

Technische Universität Dresden
Institut für Geographie
Lehrstuhl für Landschafts- und Geoökologie

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Geographin

Räumliche und zeitliche Analyse von kontinuierlichen
Luftschadstoffmessungen in Berlin

**Einfluss von Regen und Luftfeuchtigkeit auf die PM10-Emission und
-Immission**

eingereicht von: Evelyn Schulze

Matr.Nr.: 2488771

1. Betreuer:

Prof. Dr. Karl Mannsfeld

Lehrstuhl für Landschafts- und Geoökologie

2. Betreuer:

Dr. rer. nat. Ingo Düring

Ingenieurbüro Lohmeyer Dresden

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Anhangsverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Vorwort.....	XVI
Teil A	
1 Einleitung.....	1
2 Warum diese Arbeit – Motivation.....	2
2.1 DAS (UNLÖSBARE?) PROBLEM DES STRAßENVERKEHRS.....	2
2.2 DER GEOGRAPHISCHE BEZUG.....	3
3 PM10 – seine Rolle und Eigenschaften	5
3.1 STAUB UND PM10 – EINE KURZE EINFÜHRUNG	5
3.2 QUELLEN UND ENTSTEHUNG VON STRAßENVERKEHRSINDUZIERTEM PM10	6
3.3 PM10 UND WASSER.....	7
3.4 STAUB UND SEINE EPIDEMIOLOGISCHE BEDEUTUNG.....	7
3.5 DIE EU – LUFTQUALITÄTSRICHTLINIE UND PM10	9
4 Der Untersuchungsort Berlin.....	11
4.1 GEOGRAPHISCHE EINORDNUNG.....	11
4.2 DAS KLIMA.....	11
4.2.1 <i>Der großklimatische Einfluss.....</i>	<i>11</i>
4.2.2 <i>Das Stadtklima.....</i>	<i>12</i>
4.2.3 <i>Die Staubbelastung in Berlin.....</i>	<i>13</i>
4.2.4 <i>Zusammensetzung und Herkunft des Schwebstaubes in Berlin.....</i>	<i>14</i>
4.3 DIE VERKEHRSSITUATION.....	15
4.3.1 <i>Ein kurzer Rückblick.....</i>	<i>15</i>
4.3.2 <i>Die heutige Situation.....</i>	<i>16</i>
Teil B	
5 Datengrundlage.....	17
5.1 DIE BETRACHTETEN MESSSTATIONEN IN BERLIN	17
5.1.1 <i>Allgemeines.....</i>	<i>17</i>

5.1.2	Station 14 – Stadtautobahn (Lerschpfad).....	18
5.1.3	Station 42 – Nansenstraße (Neukölln).....	18
5.1.4	Station 71 – Mitte (Parochialstraße).....	19
5.1.5	Station 77 – Buch.....	19
5.1.6	Station 117 – Schildhornstraße.....	19
5.1.7	Station 174 – Frankfurter Allee.....	19
5.2	MESSDATEN.....	20
5.2.1	Datenverfügbarkeit.....	20
5.2.2	Räumliche und zeitliche Repräsentanz der meteorologischen Daten.....	21
5.3	VERWENDETE PROGRAMME ZUR DATENANALYSE	23
6	Datenauswertung und Ergebnisse	24
6.1	WOCHENGÄNGE DER NO _x - UND PM10-GESAMTBELASTUNG.....	24
6.2	METEOROLOGISCHE SITUATION IM UNTERSUCHUNGSZEITRAUM.....	29
6.3	PM10 UND RELATIVE LUFTFEUCHTE.....	35
6.4	KORRELATIONEN VON PM10- UND NO _x - GESAMTBELASTUNGEN BEI NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN	36
6.4.1	Vorgehensweise.....	36
6.4.2	Vergleich der Gesamtbelastung bei verschiedenen Niederschlagsschwellen.....	37
6.4.3	Vergleich der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen.....	39
6.5	KORRELATIONEN ZWISCHEN PM10- UND NO _x - ZUSATZBELASTUNGEN BEI NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN.....	41
6.5.1	Einführung und Vorgehensweise.....	41
6.5.2	Mittlere Wochengänge der Zusatzbelastung.....	41
6.5.3	Vergleich der Zusatzbelastung bei verschiedenen Niederschlagsschwellen an Werktagen.....	42
6.5.4	Vergleich der Zusatzbelastung in verschiedenen Niederschlagsklassen an Werktagen.....	44
6.6	ZUSAMMENFASSUNG DER BISHERIGEN ERGEBNISSE.....	46
6.6.1	Gesamtbelastung.....	46
6.6.2	Zusatzbelastung.....	48
6.6.3	Relative Luftfeuchte.....	50
6.6.4	Diskussion der Daten für Gesamt- und Zusatzbelastung.....	50
6.6.5	Besonderheiten an der Stadtautobahn und in Windrichtungssektoren.....	54
6.7	AUSBLICK: BETRACHTUNG DER PM10- UND NO _x - GESAMT- UND ZUSATZBELASTUNGEN INNERHALB EINZELNER QUARTALE.....	56
6.7.1	Vorbemerkung.....	56
6.7.2	Betrachtung der Gesamtbelastung.....	57
6.7.3	Betrachtung der Zusatzbelastung.....	58
6.7.4	Zusammenfassung.....	59
7	Auswertungen von Intensivmessungen an der Schildhornstraße	60
7.1	DATENGRUNDLAGE UND -VERFÜGBARKEIT	60
7.2	ÜBERBLICK ÜBER DIE NIEDERSCHLAGSSITUATION.....	61
7.3	BERECHNUNG STÜNDLICHER EMISSIONSFAKTOREN IN DER SCHILDHORNSTRASSE.....	61

7.4	KORRELATION DER PM10-EMISSIONSFAKTOREN MIT NIEDERSCHLAGSHÖHE UND LUFTFEUCHTIGKEIT..	64
7.4.1	Vorgehensweise.....	64
7.4.2	Zeitliche Entwicklung der PM10-Emissionsfaktoren vor und nach einem Niederschlagsereignis	67
7.4.3	Zeitliche Entwicklung der PM10-Emissionsfaktoren nach einem Niederschlagsereignis unter besonderer Berücksichtigung der Niederschlagshöhe.....	68
7.4.4	Zeitliche Entwicklung der PM10-Emissionsfaktoren nach einem Niederschlagsereignis unter besonderer Berücksichtigung der Niederschlagsdauer.....	71
7.4.5	Zusammenfassung und Diskussion Schildhornstraße bezüglich Regen.....	74
7.4.6	Stündliche Emissionsfaktoren und relative Luftfeuchte.....	75
7.5	PLAUSIBILITÄTSANALYSE DER ERMITTELTEN EMISSIONSFAKTOREN.....	75
8	Auswertungen von Intensivmessungen an der Frankfurter Allee.....	78
8.1	DATENGRUNDLAGE UND VORGEHEN.....	78
8.2	NIEDERSCHLAGSSITUATION IM UNTERSUCHUNGSZEITRAUM.....	80
8.3	ANALYSE DER STÜNDLICHEN PM10-EMISSIONSFAKTOREN AN DER FRANKFURTER ALLEE.....	81
8.3.1	Korrelation mit dem Verkehrsaufkommen und der Fahrzeuggeschwindigkeit.....	81
8.3.2	Stündliche Emissionsfaktoren und Niederschlagsereignisse.....	83
8.3.3	Stündliche Emissionsfaktoren und Niederschlagsdauer.....	84
8.3.4	Stündliche Emissionsfaktoren und Niederschlagshöhe.....	84
8.3.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Frankfurter Allee.....	85
9	Konsequenzen aus den Ergebnissen für die PM10-Emissionsmodellierung...87	
9.1.1	Ansätze zur PM10-Emissionsberechnung.....	87
9.1.2	Zusammenstellung der gewonnenen Ergebnisse.....	88
9.1.3	Schlussfolgerung.....	89
10	Zusammenfassung und Schlussbetrachtung	91
11	Quellenverzeichnis.....	95
11.1	LITERATUR.....	95
11.2	KARTEN.....	97
11.3	INTERNET.....	97
11.4	GESPRÄCHE.....	98
11.5	DATENGRUNDLAGE.....	98
Anhang		
A1:	Lageskizzen der betrachteten Stationen.....	99
	STADTAUTOBAHN.....	99
	FRANKFURTER ALLEE.....	100
	SCHILDHORNSTRASSE	101
	MITTE	102

NANSENSTRASSE	103
BUCH	104
A2: PM10- und NO_x - Gesamtbelastung	105
STADTAUTOBAHN/ LERSCHPFAD.....	105
SCHILDHORNSTRASSE	106
FRANKFURTER ALLEE.....	107
MITTE	108
NANSENSTRASSE	109
A3: PM10 und relative Luftfeuchte.....	110
STADTAUTOBAHN.....	110
SCHILDHORNSTRASSE	110
STATION MITTE	111
FRANKFURTER ALLEE.....	111
NANSENSTRASSE	112
BUCH	112
A4: Daten fehlender Messwerte der Tagesniederschlagsbetrachtung	113
A5: PM10- und NO_x - Gesamtbelastung und Niederschlagsereignisse.....	116
STADTAUTOBAHN.....	116
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>116</i>
<i>Werktags - Niederschlagsklassen.....</i>	<i>117</i>
SCHILDHORNSTRASSE	119
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>119</i>
<i>Werktags – Niederschlagsklassen.....</i>	<i>120</i>
FRANKFURTER ALLEE.....	121
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>121</i>
<i>Werktags - Niederschlagsklassen.....</i>	<i>122</i>
STATION MITTE	123
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>123</i>
<i>Werktags - Niederschlagsklassen.....</i>	<i>124</i>
NANSENSTRASSE	125
<i>Werktags - Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>125</i>
<i>Werktags – Niederschlagsklassen.....</i>	<i>126</i>
BUCH	127
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>127</i>
<i>Werktags - Niederschlagsklassen.....</i>	<i>128</i>
A6: PM10- und NO_x - Zusatzbelastung	129
SCHILDHORNSTRASSE	129
FRANKFURTER ALLEE.....	131

MITTE	132
A7: PM10- und NO_x-Zusatzbelastung und Niederschlagsereignisse	134
SCHILDHORNSTRASSE	134
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>134</i>
<i>Werktags – Niederschlagsklassen.....</i>	<i>136</i>
FRANKFURTER ALLEE.....	137
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>137</i>
<i>Werktags – Niederschlagsklassen.....</i>	<i>138</i>
MITTE	139
<i>Werktags – Niederschlagsschwellen.....</i>	<i>139</i>
<i>Werktags - Niederschlagsklassen.....</i>	<i>140</i>
EINFLUSS DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE AUF DIE PM10-ZUSATZBELASTUNG.....	141
A8: Korrelation zwischen PM10- und NO_x- Gesamt- und Zusatzbelastung und Niederschlagsereignissen nach Quartalen	143
NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG.....	143
PM10- UND NO _x -GESAMTBELASTUNG IN QUARTALEN.....	144
PM10- UND NO _x -ZUSATZBELASTUNG IN QUARTALEN.....	152
A9: Auswertungen aus der Intensivmesskampagne Schildhornstraße	158
WOCHENGÄNGE DER EMISSIONSFAKTOREN.....	158
TAGESGANG DER EMISSIONSFAKTOREN	162
NORMIERTE PM10-EMISSIONSFAKTOREN NACH NIEDERSCHLAGSKLASSEN	163
PM10-EMISSIONSFAKTOREN NACH NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEREN DAUER.....	166
A10: Auswertungen der Intensivmessungen Frankfurter Allee.....	168
TAGESGANG DER MITTLEREN EMISSIONSFAKTOREN.....	168
KORRELATION EMISSIONSFAKTOREN UND FAHRZEUGGESCHWINDIGKEIT	169
STÜNDLICHE EMISSIONSFAKTOREN UND NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE.....	170
EMISSIONSFAKTOREN UND NIEDERSCHLAGSDAUER.....	171
EMISSIONSFAKTOREN UND NIEDERSCHLAGSHÖHE.....	174
A11: Herleitung des PEARSON-Korrelationskoeffizienten.....	178

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Das Landschaftsökosystem nach LESER	4
Abbildung 3-1: Abscheidungscharakteristik von Partikeln in der menschlichen Lunge	9
Abbildung 4-1: Mittlere Schwebstaubimmissionen zwischen 1970 und 1993	14
Abbildung 4-2: PKW-Dichte in europäischen Ländern.....	16
Abbildung 5-1: Skizze über die Lage der Messstellen in Berlin	18
Abbildung 5-2: Mittlere Niederschlagsverteilung [mm] in Berlin	21
Abbildung 5-3: Vergleich Luftfeuchtwerte der Stationen Berlin Dahlem und Schöneberg	22
Abbildung 6-1: NO _x -und PM10-Gesamtbelastung Stadtautobahn	25
Abbildung 6-2: NO _x -und PM10-Gesamtbelastung Schildhornstraße.....	25
Abbildung 6-3: NO _x -und PM10-Gesamtbelastung Frankfurter Allee	26
Abbildung 6-4: NO _x -und PM10-Gesamtbelastung Station Mitte	26
Abbildung 6-5: NO _x -und PM10-Gesamtbelastung Nansenstraße	27
Abbildung 6-6: PM10-Gesamtbelastung Station Buch.....	27
Abbildung 6-7: Histogramm halbstündiger Niederschlagsereignisse.....	31
Abbildung 6-8: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagstagesummen.....	32
Abbildung 6-9: Niederschlagstagesummen ab Schwellenwerten im Untersuchungszeitraum.....	33
Abbildung 6-10: Halbstündige Niederschlagsereignisse nach Wochentagen.....	33
Abbildung 6-11: Tagesniederschlagssummen nach Wochentagen.....	34
Abbildung 6-12: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagstypen	34
Abbildung 6-13: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagstypen zusammengefasst	35
Abbildung 6-14: Vergleich der PM10-Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen	52
Abbildung 6-15: Vergleich der NO _x -Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen	52
Abbildung 6-16: Vergleich der PM10-Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen	52
Abbildung 6-17: Vergleich der NO _x -Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen	52
Abbildung 6-18: Vergleich der PM10-Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen.....	53
Abbildung 6-19: Vergleich der NO _x -Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen.....	53
Abbildung 6-20: Vergleich der PM10-Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen.....	53
Abbildung 6-21: Vergleich der NO _x -Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen.....	53
Abbildung 7-1: Tage mit Niederschlag im Intensivmesszeitraum	61
Abbildung 7-2: Tagesgang mittlerer Emissionsfaktoren sowie des LKW-Anteils	65
Abbildung 7-3: Entwicklung der Emissionsfaktoren bei Niederschlagsereignissen	67
Abbildung 7-4: Niederschlagsereignisse nach Niederschlagshöhe	69
Abbildung 7-5: Niederschlagsereignisse nach Dauer	72
Abbildung 7-6: Vergleich von Emissionsfaktoren nach unterschiedlichen Messverfahren.....	76

Abbildung 8-1: Skizze Messstation Frankfurter Allee.....	78
Abbildung 8-2: Anzahl der Niederschlagsereignisse nach ihrer Dauer, Frankfurter Allee.....	80
Abbildung 8-3: Anzahl der Niederschlagsereignisse nach ihrer Höhe, Frankfurter Allee.....	81
Abbildung 8-4: Mittlere PM10-Emissionsfaktoren und LKW-Anteile	82
Abbildung 8-5: normierte Emissionsfaktoren bei Niederschlagsereignissen, Frankfurter Allee.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Grenzwerte für PM10.....	10
Tabelle 5-1: Anzahl der PM10- und NO _x -Messwerte an den einzelnen Stationen.....	20
Tabelle 5-2: Vergleich Luftfeuchtwerte Station Dahlem und Schöneberg.....	22
Tabelle 6-1: Vergleich der Niederschlagswerte an der Station Berlin Dahlem	30
Tabelle 6-2: Korrelationskoeffizienten von PM10 und relativer Luftfeuchte.....	36
Tabelle 6-3: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Gesamtbelastungen an Werktagen mit verschiedenen ausgewählten Mindestniederschlagshöhen mit Werktagen ohne Niederschlag.....	38
Tabelle 6-4: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Gesamtbelastungen an Werktagen in verschiedenen ausgewählten Niederschlagsklassen mit Werktagen ohne Niederschlag	40
Tabelle 6-5: Vergleich der durchschnittlichen Gesamt- und Zusatzbelastung.....	42
Tabelle 6-6: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Zusatzbelastungen an Werktagen bei verschiedenen ausgewählten Niederschlagsschwellen mit Werktagen ohne Niederschlag	43
Tabelle 6-7: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Zusatzbelastungen an Werktagen in verschiedenen ausgewählten Niederschlagsklassen mit Werktagen ohne Niederschlag	45
Tabelle 6-8: NO _x -Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab Niederschlagsschwellen (Gesamtbelastung)	47
Tabelle 6-9: NO _x -Änderung [%] minus PM10-Änderung bei Niederschlag [%] in Niederschlagsklassen (Gesamtbelastung)	47
Tabelle 6-10: NO _x -Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab Niederschlagsschwellen (Zusatzbelastung)	48
Tabelle 6-11: NO _x -Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag in Niederschlagsklassen (Zusatzbelastung)	49
Tabelle 6-12: NO _x -Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab einer Niederschlagsschwelle von 0,1 mm (Gesamtbelastung)	58
Tabelle 6-13: NO _x -Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab einer Niederschlagsschwelle von 0,1 mm (Zusatzbelastung)	58
Tabelle 7-1: Fehlende Messwerte (Stundenmittel) Intensivmessung Schildhornstraße.....	60
Tabelle 7-2: Verkehrsmuster und NO _x -Emissionsfaktoren	62
Tabelle 7-3: Fehlende Emissionsfaktoren im Messzeitraum aufgeschlüsselt nach Stunden	65
Tabelle 7-4: Normierte PM10-Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlag	67
Tabelle 7-5: Entwicklung der Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen in Niederschlagsklassen, Richtung West	70
Tabelle 7-6: Entwicklung der Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen nach Niederschlagsdauer.....	73
Tabelle 7-7: Vergleich Emissionsfaktoren aus gravimetrischen und kontinuierlichen Messungen.....	76
Tabelle 8-1: Verkehrsmuster und Emissionsfaktoren.....	79
Tabelle 8-2: Korrelation der mittleren stündlichen Emissionsfaktoren mit Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsaufkommen, werktags	83
Tabelle 9-1: Wesentliche Ergebnisse der Arbeit	88

