berechnen daraus wieder die Prognoseresiduen analog zu Abschnitt 2.3.4. Die Verteilung der Prognoseresiduen ist annähernd symmetrisch mit einem positiven Median. Der Scatterplot weist wiederum die bekannte Trichterform auf.

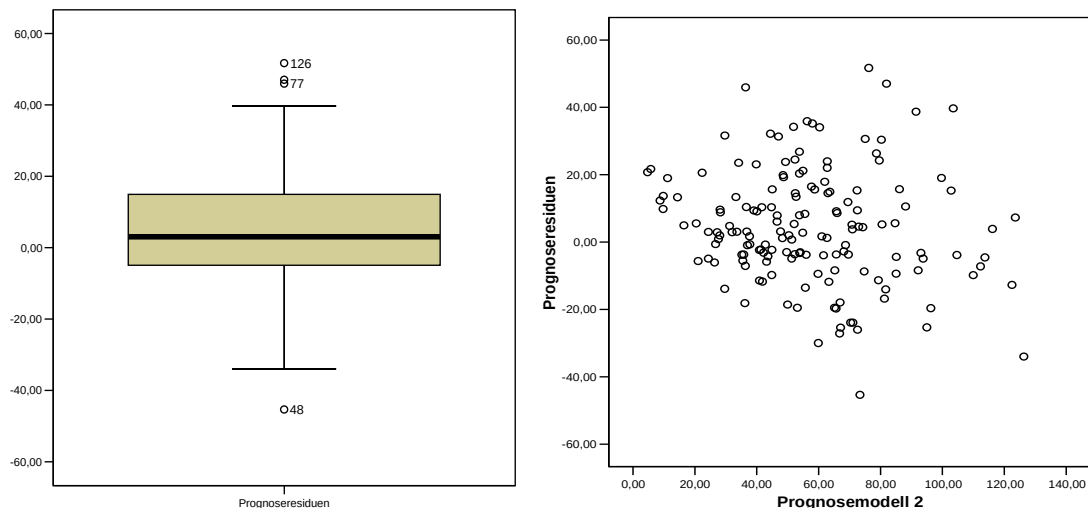


Diagramm 17: Boxplot und Scatterplot zur Analyse der Prognoseresiduen.

Univariate Statistiken

			Statistik	Standardfehler
Prognoseresiduen	Mittelwert		4,4141	1,34239
	95% Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	1,7625	
		Obergrenze	7,0657	
	5% getrimmtes Mittel		4,2687	
	Median		3,0694	
	Varianz		282,918	
	Standardabweichung		16,82015	
	Minimum		-45,35	
	Maximum		51,71	
	Spannweite		97,06	
	Interquartilbereich		20,04	
	Schiefte		,165	
	Kurtosis		,295	
				,194
				,385

Die folgende Gegenüberstellung der Daten aus 2002/03 mit dem Modell basierend auf den Daten aus 2003/04 zeigt eine relativ zufällige Schwankung der Prognoseresiduen. Man erkennt, dass extrem hohe PM10 Werte durch die Prognose eher unterschätzt werden (siehe z.B. den Zeitraum 5.2.-1.3.03), was für die praktische Anwendung aber kein großes Problem darstellen wird, wie wir weiter unten ausführen werden.

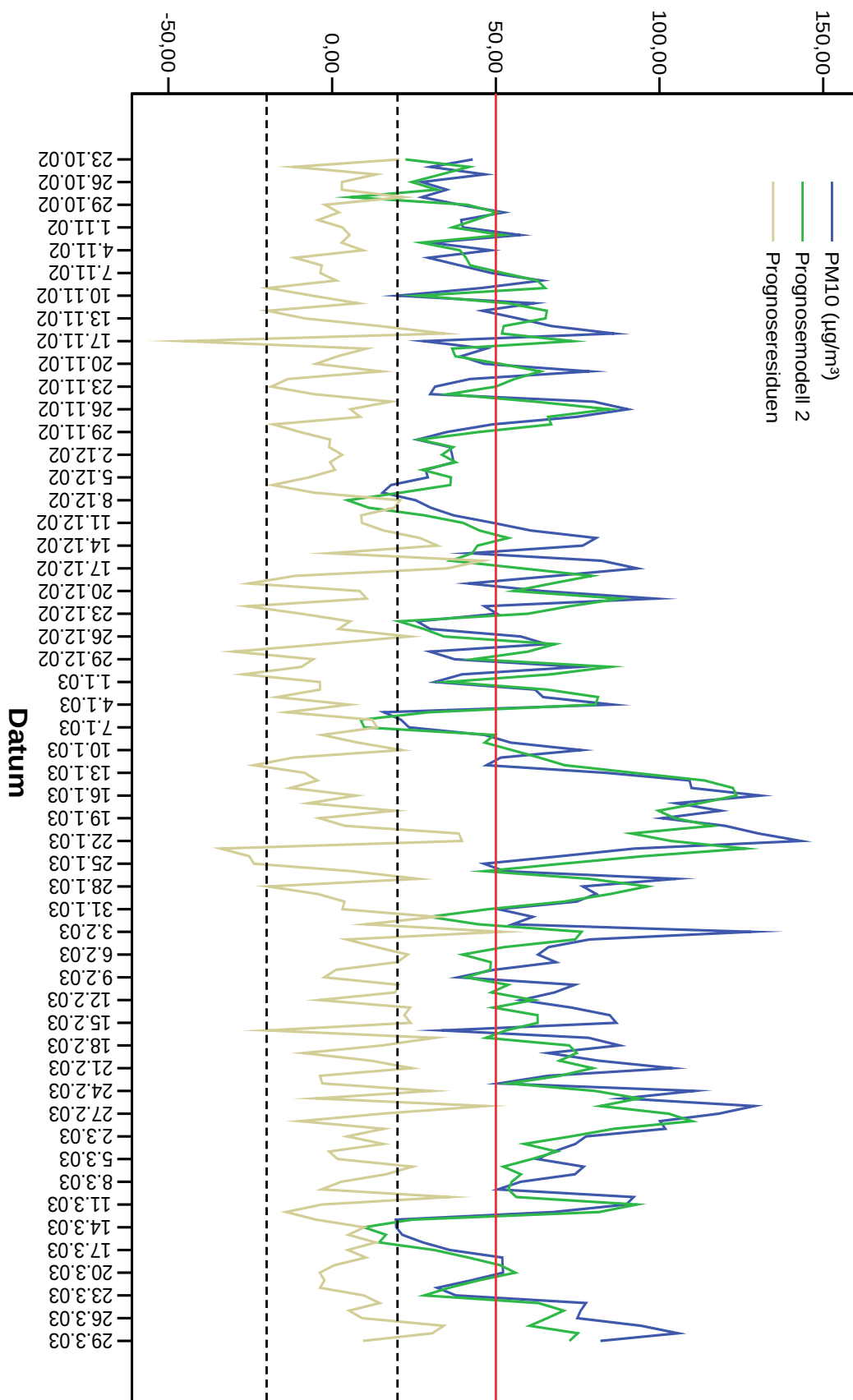


Diagramm 18: Zeitreihendarstellung der Prognoseresiduen, PM10-Werte und Prognosen aus Prognosemodell 2.

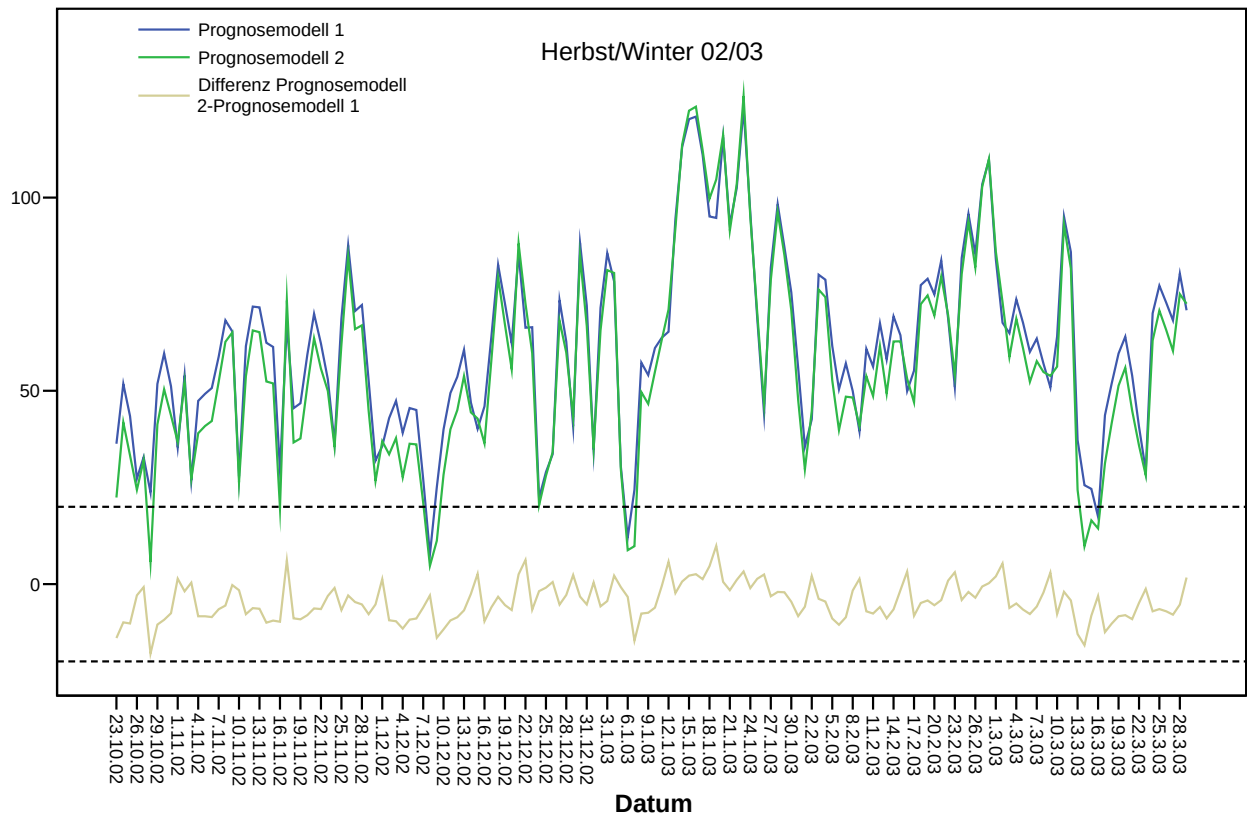


Diagramm 19: Vergleich der beiden Prognosemodelle.

2.5. Kategorisierte Prognosen

Im Folgenden entwickeln wir einige Ideen und Vorschläge auf welche Weise man die diskutierten Modelle sehr einfach graphisch veranschaulichen kann, um den Grad der Belastung auf einen Blick zu erkennen. Dies könnte vor allem für den Einsatz als Informationsinstrument wichtig sein. Zunächst unterteilen wir die PM₁₀ Werte in vier Gruppen (niedrig, mäßig, hoch, sehr hoch) und markieren jede Gruppe mit einer anderen Farbe.

Niedrig	PM-10 < 30	■
Mäßig	30 ≤ PM-10 < 50	■
Hoch	50 ≤ PM-10 < 80	■
Sehr Hoch	PM-10 ≥ 80	■

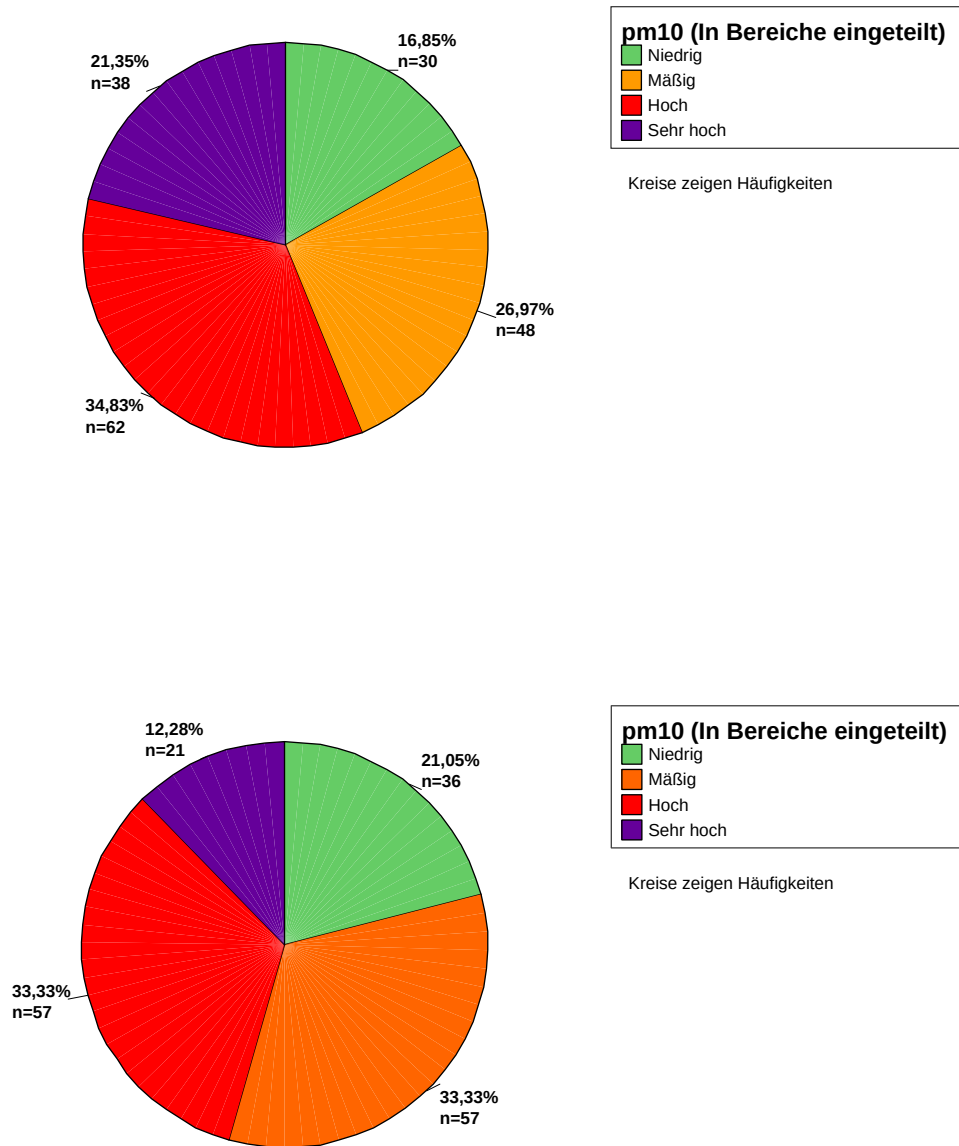
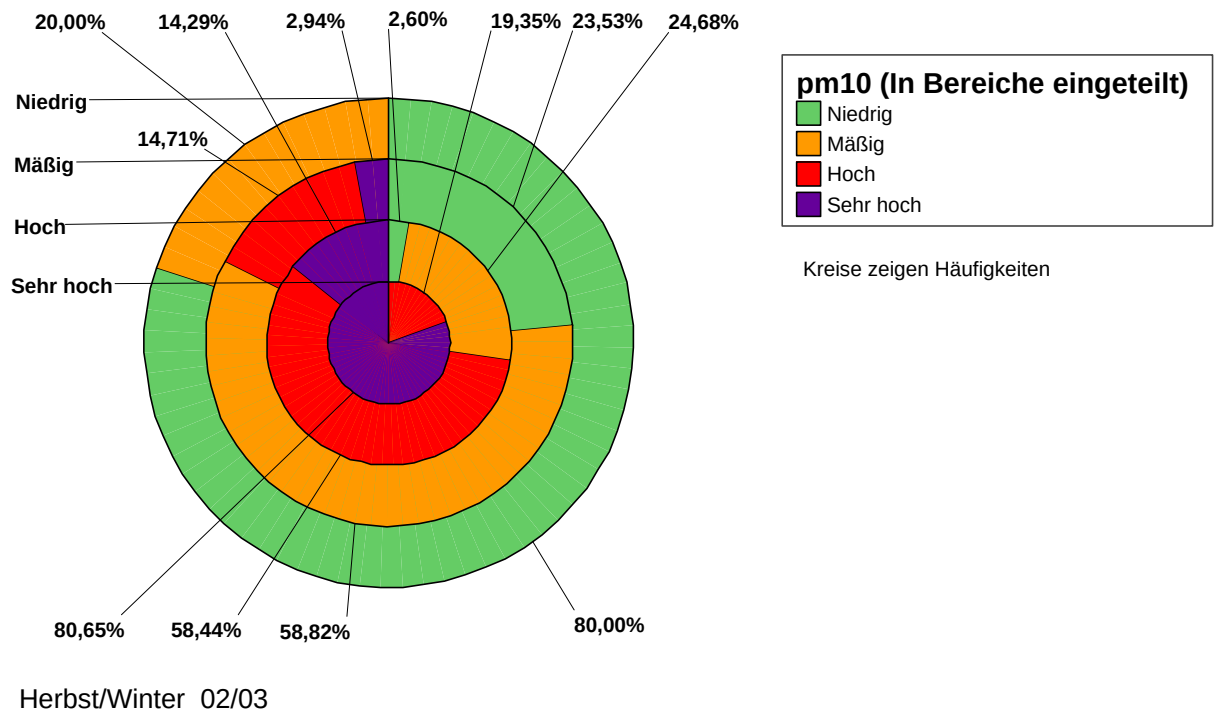


Diagramm 20: Kreisdiagramme mit Häufigkeiten der PM10 Kategorien (oben 02/03, unten 03/04).

Die Kreisdiagramme zeigen deutlich das allgemein höhere PM10 Tagesniveau der Wintersaison 2002/03. In dieser Saison waren mehr als 56% der Tage *hoch* oder *sehr hoch* belastet, während 2003/04 nur ca. 46% der Tage in diese beiden hohen Belastungskategorien fallen.

Prognosemodell 1

**Diagramm 21: Gestapeltes Kreisdiagramm prognostizierte Kategorie vs. beobachtete Kategorie.**

Die Kreisscheiben in Diagramm 21 entsprechen den prognostizierten Kategorien, während die Kreissegmente den Anteil der beobachteten Kategorien angeben. (Z.B. steht die äußere Kreisscheibe für niedrige Prognosen ($< 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In 80% der Fälle war der tatsächlich beobachtete Wert ebenfalls niedrig; zu 20% war er mäßig (zwischen 30 und $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Der innere Kreis steht für sehr hohe Prognosen ($\geq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In mehr als 80% der Fälle war der tatsächlich beobachtete Wert ebenfalls sehr hoch. In knapp 20% war er hoch (zwischen 50 und $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Für Prognosemodell 2 erhält man eine ähnliche Aufteilung (siehe Diagramm 22). Naturgemäß ist dieses Modell geringfügig schlechter, da mit den Koeffizienten der Datenbasis aus 2003/04 die Werte aus 2002/03 prognostiziert werden.

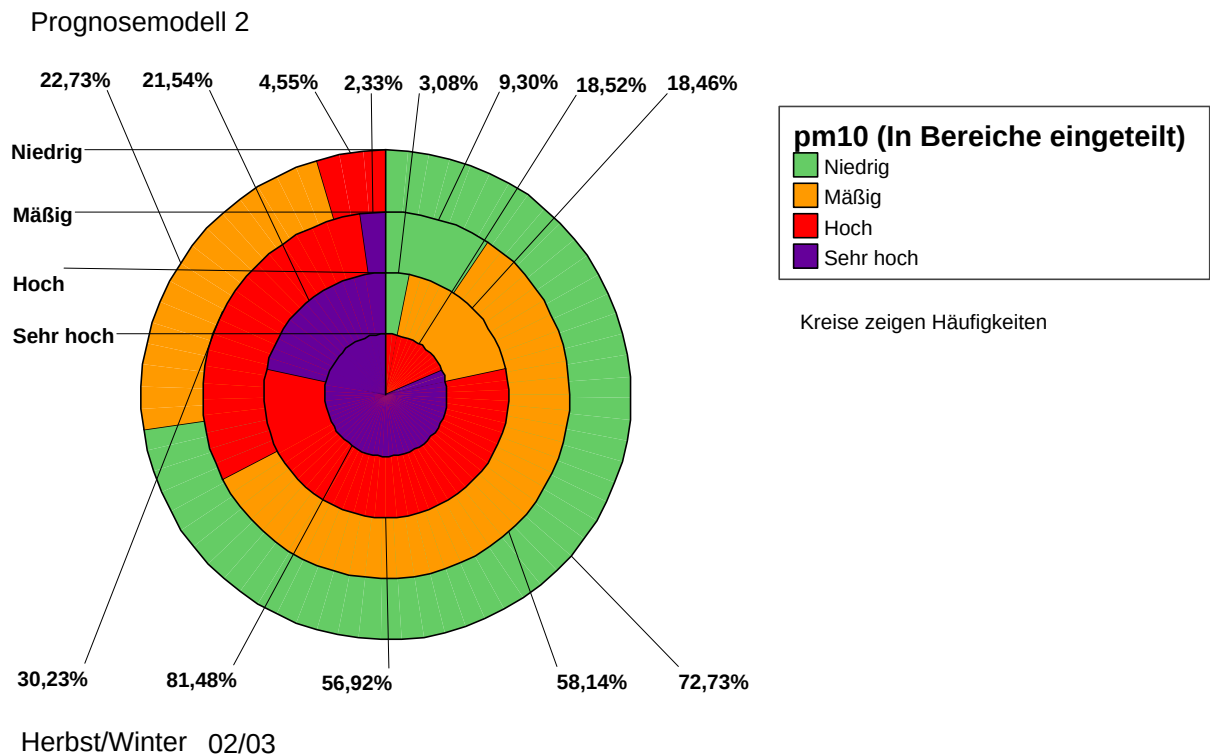


Diagramm 22: Gestapeltes Kreisdiagramm prognostizierte Kategorie vs. beobachtete Kategorie.

Das Problem sind gute Prognosen, die nahe einer Bereichsgrenze für die Kategorien sind, aber durch die Kategorisierung „falsch“ eingefächert werden.

Bsp.: Die Prognose lautet auf $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$; der beobachtete Wert beträgt $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Folgerung: Wir prognostizieren eine falsche Kategorie, obwohl die Prognose nahe dem beobachteten Wert ist.

Um diese Situation etwas abzumildern kann man eine feinere Einteilung in 7 Klassen für die Prognose treffen:

Ausprägung	Klasse	Bereiche	Farbe
Niedrig	1	$\text{PM-10} < 20$	■
	2	$20 \leq \text{PM-10} < 30$	■ ■
Mäßig	3	$30 \leq \text{PM-10} < 40$	■
	4	$40 \leq \text{PM-10} < 50$	■ ■
Hoch	5	$50 \leq \text{PM-10} < 70$	■
	6	$70 \leq \text{PM-10} < 80$	■ ■
Sehr Hoch	7	$\text{PM-10} \geq 80$	■

Ist die Prognose in der Nähe von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (hier zwischen 20 und $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), dann wird die Prognose durch ■ ■ gekennzeichnet. Dies bedeutet, dass die entsprechende Prognose *niedrig*

lautet, aber der tatsächliche Wert durchaus auch *mäßig* sein könnte. Ähnliches geschieht bzgl. der anderen Kategorien.

Die Klasseneinteilung wird hier bewusst „*konservativ*“ gewählt. D.h. wir prognostizieren eher zu hohe als zu niedrige Klassen.

PM-10 Wert	42	30	46	27	34	27	39	52	39	39	57	29	48	29	39	48	63	45	20	61
Prognosemodell 1	35	51	43	27	33	23	52	60	51	36	54	26	47	49	51	59	68	65	28	62
Beobachtete Kategorie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Prognostizierte Kategorie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Die Tabelle zeigt als Beispiel den Zeitraum vom 23.10.02 bis 11.11.02. Es sind zumeist Ähnlichkeiten in den Farbmustern zu erkennen; dies deutet auf eine gute Übereinstimmung der Prognose mit der Beobachtung hin.

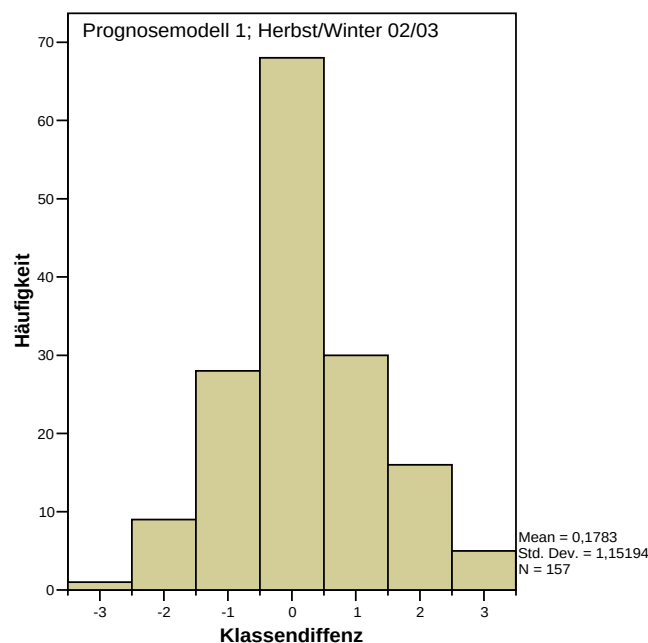


Diagramm 23: Histogramm mit Häufigkeiten der Klassendifferenzen.