Anhangsverzeichnis

Abbildungen im Anhang

Abbildung A1- 1: Lageskizze der Station 14 – Stadtautobahn (Charlottenburg).....	99
Abbildung A1- 2: Lageskizze der Station 174 – Frankfurter Allee.....	100
Abbildung A1- 3: Lageskizze der Station 117 – Schildhornstraße.....	101
Abbildung A1- 4: Lageskizze der Station 71 – Mitte (Parochialstraße).....	102
Abbildung A1- 5: Lageskizze der Station 42 – Nansenstraße (Neukölln)	103
Abbildung A1- 6: Lageskizze der Station 77 – Buch	104
Abbildung A2- 1: Wochengang der PM10-Gesamtbelastung an der Stadtautobahn.....	105
Abbildung A2- 2: Wochengang des PM10- NO _x -Verhältnisses an der Stadtautobahn	105
Abbildung A2- 3: Wochengang der PM10-Gesamtbelastung an der Schildhornstraße.....	106
Abbildung A2- 4: Wochengang des PM10- NO _x -Verhältnisses an der Schildhornstraße.....	106
Abbildung A2- 5: Wochengang der PM10-Gesamtbelastung an der Frankfurter Allee	107
Abbildung A2- 6: Wochengang des PM10- NO _x -Verhältnisses an der Frankfurter Allee.....	107
Abbildung A2- 7: Wochengang der PM10-Gesamtbelastung an der Station Mitte	108
Abbildung A2- 8: Wochengang des PM10- NO _x -Verhältnisses an der Station Mitte	108
Abbildung A2- 9: Wochengang der PM10-Gesamtbelastung an der Nansenstraße.....	109
Abbildung A2- 10: Wochengang des PM10- NO _x -Verhältnisses an der Nansenstraße.....	109
Abbildung A3- 1: Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Konzentration, Stadtautobahn	110
Abbildung A3- 2: Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Konzentration, Schildhornstraße	110
Abbildung A3- 3: Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Konzentration, Mitte	111
Abbildung A3- 4: Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Konzentration, Frankfurter Allee.....	111
Abbildung A3- 5: Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Konzentration, Nansenstraße.....	112
Abbildung A3- 6: Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Konzentration, Buch.....	112
Abbildung A5- 1: PM10- und NO _x -Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Stadtautobahn	116
Abbildung A5- 2: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Stadtautobahn.....	116
Abbildung A5- 3a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Stadtautobahn	117
Abbildung A5- 4: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Stadtautobahn.....	117
Abbildung A5- 5: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Stadtautobahn.....	117
Abbildung A5- 6a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen [%], Stadtautobahn.....	118
Abbildung A5- 7: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Schildhornstraße	119
Abbildung A5- 8: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Schildhornstraße.....	119
Abbildung A5- 9a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Schildhornstraße.....	119
Abbildung A5- 10: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Schildhornstraße.....	120

Abbildung A5- 11: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Schildhornstraße.....	120
Abbildung A5- 12a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen [%], Schildhornstraße.....	120
Abbildung A5- 13: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Frankfurter Allee.....	121
Abbildung A5- 14: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Frankfurter Allee	121
Abbildung A5- 15a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Frankfurter Allee	121
Abbildung A5- 16: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Frankfurter Allee	122
Abbildung A5- 17: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Frankfurter Allee	122
Abbildung A5- 18a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen [%], Frankfurter Allee	122
Abbildung A5- 19: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Station Mitte	123
Abbildung A5- 20: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Station Mitte.....	123
Abbildung A5- 21: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Station Mitte	123
Abbildung A5- 22: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Station Mitte	124
Abbildung A5- 23: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Station Mitte.....	124
Abbildung A5- 24a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen [%], Station Mitte.....	124
Abbildung A5- 25: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Nansenstraße.....	125
Abbildung A5- 26: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Nansenstraße.....	125
Abbildung A5- 27a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Nansenstraße.....	125
Abbildung A5- 28: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Nansenstraße.....	126
Abbildung A5- 29: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Nansenstraße.....	126
Abbildung A5- 30: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen [%], Nansenstraße.....	126
Abbildung A5- 31: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen, Station Buch.....	127
Abbildung A5- 32: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Station Buch.....	127
Abbildung A5- 33: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen, Station Buch.....	128
Abbildung A5- 34: PM10- Tagesmittelwerte der Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen [%], Station Buch.....	128

Abbildung A6- 1: Wochengang Zusatzbelastung NO _x und PM10, Schildhornstraße	129
Abbildung A6- 2: Wochengang Zusatzbelastung PM10, Schildhornstraße.....	130
Abbildung A6- 3: Wochengang Zusatzbelastung PM10/ NO _x , Schildhornstraße.....	130
Abbildung A6- 4: Wochengang Zusatzbelastung NO _x und PM10, Frankfurter Allee	131
Abbildung A6- 5: Wochengang Zusatzbelastung PM10, Frankfurter Allee	131
Abbildung A6- 6: Wochengang Zusatzbelastung PM10/ NO _x , Frankfurter Allee	132
Abbildung A6- 7: Wochengang Zusatzbelastung NO _x und PM10, Mitte	132
Abbildung A6- 8: Wochengang Zusatzbelastung PM10, Mitte	133
Abbildung A6- 9: Wochengang Zusatzbelastung PM10/ NO _x , Mitte	133
Abbildung A7- 1: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Schildhornstraße.....	134
Abbildung A7- 2: PM10- Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Schildhornstraße.....	134
Abbildung A7- 3a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen [%], Schildhornstraße.....	135
Abbildung A7- 4: PM10- und NO _x Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen, Schildhornstraße	136
Abbildung A7- 5: PM10- Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen, Schildhornstraße.....	136
Abbildung A7- 6a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen [%], Schildhornstraße.....	136
Abbildung A7- 7: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Frankfurter Allee.....	137
Abbildung A7- 8: PM10- Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Frankfurter Allee	137
Abbildung A7- 9a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen [%], Frankfurter Allee	137
Abbildung A7- 10: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen, Frankfurter Allee	138
Abbildung A7- 11: PM10- Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen, Frankfurter Allee.....	138
Abbildung A7- 12a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen [%], Frankfurter Allee	138
Abbildung A7- 13: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Station Mitte	139
Abbildung A7- 14: PM10- Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Station Mitte.....	139
Abbildung A7- 15a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen, Station Mitte	139
Abbildung A7- 16: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen, Station Mitte	140
Abbildung A7- 17: PM10- Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen, Station Mitte.....	140
Abbildung A7- 18a und b: PM10- und NO _x - Tagesmittelwerte der Zusatzbelastung in Niederschlagsklassen [%], Station Mitte.....	140
Abbildung A7- 19: PM10-Zusatzbelastung und relative Luftfeuchte, Schildhornstraße.....	141
Abbildung A7- 20: PM10-Zusatzbelastung und relative Luftfeuchte, Frankfurter Allee	141

Abbildung A7- 21: PM10-Zusatzbelastung und relative Luftfeuchte, Station Mitte.....	142
Abbildung A8- 1: Niederschlagshöhe in Quartalen.....	143
Abbildung A8- 2: Anzahl von Niederschlagsereignissen in Quartalen.....	143
Abbildung A8- 3: PM10-Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 1	148
Abbildung A8- 4: PM10-Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 2	148
Abbildung A8- 5: NO _x -Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 1	148
Abbildung A8- 6: NO _x -Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 2	148
Abbildung A8- 7: PM10-Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 3	149
Abbildung A8- 8: PM10-Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 4	149
Abbildung A8- 9: NO _x -Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 3	149
Abbildung A8- 10: NO _x -Gesamtbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 4	149
Abbildung A8- 11: PM10-Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 1	150
Abbildung A8- 12: PM10-Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 2.....	150
Abbildung A8- 13: NO _x -Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 1.....	150
Abbildung A8- 14: NO _x -Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 2.....	150
Abbildung A8- 15: PM10-Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 3.....	151
Abbildung A8- 16: PM10-Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 4.....	151
Abbildung A8- 17: NO _x -Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 3.....	151
Abbildung A8- 18: NO _x -Gesamtbelastung in Niederschlagsklassen im Quartal 4.....	151
Abbildung A8- 19: PM10-Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 1.....	154
Abbildung A8- 20: PM10-Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 2.....	154
Abbildung A8- 21: NO _x -Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 1	154
Abbildung A8- 22: NO _x -Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 2.....	154
Abbildung A8- 23: PM10-Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 3.....	155
Abbildung A8- 24: PM10-Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 4.....	155
Abbildung A8- 25: NO _x -Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 3	155
Abbildung A8- 26: NO _x -Zusatzbelastung ab Niederschlagsschwellen im Quartal 4	155
Abbildung A8- 27: PM10-Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 1.....	156
Abbildung A8- 28: PM10-Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 2.....	156
Abbildung A8- 29: NO _x -Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 1.....	156
Abbildung A8- 30: NO _x -Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 2.....	156
Abbildung A8- 31: PM10-Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 3.....	157
Abbildung A8- 32: PM10-Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 4.....	157
Abbildung A8- 33: NO _x -Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 3	157
Abbildung A8- 34: NO _x -Zusatzbelastung in Niederschlagklassen im Quartal 4	157
Abbildung A9- 1: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. West, 1. Woche	158
Abbildung A9- 2: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. West, 2. Woche	158
Abbildung A9- 3: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. West, 3. Woche	159
Abbildung A9- 4: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. West, 4. Woche	159
Abbildung A9- 5: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. West, 1. Woche	159
Abbildung A9- 6: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. Ost, 1. Woche.....	160
Abbildung A9- 7: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. Ost, 2. Woche.....	160
Abbildung A9- 8: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. Ost, 3. Woche.....	160

Abbildung A9- 9: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. Ost, 4. Woche.....	161
Abbildung A9- 10: Stündliche Emissionsfaktoren, Ri. Ost, 5. Woche.....	161
Abbildung A9- 12: PM10- Emissionsfaktoren bei 0,1 mm Niederschlag.....	163
Abbildung A9- 13: PM10- Emissionsfaktoren zwischen 0,2 und 0,5 mm Niederschlag.....	164
Abbildung A9- 14: PM10- Emissionsfaktoren zwischen 0,6 und 1,0 mm Niederschlag.....	164
Abbildung A9- 15: PM10- Emissionsfaktoren zwischen 1,0 und 5,0 mm Niederschlag.....	164
Abbildung A9- 16: PM10- Emissionsfaktoren > 5,0 mm Niederschlag.....	165
Abbildung A9- 17: PM10- Emissionsfaktoren vor und nach einem einstündigen Niederschlagsereignis	166
Abbildung A9- 18: PM10-Emissionsfaktoren nach einem 2-stündigen Niederschlagsereignis.....	167
Abbildung A9- 19: PM10-Emissionsfaktoren nach einem 3-stündigen Niederschlagsereignis.....	167
Abbildung A9- 20: PM10-Emissionsfaktoren nach einem 5-stündigen Niederschlagsereignis.....	167
Abbildung A10- 1: Tagesgang der mittleren Emissionsfaktoren Frankfurter Allee.....	168
Abbildung A10- 2: Emissionsfaktoren und Fahrzeuggeschwindigkeit FS1.....	169
Abbildung A10- 3: Emissionsfaktoren und Fahrzeuggeschwindigkeit FS2.....	169
Abbildung A10- 4: Emissionsfaktoren und Fahrzeuggeschwindigkeit FS2.....	169
Abbildung A10- 5: Emissionsfaktoren und Fahrzeuggeschwindigkeit FS4.....	169
Abbildung A10- 6: Emissionsfaktoren und Fahrzeuggeschwindigkeit FS5.....	169
Abbildung A10- 7: Emissionsfaktoren und Fahrzeuggeschwindigkeit FS6.....	169
Abbildung A10- 8: Emissionsfaktoren bei einstündigen Niederschlagsereignissen.....	171
Abbildung A10- 9: Emissionsfaktoren bei zweistündigen Niederschlagsereignissen.....	172
Abbildung A10- 10: Emissionsfaktoren bei drei- und mehrstündigen Niederschlagsereignissen.....	173
Abbildung A10- 11: Emissionsfaktoren bei 0,1 mm Niederschlag.....	174
Abbildung A10- 12: Emissionsfaktoren bei >0,1 bis 0,5 mm Niederschlag.....	175
Abbildung A10- 13: Emissionsfaktoren bei >0,5 bis 1,0 mm Niederschlag.....	176
Abbildung A10- 14: Emissionsfaktoren bei >1,0 bis 2,5 mm Niederschlag.....	177

Tabellen im Anhang

Tabelle A- 1: Fehlende Messwerte der Tagesniederschlagsbetrachtung.....	113
Tabelle A- 2: PM10-Gesamtbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsschwellen.....	144
Tabelle A- 3: NO _x -Gesamtbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsschwellen.....	145
Tabelle A- 4: PM10- Gesamtbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsklassen.....	146
Tabelle A- 5: NO _x - Gesamtbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsklassen.....	147
Tabelle A- 6: PM10-Zusatzbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsschwellen.....	152
Tabelle A- 7: NO _x -Zusatzbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsschwellen.....	152
Tabelle A- 8: PM10-Zusatzbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsklassen.....	153
Tabelle A- 9: NO _x -Zusatzbelastungen innerhalb von Quartalen, Niederschlagsklassen.....	153
Tabelle A- 10: Entwicklung der Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen in Niederschlagsklassen Richtung Ost.....	163
Tabelle A- 11: Entwicklung der Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer Richtung Ost.....	166
Tabelle A- 12: Korrelation der mittleren stündlichen Emissionsfaktoren mit Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsaufkommen, Wochenende	168
Tabelle A- 13: Normierte Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen.....	170
Tabelle A- 14: Emissionsfaktoren bei einstündigen Niederschlagsereignissen.....	171
Tabelle A- 15: Emissionsfaktoren bei zweistündigen Niederschlagsereignissen.....	172
Tabelle A- 16: Emissionsfaktoren bei drei- und mehrstündigen Niederschlagsereignissen.....	173
Tabelle A- 17: Emissionsfaktoren bei 0,1 mm Niederschlag	174
Tabelle A- 18: Emissionsfaktoren bei >0,1 bis 0,5 mm Niederschlag.....	175
Tabelle A- 19: Emissionsfaktoren bei 0,6 bis 1,0 mm Niederschlag.....	176
Tabelle A- 20: Emissionsfaktoren bei >1,0 bis 2,5 mm Niederschlag.....	177

Abkürzungsverzeichnis

BLUME:	Berliner Luftgütemessnetz
DTV:	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
DWD:	Deutscher Wetterdienst
eF:	Emissionsfaktor
EPA:	Environmental Protection Agency (USA)
Fzg:	Fahrzeug
FS:	Fahrspur
HVS1:	Ortsdurchfahrt, vorfahrtsberechtigt, ohne Störungen
HVS2:	Hauptverkehrsstraße, vorfahrtsberechtigt, geringe Störungen
HVS3:	Hauptverkehrsstraße, vorfahrtsberechtigt, mittlere Störungen
IO_Kern:	Innerortsstraßen im Stadtkern
KfZ:	Kraftfahrzeug
LKW:	Lastkraftwagen
LSA:	Lichtsignalanlage
LSA2:	Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlage, mittlere Störungen
LSA3:	Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlage, starke Störungen
LUA:	Landesumweltamt
NO_x:	Summe der Stickoxide NO und NO ₂
PKW:	Personenkraftwagen
PM:	Particulate Matter
PM10:	Partikel, die einen gröbenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist
TA-Luft:	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

Vorwort

Auf der Suche nach einer Diplomarbeit wurde mir von Seiten der Mitarbeiter des Ingenieurbüros Lohmeyer in Radebeul der Vorschlag unterbreitet, ein Thema zur PM10-Problematik in Angriff zu nehmen. Zum damaligen Zeitpunkt hatte ich diesen Begriff zwar schon einmal gehört, hatte aber wenig konkrete Vorstellungen darüber. Trotzdem beschloss ich, mich für meine Diplomarbeit auf Neuland hinauszuwagen, was sich dann oft auch als großes und manchmal auch nahezu undurchdringliches Dickicht erwies. Gerade deutschsprachige Literatur ist zu diesem Thema nur ziemlich spärlich vorhanden. In Deutschland und Europa wird gerade erst begonnen, die Frage der Luftschadstoffbelastung durch kleinste Partikel intensiver zu untersuchen und in die räumliche Planung einfließen zu lassen. Ich hoffe, durch meine Arbeit einen kleinen Beitrag für das Verständnis des Verhaltens von PM10 geleistet zu haben und dass auch auf die vielen Fragen, auf die ich beim Lesen stieß, die sich mir im Laufe der Arbeit stellten und unbeantwortet bleiben mussten, eines Tages Antwort und Lösung gefunden wird.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Ingenieurbüros Lohmeyer in Radebeul bedanken, die alle auf ihre Weise dazu beigetragen haben, meine Arbeit in einer netten Atmosphäre zu beenden. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Ingo Düring, der stets Zeit für Fragen, Diskussion und konstruktive Kritik aufbringen konnte. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Mannsfeld für seine Offenheit, ein etwas ausgefalleneres Thema zu betreuen, bedanken und mir somit diese Arbeit erst zu ermöglichen. Herrn Reichenbächer sowie Frau Dr. Rauterberg-Wulff danke ich für die schnelle Zusendung der Daten und anderer Informationen sowie der Beantwortung meiner Fragen!