Das Merkmal Klassendifferenz bezeichnet die Differenz zwischen der prognostizierten und der beobachteten Klasse. Von den 157 Fällen werden ca. 82% der Prognosen als gut eingestuft (Klassendifferenz -1, 0 oder 1). Von den schlechter eingestuften Prognosen sind 10 zu niedrig (Klassendifferenz -3 oder -2), aber ca. 20 zu hoch (Klassendifferenz +2 oder +3). Extrem schlechte Prognosen mit Klassendifferenzen -3 oder +3 sind aber sehr selten.

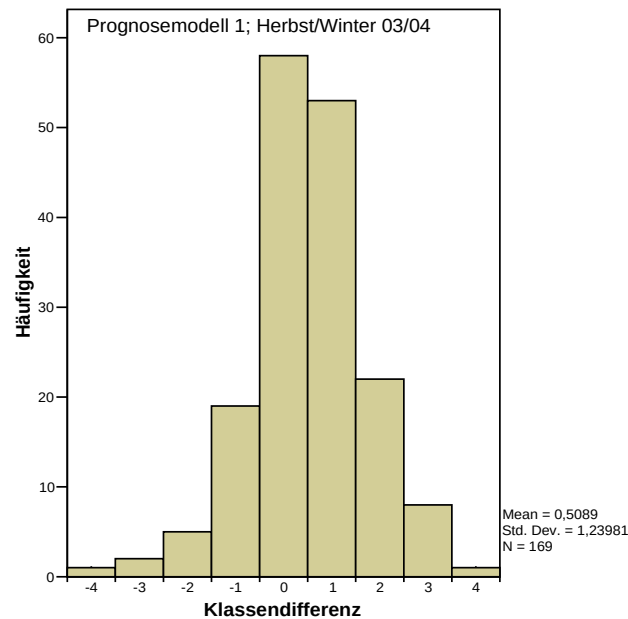


Diagramm 24: Histogramm mit Häufigkeiten der Klassendifferenzen.

Werden mit Prognosemodell 1 (Datenbasis 02/03) Klassen für die Wintersaison 03/04 prognostiziert, dann verschlechtert sich natürlich die Güte der Prognose, was zu erwarten war. Von den 169 Fällen weisen aber immer noch 77% der Klassendifferenzen Werte von -1, 0 oder 1 auf. 10 der schlechteren Prognosen sind zu niedrig, aber ca. 30 zu hoch. Es treten auch etwas mehr extremere Abweichungen mit Klassendifferenzen -4, -3, +3, +4 auf.

2.6. Eintagesprognosemodelle errechnet aus den Daten der Wintersaisons 2002/03 und 2003/04 (Prognosemodell 3 und 4)

Wir haben in den Abschnitten 2.3 und 2.4 zwei Prognosemodelle vorgestellt, die jeweils aus den Daten einer Winterperiode erstellt wurden. Die anschließende Überprüfung am jeweils anderen Datensatz lieferte eine sehr zufrieden stellende Güte und Stabilität des Modells. Wir werden nun ein einziges Modell aus beiden Datensätzen errechnen.

2.6.1. Statistische Zusammenfassung

Das Modell weist einen Bestimmtheitsgrad von ca. 69% mit einer Streuung der Regression von $16,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf.

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,834 ^a	,696	,691	16,70351

a. Einflußvariablen : (Konstante), Kodierter Niederschlag, mittlere Windgeschwindigkeit (m/s), Mo-Fr, Sa oder So/Fe, PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr), Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten

b. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	70,992	4,345		16,338	,000
	Mo-Fr, Sa oder So/Fe	-10,860	1,192	-,285	-9,109	,000
	mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	-21,032	3,701	-,194	-5,682	,000
	Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten	-4,653	,528	-,344	-8,815	,000
	PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr)	,403	,036	,407	11,205	,000
	Kodierter Niederschlag	-11,631	2,060	-,180	-5,646	,000

a. Abhängige Variable: PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

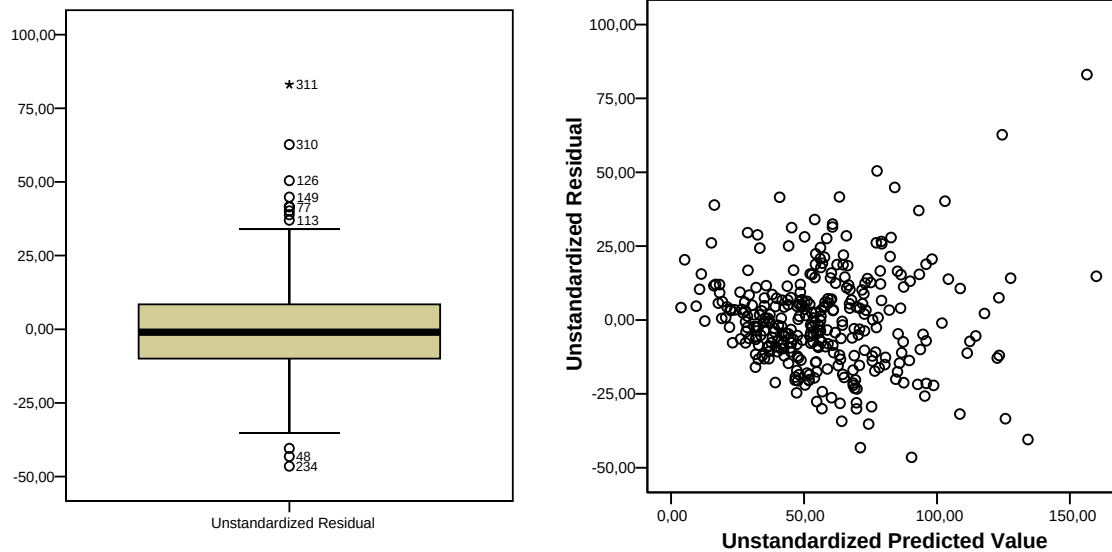


Diagramm 25: Boxplot und Streudiagramm zur Analyse der Residuen.

Der Plot der Residuen gegen die Vorhersagewerte weist eine trichterförmige Gestalt auf und eine Transformation der abhängigen Variablen PM10 ist notwendig. Wir führen eine Quadratwurzeltransformation nach $\sqrt{\text{PM10}}$ aus. Durch diese Transformation wird die Verteilung der Residuen in Richtung Normalverteilung transformiert wie der folgende Boxplot und der Q-Q-Plot in Diagramm 26 zeigen:

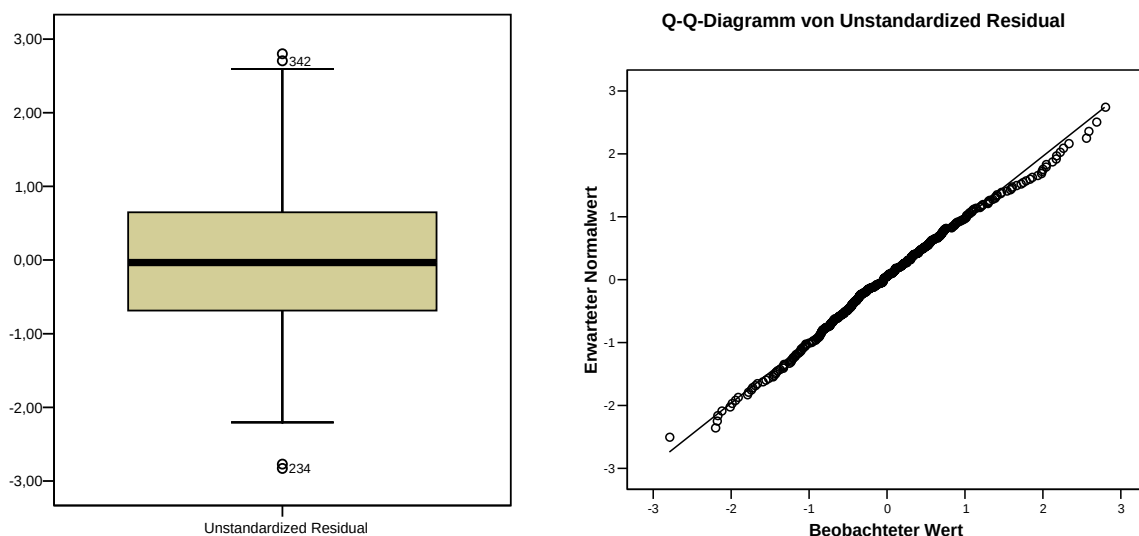


Diagramm 26: Boxplot und Q-Q-Plot zur Analyse der Residuen nach einer Wurzeltransformation.

Die statistischen Tests sprechen ebenfalls für die Hypothese von normalverteilten Residuen.

Tests auf Normalverteilung

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,038	326	,200*	,995	326	,300

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Univariate Statistiken

			Statistik	Standardfehler
Unstandardized Residual	Mittelwert		,0000000	,0562959
	95% Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	-,1107504	
		Obergrenze	,1107504	
	5% getrimmtes Mittel		-,0121580	
	Median		-,0342125	
	Varianz		1,033	
	Standardabweichung		1,016449	
	Minimum		-2,82950	
	Maximum		2,80069	
	Spannweite		5,63019	
	Interquartilbereich		1,34056	
	Schiefe		,198	,135
	Kurtosis		,025	,269

Der Residuenplot in Diagramm 27 weist ein zufälliges Muster ohne Trichterform auf. Durch die Transformation wurde also die Varianz stabilisiert.

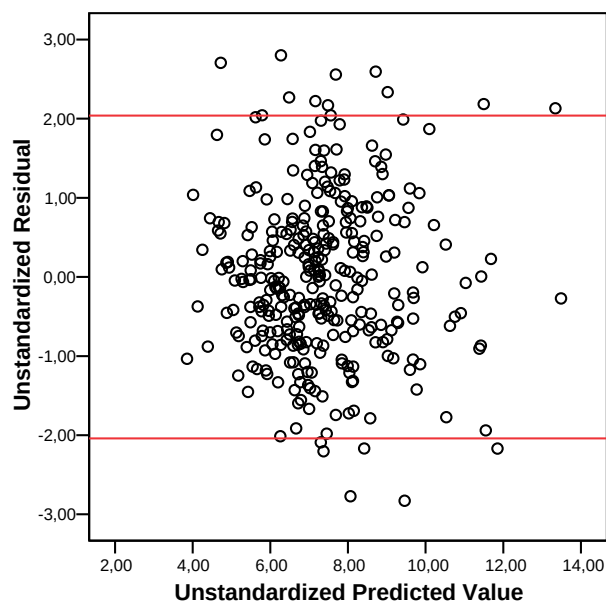


Diagramm 27: Residuen vs. Predicted Values nach einer Wurzeltransformation. Die roten Begrenzungslinien geben den Bereich $[-2s, 2s]$ an.

Das resultierende Modell bezeichnen wir als **Prognosemodell 4**, das wie folgt gegeben ist.

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,839 ^a	,704	,699	1,02436

a. Einflußvariablen : (Konstante), Kodierter Niederschlag, mittlere Windgeschwindigkeit (m/s), Mo-Fr, Sa oder So/Fe, PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr), Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten

b. Abhängige Variable: Sqrt(PM10)

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	8,616	,266		32,333	,000
	Mo-Fr, Sa oder So/Fe	-,746	,073	-,315	-10,208	,000
	mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	-1,592	,227	-,236	-7,012	,000
	Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten	-,271	,032	-,322	-8,362	,000
	PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr)	,024	,002	,382	10,671	,000
	Kodierter Niederschlag	-,848	,126	-,211	-6,713	,000

a. Abhängige Variable: Sqrt(PM10)

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden wir als Prognose für PM10 nun das Quadrat der Prognose von Sqrt(PM10) verwenden. Man beachte, dass wir damit nicht exakt den Erwartungswert von PM10 modellieren. Dieser ergibt sich eigentlich aus

$$E(\text{PM10}) = (\text{Prognose Sqrt}(\text{PM10}))^2 + \sigma^2.$$

Der Bias kann aber aufgrund des kleinen $\sigma^2 (=1.05)$ vernachlässigt werden.

2.7. Prognose extremer Werte

Neben einem Einsatz des Prognosemodells als Informationsquelle, ist auch ein funktionaler Einsatz geplant. Bei prognostizierten sehr hohen PM10 Werten (z.B. Werte über $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sind in Zukunft kurzfristige Maßnahmen vorgesehen (etwa gezielte Fahrverbote, Tempolimits etc.), die für entsprechende Entlastung sorgen sollen. Ungünstige Prognosewerte werden damit zu einem sehr sensiblen Thema und eine hohe Aussagekraft des Modells ist dadurch unumgänglich.

MÖGLICHER LÖSUNGSANSATZ

- Werden Werte über einem fiktiven und niedrigen *Prognoseschwellwert* (z.B. $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vorhergesagt, dann wird dies bereits als Überschreitung des hohen *Beobachtungsschwellwertes* von z.B. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ angesehen.

PROBLEM

- Wir wollen erreichen, dass mit großer Wahrscheinlichkeit keine Überschreitung des hohen *Beobachtungsschwellwertes* (z.B. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) prognostiziert wird, wenn der tatsächlich beobachtete Wert unter dem niedrigen Schwellwert (z.B. $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) liegt.

Richtige Entscheidung. Normale Belastung

- Wir wollen erreichen, dass mit großer Wahrscheinlichkeit eine Überschreitung des hohen Schwellwertes (z.B. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) prognostiziert wird, wenn der tatsächlich beobachtete Wert den hohen Schwellwert überschreitet.

Richtige Entscheidung. Hohe Belastung

Wir führen folgende **Entscheidungsregel** ein:

- Falls der Prognosewert kleiner als $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dann wird keine Überschreitung des *Beobachtungsschwellwertes* angezeigt und es sind keine Maßnahmen erforderlich. **Normale Belastung, kein Handlungsbedarf.**
- Falls der Prognosewert größer als $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dann wird eine Überschreitung des *Beobachtungsschwellwertes* angezeigt und es werden Maßnahmen zur Reduktion von PM10 eingeleitet. **Hohe Belastung, Handlungsbedarf.**

Im Folgenden werden einige Ergebnisse, die auf dieser Entscheidungsregel basieren, angegeben.

PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (In Bereiche eingeteilt) * Prognose (In Bereiche eingeteilt) Kreuztabelle

			Prognose (In Bereiche eingeteilt)		Gesamt
			<75	>=75	
PM10 (µg/m³) (In Bereiche eingeteilt)	Normal (<75)	Anzahl	237	11	248
		% von PM10 (µg/m³) (In Bereiche eingeteilt)	95,6%	4,4%	100,0%
	Hoch (zwischen 75 und 100)	Anzahl	31	17	48
		% von PM10 (µg/m³) (In Bereiche eingeteilt)	64,6%	35,4%	100,0%
	Sehr hoch (>100)	Anzahl	2	28	30
		% von PM10 (µg/m³) (In Bereiche eingeteilt)	6,7%	93,3%	100,0%
Gesamt		Anzahl	270	56	326
		% von PM10 (µg/m³) (In Bereiche eingeteilt)	82,8%	17,2%	100,0%

Der Kreuztabelle ist zu entnehmen:

- *Der PM10 Wert überschritt an 78 von 326 Tagen einen Schwellwert von $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (48 Tage zwischen 75 und $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 30 Tage mehr als $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Von diesen 78 Tagen wurden mittels Prognosemodell 45 mal Überschreitungen des Schwellwertes angezeigt (Maßnahmen werden ergriffen). Weiters wurden 33 von den 78 Tagen als „Normal“ (<75) eingestuft (keine Maßnahmen werden ergriffen). Von diesen 33 Tagen waren 31 „Hoch“ aber nur 2 „Sehr hoch“.*

FAZIT: Der Bereich zwischen 75 und $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kann als Grauzone betrachtet werden. Hier sind Maßnahmen nützlich, aber nicht unbedingt notwendig. Nur an 2 Tagen an denen Maßnahmen unbedingt erforderlich waren, wurden keine Maßnahmen gesetzt.

- *An 56 von 326 Tagen wurde ein PM10 Mittel von über $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ prognostiziert. Von diesen 56 Tagen waren 45 „Hoch“ bzw. „Sehr hoch“ belastet. Hingegen waren 11 Tage in Wirklichkeit „Normal“.*

FAZIT: Wurde ein Wert von über $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ prognostiziert, dann war zu ca. 80% der PM10 Wert tatsächlich „Hoch“ bzw. „Sehr hoch“. An 11 Tagen wurden Maßnahmen ergriffen, die nicht erforderlich gewesen wären. (An diesen Tagen wurden großteils Belastungen um $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über dem Grenzwert, festgestellt. Siehe Diagramm 29.)

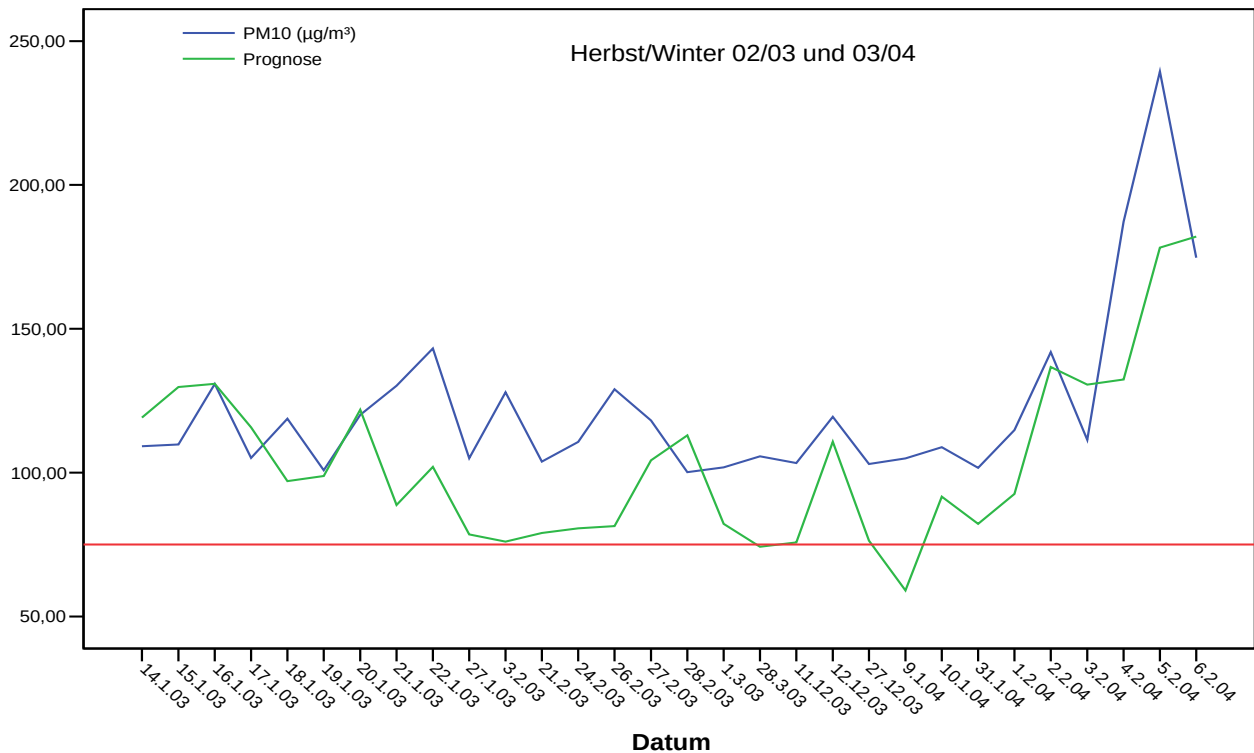


Diagramm 28: Prognose und PM10 an Tagen, wo der PM10 Wert einen Schwellwert von 100 µg/m³ überschritten hat.

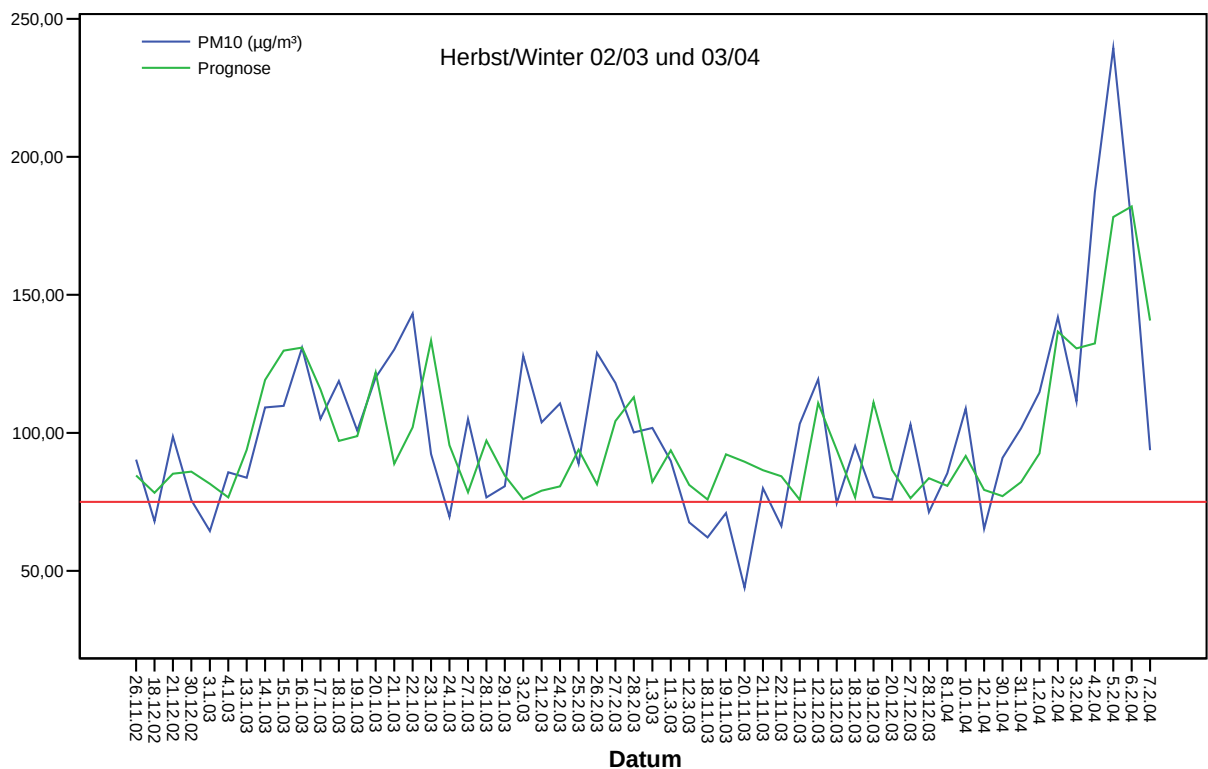


Diagramm 29: Prognose und PM10 an Tagen, wo der Prognosewert einen Schwellwert von 75µg/m³ überschritten hat.

2.8. Prognosemodell für Graz-Süd

Unterschiedliche Messstellen in Graz liefern auch unterschiedliche PM10 Belastungen. Ein Prognosemodell kann daher nur für jene Region verwendet werden, in der die Messungen durchgeführt wurden und aus deren Daten das Modell errechnet wurde. Wir wollen nun untersuchen, welches Modell sich für Graz-Süd ergibt. Die Daten stammen aus der Wintersaison 2003/04 (01.10.03 - 31.03.04; 183 Beobachtungen; Niederschlagswerte aus Graz- Nord)

2.8.1. Statistische Zusammenfassung

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,862 ^a	,743	,735	1,12932

a. Einflußvariablen : (Konstante), Kodierter Niederschlag / Graz Nord, Werktag, Samstag, Sonn- und Feiertag, Windgeschwindigkeit (m/s), mittel_20, Temperaturdifferenz Graz-Kalkleiten

b. Abhängige Variable: Sqrt(PM10)

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	8,122	,325		24,959	,000
	Werktag, Samstag, Sonn- und Feiertag	-,412	,108	-,147	-3,822	,000
	Windgeschwindigkeit (m/s)	-2,176	,313	-,304	-6,947	,000
	Temperaturdifferenz Graz-Kalkleiten	-,278	,053	-,279	-5,197	,000
	mittel_20	,025	,003	,406	8,503	,000
	Kodierter Niederschlag / Graz Nord	-1,099	,184	-,236	-5,989	,000

a. Abhängige Variable: Sqrt(PM10)

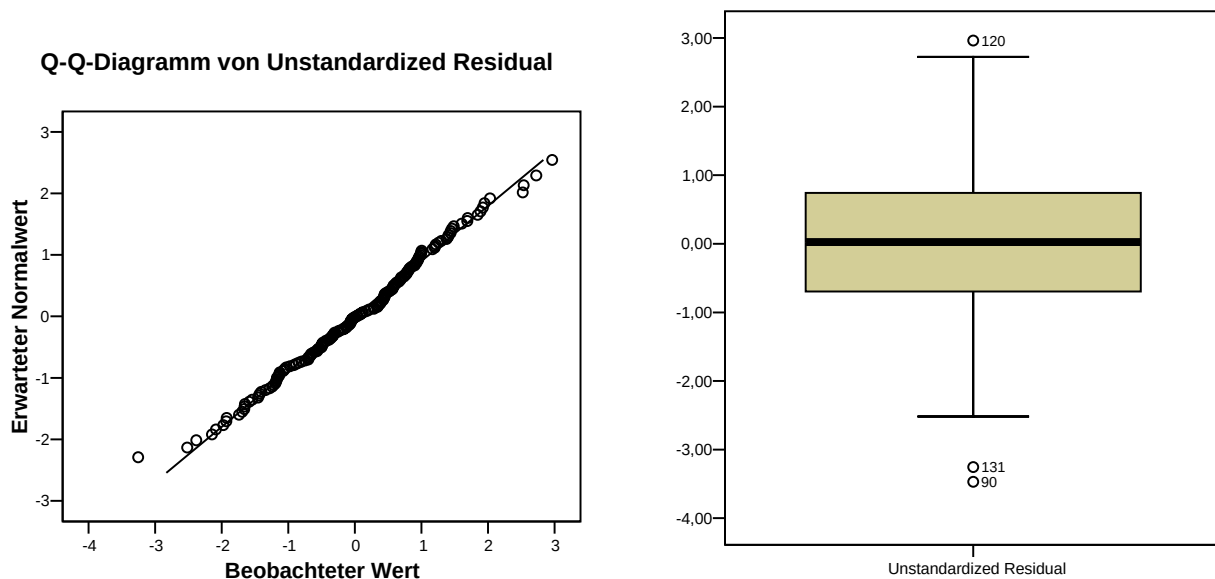


Diagramm 30: Q-Q-Plot und Boxplot zur Analyse der Residuen.