Vielen Dank v. a. auch meiner Familie für die liebevolle Unterstützung während meines gesamten Studiums.

Zur Gliederung

Die Diplomarbeit gliedert sich in zwei Teile A und B. Im Teil A wird eine allgemeine Einführung in die PM10-Problematik gegeben und das Untersuchungsgebiet beschrieben. Der zweite Teil B ist der reinen Datenauswertung gewidmet. Dort finden sich Informationen über die Datenherkunft, das Vorgehen bei der Auswertung, die Ergebnisse und deren Diskussion. Tabellen und Abbildungen, die nicht mit in den laufenden Text integriert wurden, finden sich im Anhang. Im Text wird darauf verwiesen.

Die Datenauswertung im Teil B kann als gedanklicher Prozess verstanden werden. Ziel ist, einen möglichen Einfluss von Niederschlägen auf die PM10- Konzentration in der Luft aufzudecken. Zuerst wird ein möglicher Einfluss von Niederschlag auf die NO_x - und PM10-Gesamtbelastung untersucht, wobei NO_x eine Vergleichsgröße darstellt. Dann wird versucht, die Hintergrundbelastung auszuklammern und der Einfluss von Niederschlag auf die PM10- bzw. NO_x - Zusatzbelastung¹ hin untersucht. Zum Schluss werden nach Ableitung von Emissionsfaktoren mögliche Einflüsse von Verkehrsmengen und meteorologischen Ausbreitungsparametern ausgeklammert, um Einflüsse von Niederschlägen auf die PM10-Emissionsfaktoren aufzuzeigen.

Am Ende einiger Kapitel werden in einer Art Ausblick weiterführende Aspekte umrissen und diskutiert. Dabei fließen viele neue Betrachtungsaspekte mit ein, die zwar erwähnt, aber nur im Rahmen des gestellten Themas andiskutiert werden sollen.

Abbildungen und Tabellen werden mit Kapitelnummer versehen und innerhalb der einzelnen Kapitel durchnummeriert. Lediglich im Anhang wird bei der Tabellenbeschriftung auf die Einbeziehung der Kapitelnummer verzichtet. Abbildungs- und Tabellennummern aus dem Anhang sind durch ein A gekennzeichnet.

¹ Im Vorgriff: Die Zusatzbelastung ist die Immission, die ausschließlich vom Verkehr auf dem untersuchten Straßennetz hervorgerufen wird. Die Hintergrundbelastung ist die Immission, die bereits ohne Emissionen des Straßenverkehrs an den betrachteten Straßen vorliegt.

Teil A

1 Einleitung

In der ersten Tochterrichtlinie (1999/30/EG) zur 1996 in Kraft getretenen EU-Luftqualitätsrichtlinie (96/62/EG) werden erstmalig Grenzwerte für kleinste Partikel in der Luft (PM10) festgelegt, da sie laut toxikologischen Untersuchungen die menschliche Gesundheit negativ beeinflussen können. Unter PM10 versteht man, anschaulich formuliert, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser² von weniger als 10 µm (mehr dazu im Abschnitt 3).

Auch wenn in den letzten Jahren Reduzierungen in der Luftschadstoffbelastung durch Partikel zu verzeichnen sind, ist die Situation v. a. in städtischen Gebieten u.a. aufgrund des stetig steigenden Güter- und Individualverkehrs weiterhin nicht zufriedenstellend.

Um diesbezügliche Minderungsmaßnahmen einleiten zu können, insbesondere an Straßen mit festgestellten Grenzwertüberschreitungen, müssen die Herkunft, Zusammensetzung und Eigenschaften der Stoffe bekannt sein. Allerdings bestehen diesbezüglich noch Unklarheiten und Forschungsbedarf, beispielsweise in Konzentrationsmessungen und Emissionsmodellierungen. „Niemand scheint [...] so recht zu wissen, wie z. B. PM10-Emissions- und Immissionsprognosen für Kfz-Straßen unter Einschluß von Staubaufwirbelung und Straßenabrieb durchgeführt werden sollen“ (LOHMEYER, 2000). Es gibt verschiedene Messverfahren, und Ansätze zur Berechnung der Emission sind derzeit nur ungenügend an deutsche Verhältnisse angepasst. Zudem sind Struktur und chemische Zusammensetzung der Stoffe sehr uneinheitlich.

Ebenfalls unklar ist der Einfluss von Regen und Luftfeuchtigkeit auf durch Straßenverkehr verursachte PM10-Emissionen bzw. –Immissionen. Auswertungen von Messdaten in Straßen von Berlin und Leipzig zeigen zum Teil sich widersprechende Ergebnisse (vgl. LOHMEYER, 2001).

Das Ziel der folgenden Arbeit ist deshalb, erfasste Messdaten von PM10 und NO_x sowie zum meteorologischen Geschehen verschiedener Berliner Messstellen über einen Zeitraum von 19 Monaten hinsichtlich einer möglichen PM10-Emissions- und Immissionsveränderung unter dem Einfluss von Niederschlag und Luftfeuchte auszuwerten.

² Der aerodynamische Durchmesser eines Teilchens entspricht dem Durchmesser, den eine Kugel mit einer Dichte von 1g/cm³ haben müsste, damit sie die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufweisen würde wie das betrachtete Teilchen.

2 Warum diese Arbeit – Motivation

2.1 Das (unlösbare?) Problem des Straßenverkehrs

„HERR, DIE NOT IST GROß. DIE GEISTER, DIE ICH RIEF, WERD` ICH NUN NICHT LOS.“

Goethe kannte noch keine Autos und auch hatte sein Zauberlehrling wohl eher Probleme mit nicht zu bändigenden Reinigungsgeräten, und das Wasser in seinem Haus hat garantiert allen Staub fortgespült. Doch beschreibt dieser Ausspruch gut die Straßenverkehrssituation, in der wir uns heute befinden und auch die Ohnmacht, die so mancher dabei empfinden wird. „Transport has stirred up environmental debates throughout recorded history.“ (HAYASHI, Y., BUTTON, K., NIJKAMP, P. (HRSG.) 1999, S. xv).

Straßenverkehr gilt (neben Industrie u. a.) als ein bedeutender Verursacher von Feinstaubemissionen in Städten. Und doch oder allerdings ist motorisierter Straßenverkehr heute wohl kaum mehr wegzudenken, bildet er doch Grundlage unserer modernen Gesellschaft. Moderne Städte erfordern umfassende Transportsysteme. Große Teile des Güterverkehrs wurden von der Schiene auf die Straße verlagert, um den ‚just-in-time‘-Prinzip gerecht zu werden. Suburbanisierung einschließlich der Errichtung großer Einkaufs- und Freizeitzentren am Stadtrand sowie mehr Freizeit und ein höheres Lohnniveau führten zu einer deutlich höheren motorisierten Mobilität, zu einem großen Teil erzwungenermaßen aufgrund unangemessener Stadtplanung. Die Schaffung autofreundlicher Städte war bis vor gar nicht allzu langer Zeit ein angestrebtes Ziel.

Es soll zwar nicht Thema der Arbeit sein, die Rolle des Straßenverkehrs in Deutschland aufzuzeigen. Doch sollte diese Brücke geschlagen werden, da ein Großteil der Betrachtungen in vorliegender Arbeit auf Feinstaubemissionen und –immissionen basieren, die primär durch den KFZ-Verkehr verursacht werden.

Um Minderungsmaßnahmen auch langfristig durchsetzen zu können, sind nicht nur technische Lösungen in Form von verbesserter Abgasreinigung, Straßenbau und –reinigung von Nöten, sondern auch ein Umdenkprozess in der Politik und bei jedem Einzelnen.

2.2 Der geographische Bezug

„Das Bereitstellen von Informationen für die Auseinandersetzung von Staat, Wirtschaft und einzelnen Bürgern mit Fragen ihres ‚eigenen‘ Raumes ... gehört zweifellos eigenständig zu den Aufgaben, die in einer Gesellschaft bewältigt werden müssen und stellt eine historische Wurzel der Angewandten Geographie dar.“ (v. ROHR, 1990)

Mancher Leser der Arbeit wird sich sicher fragen, wieso beschäftigt sich ein Geograph mit solch einem Thema? Ist das nicht Aufgabe anderer Leute?

Obwohl in das Thema der Arbeit viele sehr spezielle und technische Aspekte einfließen, handelt es sich auch zweifellos um ein stadtoökologisches Thema, bei welchem der Schwerpunkt auf den klimatischen und lufthygienischen Sektor gelegt wird. Über diesen stadtoökologischen Betrachtungsaspekt ergibt sich auch der Bezug zur Landschaftsökologie und so zur Geographie, der hier kurz umrissen werden soll:

Im deutschen Sprachraum ist Stadtökologie eine relativ junge Disziplin. Sie beschäftigt sich als Teilgebiet der Ökologie mit den urbanen Ökosystemen, also mit „den städtischen Biozöosen, Biotopen und Ökosystemen, ihren Organismen und Standortbedingungen sowie mit Struktur, Funktion und Geschichte urbaner Ökosysteme... [Zudem ist Stadtökologie] ein integriertes Arbeitsfeld mehrerer Wissenschaften aus unterschiedlichen Bereichen und von Planung mit dem Ziel einer Verbesserung der Lebensbedingungen und einer dauerhaften umweltverträglichen Stadtentwicklung.“ (SUKOPP, H.; WTTIG, R. 1993, S.2). Stadtökologie beschreibt demnach den Gesamtfunktionszusammenhang des Ökosystems der Stadt.

Das Besondere an stadtoökologischen Fragestellungen ist, dass der Mensch und sein Wirken nicht außer Acht gelassen werden können. Der Mensch ist das wichtigste Element in urbanen Ökosystemen. Er bestimmt die Ausprägung und das Wirken der natürlichen Faktoren wesentlich, v.a. auf Grundlage von Technik, wirtschaftlichen und sozialen Aspekten. Zur letztendlichen Lösung der in der Arbeit aufgegriffenen Probleme kann demnach nicht nur eine rein naturwissenschaftliche Betrachtung im Vordergrund stehen, sondern es müssen ebenso historische und sozioökonomische Aspekte einbezogen werden.

Aufgrund dieser ganzheitlichen Betrachtung ist der enge Bezug zur Landschaftsökologie gegeben, deren Untersuchungsgegenstand wiederum das Landschaftsökosystem ist. LESER definiert das Landschaftsökosystem als ein „hochkomplexes stoffliches und energetisches System naturbürtiger, anthropogen veränderter und anthropogener Faktoren, Regler und Prozesse – die miteinander in direkten und indirekten Beziehungen stehen... [Es] wird aus Gründen der Methodik und Fachbereichsinteressen zweckgerichtet abgegrenzt, gleichwohl

aber als Ausschnitt der Realität untersucht, bewertet und geplant. (LESER, H. 1997b, S. 180). LESER (1997a) spricht auch von einer Stadtlandschaft als einem Teilraum der Kulturlandschaft.

Landschaftsökologie, auf den urbanen Raum bezogen, behandelt also das Ökosystem Stadt und seine Bewohner und stellt naturbürtige Faktoren in einen politischen und sozioökonomischen Zusammenhang. Wenn man Stadtökologie nun als eine Aufgabe der Landschaftsökologie begreift, lassen sich ihre Komponenten auch in das System der Landschaftsökologie mit ihrem Wirkungsgefüge aus bioökologischen und geökologischen Faktoren einordnen.

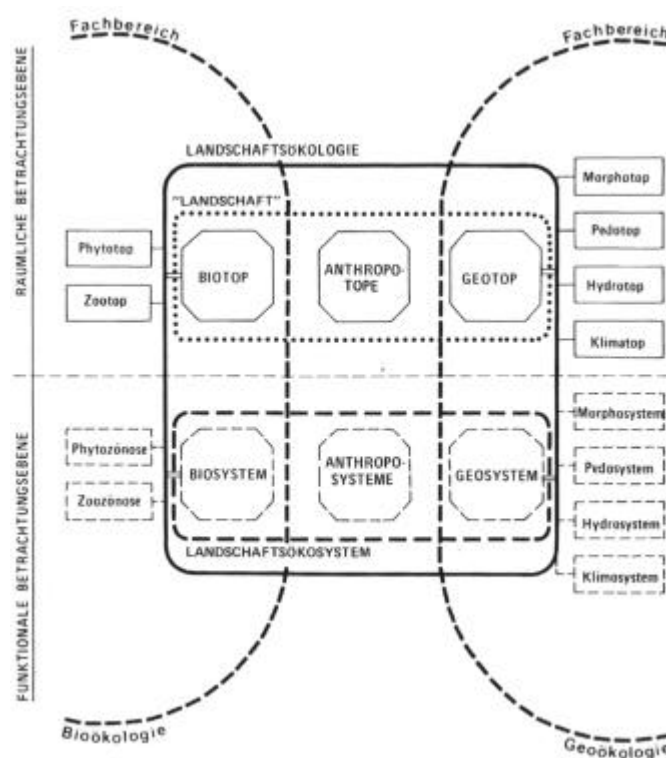


Abbildung 2-1: Das Landschaftsökosystem nach LESER (1997 b), S. 182

Aus der obigen Abbildung wird deutlich, dass es sich bei der Landschaftsökologie um einen Gesamtbetrachtungsansatz der Landschaft handelt und in vorliegender Arbeit demnach nur ein Subsystem betrachtet wird, da der Schwerpunkt auf dem klimatologischen Sektor liegt. Jedoch kann ohne das Verständnis von Teilzusammenhängen auch keine integrative Betrachtung, die sich in der räumlichen Planung realisiert, getroffen werden.

Aufgrund des gestellten Umfangs der Arbeit kann auf die sozialen und politischen Gesichtspunkte nur in soweit eingegangen werden, wie sie für das Thema der Arbeit noch unmittelbar relevant sind.

3 PM10 – seine Rolle und Eigenschaften

3.1 Staub und PM10 – eine kurze Einführung

Unter Staub versteht man allgemein dispergierte Feststoffpartikel in der Luft. Man unterscheidet die sehr langsam sedimentierenden Fein- oder Schwebestäube von den sich rasch ablagernden Sedimentationsstäuben. Feine Stäube können über sehr weite Distanzen transportiert werden (*LESER 1997 a*). Bei Schwebstäuben überwiegen Korngrößen von weniger als 10 Mikrometern.

Stäube setzen sich mit der Zeit als Staubdeposition ab. Die Verweildauer in der Luft ist abhängig von der Korngröße, Gestalt und der Masse sowie von externen Faktoren wie z.B. Windgeschwindigkeit. *FELLENBERG* (1999) bemerkt, dass sich Feinstäube weitgehend der Auswaschung durch den Regen entziehen können und in bodennahen Schichten 10 bis 20 Tage schwebfähig sind. Eine Angabe über die Korngröße gibt er hierbei allerdings nicht. Aber auch größere Partikel können eine höhere Verweildauer erreichen, besonders in engen Straßenschluchten, wo sie vom Verkehr immer wieder aufgewirbelt werden. Zudem ist die jahreszeitliche Staubbelastung nicht konstant. Im Berichtsband des bayerischen Landesamtes für Umweltschutz wird für Partikel zwischen 0,1 bis 10 µm aerodynamischen Durchmesser eine Verweildauer von einigen Stunden bis Tagen angegeben.