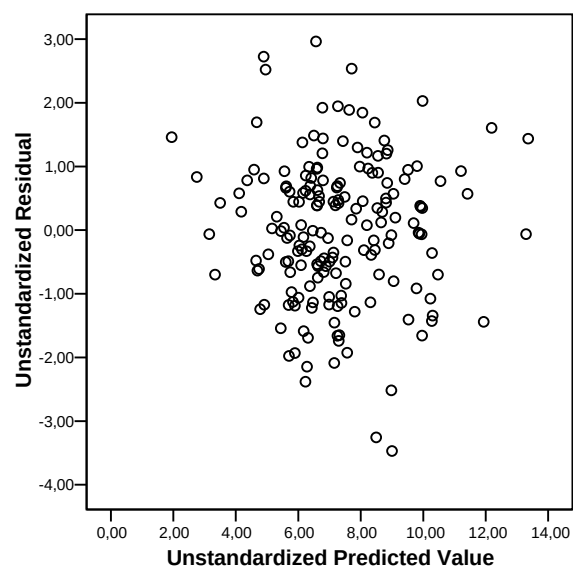


Diagramm 31: Streudiagramm Predicted Values vs. Residuals.

Tests auf Normalverteilung

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,061	181	,200*	,994	181	,633

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Aus den statistischen Untersuchungen sind keine Verletzungen der Modellannahmen ersichtlich. Auch die Anpassungsgüte des Modells (74 %) ist sehr hoch. Folgende Unterschiede in den Koeffizienten zu **Prognosemodell 4** sind anzumerken:

- Eine kleinere Konstante
- Faktor *tag* (geht hier weniger stark ein; evtl. gleichmäßigeres Verkehrsaufkommen);
- Faktoren *wige* und *nied* gehen etwas stärker ein.
- *mittel_20* und *ltusg_k* bleiben nahezu unverändert.

3. Überschreitungswahrscheinlichkeiten

Meteorologische Prognosen werden oft durch Wahrscheinlichkeiten angegeben: 80% Regenwahrscheinlichkeit, die Wahrscheinlichkeit von Gewittern ist sehr hoch,...

In diesem Abschnitt werden wir zeigen, dass die Entscheidungsregel von Abschnitt 2.6.2 äquivalent zu folgender Regel ist.

Man prognostiziere die Wahrscheinlichkeit, dass der *untere Beobachtungsschwellwert* von 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten wird und wende folgende Entscheidungsregel an:

- Ist die Prognosewahrscheinlichkeit kleiner als 50%, dann wird keine Überschreitung des Beobachtungsschwellwertes angezeigt und es werden keine Maßnahmen eingeleitet.

Normale Belastung, kein Handlungsbedarf.

- Ist die Prognosewahrscheinlichkeit größer gleich 50%, dann wird eine Überschreitung des Beobachtungsschwellwertes angezeigt und es sind entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Hohe Belastung, Handlungsbedarf.

Unser Prognosemodell 4 für den Tag k lautet:

$$\text{Sqrt}(\text{PM10})(k) = \text{Prognose}(k) + e_k,$$

wobei (e_k) eine Folge von i.i.d. $N(0,1.06)$ verteilten Zufallsvariablen ist. Damit gilt:

$$P(\text{PM10}(k) > 75) = P(\text{Sqrt}(\text{PM10})(k) > \text{Sqrt}(75)) = P(e_k > \text{Sqrt}(75) - \text{Prognose}(k))$$

Es gilt folgende einfache Äquivalenz:

Ist $\text{Prognose}(k) > \text{Sqrt}(75)$, genau dann ist $P(\text{PM}_{10}(k) > 75) > 0,50$.

Die Zeitreihendarstellung in Diagramm 32 zeigt die gute Übereinstimmung der Prognose mit den beobachteten Werten:

Bei einer prognostizierten Wahrscheinlichkeit größer als 50% ist der PM₁₀-Wert zumeist im Bereich zwischen $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oder auch größer als $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Bei einer prognostizierten Wahrscheinlichkeit kleiner als 50% ist der PM₁₀-Wert sehr häufig unter $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, manchmal auch zwischen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Eine Überschreitung über $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ist hier nicht zu erkennen.

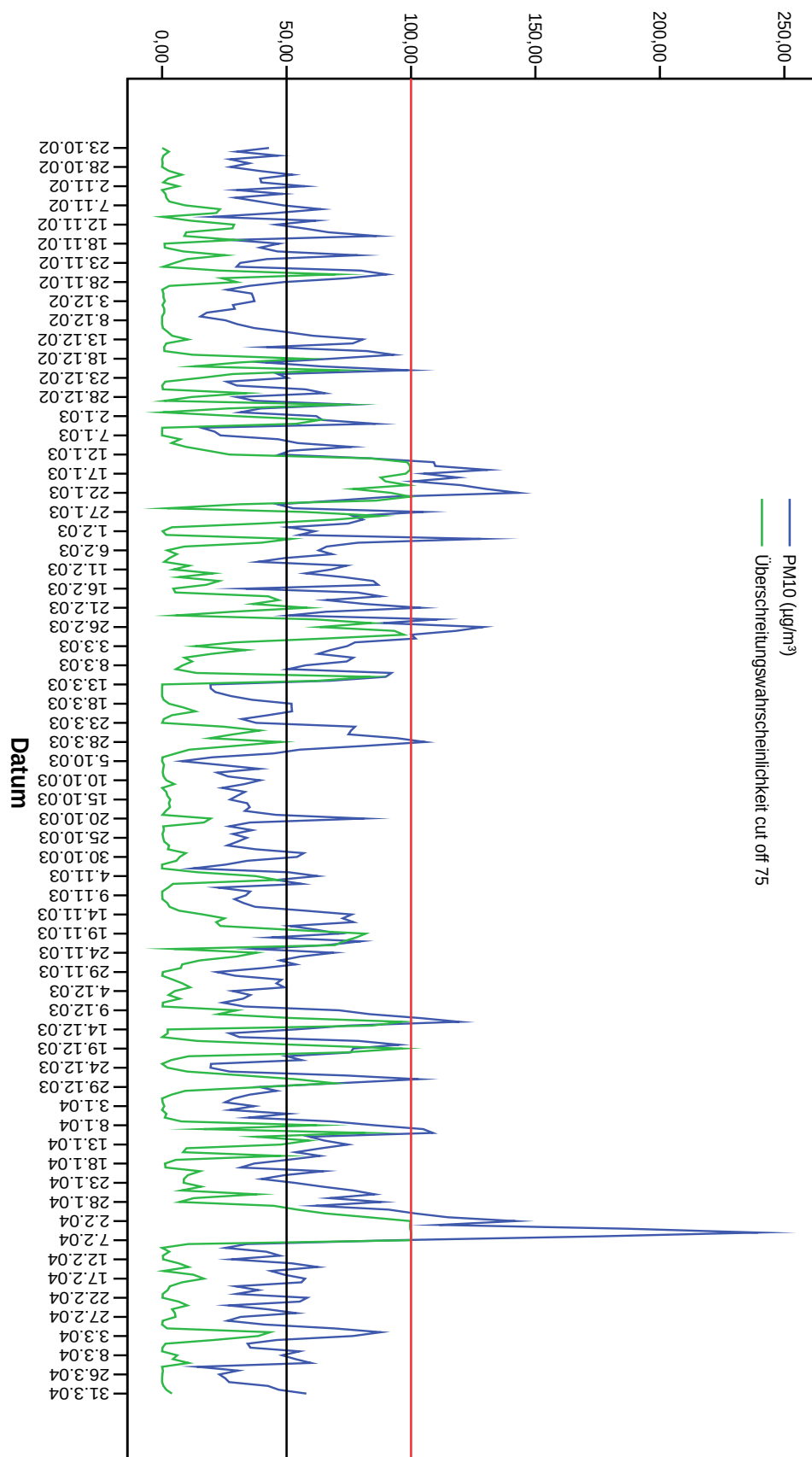


Diagramm 32: Zeitreihendarstellung des PM10 Verlaufs und Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

4. Erweitertes Prognosemodell errechnet aus Daten der Wintersaisons 2002/03 und 2003/04 (Prognosemodell 5)

Die bisherigen Modelle lieferten sehr zufrieden stellende Ergebnisse bezüglich der Güte von Prognosen. Des weiteren gab es bei den Modellen für den wurzeltransformierten PM10 Wert keine Anzeichen auf eine Verletzung der Modellannahmen. Die Tests auf die Stabilität der Modelle bestätigen ebenfalls deren Tragfähigkeit. Wir wollen nun ein alternatives Modell vorstellen, welches sich von den ursprünglichen Modellen durch die Hinzunahme eines weiteren Parameters unterscheidet. Dieser Parameter klassifiziert die Daten nach der durchschnittlichen Tagestemperatur:

- 0, falls die durchschnittliche Temperatur der letzten 24 Stunden > 0 ;
- 1, falls die durchschnittliche Temperatur der letzten 24 Stunden ≤ 0 .

Wir bezeichnen diesen Parameter mit `lute_kat`, bzw. mit `lute_kat_20` (24-Stundenmittel errechnet um 20 Uhr), `lute_kat_16`, etc.

Man beachte, dass die Hinzunahme dieses Parameters **keine zusätzliche meteorologische Prognose** notwendig macht. Es ist im Mittel ein deutlicher niedrigerer PM10 Wert zu erwarten, wenn die durchschnittliche Temperatur des Vortages positiv war.

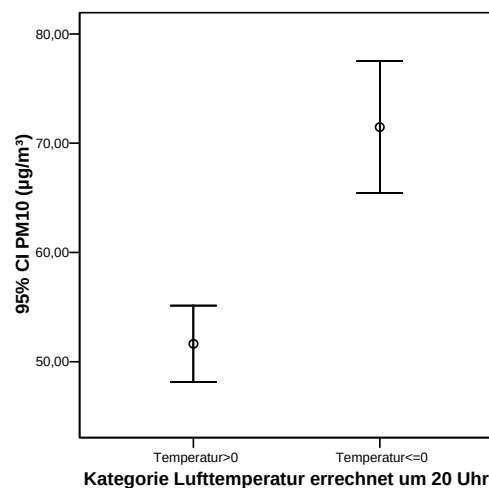


Diagramm 33. Fehlerbalken der kategorisierten Lufttemperatur.

4.1. Statistische Zusammenfassung

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,858 ^a	,736	,731	,96856

a. Einflußvariablen : (Konstante), Lufttemperatur Vortag unter 0, Mo-Fr, Sa oder So/Fe, PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr), Kodierter Niederschlag, mittlere Windgeschwindigkeit (m/s), Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten

b. Abhängige Variable: Sqrt(PM10)

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	8,216	,260		31,597	,000
	Mo-Fr, Sa oder So/Fe	-,759	,069	-,320	-10,976	,000
	mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	-1,290	,220	-,191	-5,866	,000
	Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten	-,277	,031	-,330	-9,042	,000
	PM10 24-Stunden Mittel (20 Uhr)	,023	,002	,375	11,081	,000
	Kodierter Niederschlag	-,777	,120	-,193	-6,480	,000
	Lufttemperatur Vortag unter 0	,786	,126	,186	6,240	,000

a. Abhängige Variable: Sqrt(PM10)

Q-Q-Diagramm von Normal von Unstandardized Residual

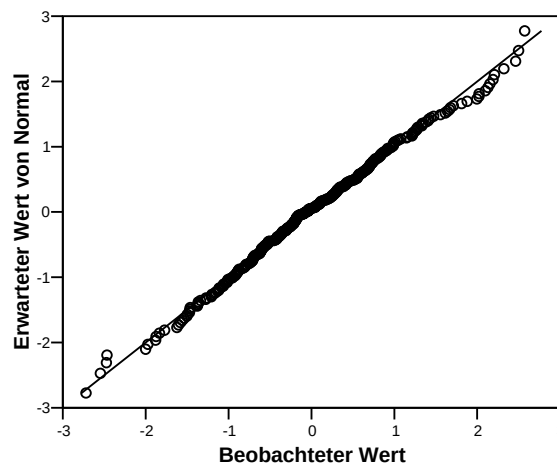


Diagramm 34: Q-Q-Plot zur Analyse der Residuen.