„Atmosphärische Schwebestäube stellen wohl den komplexesten Bestandteil aller Luftfremdstoffe dar. Während Immissionen^[3] von Spurengasen durch die Angabe der Massenkonzentrationen vollständig beschrieben werden, sind für die [komplette] Charakterisierung von Schwebestaubimmissionen Kenntnisse einer Reihe weiterer Parameter wie chemische Zusammensetzung, Phasenzustand und Größenverteilung, sowie Anzahl- und Oberflächenkonzentration der Partikel notwendig“ (*BUWAL; HÜGLIN 1999 S. 1*). Eine eindeutige Definition ist also nicht möglich.

Chemisch lassen sich luftgetragene Partikel in organische und anorganische Bestandteile gliedern. Den organischen Anteil bilden u.a. Pollen und Mikroorganismen sowie höher siedende Kohlenwasserstoffe; der anorganische Teil setzt sich beispielsweise aus feinen mineralischen Bestandteilen der Erdkruste und Schwermetallen zusammen. Elementarer Kohlenstoff tritt je nach Standort in unterschiedlichen Konzentrationen auf.

³ Man beachte, auch im Hinblick auf die Grenzwerte, dass Emission, die von einem Emittenten in die Luft abgegebene Konzentration von Stoffen beschreibt (g Schadstoff pro Stunde) und Immission die Schadstoffkonzentration in der Luft (µg bzw. mg Schadstoff pro m³ Luft).

Die Entstehung von Stäuben folgt unterschiedlichen Mechanismen. Man unterscheidet primäre Schwebestäube (auch Primäraerosole), also direkt emittierte Partikel, sowie sekundär gebildete Anteile (auch Sekundäraerosole), die aus gasförmigen Vorläufersubstanzen durch chemische Umwandlung in der Atmosphäre entstehen. Solche Umwandlungsvorgänge sind beispielsweise

- Verdampfung und Kondensation fester und flüssiger Stoffe aus Hochtemperaturprozessen (Vulkanismus, Metallgewinnung und –verarbeitung etc.)
- Verbrennungsvorgänge (Waldbrände, Verkehr)
- Gas-Partikelumwandlung (wie Oxidation bzw. Neutralisation von als Gas emittierten NO_x , SO_2 , NH_3 , zu Nitraten, Sulfaten und Ammoniumverbindungen) sowie
- Freisetzung der Kondensationskeime nach Verdunstung von Wolken- und Nebeltröpfchen (*BAYERISCHES AMT FÜR UMWELTSCHUTZ (HRSG.) 2000*).

Primär und sekundär gebildete Schwebestäube können natürlichen Ursprungs sein wie durch Wind ausgeblasene natürliche Mineralstäube, Meersalz, biologische Partikel oder aus biogen emittierten Kohlenwasserstoffen gebildete sekundäre Partikelchen (*vgl. HÜGLIN 2000*). Sie können aber auch anthropogen entstehen, z. B. durch emittierende Kraftwerks- und Industrieanlagen, Bergbau und Verkehr, welche im Allgemeinen als Hauptverursacher von Staubemissionen anzusehen sind.

In der Praxis werden Stäube mit Hilfe ihres aerodynamischen Durchmessers unterschieden. PM10 ist eine Größengruppe unter den Feinstäuben. ‚PM‘ ist die Abkürzung für ‚particulate matter‘. PM10 sind laut EU-Richtlinie eigentlich „die Partikel, die einen gröbenselektierenden Lufteinlaß passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.“ (Art 2,11). Genaugenommen handelt es sich dabei also um eine messtechnische Definition.

3.2 Quellen und Entstehung von straßenverkehrsinduziertem PM10

PM10-Emissionen können, wie in Punkt 3.1 schon angesprochen, auf verschiedene Quellen zurückgeführt werden. Da in dieser Arbeit straßenverkehrsinduzierte PM10-Emissionen von großem Belang sind, sollen diese Quellen hier auch eingehender besprochen werden.

Eine wichtige Quelle bilden die Auspuffemissionen, wovon Ruß (elementarer Kohlenstoff) ein wichtiger Inhaltsstoff ist, der v.a. aufgrund seiner gesundheitsschädlichen kanzerogenen Wirkungen interessiert. Auf befestigten Straßen kann Straßenstaub bzw. auch gröberes akkumuliertes Material wie Streusand aufgewirbelt werden. Von der Straße an sich sowie von

Reifen, von Brems- und Kupplungsbelägen werden durch Abrieb ebenfalls Partikel unterschiedlicher Zusammensetzung freigesetzt.

Die Aufwirbelung von Straßenstaub ist abhängig vom Zustand der Straße und deren Umgebungsbedingungen, wobei noch nicht alle Faktoren endgültig geklärt sind. Der Zustand der Straße wird u. a. von ihrem Alter, der Oberflächenstruktur (rissig oder glatt) und dem Material (Beton, Asphalt, Pflaster etc.) bestimmt. Die Umgebungsbedingungen werden beispielsweise durch die Landnutzung sowie Emissions- und Bebauungsstrukturen bestimmt.

Der Reifenabrieb ist abhängig von den Straßenverhältnissen, z. B. von der Rauigkeit des Belages. Das Ausmaß des Reifenabriebs wird aber auch maßgeblich vom Reifenmaterial selbst, beispielsweise dessen Inhaltsstoffen, Qualität und Alter bestimmt.

3.3 PM10 und Wasser

Anorganische Salze sind wesentliche Bestandteile atmosphärischer Schwebstaubbelastung. Sie können Wasser direkt als Kristallwasser binden bzw. ab- oder adsorbieren. Anorganische Salze bleiben bei steigender Feuchte solange stabil, bis ein charakteristischer Punkt (Deliqueszenzpunkt) erreicht wird, oberhalb dessen das Salz in Lösung geht. Wasser wird absorbiert, bis die Lösung gesättigt ist. Sinkt die relative Feuchte wieder, kristallisiert das Salz aber nicht am Deliqueszenzpunkt. Die Lösung bleibt noch eine Weile übersättigt und kristallisiert erst bei einer niedrigeren relativen Luftfeuchte wieder. Je nach Zusammensetzung können sich die hygroskopischen Eigenschaften von Mischsalzen von denen ihrer Einzelkomponenten unterscheiden. Auch organische bzw. biologische Partikel können erheblich zum Wassergehalt in PM10 beitragen. Pollen können beispielsweise ein hohes Maß an Wasser aufnehmen. (vgl. HÜGLIN 2000). Da bei Erreichen des Deliqueszenzpunktes Partikel quellen, ändert sich ihr Größenspektrum, was indirekt einen Einfluss auf ihre Konzentration innerhalb einer bestimmten Größenklasse ausüben kann.

3.4 Staub und seine epidemiologische Bedeutung

Anthropogen erzeugte Stäube sind für den Menschen, v.a. in dicht besiedelten Industriegebieten, von Bedeutung, da erhöhte Belastungen zu gesundheitlichen Schäden führen können.

Die schädliche Wirkung kleinster Partikel auf den menschlichen Organismus wurde lange unterschätzt, zumal viele Wirkungsmechanismen immer noch unklar sind. In den 70-er und 80-er Jahren wurden erste wirkungsbezogene epidemiologische Studien durchgeführt, die

einen deutlichen Zusammenhang zwischen Gesamtschwebstaubbelastung und Atemwegserkrankungen und erhöhten Sterblichkeiten feststellten. In dieser Zeit wurden auch die ersten Untersuchungen zum Größenspektrum der Partikel in der Luft durchgeführt (*KUHLBUSCH, JOHN 2000*).

Insbesondere Feinstäube können eine Vielzahl von Umweltgiften wie Schwermetalle anlagern und so beim Einatmen toxisch wirken. Dieselrußteilchen wird eine kanzerogene Wirkung bescheinigt, beispielsweise hervorgerufen durch Stoffe wie Benzo(a)pyren, die sich an den Kohlenstoffkern des Rußes anlagern. Weitere Wirkungen sind u.a. (chronische) Atemwegserkrankungen, Verschlechterung der Lungenfunktionen und eine daraus resultierende erhöhte Sterblichkeit. Dies gilt vor allem unter zusätzlicher Einwirkung weiterer Luftschadstoffe. Epidemiologische Studien in den USA und Europa zeigen, dass um so mehr gesundheitliche Folgen zu befürchten sind, je kleiner die eingeatmeten Partikel sind. Teilchen mit einem Durchmesser von weniger als 10 μm werden nur ungenügend in den oberen Atemwegen abgeschieden und können sich beim Einatmen auf die Schleimhäute der oberen Luftwege niederschlagen. Je kleiner die Partikel, desto tiefer können sie in die Lungen eindringen, da sie sich zunehmend wie gasförmige Stoffe verhalten. Erreichen sie eine Größe von kleiner 5 μm , können sie bis in die Lungenbläschen vordringen (*vgl. FELLEBERG 1999*).

Die Verweilzeit im Organismus ist abhängig vom Ablagerungsort. Teilchen, die nur bis in die oberen Luftwege gelangen, können durch Aushusten oder Verschlucken relativ schnell in einigen Minuten oder Stunden aus dem Körper entfernt werden. Sind sie bis in die Lungenbläschen vorgedrungen, werden sie mit Hilfe der Makrophagen über Atemwege oder Lymphbahnen entfernt, was mehrere Jahre dauern kann.

Bezugnehmend auf die Eindringtiefe von Feinstäuben in den menschlichen Organismus unterscheidet man

- die einatembare
- die thorakale sowie
- die alveolengängige Staubfraktion.

Erstere kann über Mund und Nase eingeatmet werden, zweitere gelangt über den Kehlkopf und die Luftröhre bis zu den Bronchien und Bronchiolen. Letztgenannte dringt bis in Alveolen, die Lungenbläschen vor. Als Feinstaub gilt nach dieser Ordnung alveolengängiger Staub.

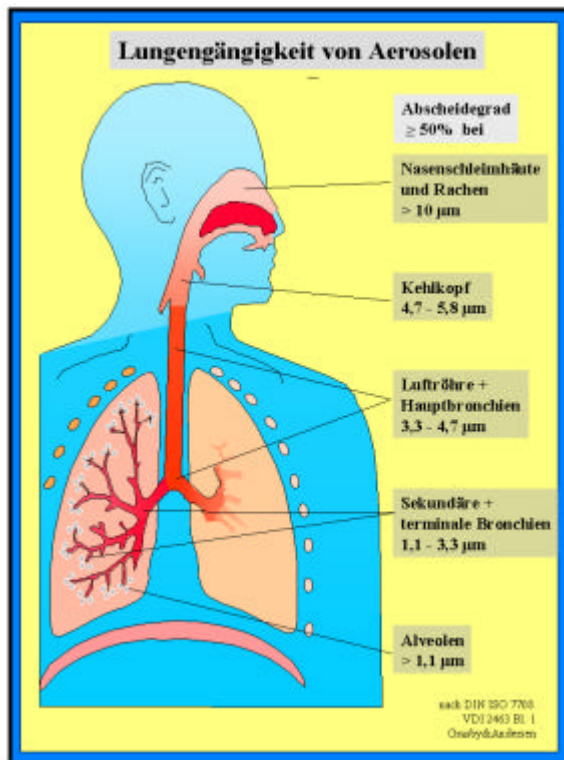


Abbildung 3-1: Abscheidungscharakteristik von Partikeln in der menschlichen Lunge

(aus: KUHLBUSCH, T., JOHN, A. (2000): Korngrößenabhängige Untersuchungen von Schwebstaub und Inhaltsstoffen, S.2)

Normalerweise orientieren sich die Grenzwerte für Schadstoffe in den EU-Richtlinien an den Empfehlungen der WHO. Da aber vorhandene epidemiologische Daten keine genaue Auskunft über die Wirkungsschwelle von kleinsten Partikeln geben, werden in den *Air Quality Guidelines for Europe* der WHO keine Grenzwerte empfohlen.

3.5 Die EU – Luftqualitätsrichtlinie und PM10

Die Richtlinie 1999/30/EG des Rates der Europäischen Union vom 22. April 1999 über „Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickoxide, Partikel und Blei in der Luft“ ist die erste Tochterrichtlinie zur EU-Luftqualitätsrahmenrichtlinie 96/62/EG. Nach ihr wird anhand einheitlicher Methoden und Kriterien die Luftqualität in den Mitgliedstaaten beurteilt. Sie war bis zum Sommer 2001 in deutsches Recht zu überführen, was bis jetzt (Stand April 2002) noch nicht geschehen ist.

Die EU-Luftqualitätsrichtlinie legt „...im Hinblick auf eine dauerhafte und umweltgerechte Entwicklung...“ und „...zur Verhütung und Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und Umwelt insgesamt...“ (Punkt 1) u.a. Grenzwerte für Konzentrationen von Feinstaubpartikeln (PM10) neu fest (**Tabelle 3-1**). Laut Artikel 5 müssen die Maßnahmen zur Verringerung von PM10 auch auf die Verringerung von PM2,5⁴ hinwirken.

⁴ PM2,5 sind analog zu PM10 „die Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlaß passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist.“ (Art2,12).

Messungen zeigen derzeit häufig eine Überschreitung der Grenzwerte im Innerortsbereich, also dort, wo sich viele Menschen aufhalten. Der Kenntnisstand über Emissionsprozesse derartiger Teilchen ist noch sehr ungenügend. In vielen Ländern der EU ist die Datenbasis bezüglich PM10 Emissionen bzw. –Immissionen nur gering. Über Auspuffemissionen und bedingt auch über Reifenabrieb gibt es in Deutschland ausreichend Informationen. Die Datenbasis über die anderen genannten Emissionsprozesse (Abrieb und Aufwirbelung) ist allerdings unzureichend. Deshalb fällt es oft schwer, den Erfolg möglicher Minderungsmaßnahmen abzuschätzen.

Tabelle 3-1: Grenzwerte für PM10

	Mittelungszeitraum	Grenzwert	Toleranzmenge	Zeitpunkt bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist
Stufe 1				
1. 24-Stunden-Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 Stunden	50µg/m ³ PM ₁₀ dürfen nicht öfter als 35 mal im Jahr überschritten werden	50 % bei Inkrafttreten dieser Richtlinie, lineare Reduzierung am 1. Januar 2001 und alle 12 Monate danach um einen gleichen jährlichen Prozentsatz bis auf 0 % am 1. Januar 2005	1. Januar 2005
2. Jahresgrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	40µg/m ³ PM ₁₀	20% bei Inkrafttreten dieser Richtlinie, lineare Reduzierung am 1. Januar 2001 und alle 12 Monate danach um einen gleichen jährlichen Prozentsatz bis auf 0% am 1. Januar 2005	1. Januar 2005
Stufe 2				
1. 24-Stunden-Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 Stunden	50µg/m ³ PM ₁₀ dürfen nicht öfter als 7 mal im Jahr überschritten werden	Aus den Daten abzuleiten, gleichwertig mit dem Grenzwert der Stufe 1	1. Januar 2010
2. Jahresgrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	20µg/m ³ PM ₁₀	50 % am 1. Januar 2005, lineare Reduzierung alle 12 Monate danach um einen gleichen jährlichen Prozentsatz bis auf 0 % am 1. Januar 2010	

nach: Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 L 163/41

4 Der Untersuchungsort Berlin

4.1 Geographische Einordnung

Gelegen im östlichen Teil des Norddeutschen Tieflands, im Jungmoränengebiet, ist Berlin mit einer Gesamtfläche von 890 km² und etwa 3,4 Millionen Einwohnern eine der größten städtischen Siedlungsagglomeration Deutschlands mit sehr hoher politischer und sozioökonomischer Bedeutung.

Aufgrund der hohen Bevölkerungs- Verkehrs- und Siedlungsdichte etc. kommt dem Schutz der städtischen Umwelt in allen Bereichen eine sehr hohe Bedeutung zu.

4.2 Das Klima

4.2.1 DER GROßKLIMATISCHE EINFLUSS

Die Klimasituation ist in Berlin und seinem Umland relativ einheitlich, da die Stadt nach allen Seiten hin offen ist und kaum orographische Hindernisse die Luftmassen stören. Nach der Klimaklassifikation von *NEEF* befindet sich Berlin aufgrund seiner mittleren geographischen Breite in der gemäßigten Klimazone im Übergangsklima. Es herrscht ozeanisch geprägtes Westwindklima mit ganzjährig vorherrschender Zyklonentätigkeit vor, das aber aufgrund seiner binnenländigen Lage auch kontinentale Einflüsse in Form antizyklonaler Phasen aufweist. Die bewölkungsarmen Monate Mai, Juni und September sind im langjährigen Mittel besonders antizyklonal beeinflusst. 52,4 % der Winde wehen aus westlicher Richtung. 30 % kommen aus südöstlicher bis nordöstlicher Richtung und beeinflussen die Stadt somit kontinental. Die Witterung ist sehr wechselhaft. Da Luftströmungen ozeanischer Herkunft vorherrschen, bestimmt hauptsächlich ihr Verhalten die Temperatur- aber auch die Niederschlagsverteilung. Aber auch die Luftströmungen kontinentaler Herkunft haben sich bei ihrem Vordringen in Richtung Westen allmählich erwärmt, da sie zunehmend in Gebiete mit günstigerem Strahlungshaushalt gestoßen sind, wo strahlungsreflektierende Schneedecken wesentlich weniger häufig auftreten als in ihrem Herkunftsgebieten in Osteuropa (*LIEDKE, H.; MARCINEK, J., 1995*).

Weiterhin typisch ist ein ausgeprägtes Jahreszeitenklima mit weitestgehend negativer Strahlungsbilanz im Winter und positiver im Sommer. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt etwa 8,8°C, wobei die Durchschnittstemperaturen im Januar -0,5°C und im Juli 17,9°C betragen (*ZIMM 1990*).

Im Vergleich zu den Gebieten im westlichen Binnentiefland Deutschlands sind die Niederschlagsjahressummen im östlichen Binnentiefland, also auch in der Region um Berlin, relativ niedrig. Aufgrund der zunehmenden Atlantikdistanz nimmt infolge der Verringerung der Häufigkeit von Frontpassagen sowie aufgrund der Reduzierung der Niederschlagswirksamkeit der Fronten die Niederschlagshäufigkeit von West nach Ost ab. Zudem erreichen die weichselzeitlichen Platten um Berlin nur durchschnittliche Höhen von 60 bis 80 m und liegen so unter den Durchschnittshöhen des nördlichen und südlichen Landrückens (> 100 m), so dass im Umland unter normalen Geländebedingungen weiträumig etwa 550 mm im langjährigen Durchschnitt erreicht werden (*LIEDKE, H.; MARCINEK, J., 1995*). In Berlin Dahlem werden im langjährigem Mittel (1904 bis 1964) ca. 589 mm Niederschlag, also leicht höhere Werte gemessen (*INSTITUT FÜR METEOROLOGIE, Berlin Dahlem*). Die Niederschlagshöhen variieren aber innerhalb des Stadtgebietes. Darauf soll noch einmal eingegangen werden, wenn die meteorologische Situation des untersuchten Zeitraums vorgestellt werden wird.

Der Jahresgang der Niederschläge weist einen für das langjährige Mittel typischen Verlauf auf. Es gibt ein winterliches Neben- und ein sommerliches Hauptmaximum der Niederschlagsmenge. Das Maximum der Niederschlagshäufigkeit ist allerdings in den Wintermonaten anzutreffen. Deshalb müssen die höheren Niederschlagsmengen im Sommer v. a. auf den erhöhten Wasserdampfgehalt in der Luft aufgrund deren erhöhter Wasserdampfaufnahmefähigkeit bei höheren Temperaturen zurückgeführt werden. Niederschlagswirksamen Vorgängen geht im Sommer deshalb eine erhöhte Niederschlagsausbeute einher. Dann dominieren demzufolge Schauerniederschläge. Aber auch die niederschlagsergiebigen Gewitterkonvektionen tragen zu den hohen Niederschlagssummen im Sommer bei (*ZIMM 1990, S. 238; LIEDKE, H.; MARCINEK, J., 1995*). Im Abschnitt 6 werden die Klimadaten aus dem Messzeitraum noch einmal mit den langjährigen klimatischen Mittelwerten verglichen.

4.2.2 DAS STADTKLIMA

Zu stadtklimatischen Problemen soll nur ein kurzer Abriss, hauptsächlich zur Luftschadstoffbelastung, gegeben werden, da das Thema sehr komplex ist. Allgemein kann festgestellt werden, dass innerhalb der Stadt aufgrund ‚positiver Anomalien‘ charakteristische Unterschiede zum Umland auftreten.

Die sehr dichte Bebauung und Bodenversiegelung v.a. im Stadtzentrum wirkt als Wärmespeicher, und es bildet sich somit ein stadttypisches Kleinklima heraus. Dies ist durch

Überwärmung, veränderten Windstärken und -geschwindigkeiten sowie erhöhter Schwülegefahr gekennzeichnet. Dieser Effekt wird durch die anthropogene Wärmeemission in Form von Heizung und Industrie verstärkt. In Richtung Stadtrand und größerer Grüngürtel nimmt die Belastung ab. Jedoch ist auch in den Großsiedlungen am Stadtrand die klimatische Belastung hoch (*FNP 94*).

Über der Stadt entwickelt sich ein eigener städtischer Luftkörper, der durch hohe Luftbelastungen aus Verbrennungsprozessrückständen, Stäuben u.a. Luftfremdstoffen gekennzeichnet ist (*ZIMM 1990*). In weiten Teilen des (Haupt-) Straßennetzes werden beispielsweise die Grenzwerte bezüglich Lärm und Schadstoffausstoß überschritten. Gebiete hoher Emissionen sind v.a. Innenstadtbezirke, wo der Schadstoffausstoß von Kraftfahrzeugen, (Ofen-) Heizungen und Industrie sehr hoch ist. Die Immissionsgebiete entsprechen in etwa den Gebieten mit hohen Emissionen. Es sind noch charakteristische Unterschiede zwischen den ehemaligen Ost- und Westteilen Berlins feststellbar. Im Westteil ist der Kraftfahrzeugverkehr Hauptverursacher nahezu aller Schadstoffkomponenten. Im Ostteil hingegen kommen dazu noch Emissionen von Ofenheizungen und Industrieanlagen (*FNP 94*).

4.2.3 DIE STAUBBELASTUNG IN BERLIN

Die Konzentration von Luftschadstoffen wird in Berlin schon seit mehr als 30 Jahren gemessen. Die anfangs 43 Messstationen wurden aber im Laufe der Zeit aufgrund sinkender Belastungen auf 21 reduziert, wovon heute an 18 Stationen suspendierte Partikel gemessen werden. Doch neue und höhere Anforderungen sowie ein höheres Umweltbewusstsein etc. werden Messungen auch weiterhin nötig machen.

In **Abbildung 4.1** wird deutlich, dass der Trend der Staubkonzentration in Berlin schon seit den 70-er Jahren abwärts gerichtet ist. Dennoch ist zwischenzeitlich in den 80er Jahren eine erneute Zunahme der Belastung erkennbar, die durch die damalige Energiekrise und dem damit verbundenen Einsatz von Rohbraunkohle in der DDR verursacht wurde.

Aufgrund der politischen Veränderungen der letzten zwölf Jahre sind auch erhebliche Veränderungen in der Luftbelastung feststellbar. Die im Ostteil der Stadt verbreitete Kohlefeuerung wurde i. a. durch auf Erdgas und Fernwärme basierende Gebäudeheizungen umgestellt. Innerstädtische Heizkraftwerke wurden mit modernen Rauchgaswäschen ausgestattet und die Emissionen durch Industrie konnten gemindert werden (*vgl. STRIEDER 1998*). Dessen ungeachtet bleibt die Emission durch Verkehr als großes Problem bestehen (siehe Kapitel 4.3.2) (*SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG [II]*).

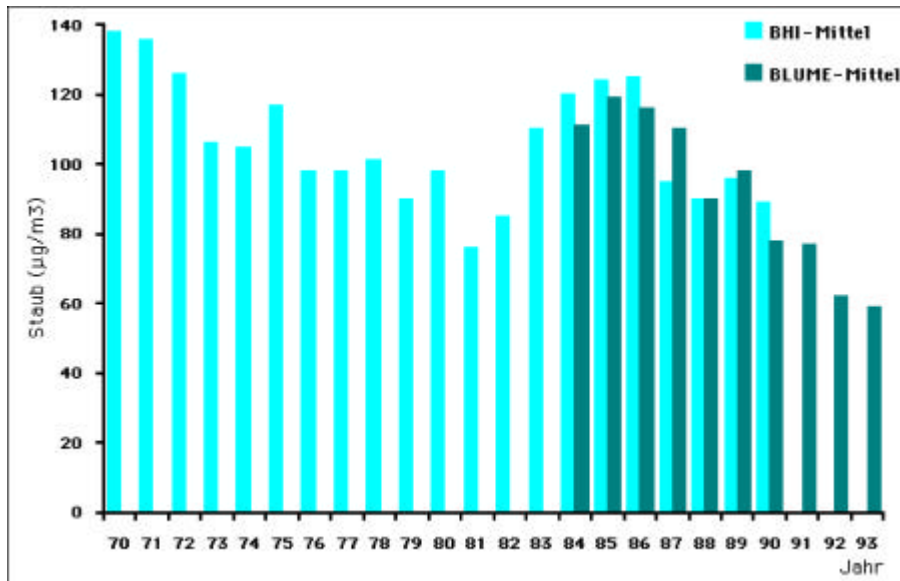


Abbildung 4-1: Mittlere Schwebstaubimmissionen zwischen 1970 und 1993

(im BHI-Mittel von 11 Messstationen der Bezirkshygieneinspektion Berlin-Ost von 1970 – 1990 und des BLUME-Mittel von 5 BLUME-Messstationen von 1984 bis 1993)

(Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung [II])

Der weiteren Entwicklung wird für Gesamtdeutschland ebenfalls ein Abwärtstrend vorausgesagt. Nach Abschätzung des Umweltbundesamtes können sich im Jahre 2005 die PM10-Emissionen im Vergleich zum Ende der 90-er Jahre um etwa 30 % verringern (IHK NORDSCHWARZWALD 2000).

4.2.4 ZUSAMMENSETZUNG UND HERKUNFT DES SCHWEBSTAUBES IN BERLIN

Der PM10-Anteil des in Berlin gemessenen Schwebstaubes beträgt laut Angaben der Senatsverwaltung 75 %, der PM2,5- Anteil wird mit etwa 50 % angegeben.

Die Zusammensetzung des Feinstaubes besteht aus etwa einem Drittel kohlenstoffhaltigem Material (Ruß, Teer, Öl), aus einem weiteren Drittel aus Sulfat-, Ammonium- und Nitratpartikeln, zu einem Viertel aus Erdkrustenmaterial und zu etwa zehn Prozent aus Wasser.

Insgesamt ist Berlin zu etwa einem Fünftel an den Gesamtschwebstaubimmissionen selbst beteiligt, der größte Teil gelangt demnach durch Ferntransport in die Stadt. (SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG [II]).

LENSCHOW ET AL. (2001) gehen vergleichsweise von etwa 50 % städtischer PM10-Hintergrundbelastung aus, die durch natürliche Quellen hervorgerufen oder durch Ferntransport von außerhalb in die Stadt transportiert wird. Diese 50 % beziehen sich hier allerdings nur auf den PM10- Anteil der Staubbeklastung. Laut den Angaben LENSCHOWs handelt es sich dabei v.a. um sekundär gebildetes Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat sowie um natürlicherseits

entstandene Stoffe. Der hohe Anteil von Nitrat- und Ammoniumverbindungen resultiert aus der landwirtschaftlich genutzten, ruralen Umgebung Berlins.

An Hauptverkehrsstraßen sind die PM10-Konzentrationen um bis zu 40 % höher als im urbanen Hintergrund. Etwa die Hälfte dieser zusätzlichen Belastung wird durch Auspuffausstoß und Reifenabrieb verursacht, die andere wahrscheinlich durch Aufwirbelung von abgelagertem Material (*LENSCHOW ET AL, 2000*).

4.3 Die Verkehrssituation

4.3.1 EIN KURZER RÜCKBLICK

Die Wende zum 20. Jahrhundert brachte einen grundlegenden Wandel der städtischen Umweltproblematik mit sich – nicht nur in Berlin. „Verkehrsimmissionen, die noch im späten 19. Jahrhundert weit hinter den Belastungen aus dem Hausbrand zurück blieben, gewannen nach der Jahrhundertwende schnell an Brisanz.“ (*BERNHARD 2001*). Besonders Abgase von Bussen und von Eisenbahnen sowie zunehmend auch von Autos belasten die Luft. Allerdings verloren die Abgase von Schienenfahrzeugen weitestgehend an Bedeutung.

Von der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert bis zum zweiten Weltkrieg wurden die Grundlagen der heutigen Verkehrssysteme geschaffen. Das Straßennetz wurde ausgebaut bzw. an neue Situationen angepasst, das Kraftfahrzeug in den allgemeinen Straßenverkehr integriert. PKW's, LKW's, Busse und Motorräder gewannen an Bedeutung. Schon in der Zwischenkriegszeit wurde durch Preissenkungen der Nutzerkreis privater Kraftfahrzeuge erweitert. Ein Auto zu haben wurde immer weniger Privileg der höheren Schichten und der gehobenen Mittelschicht.

Doch bereits damals wurde auf die Verschlechterung der urbanen Lebensbedingungen neben Unfällen als Folge der Motorisierung von Fachwelt und Öffentlichkeit hingewiesen. Verkehrsemissionen wurden zu einem kommunal und staatlich anerkannten Problem mit Handlungsbedarf. Sie waren sicht- und fühlbar. Der Ausstoß von Abgasen in unmittelbarer Bodennähe wurde als gesundheitlich bedeutend im negativen Sinne anerkannt. Enge Straßen verhinderten den Abtransport von Abgasen durch Wind. (*BENDIKAT 2001*).

Auch wurde damals bereits die Rolle des Staubes angesprochen. Ab 1906 unterschied der *„Deutsche Verein für öffentliche Gesundheitspflege“* zwischen Decken- und Verkehrstaub. „Deckenstaub entstand in Zuge des Abschleifens des Straßendeckenmaterials durch Fahrzeuge jeglicher Art“ (*BERNHARDT 2001*). Die enthaltenen mineralischen Stoffe waren ein Maß für die Straßenabnutzung durch Verkehr. Die Ursache von Verkehrstaub war Zerreißung von Partikeln. Weiterhin unterschied man den Abrieb von Schienenfahrzeugen,

Ruß aus Heizungsanlagen sowie Staub aus Müllentsorgung und Gewerbe. 1905 ließ das Reichsgesundheitsamt erstmals Staubkollektoren in einer Höhe von zwei Metern an Hauptverkehrsstraßen anbringen. Mit deren Hilfe wurden Luftschadstoffe quantitativ und nach physikalisch-chemischen Eigenschaften untersucht. Nach dem ersten Weltkrieg wurden die Messungen durch die ‚Landesanstalt für Wasserhygiene‘ mit verbesserten Instrumenten und Verfahren fortgesetzt. Doch genoss Berlin auch in den zwanziger Jahren den Ruf der ‚saubersten Stadt Europas‘ (BERNHARD 2001).

4.3.2 DIE HEUTIGE SITUATION

Im Folgenden soll nur auf einzelne Aspekte – v. a. auf den motorisierten Individual- und den LKW-Verkehr eingegangen werden. 1999 waren in Berlin 1,1 Millionen Personenkraftfahrzeuge sowie leichte Nutzfahrzeuge registriert. Das bedeutet, dass pro 1000 Einwohner 323 Fahrzeuge registriert sind. Dazu kommen noch etwa 100.000 Schwerlastfahrzeuge. Verglichen mit anderen Städten dieser Größe ist die Fahrzeugdichte noch relativ gering (LENSCHOW ET AL, 2000)! Der deutsche Durchschnitt liegt bei 502 PKW pro 1000 Einwohner (ERDKUNDE-ONLINE).

Abbildung 4.2 zeigt die Entwicklung der PKW-Dichten einiger europäischer Länder im Vergleich zueinander in verschiedenen Jahren mit einer Prognose für das Jahr 2020. Es wird deutlich, dass eine Abnahme des Straßenverkehrs in den nächsten Jahren nicht zu erwarten ist. Das Problem des verkehrsinduzierten PM10's wird also weiterhin brisant bleiben.