Tests auf Normalverteilung

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Unstandardized Residual	,043	326	,200*	,995	326	,298

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

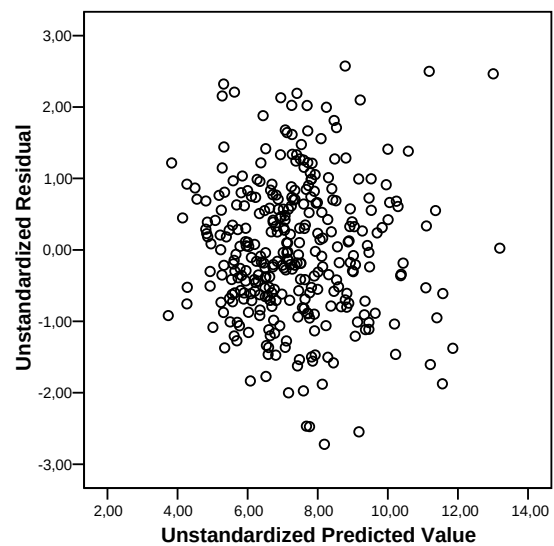
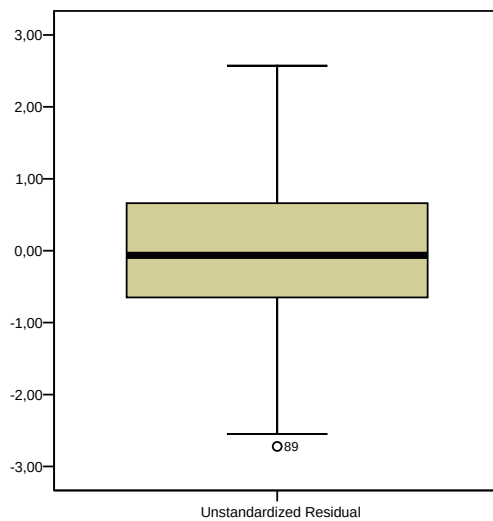


Diagramm 35: Streudiagramm und Boxplot zur Analyse der Residuen.

Die Güte des Prognosemodells 5 erhöht sich gegenüber der Güte von Prognosemodell 4 von 69,9 % auf 73,1 %. Der Standardfehler der Regression verkleinert sich von 1,02 auf 0,97.

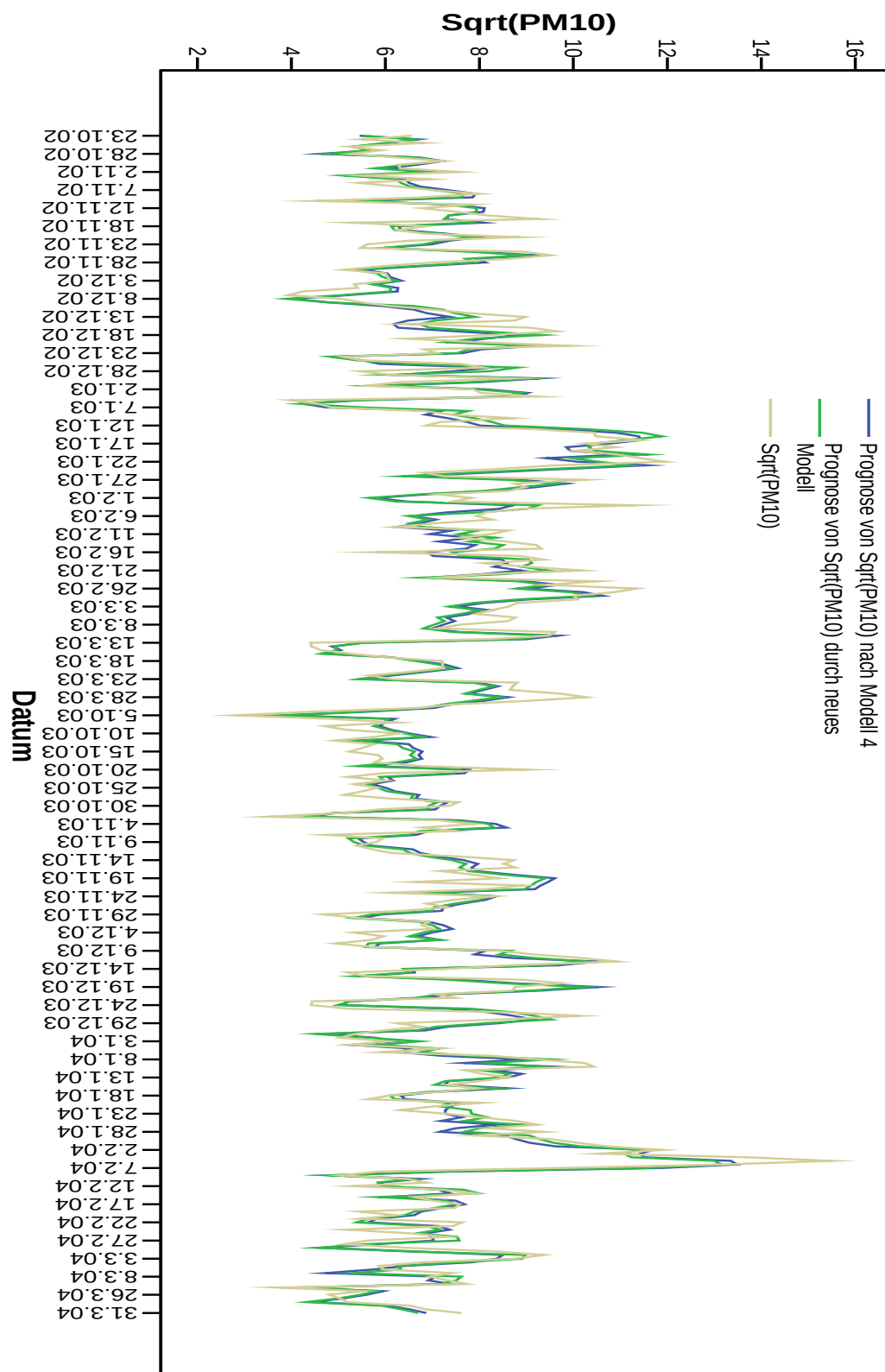


Diagramm 36. Vergleich von Modell 4 und Modell 5 mit den tatsächlich beobachteten Werten.

5. Reduktionspotential durch Verkehrsregulation

5.1. Modellannahmen

Wir wollen nun durch ein sehr einfaches Modell versuchen, das Reduktionspotential durch verkehrsregulierende Maßnahmen zu modellieren. Wir gehen dabei von den folgenden Überlegungen und Annahmen aus:

- Der durchschnittliche immissionsrelevante PM10-Gehalt an einem Tag x setzt sich aus einem vom Verkehr verursachten Anteil em_v (Auspuffemission, Reifenabrieb, Aufwirbelung, etc.) und einen durch einen Rest $(1 - em_v)$ (Hausbrand, Industrie, Pollen, etc.) verursachten Anteil zusammen. Das heißt der Beitrag des Verkehrs am Tag x zum Immissionswert $pm10$ beträgt $em_v * pm10$.

BEMERKUNG: Die in diversen Studien sehr unterschiedlich bewertete Größenordnung von Abrieb und Aufwirbelung ist für unser Modell nicht relevant. Es ist durchaus möglich, dass umweltfreundliche Verkehrsmittel, die keine oder wenig direkte Emissionen aus dem Auspuff verzeichnen, nur durch Aufwirbelung zu einer verstärkten PM10 Konzentration beitragen.

- Verkehrsaufkommen und em_v seien direkt proportional. D.h. erhöht sich unter konstanten meteorologischen Umständen das Verkehrsaufkommen um einen Faktor V , dann erhöht sich der PM10-Wert auf $(em_v * V + (1 - em_v)) * pm10$.
- Die durch LKW (schwere Fahrzeuge) verursachte PM10-Belastung ist L -mal so hoch wie jene durch PKW verursachte.
- Wir setzen voraus, dass der Gesamtverkehr zu einem Anteil S an Schwerfahrzeugen besteht.

Es ist hierbei darauf zu achten, dass besonders die Variablen em_v und L in den verschiedenen Studien sehr unterschiedlich bewertet werden. Im **Emissionskataster Graz 1995 [6]** werden die Faktoren Verkehr, Hausbrand und Betriebe in folgende Relation gestellt

- Verkehr 23 %
- Hausbrand 64 %
- Betriebe 13 %

In einer korrigierten Version (von Dr. W. PRUTSCH, Umweltamt) wurde anschließend folgende Zusammensetzung angenommen:

- Verkehr 70 %

- Hausbrand 25 %
- Betriebe 5 %

Weiters ist zu beachten, dass die hier verwendete Variable L einen durchschnittlichen Multiplikationsfaktor darstellt. In der Regel ergeben sich natürlich gravierende Unterschiede allein beim Vergleich von Ruß verursachenden Dieselmotoren ohne Partikelfilter oder Ottomotoren. Weiters sind der Aufwirbelungs- und Straßenabriebsfaktor sehr unsichere und je nach Straßenbeschaffenheit unterschiedlich zu bewertende Einflussfaktoren. Der Anteil s an Schwerfahrzeugen wird hier auf etwa 5-10% geschätzt (5.5% laut **Emissionskataster Graz 1995 [6]**).

Wir verwenden die folgenden Bezeichnungen:

Variablenbezeichnung	Beschreibung
r_{PKW}	Reduktion der PKW um r_{PKW} %
r_{LKW}	Reduktion der LKW um r_{LKW} %
L	Verhältnis PM10 Imissionsbelastung LKW zu PKW
em_v	Anteil des Verkehrs an der Gesamtemission
s	Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen

Damit erhalten wir den Reduktionsfaktor red :

$$(iii) \quad red = (1 - em_v) + \left(\frac{(1 - r_{PKW} / 100) + L s (1 - r_{LKW} / 100)}{1 + L s} em_v \right).$$

Rechenbeispiel A: Wir gehen davon aus, dass für das PM10-Tagesmittel am Tag x ein Wert von $80\mu g/m^3$ zu erwarten ist. Durch eine Veranstaltung werden Teile der Innenstadt gesperrt und dadurch eine Reduktion des PKW-Aufkommens um 30% ($r_{PKW}=30$) bzw. eine Reduktion des LKW-Aufkommens um 15% ($r_{LKW}=15$) erreicht. Wir nehmen weiters an, dass der Anteil der LKW am gesamten KFZ-Aufkommen 6% ($s=0.06$) beträgt. Gehen wir davon aus, dass **etwa 50% der gesamten Partikelemission durch KFZ Verkehr verursacht** wird ($em_v = 0.5$) und ein LKW im Mittel ein 10-faches Belastungspotential für Feinstaub besitzt ($L=10$), ergibt dies einen Reduktionsfaktor für PM10 von $red=0.87$.

Die zu erwartende PM10-Belastung, wäre auf $80 \cdot 0.87 = 70\mu g/m^3$ zu korrigieren.

Rechenbeispiel B: Verkehrszählungen zeigen, dass an Sonn- und Feiertagen in Graz eine Reduktion des Gesamtverkehrsaufkommens um 35% gegeben ist. Nehmen wir an, dass 30% davon PKW und 5% LKW sind. Die restlichen Variablen werden wie oben angenommen.

Damit sind $r_{\text{PKW}}=32\%$ und $r_{\text{LKW}}=83\%$. Es ergibt sich ein Reduktionsfaktor $red=0.74$, also etwa $\frac{3}{4}$ des ursprünglichen Wertes. Ein Vergleich mit den Daten aus den Jahren 02/03 und 03/04 zeigt, dass der empirische Reduktionsfaktor bei etwa 0.7 liegt. Es ist nahe liegend den Hausbrand und natürliche PM10-Verursacher (Landwirtschaft, Pollenflug, etc.) nicht vom Wochentag abhängig zu machen. Es bleiben also neben dem Verkehr noch Industrie und Gewerbe, die durch etwaige geringere Produktion eine vom Wochentag abhängige PM10 Emissionsquelle darstellen. Diese Quelle ist laut Emissionskataster für Graz allerdings insgesamt weniger relevant.

An Samstagen ist das Verkehrsaufkommen in Graz-Mitte um ca. 12% geringer als an Werktagen. Nehmen wir an, dass 9% davon PKW und 3% LKW sind, dann ergibt sich etwa $r_{\text{PKW}}=10\%$ und $r_{\text{LKW}}=50\%$. Somit ist $red=0.88$. Ein Vergleich mit den Daten aus den Jahren 2002/03 und 2003/04 zeigt, dass der empirische Reduktionsfaktor auch bei etwa 0.88 liegt.