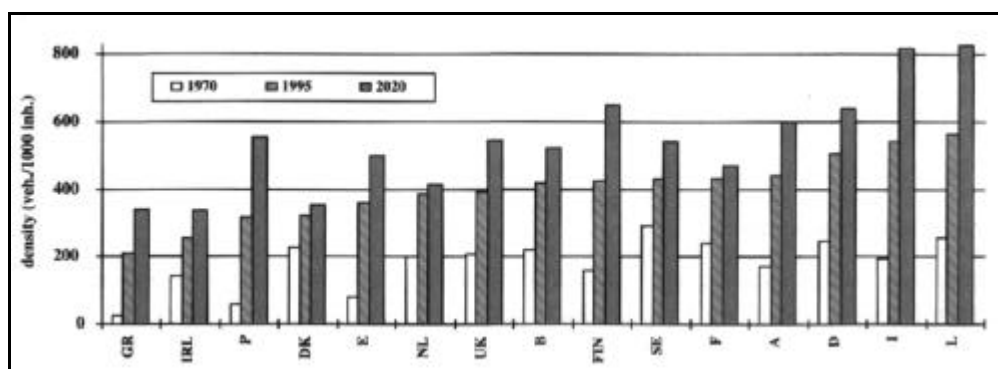


Abbildung 4-2: PKW-Dichte in europäischen Ländern

(aus COST 319, Estimation of pollutant emissions from transport, S. 66)

Teil B

5 Datengrundlage

5.1 Die betrachteten Messstationen in Berlin

5.1.1 ALLGEMEINES

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden PM₁₀- und NO_x - Immissionswerte von sechs verschiedenen Messstationen aus dem Berliner Luftgütemessnetz (BLUME) über einen 19-monatigen Zeitraum betrachtet (siehe auch Kapitel 6). Die Nummern der Stationen wurden übernommen. An den BLUME-Messstationen werden Luftschadstoffkonzentrationen kontinuierlich gemessen und von einer Messzentrale als Halbstunden- bzw. Tageswerte aufgezeichnet. Meteorologische Daten wurden von der Messstation Berlin-Dahlem verwendet.

Die PM₁₀-Konzentration wird, wie angesprochen, an allen Stationen kontinuierlich gemessen. Die Luft wird dabei mit einem Durchsatz von einem Kubikmeter pro Stunde angesaugt und durch einen Filter geleitet. Leicht radioaktive β -Strahler durchstrahlen den Filter. Mit zunehmender Staubbelastung des Filters werden die durchdringenden Strahlen abgeschwächt. Diese Verringerung der Strahlungsintensität durch das zeitliche Anwachsen der Staubmasse wird in ein Signal umgewandelt, auf Grundlage dessen man die Staub- bzw. PM₁₀- Konzentration bestimmen kann.

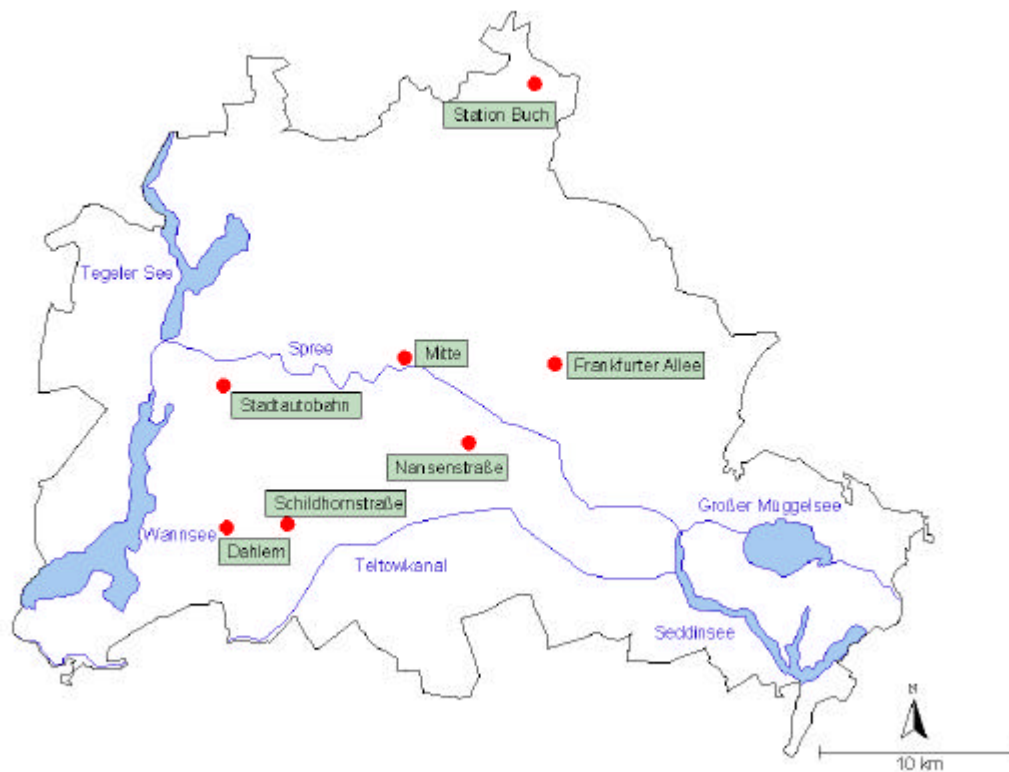


Abbildung 5-1: Skizze über die Lage der Messstellen in Berlin

5.1.2 STATION 14 – STADTAUTOBAHN (LERSCHPFAD)

Der Messcontainer der innerstädtischen Station 14 steht westlich der an dieser Stelle von Süd nach Nord verlaufenden Stadtautobahn in der Nähe eines Wohngebietes (Abb. A1-1). Das Verkehrsaufkommen ist entsprechend sehr hoch [bis ca. 150.000 KfZ pro Tag (*Umweltatlas der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, II*)]. Der Container ist in ca. 5 m Höhe über der Autobahn angebracht. Auf der anderen, östlichen Seite der Stadtautobahn verläuft eine S-Bahnlinie. Westlich der Messstelle befindet sich in unmittelbarer in der Nähe ein Friedhof. Die Messungen spiegeln laut den Angaben der Berliner Senatsverwaltung die Belastung der Stadtautobahn wider.

5.1.3 STATION 42 – NANSENSTRASSE (NEUKÖLLN)

Die Nansenstraße (Abb. A1-5) repräsentiert einen innerstädtischen Standort mit städtischer Hintergrundbelastung. Es handelt sich um ein relativ dicht bebauten Wohngebiet mit vergleichsweise niedrigerem Verkehrsaufkommen. Stattdessen sind laut Angaben der Berliner Senatsverwaltung in diesem Gebiet die Hausbrandemissionen vergleichsweise hoch.

Der Verlauf der Straße ist nach Nordost orientiert. Die Messstelle befindet sich auf der östlichen Straßenseite neben dem Gelände einer Kindertagesstätte. Auf der anderen Straßenseite befindet sich in leicht südlicher Richtung ein Spielplatz.

5.1.4 STATION 71 – MITTE (PAROCHIALSTRASSE)

Die Station Berlin-Mitte (Abb. A1-4) liegt im innerstädtischen Gebiet in Berlin Charlotteburg an einem Parkplatz. Im Nordwesten verläuft eine stark befahrene Hauptverkehrsstraße. Deshalb treten höhere NO_x - und PM10-Belastungen auf, obwohl die Umgebung an sich eher mittleres Verkehrsaufkommen aufweist. Der Standort ist also verkehrsbeeinflusst, stellt aber keine direkte Verkehrsstation dar. Südlich und östlich um die Station befinden sich Verwaltungsgebäude.

5.1.5 STATION 77 – BUCH

Die Station Buch (Abb. A1-6) liegt am nördlichen Stadtrand an einem Klinikum in einem verkehrarmen Bereich. Die Messstelle selbst befindet sich auf einer Brachfläche, in der Nähe stehen einzelne Häuser.

5.1.6 STATION 117 – SCHILDHORNSTRASSE

Die Schildhornstraße (Abb. A1-3) ist eine vierspurig ausgebaute Straße in einem Wohngebiet in Berlin Steglitz, welche in ihrer Fortsetzung in die Stadtautobahn A107 einmündet. Das durchschnittliche Verkehrsaufkommen ist entsprechend hoch: etwa 45.000 Fahrzeuge pro Tag. Es handelt sich hier um eine Straßenschlucht mit behindertem Luftaustausch.

5.1.7 STATION 174 – FRANKFURTER ALLEE

Die Frankfurter Allee (Abb. A1-2) ist eine sechsspurige Hauptverkehrsstraße in Berlin-Friedrichshain und wichtige Verkehrsverbindung im Ostteil der Stadt mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen von etwa 50.000-60.000 KfZ pro Tag (*RAUTERBERG-WULFF 2000, S.6*). Es handelt sich um eine Straßenschlucht von ca. 42 m Breite (*SENATSVERWALTUNG BERLIN*). In der Umgebung der Messstation überwiegt dichte Wohnbebauung mit vielen Geschäften. Die Hausbrandemissionen sind ebenfalls hoch. Die Station liegt in unmittelbarer Straßennähe.

5.2 Messdaten

5.2.1 DATENVERFÜGBARKEIT

Alle verwendeten Daten stammen aus dem Messzeitraum vom 1. Juni 1999 bis zum 31. Dezember 2000. Im allgemeinen handelt es sich um halbstündige Messwerte. Geht man von einer vollständigen Datenerfassung aus, stehen für jede zu untersuchende Option 27840 Werte zur Verfügung. Allerdings treten aus den unterschiedlichsten Gründen Messausfälle auf. **Tabelle 5-1** listet für die PM10- und NO_x-Messungen an den einzelnen Stationen die Anzahl der zugrundeliegenden Daten auf.

Tabelle 5-1: Anzahl der PM10- und NO_x-Messwerte an den einzelnen Stationen

Station	Frankfurter Allee	Schildhornstraße	Lerschpfad/ Stadtauto- bahn	Nansenstraße	Parochialstraße/ Mitte	Buch
Theoretische Anzahl von PM10- Werten im Messzeitraum	27840	27840	27840	27840	27840	27840
Tatsächliche Anzahl der PM10- Werte	25504	27394	26111	27523	27382	27411
Prozent	91,61	98,39	93,79	98,86	98,35	98,46
Theoretische Anzahl von NO _x - Werten im Messzeitraum	27840	27840	27840	27840	27840	0
Tatsächliche Anzahl der NO _x - Werte	26614	27592	27191	27655	26966	0
Prozent	95,60	99,11	97,67	99,34	96,86	0

Die Luftqualitätsrichtlinie 1999/30/EG setzt im Anhang VIII auch Qualitätsrichtlinien für die erfassten Messdaten zur Luftschadstoffbelastung. Dabei wird für PM10 sowie für Stickoxide bei kontinuierlicher Messung eine Mindestdatenerfassung von 90 % verlangt. Die Verfügbarkeit der Daten wäre somit repräsentativ.

Die *meteorologischen Daten* der Station Berlin Dahlem wurden von der FU Berlin, Institut für Meteorologie zur Verfügung gestellt. Messausfälle kamen nicht vor. Besonders relevant sind hierbei die halbstündigen Messungen des Niederschlagstyps (beispielsweise Regen), der Niederschlagsmenge, der relativen Luftfeuchte, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

5.2.2 RÄUMLICHE UND ZEITLICHE REPRÄSENTANZ DER METEOROLOGISCHEN DATEN

Allen Auswertungen zwischen meteorologischen Daten und PM₁₀- bzw. NO_x-Belastungen an den einzelnen Stationen liegen immer nur die Niederschlagsdaten der Station Berlin Dahlem zu Grunde. Dieser Kompromiss, nur eine Messstation als Bezugsgrundlage zu benutzen, musste aufgrund der vorhandenen Datenlage eingegangen werden. Hierbei ist in der Auswertung und Diskussion zu beachten, dass es gerade bei einzelnen kurzzeitigen Niederschlagsereignissen bezüglich Niederschlagsmenge, Niederschlagsdauer sowie Beginn bzw. Ende eines Niederschlagsereignisses zu Ungenauigkeiten in der Auswertung kommen kann.

Beispielsweise treten im westlichen Stadtgebiet von Berlin hohe Niederschlagswerte auf. Auch wenn die Höhenzüge dort nur schwach ausgeprägt sind, können sie Steigungsregen erzeugen. Im Lee der west-südwestlichen Hauptwindrichtung, im zentralen Stadtgebiet, im Bereich der Spreeniederung werden geringere Niederschlagshöhen gemessen (ca. 540 mm/a). Aufgrund der erhöhten Reibungs- und Stauwirkung der Baumassen und Wärmeinseleffekten werden in den östlichen Stadtgebieten erneut höhere Niederschlagswerte festgestellt (ca. 600 mm/a). Das sich im Osten anschließende Umland ist dann wieder durch geringere Niederschlagshöhen gekennzeichnet (SUKOPP, H., 1990, siehe auch **Abbildung 5-2**).

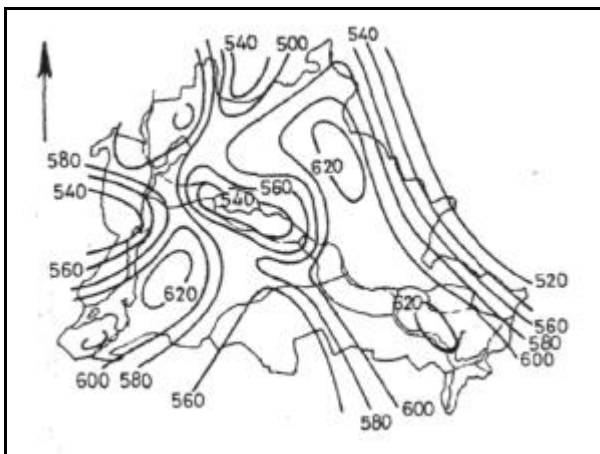


Abbildung 5-2: Mittlere Niederschlagsverteilung [mm] in Berlin
(aus: SCHLAAK 1977 in SUKOPP 1990, S. 56)

Berlin Dahlem ist ein städtisch geprägter Stadtteil, der mit den Bedingungen für die meisten betrachteten Messstandorte etwa vergleichbar ist. Es wird aber davon ausgegangen, dass, abgesehen von mikroskaligen und den erwähnten stadtklimatisch bedingten Besonderheiten, sich das Klima in den einzelnen Teilen Berlins nicht grundlegend unterscheiden wird.

Dies zeigt u. a. der Vergleich der relativen Luftfeuchte an der Station Schöneberg und der Station Berlin Dahlem. Hier kann festgestellt werden, dass in ca. 94 % der Fälle die Abweichung nicht mehr als 10 % rel. Feuchte beträgt. In etwa 2/3 der Fälle beträgt die Abweichung nicht mehr als 5 % rel. Feuchte.

Tabelle 5-2: Vergleich Luftfeuchtwerte Station Dahlem und Schöneberg

Gesamt	27840 Werte	
Abweichung kleiner 10% rel. Feuchte	26192 Werte	= 94,1 %
Abweichung kleiner 5% rel. Feuchte	18883 Werte	= 67,8 %

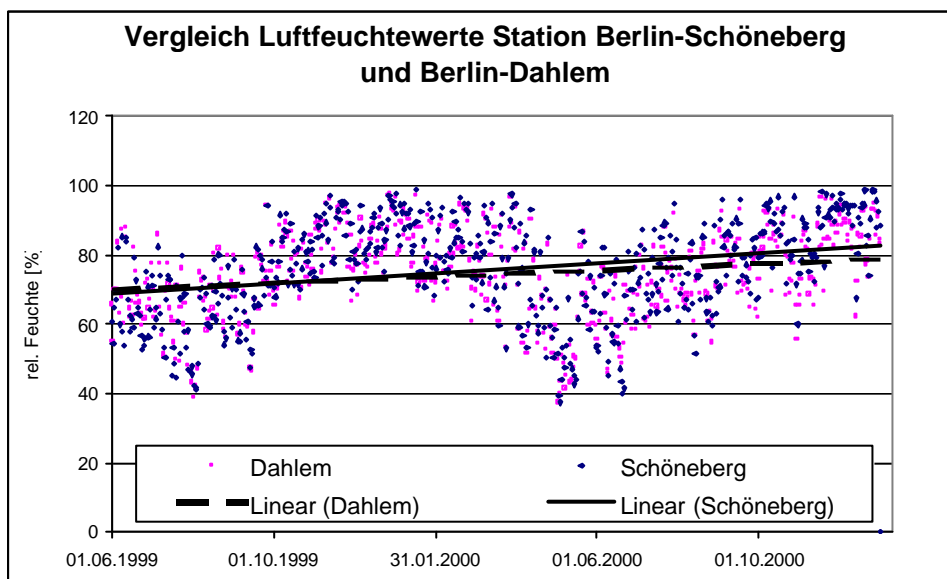


Abbildung 5-3: Vergleich Luftfeuchtwerte der Stationen Berlin Dahlem und Schöneberg
Anmerkung: Der Übersicht halber werden in dieser Abbildung Tagesmittelwerte und keine halbstündigen Werte verwendet.

Betrachtet man die Lage der Stationen in **Abbildung 5-1**, ist festzustellen, dass die Station Berlin Dahlem für die Schildhornstraße am repräsentativsten ist, so dass die Ergebnisse, die anhand der Daten der Schildhornstraße gewonnen wurden, wohl die höchste Sicherheit aufweisen.

Zusätzlich wurden Daten aus zwei früheren Projekten mit Intensivmesskampagnen herangezogen. Es handelt sich dabei um Messungen von *RAUTERBERG-WULFF* in der Frankfurter Allee aus dem Jahre 1999 (*RAUTERBERG-WULFF 2000*) sowie um Messungen des Ingenieurbüros *LOHMEYER* aus dem Jahre 2000 in der Schildhornstraße (*LOHMEYER 2001*). Eine genauere Beschreibung der Gegebenheiten erfolgt in den entsprechenden beiden Kapiteln 7 und 8.

5.3. Verwendete Programme zur Datenanalyse

Die Datenanalyse fand hauptsächlich mit EXCEL 2000 statt.

Dazu mussten in einem ersten Schritt die Daten der verschiedenen Messstationen aufbereitet, zusammengeführt und bereinigt werden. Das Bereinigen war in sofern nötig, um fehlende Messwerte nicht mit in die Analyse einfließen zu lassen.

Mit zusätzlichen Analyse-Tools konnten in EXCEL 2000 auch statistische Berechnungen relativ problemlos durchgeführt werden.

6 Datenauswertung und Ergebnisse

6.1 Wochengänge der NO_x - und PM_{10} -Gesamtbelastung

Im Folgenden sollen die Wochengänge von PM_{10} und NO_x der einzelnen Stationen verglichen werden (**Abbildungen 6-1 bis 6-6**). Es handelt sich dabei um die Wochengänge der Gesamtbelastung. Die *Gesamtbelastung* ergibt sich aus der Summe der *Vorbelastung* und der *Zusatzbelastung*. Bei der Vorbelastung handelt es sich um die Immissionsbelastung, die bereits großräumig vorhanden ist, beispielsweise hervorgerufen durch Ferntransport von Stoffen bzw. Emissionen weiter entfernt fließenden Verkehrs, Industrie und Haushalten. Als Zusatzbelastung hingegen wird die Immission bezeichnet, welche, durch Emission in der jeweiligen Straße verursacht, gemessen wird.

Zusätzlich ist im Anhang A1 das Verhältnis der Gesamtbelastung von PM_{10} zu NO_x dargestellt. Dort ist außerdem der PM_{10} -Tagesverlauf noch einmal extra dargestellt, um den genauen Tagesgang ablesen zu können. Aus Darstellungsgründen wurde bei den Abbildungen im Text auf eine einheitliche Skalierung verzichtet.

NO_x wird in Berechnungen oft als sog. Tracer genutzt. Teilweise wird auch näherungsweise direkt von den NO_x -Konzentrationen auf die PM_{10} -Konzentration geschlossen. Bei einem derartigen Herangehen wird davon ausgegangen, dass sich PM_{10} gasähnlich verhält und ein ähnliches Ausbreitungsverhalten wie beispielsweise NO_x aufweist. Da das Ausbreitungsverhalten und die Emissionsmengen von NO_x im Allgemeinen sind, können durch PM_{10} - und NO_x - Korrelationen abweichende Ausbreitungs- und Emissionsmuster abgeleitet werden oder durch einen Dreisatz aus bekannten NO_x -Emissionen, PM_{10} - und NO_x -Zusatzbelastung auf die PM_{10} -Emission geschlossen werden.

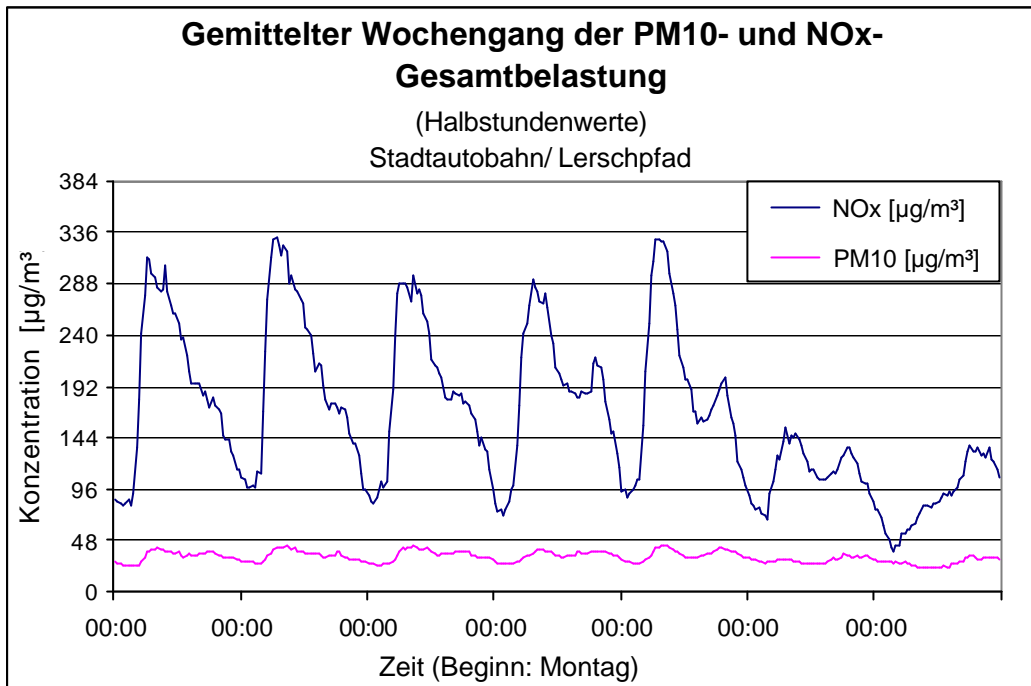


Abbildung 6-1: NO_x - und PM_{10} -Gesamtbelastung Stadtautobahn (siehe auch Abb. A2-1 und A2-2)

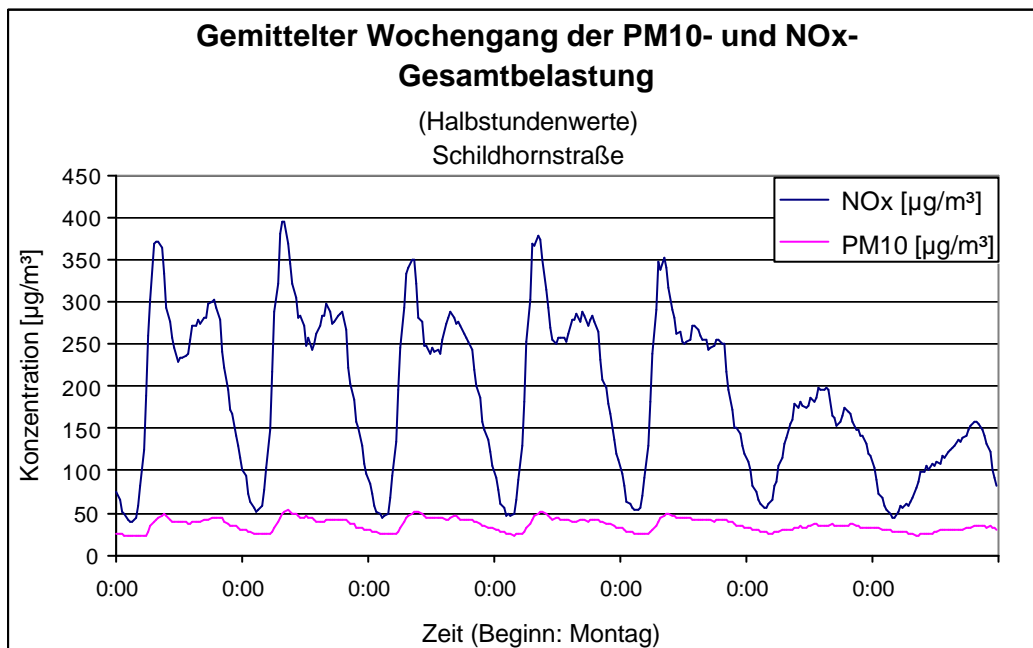


Abbildung 6-2: NO_x - und PM_{10} -Gesamtbelastung Schildhornstraße (siehe auch Abb. A2-3 und A2-4)

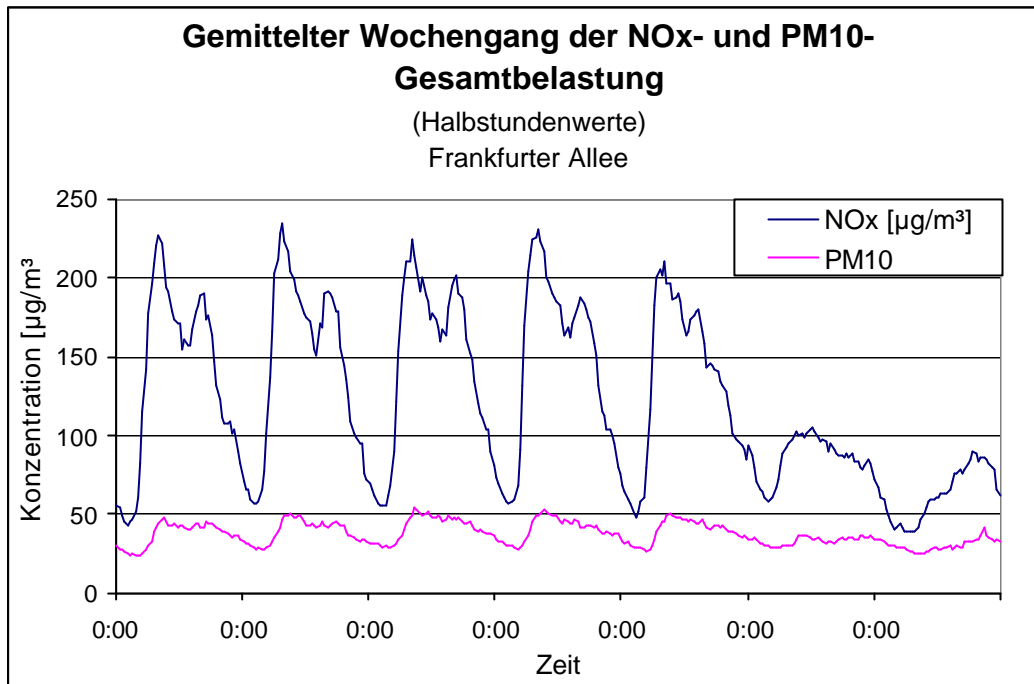


Abbildung 6-3: NO_x- und PM₁₀-Gesamtbelastung Frankfurter Allee
(siehe auch Abb. A2-5 und A2-6)

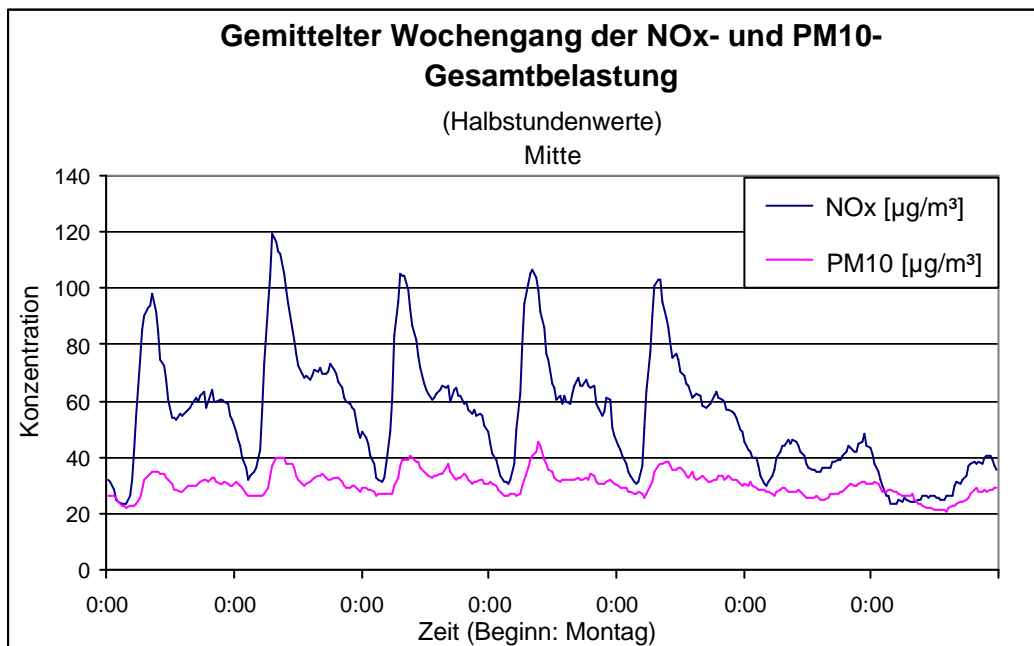


Abbildung 6-4: NO_x- und PM₁₀-Gesamtbelastung Station Mitte
(siehe auch Abb. A2-7 und A2-8)

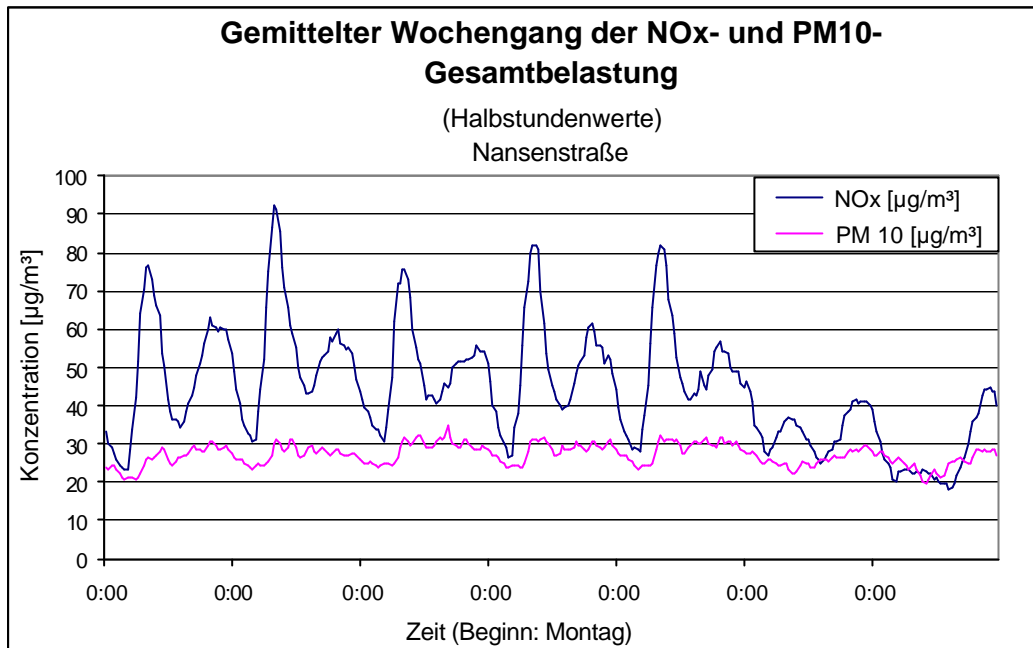


Abbildung 6-5: NO_x- und PM₁₀-Gesamtbelastung Nansenstraße
(siehe auch Abb. A2-9 und A2-10)

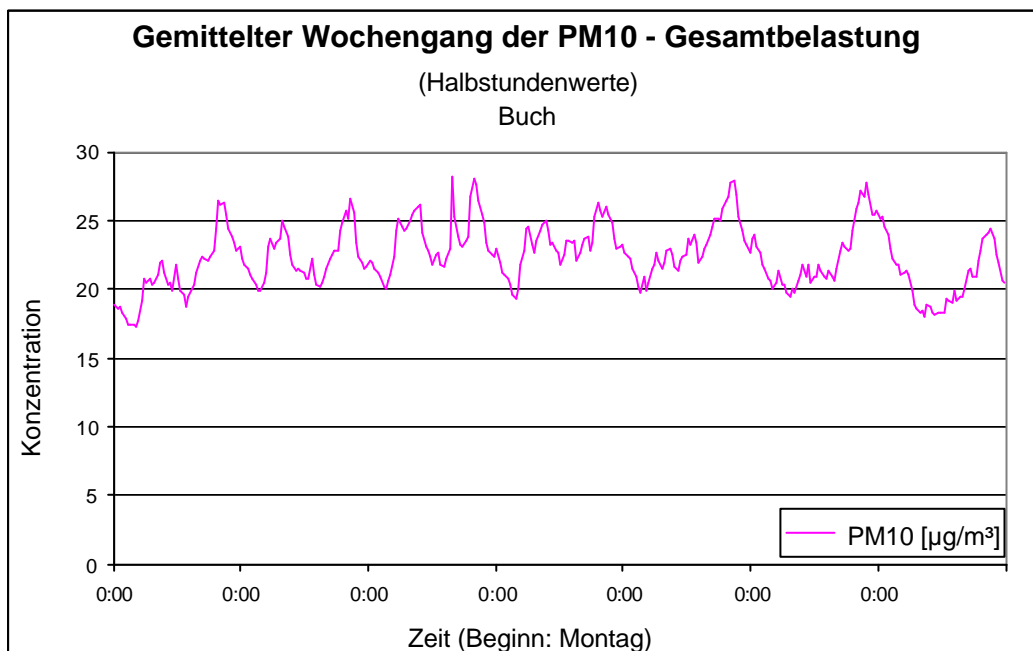


Abbildung 6-6: PM₁₀-Gesamtbelastung Station Buch

Aus den Diagrammen wird deutlich, dass die NO_x-Konzentrationen, wie erwartet, einen ausgeprägten Tages- und Wochengang aufweisen. Sie spiegeln im wesentlichen das Verkehrsaufkommen direkt wider (BAUMBACH 1994). Bedingt durch den Berufsverkehr, gibt es, zumindest an den Werktagen, zwei ausgeprägte Tagesspitzen, wobei die Morgenspitze stärker ausgeprägt ist als die am Nachmittag einsetzende. In der Nansenstraße, Schildhornstraße sowie in der Frankfurter Allee sind diese Spitzen zudem viel ausgeprägter

als an der Stadtautobahn und in Berlin Mitte, wo ein mehr oder weniger allmählicher Abstieg von den Mittagsstunden an zu verzeichnen ist. Am Wochenende und in den Nachtstunden sind die Konzentrationen viel niedriger als tagsüber und erreichen dort die niedrigsten Werte. Durch den fehlenden Berufsverkehr sind die Wochenendspitzen deutlich weniger ausgeprägt und ein Konzentrationsanstieg setzt auch erst später ein.