5.2. Graphische Darstellungen und Tabellen

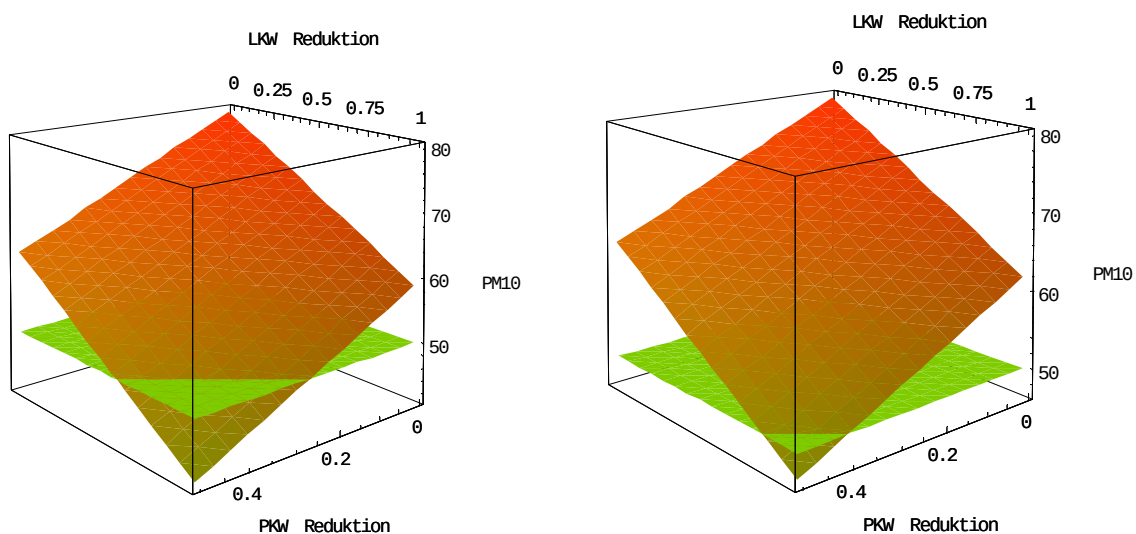


Diagramm 37: Bei einer PM10-Grundbelastung (100 % Verkehr) von $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ zeigen die Diagramme für $L = 10$, $s = 0.06$ und $em_v = 0.7$ (links) bzw. $em_v = 0.6$ (rechts) die Abnahme der PM10 Konzentration bei entsprechender Entlastung durch PKW und LKW.

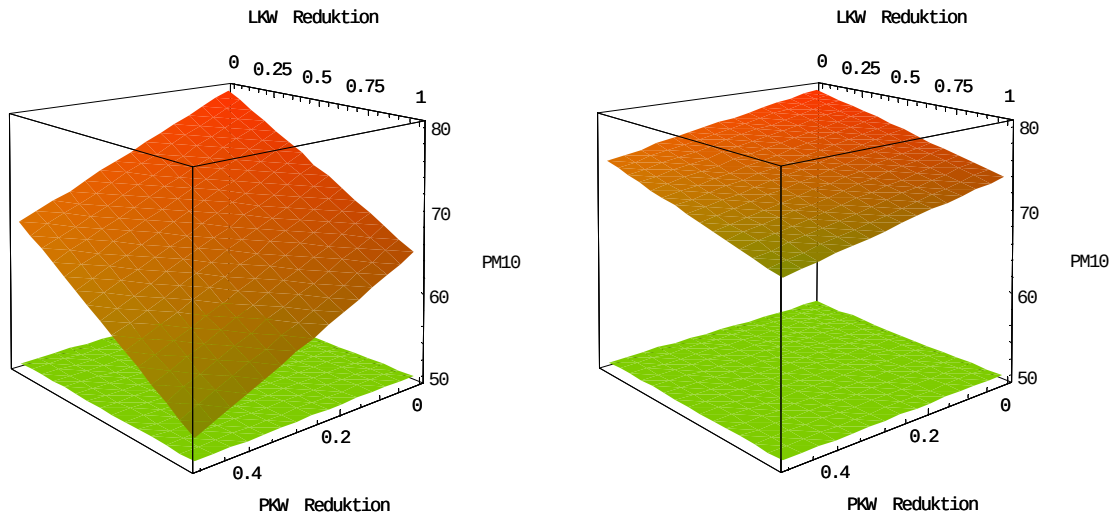


Diagramm 38: Bei einer PM10-Grundbelastung (100 % Verkehr) von $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ zeigen die Diagramme für $L = 10$, $s = 0.06$ und $em_v = 0.5$ (links) bzw. $em_v = 0.2$ (rechts) die Abnahme der PM10 Konzentration bei entsprechender Entlastung durch PKW und LKW.

Tabelle 1: PM10 Änderung in Abhängigkeit von PKW/LKW Verkehrsaufkommen.
 $L = 10$, $s = 0.06$, $em_v = 0.7$; (Immissionsbelastung LKW:PKW = 10:1; LKW Anteil 6 %; Verkehrsanteil an Immissionen 70 %.)

PKW/LKW-Zunahme	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	0 %
50 %	1.48	1.43	1.38	1.32	1.27	1.22
40 %	1.44	1.39	1.33	1.28	1.23	1.18
30 %	1.39	1.34	1.29	1.24	1.18	1.13
20 %	1.35	1.30	1.25	1.19	1.14	1.09
10 %	1.31	1.25	1.20	1.15	1.10	1.04
0 %	1.26	1.21	1.16	1.10	1.05	1.00
PKW/LKW-Reduktion	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
0 %	1.00	0.95	0.90	0.84	0.79	0.74
10 %	0.96	0.90	0.85	0.80	0.75	0.69
20 %	0.91	0.86	0.80	0.75	0.70	0.65
30 %	0.86	0.81	0.77	0.72	0.65	0.60
40 %	0.83	0.77	0.72	0.67	0.61	0.56
50 %	0.78	0.73	0.68	0.62	0.57	0.52

Tabelle 2: PM10 Änderung in Abhängigkeit von PKW/LKW Verkehrsaufkommen.

$L = 10$, $s = 0.06$, $em_v = 0.5$; (Immissionsbelastung LKW:PKW = 10:1; LKW Anteil 6 %; Verkehrsanteil an Immissionen 50 %.)

PKW/LKW-Zunahme	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	0 %
50 %	1.34	1.31	1.27	1.23	1.19	1.16
40 %	1.31	1.28	1.24	1.20	1.16	1.13
30 %	1.28	1.24	1.21	1.17	1.13	1.09
20 %	1.25	1.21	1.18	1.14	1.10	1.06
10 %	1.22	1.18	1.14	1.11	1.07	1.03
0 %	1.19	1.15	1.11	1.08	1.04	1.00
PKW/LKW-Reduktion	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
0 %	1.00	0.96	0.93	0.89	0.85	0.81
10 %	0.97	0.93	0.89	0.86	0.82	0.78
20 %	0.94	0.90	0.86	0.83	0.79	0.75
30 %	0.91	0.87	0.83	0.79	0.76	0.72
40 %	0.88	0.83	0.80	0.76	0.73	0.69
50 %	0.84	0.81	0.77	0.73	0.69	0.66

Tabelle 3: PM10 Änderung in Abhängigkeit von PKW/LKW Verkehrsaufkommen.

$L = 10$, $s = 0.06$, $em_v = 0.2$; (Immissionsbelastung LKW:PKW = 10:1; LKW Anteil 6 %; Verkehrsanteil an Immissionen 20 %.)

PKW/LKW-Zunahme	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	0 %
50 %	1.14	1.12	1.11	1.10	1.07	1.06
40 %	1.12	1.11	1.10	1.08	1.07	1.05
30 %	1.11	1.10	1.08	1.07	1.05	1.04
20 %	1.10	1.09	1.07	1.06	1.04	1.03
10 %	1.09	1.07	1.06	1.04	1.03	1.01
0 %	1.08	1.06	1.05	1.03	1.02	1.00
PKW/LKW-Reduktion	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
0 %	1.00	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93
10 %	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91
20 %	0.98	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90
30 %	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89
40 %	0.95	0.94	0.92	0.91	0.89	0.88
50 %	0.94	0.92	0.91	0.89	0.88	0.86

6. Skalierung zum Vergleich unterschiedlicher Jahre

Die explorativen Analysen zu Beginn dieses Berichtes zeigen einen deutlichen Unterschied im PM10 Mittel über die Wintersaisons 2002/03 und 2003/04. Dies wird vermutlich, zumindest über kurze Zeiträume, vor allem an unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen liegen. (Anzahl der Tage mit Inversion, Anzahl der Frosttage, Anzahl der Tage mit Niederschlag). Auf längere Sicht sind selbstverständlich auch vom Menschen verursachte Faktoren zu berücksichtigen.

Für die folgenden Plots wurden Daten (sofern vorhanden) der Wintersaisons 2001/02, 2002/03 und 2003/04 der Messstellen Graz-Mitte, Graz-Don Bosco, Graz-Süd und Graz-Nord verwendet. Dabei wurden nur jene Tage ausgewählt, an denen die 3 meteorologischen Faktoren `ltusg_k`, `lute`, `nied` und `pm10` vorlagen; (mit Ausnahme der Daten aus den Jahren 2001/02; hier lagen überhaupt keine Niederschlagsdaten vor). Die vorhandenen Niederschlagsdaten stammen jeweils aus Graz-Nord.

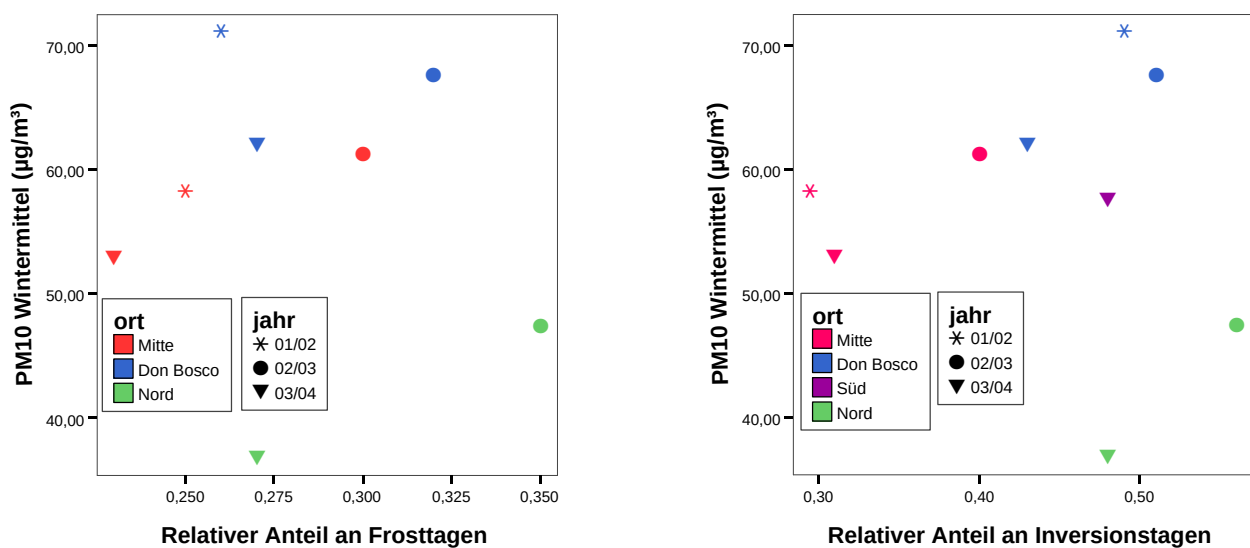


Diagramm 39: Ein Vergleich der PM10 Wintermittel bezüglich des relativen Anteils der Inversion/Frosttage aus den Jahren 2001/02 (Graz-Mitte, Graz-Don Bosco), 2002/03 (Graz-Mitte, Graz-Don Bosco, Graz-Nord) und 2003/04 (Graz-Mitte, Graz-Don Bosco, Graz-Nord, und bei Inversionsanteil Graz-Süd).

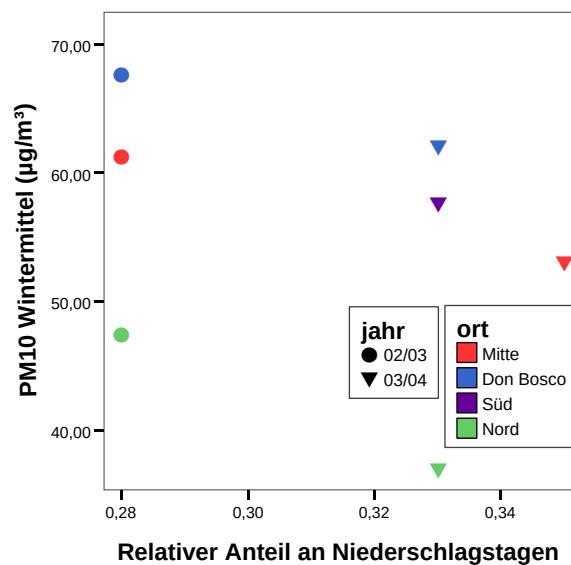


Diagramm 40: Ein Vergleich der PM10 Wintermittel bezüglich des relativen Anteils der Tage mit Niederschlag. Es standen nur Niederschlagsdaten der Messstelle Graz-Nord in den Wintersaisons 2002/03 (Graz-Mitte, Graz-Don Bosco, Graz-Nord) und 2003/04 (Graz-Mitte, Graz-Don Bosco, Graz-Nord, Graz-Süd) zur Verfügung.

Aufgrund der geringen Anzahl an Messdaten (2 bzw. 3 Beobachtungen pro Station) ist es kaum möglich einen funktionalen Zusammenhang zwischen PM10 Wintermittel und den meteorologischen Komponenten herzustellen. Es kommt dabei erschwerend hinzu, dass die einzelnen Messstationen kaum oder gar nicht miteinander vergleichbar sind. Zusätzlich verursachen fehlende Daten unterschiedlich große Datensätze und damit weitere Unsicherheit.

- Vergleicht man nur die Jahre 2002/03 und 2003/04 so ist zwar bei den verschiedenen Messstellen ein naturgemäß unterschiedliches Niveau, aber eine einigermaßen konstante Änderungsrate bzgl. der meteorologischen Faktoren beobachtbar.
- Allgemein ist eine tendenziell positive Wirkung einer größeren Anzahl von Tagen mit Niederschlag, bzw. eine tendenziell negative Wirkung von vermehrten Inversions/Frosttagen gut ersichtlich.
- Um das PM10 Wintermittel bzgl. meteorologischer Einflussgrößen statistisch abgesichert standardisieren zu können, bedarf es Messungen über einen Zeitraum von mehreren Jahren.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für den Standort Graz Mitte wurden Prognosemodelle für den *PM10 Tagesmittelwert (TMW) des nächsten Tages (Prognosetag)* auf Grund von Informationen des laufenden Tages entwickelt. Als Datenbasis standen Daten der Wintersaisons 2002/03 und 2003/04 zur Verfügung (23.10.2002 – 29.3.2003, 2.10.03 – 10.3.04, 23.3.-31.3.04).

Es wurden *fünf (bzw. sechs für Modell 5) wesentliche Einflussgrößen* bestimmt, wovon drei aus Prognosen von meteorologischen Parametern stammen müssen. **Für das Modell werden keine Verkehrsdaten benötigt.**

- *mittel_20: PM10 24-Stunden Mittel bis 20 Uhr am laufenden Tag (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) [Messwert]*

Diese Variable hat naturgemäß den stärksten Einfluss auf den PM10-Tagesmittelwert des Folgetages (0.00 – 24.00 Uhr). Je nach Tageszeit an der die Prognose erstellt wird, müssen alternativ die Variablen *mittel_16* bzw. *mittel_12* verwendet werden.

- *ltusg_k: Temperaturunterschied Graz-Kalkleiten am Prognosetag (in $^{\circ}\text{C}$) [Prognose]*

Diese Variable drückt Inversionswetterlage aus, die an ca. 48% der Wintertage vorherrscht und zu ca. 83% zu Überschreitungen des Grenzwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ führt. Der durchschnittliche PM10 TMW bei Inversionswetterlagen ist bei $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An inversionsfreien Tagen liegt diese nur bei $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 57%).

- *tag: Typ des Prognosetages (0=Mo-Fr, 1=Samstag, 2=Sonn-/Feiertag (inkl. 24.12.))*

Diese Variable substituiert die Einflussgröße Verkehr/Industrie; erfahrungsgemäß ist das Verkehrsaufkommen an Samstagen und Sonn-/Feiertagen geringer als an Werktagen. Der PM10 TMW an Werktagen liegt bei $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, an Samstagen bei $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und an Sonn/Feiertagen bei $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 67% des Werktagewertes).

- *wige: Mittlere Windgeschwindigkeit des Prognosetages (in m/s) [Prognose]*

Zunehmender Wind vermindert die PM10 Belastung. Bei Windstille hat man im Mittel einen PM10 TMW von $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$; bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 1 m/s von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- *nied_01: Kodierter Niederschlag (0 = kein Niederschlag, 1 = Niederschlag) [Prognose]*

Niederschlag reduziert die PM10 Belastung. An ca. 32% der Wintertage gab es Niederschlag, der zu PM10 TMW von 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ führt. Wintertage ohne Niederschlag weisen ein PM10 TMW von 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auf.

Prognosemodell 5:

- *lute_kat_20: Kategorisierte Lufttemperatur des aktuellen Tages (0 = „Frosttag“, 1= kein „Frosttag“) [Messwert]*

Diese Variable gibt an, ob das 24-Stundenmittel der Lufttemperatur gerechnet bis 20 Uhr positiv oder negativ ist. Im Mittel ist die PM10 Belastung nach den „Frosttagen“ um ca. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erhöht.

Durch die Koppelung von Effekten erhöht sich die PM10 Belastung. An **Inversionstagen** herrscht zu **84% kein Niederschlag**, was an solchen Tagen den PM10 TMW auf **82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** steigen lässt. Bei Niederschlag geht dieser Wert auf 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zurück.

Inversionsfreie Tage sind zu **40% mit Niederschlag** verknüpft, was den PM10 TMW auf **41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** reduziert, an niederschlagsfreien Tagen liegt dieser Wert bei 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

In unsere Prognosemodelle gehen alle diese Effekte einzeln und gekoppelt ein. Es zeigt sich, dass es aus statistischen Gründen (Varianzstabilität, Normalverteilung der Residuen) von Vorteil ist, die Quadratwurzel(PM10) vom Prognosetag zu modellieren. Prognosemodell 4, erstellt um 20 Uhr, lautet dann wie folgt:

$\begin{aligned}\text{SQRT}(\text{PM10}) = & 8,616 + 0,024 \times \text{mittel_20} - 0,271 \times \text{ltusg_k} - 0,746 \times \text{tag} - 1,592 \times \text{wige} \\ & - 0,848 \times \text{nied_01}\end{aligned}$ $r^2 = 0,699; s = 1,02$

Welche Aussagekraft liefert das Modell für Prognosen?

In unserer Modellrechnung (Wintersaisons 2002/03 und 2003/04) wird folgendes Szenario angenommen.

Es **müssen Maßnahmen** ergriffen werden, wenn zu erwarten ist, dass der **PM10 TMW** des **Folgetages** den Wert von **100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet**.

Es **können Maßnahmen** gesetzt werden, wenn man erwartet, dass

$75 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{PM10 TMW} < 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dazu wird eine Entscheidungsregel, basierend auf die Prognosewerte, eingeführt:

1. Gilt **Prognosewert $< 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$** ,
dann werden **keine Maßnahmen** gesetzt (**grüner Bereich**).
2. Gilt **$75 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{Prognosewert} < 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$** ,
dann **können Maßnahmen** getroffen werden (**oranger Bereich**).
3. Gilt **Prognosewert $\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$** ,
dann **müssen Maßnahmen** getroffen (**roter Bereich**).

Wir setzen voraus, dass der orange Bereich neutral ist; d.h. sowohl eine Entscheidung für grün als auch eine für rot ist akzeptabel.

Fall 1 trat an 270 Tagen auf (83% von 326 Tagen). An nur 2 Tagen (beobachteter PM10 TMW $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wäre die Entscheidung falsch (grün statt rot) gewesen. 1% Fehlerquote.

Fall 2 trat an 39 Tagen auf (12% der Tage). Würde generell auf grün entschieden, dann hätte man an 14 Tagen (beobachteter PM10 TMW $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eine falsche Entscheidung getroffen (grün statt rot). 36% Fehlerquote.

Würde generell auf rot entschieden, dann hätte man an 11 Tagen (beobachteter PM10 TMW $< 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) falsch entschieden (rot statt grün). 28% Fehlerquote.

Fall 3 tritt an 17 Tagen auf (5,2% der Tage). An allen Tagen ist der beobachtete PM10 TMW $> 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 0% Fehlerquote.

Bei dieser Prozedur trifft man mit 96% bzw. 95% eine richtige Entscheidung.

Offene Punkte:

- Die meteorologischen Prognosewerte für die **Lufttemperatur (Kalkleiten und Graz), Windgeschwindigkeit und Niederschlag** müssen von der ZAMG zur Verfügung gestellt werden. Dazu ist eine Vereinbarung mit Dr. Sudy in Ausarbeitung.
- Der Einbau des Prognosemodells in eine entsprechende IT-Umgebung ist noch offen.
- Die Organisation des Informationsflusses und die Definition der Testphase im Winter 2004/05 ist noch zu klären. Ab Jänner 2005 soll ein „Probetrieb“ mit unserem Modell starten, um die Aussagekraft im Zusammenhang mit realen Prognosewerten im Feldversuch zu testen.
- Die Ausnutzung weiterer Vorinformation wie eine steigende/fallende Tendenz der im 4-Stundenrhythmus gleitenden TMW, Reaktionen bei unsicherer Wetterprognose, vor Wochenenden oder Feiertagen ist noch zu überprüfen.
- Um die PM10 Saisonmittel zu vergleichen, wurden in Abschnitt 6 Möglichkeiten einer Skalierung bzgl. der meteorologischen Charakteristik der jeweiligen Wintersaisonen diskutiert. Die Tragfähigkeit derartiger Skalierungen kann nur durch langfristige Beobachtungen (mehrere Jahre) sichergestellt werden.
- Für die genauere Erforschung des Zusammenhangs zwischen PM10 und der Verkehrscharakteristik (Verkehrsaufkommen und Verkehrszusammensetzung), bedarf es gezielter Messungen, die auf einer sorgfältig konzipierten Versuchsplanung aufbauen. Hier ist noch ein breites Spektrum an Fragestellungen zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] **Stadlober E., B. Pfeiler:** Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen über ausgewählte Zeiträume. Endbericht im Auftrag von Land Stmk. und Stadt Graz, September 2003.

- [2] **Stadlober E., B. Pfeiler:** Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Mai 2003 - Oktober 2003. Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, Dezember 2003.

- [3] **Stadlober E., B. Pfeiler:** Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Mai 2003 – Dezember 2003. Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, April 2004.

- [4] **Stadlober E., B. Pfeiler:** Explorative Analyse der Feinstaubkonzentrationen von Oktober 2003 – März 2004. Endbericht im Auftrag der Stadt Graz, November 2004.

- [5] **H. Eichelseder, P. Sturm, B. Heiden:** Auswirkungen der Verkehrsmaßnahmen des Maßnahmenkatalogs nach IG-L für Feinstaub und Stickstoffdioxid für den Großraum Graz und Grazer Feld. Bericht im Auftrag des Amtes der steiermärkischen Landesregierung vom 22.12.2003.

- [6] **R. Pischinger:** Emissionskataster Graz 1995. Bericht im Auftrag des Amtes der steiermärkischen Landesregierung.
<http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10023686/52d1c0f6/Emissionskataster+Graz.pdf>

ANHANG

Die folgenden 3 Tabellen geben eine Zusammenstellung der vorgeschlagenen Prognosemodelle 4 und 5. Die Kategorisierung nach a,b und c ist an die Zeit der Erstellung der Prognosen und der dabei vorhandenen Information gebunden.

Prog. Modell	Modell 4a		Modell 5a	
Variable	Sqrt(PM10)		Sqrt(PM10)	
Datenbasis	H/W 02/03 u. 03/04		H/W 02/03 u. 03/04	
Konstante	8,62	Std. beta	8,22	Std. beta
Faktoren				
tag	-0,75	-0,315	-0,76	-0,320
wige	-1,59	-0,236	-1,29	-0,191
ltusg_k	-0,27	-0,322	-0,28	-0,330
mittel_20	0,024	0,382	0,023	0,375
nied_01	-0,85	-0,211	-0,78	-0,193
lute_kat_20	-	-	0,79	0,186
Korrig. R ²	0,699		0,731	
Standardabw.	1,02		0,97	

Prog. Modell	Modell 4b		Modell 5b	
Variable	Sqrt(PM10)		Sqrt(PM10)	
Datenbasis	H/W 02/03 u. 03/04		H/W 02/03 u. 03/04	
Konstante	8,91	Std. beta	8,55	Std. beta
Faktoren				
tag	-0,79	-0,331	-0,77	-0,325
wige	-1,63	-0,241	-1,35	-0,201
ltusg_k	-0,30	-0,363	-0,30	-0,360
mittel_16	0,020	0,332	0,019	0,315
nied_01	-0,85	-0,211	-0,82	-0,204
lute_kat_16	-	-	0,80	0,184
Korrig. R ²	0,679		0,709	
Standardabw.	1,06		1,01	

Prog. Modell	Modell 4c		Modell 5c	
Variable	Sqrt (PM10)		Sqrt (PM10)	
Datenbasis	H/W 02/03 u. 03/04		H/W 02/03 u. 03/04	
Konstante	9,05	Std. beta	8,72	Std. beta
Faktoren				
tag	-0,81	-0,344	-0,80	-0,338
wige	-1,64	-0,241	-1,38	-0,202
ltusg_k	-0,32	-0,384	-0,32	-0,381
mittel_12	0,0186	0,306	0,0173	0,284
nied_01	-0,83	-0,207	-0,81	-0,202
lute_kat_12	-		0,71	0,169
Korrig. R²	0,664		0,69	
Standardabw.	1,08		1,04	