Besonders hohe NO_x -Werte finden sich erwartungsgemäß in den verkehrsaufkommensstarken Straßen Schildhornstraße, Frankfurter Allee und an der Stadtautobahn wieder.

PM10 folgt ebenfalls einem Tagesgang mit ähnlichem Verlauf wie NO_x . Aufgrund der Skalierung wird dieser in den **Abbildungen 6-1 bis 6-6** nur weniger deutlich (siehe dazu Anhang A2, Abbildungen A2-1 bis A2-10). An der Stadtautobahn ist bei der PM10-Konzentration die zweite Tagesspitze im Gegensatz zur NO_x -Konzentration stärker ausgeprägt; die PM10-Zusatzbelastung schwankt zwischen ca. $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in den Vormittagsstunden am Sonntag und $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in den Vormittagsstunden innerhalb der Werkstage.

An der Frankfurter Allee tritt verglichen mit der NO_x -Gesamtbelastung genau der umgekehrte Fall ein: nach einer Morgenspitze fällt die Konzentration relativ kontinuierlich ab.

In der Nansenstraße, die vergleichsweise niedrige NO_x - und PM10-Belastungen aufweist, nimmt ab den Morgenstunden die PM10-Konzentration ebenfalls zu. Ein zweiter Höhepunkt ist kaum sichtbar. Vielmehr schwanken die Konzentrationen im mittleren Tagesgang nur gering (zwischen 20 und $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Diese Situation ist bei einem Hintergrundbelastungsstandort mit nur wenig Verkehrseinfluss auch zu erwarten.

An der Station Buch liegen keine NO_x -Messungen vor, sodass nur die PM10-Konzentration betrachtet werden kann. Der Tages- bzw. Wochengang ist ähnlich ausgeprägt wie in der Nansenstraße, nur sind die Konzentrationen etwas geringer (17 bis $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ein stärkerer Verkehrseinfluss ist nicht erkennbar.

In Berlin Mitte ist die PM10-Belastung durchschnittlich zwar etwas geringer (ca. 23 bis $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) als an den reinen Verkehrsstationen, unterscheidet sich jedoch von den Hintergrundstationen in der Hinsicht, dass zumindest an den Werktagen ein Tagesgang mit einer Morgen- und einer weniger ausgeprägten Nachmittagsspitze zu erkennen ist.

Auch das Verhältnis von PM10- zu NO_x -Konzentrationen lässt wieder einen Tagesgang deutlich werden. Tagsüber ist das Verhältnis von PM10 zu NO_x sehr klein. Die PM10-

Konzentrationen liegen an den Verkehrsstationen im Mittel zwischen ca. 10 und 70 % der NO_x -Konzentrationen, an der Hintergrundstation Nansenstraße zwischen ca. 40 und 140 %. An der Station Mitte ist die absolute Schwankungsbreite des PM_{10} - NO_x -Verhältnisses zwar vergleichbar mit den Straßenstationen, doch liegt das Verhältnis deutlich höher und ist eher mit den Werten der Hintergrundstation Nansenstraße vergleichbar. Dies ist auf die relativ geringen NO_x -Konzentrationen an der Station Mitte zurückzuführen.

Es zeigt sich, dass im Allgemeinen hohen NO_x -Werten relativ niedrige PM_{10} -Werte gegenüberstehen. Aber es ist zu beachten, dass die Konzentrationen von PM_{10} und NO_x nicht gleichmäßig steigen oder fallen. Die täglichen Schwankungen von NO_x sind viel größer und ausgeprägter als von PM_{10} ! Sehr hohe PM_{10} -Werte treten meist zu Zeiten sehr hoher NO_x -Belastungen auf, sodass sich das Verhältnis der PM_{10} - zur NO_x -Konzentration nicht sehr vergrößert. In den Nachtstunden sinken die Konzentrationen beider Stoffe, wie schon erwähnt, ab. Das Verhältnis wird folglich größer. Doch ist das Absinken der NO_x -Konzentration auch hier wieder verhältnismäßig stärker als das der PM_{10} -Konzentration. Dies führt zu dem hohen PM_{10} – NO_x – Verhältnis zwischen etwa 0 und 3 Uhr.

Der zeitliche Verlauf des PM_{10} – NO_x -Verhältnisses von Montag bis Freitag ist in etwa konstant. Am Wochenende ist an allen Stationen das Verhältnis zwischen PM_{10} und NO_x größer, wenn auch oft nur geringfügig. An der Schildhornstraße ist der Unterschied am geringsten ausgeprägt. In der Nansenstraße und in Mitte treten am Wochenende sogar Werte von größer ‚eins‘ auf. Die PM_{10} -Konzentration der Gesamtbelastung pro Kubikmeter Luft übersteigt dann also die von NO_x .

6.2 Meteorologische Situation im Untersuchungszeitraum

Bevor man PM_{10} -Belastungen bezüglich des Einflusses von Niederschlägen und Luftfeuchte auswerten kann, ist es unerlässlich, sich zuerst mit der meteorologischen Situation im Untersuchungsraum vertraut zu machen. Besonderer Augenmerk soll hierbei auf die Niederschlagsereignisse gerichtet werden.

In beiden Jahren des Untersuchungszeitraumes ist an der Messstation Berlin Dahlem verglichen mit dem langjährigen Mittel weniger Niederschlag gefallen, wobei 1999 sogar 26 % weniger Niederschlag als durchschnittlich gefallen sind. (siehe **Tabelle 6-1**). Beachtet werden muss, dass es sich bei den Werten in der Tabelle um Durchschnittswerte für das gesamte Jahr 1999 bzw. 2000 handelt. Für die Arbeit wird im Jahr 1999 aber nur der Zeitraum ab Juni betrachtet!

Tabelle 6-1: Vergleich der Niederschlagswerte an der Station Berlin Dahlem

Messzeitraum/ Beobachtungsperiode	1909-1969	1999	2000
<i>relative Luftfeuchte [%]</i>	77	73	74
<i>Niederschlagshöhe [mm]</i>	589,2	438,6	565,8
<i>maximale Tagesmenge [mm]</i>	35,8	19,6	31,4
<i>Zahl der Tage mit $\geq 0,1$ mm Niederschlag</i>	181,9	172	177
<i>Zahl der Tage mit $\geq 1,0$ mm Niederschlag</i>	111,6	102	111
<i>Zahl der Tage mit $\geq 2,5$ mm Niederschlag</i>	70,6	56	70
<i>Zahl der Tage mit $\geq 5,0$ mm Niederschlag</i>	37,1	27	37
<i>Zahl der Tage mit $\geq 10,0$ mm Niederschlag</i>	12,2	6	11
<i>Zahl der Tage mit Sturzregen</i>	1	1	3
<i>Zahl der Tage mit gefallenem flüssigem Niederschlag $\geq 0,1$ mm</i>	131,7	120	139
<i>Zahl der Tage mit flüssigem und festem Niederschlag $\geq 0,1$ mm</i>	32,7	37	28
<i>Zahl der Tage mit gefallenem festen Niederschlag $\geq 0,1$ mm</i>	15,6	15	10
<i>Zahl der Tage mit abgesetztem Niederschlag $\geq 0,1$ mm</i>	1,9	0	0
<i>Zahl der Tage mit Graupel, Gries und Eiskörnern</i>	28,8	26	21
<i>Zahl der Tage mit Hagel</i>	2,6	4	2

Quelle: Beilage zur Berliner Wetterkarte für die Jahre 1999 und 2000

Aus der Tabelle ist abzulesen, dass während etwa der Hälfte aller Tage eines Jahres mindestens 0,1 mm Niederschlag in jeglicher Form auftritt. Dies stimmt mit dem langjährigen Mittel überein und ist auf den dauerhaften Zykloneneinfluss und die offene Lage Berlins zurückzuführen (siehe Teil A, 4.2). Höhere Niederschlagssummen sind schon deutlich weniger häufig. Mindestens 1,0 mm Niederschlag fielen 1999 an etwa 28 % und 2000 an etwa 30 % aller Tage, mindestens 2,5 mm traten 1999 jedoch nur noch an ca. 15 % und 2000 an etwa 20 % aller Tage auf.

Zu bemerken ist hierbei, dass 0,1 mm Niederschlag die Untergrenze der Niederschlagshöhe darstellt, die gemessen wird. Niederschläge unter diesem Wert können somit nicht ausgewertet werden. Nach DIN 4049 wird ein *Tag mit Niederschlag* als ein Tag definiert, an dem mindestens 0,1 mm Niederschlag gefallen sind. Der Vereinfachung halber soll im folgenden aber von einem *Niederschlagstag*⁵ gesprochen werden.

Die folgenden Auswertungen und Diagramme beziehen sich auf den gesamten Untersuchungszeitraum vom 01.06.1999 bis 31.12.2000.

⁵ Nach DIN 4049-3 ist ein Niederschlagstag als die 24-stündige Zeitspanne zwischen 2 Niederschlagsmessterminen definiert.

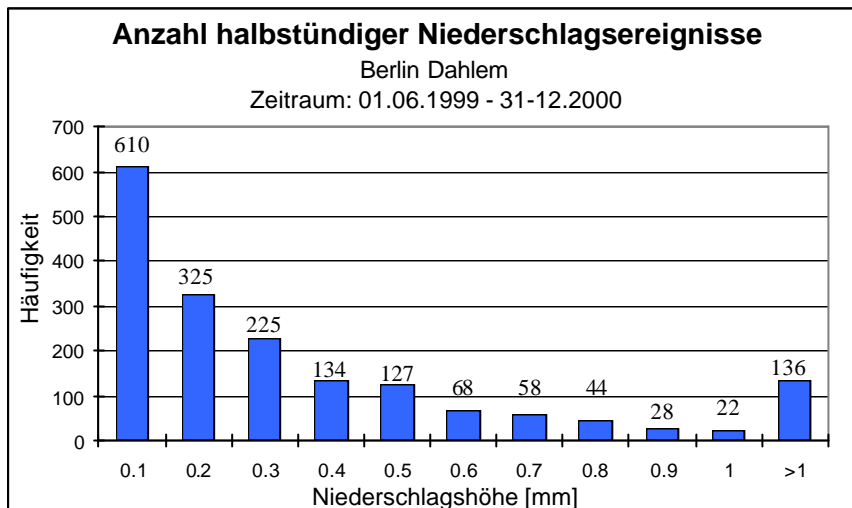


Abbildung 6-7: Histogramm halbstündiger Niederschlagsereignisse

In **Abbildung 6-7** wird deutlich, dass halbstündige Niederschlagsereignisse mit einer Niederschlagshöhe von größer als 0,2 mm jeweils nur noch weniger häufig vertreten sind. Dies ist bei den nachfolgenden Auswertungen zu beachten, da die Repräsentativität zurücktritt und extremere Ereignisse im Durchschnitt stärker hervortreten. Insgesamt wurde an 1777 Halbstunden Niederschlag gemessen. Das sind etwa 6,4 % aller beobachteten Halbstunden (insgesamt 27840).

Es bietet sich aus folgenden Gründen aber an, nicht nur die halbstündigen Messwerte als Bewertungsgrundlage heranzuziehen sondern auch die Tagessummen von Niederschlägen und die dazugehörigen Tagesmittelwerte der Konzentrationen der Luftschadstoffe:

1. Wie bereits angesprochen, wurden die Niederschlagsdaten von nur einer Station auf die anderen übertragen. Durch die Verwendung von Tagessummen der Niederschläge können evtl. auftretende zeitliche Unterschiede im Einsetzzeitpunkt des Niederschlages ausgeglichen werden, unter der Annahme, dass an allen Messpunkten in 24 Stunden etwa gleich viel Niederschlag fällt. Eventuell unterschiedliche Niederschlagshöhen an den einzelnen Stationen können allerdings auch hier nicht berücksichtigt werden.
2. Der Beurteilung von PM₁₀-Immissionen liegen nach RL 1999/30/EG Tagesmittelwerte von PM₁₀ zugrunde.
3. Unterschiede der PM₁₀- und NO_x- Konzentrationen im Tagesgang, die aber nicht durch meteorologische Erscheinungen beeinflusst werden, werden auf diese Weise immer mit berücksichtigt.
4. Als wichtiger Punkt ist auch die zeitliche Wirkung eines Niederschlagsereignisses anzusehen. Das heißt, die PM₁₀-Konzentration in der Luft wird nicht nur unmittelbar, während Niederschlag fällt, beeinflusst, sondern die Wirkung des Niederschlages bzw. der

Feuchtigkeit hält noch eine Weile an, je nach Dauer und Höhe des Niederschlages. Partikel werden mit dem Oberflächenabfluss fortgespült bzw. bleiben noch solange gebunden, bis die Oberfläche abgetrocknet ist. Auch wenn Tagesmittel diese Situation nicht vollständig beschreiben, sind sie jedoch für die Beschreibung der Auswirkungen von Niederschlag auf die PM10-Konzentration geeignet.

5. Durch die Verwendung von Tagesmittelwerten wird die Datenmenge zwar erheblich reduziert und die statistische Sicherheit der Aussagen wird gemindert, jedoch ergeben sich Vorteile in der Handhabung und Übersichtlichkeit der Daten.

Abbildung 6-8 zeigt die Anzahl von Tagen unterschiedlicher Niederschlagstagesummen. Dafür wurden alle halbstündigen Niederschlagswerte eines Tages summiert. Es zeigt sich, dass Tage mit Niederschlägen von nur 0,1mm und Tage mit Niederschlägen zwischen 1 mm und 10 mm überwiegen.

Betrachtet man vergleichsweise Tage, an denen eine bestimmte Mindestniederschlagsmenge auftritt (siehe **Abbildung 6.9**), zeigt sich ein ähnliches Bild wie in **Abbildung 6.7**. Die Anzahl der Tage mit einer bestimmten Mindestniederschlagssumme bzw. die Repräsentativität der Daten nimmt mit zunehmender Niederschlagshöhe ab. Tage mit mindestens 2 mm Niederschlag treten etwa nur noch halb so häufig auf wie Tage mit mindestens 0,1 mm Niederschlag.

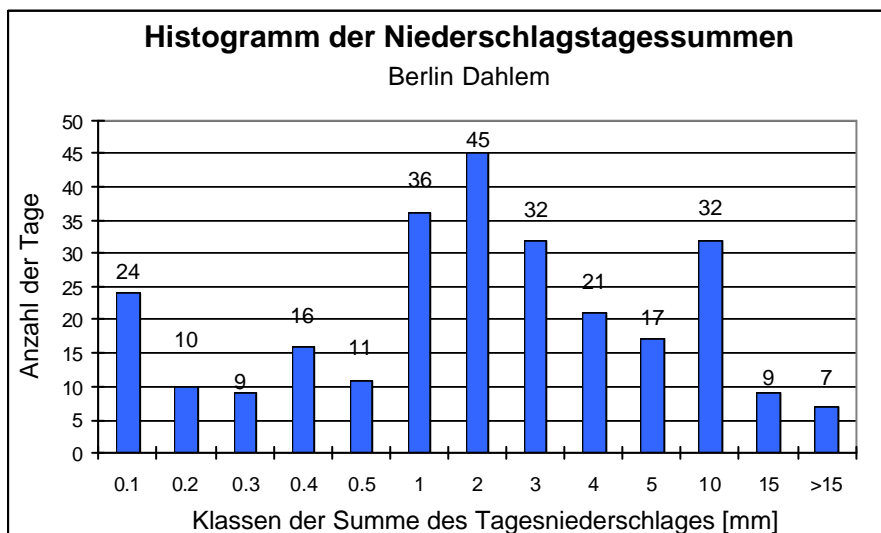


Abbildung 6-8: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagstagesummen

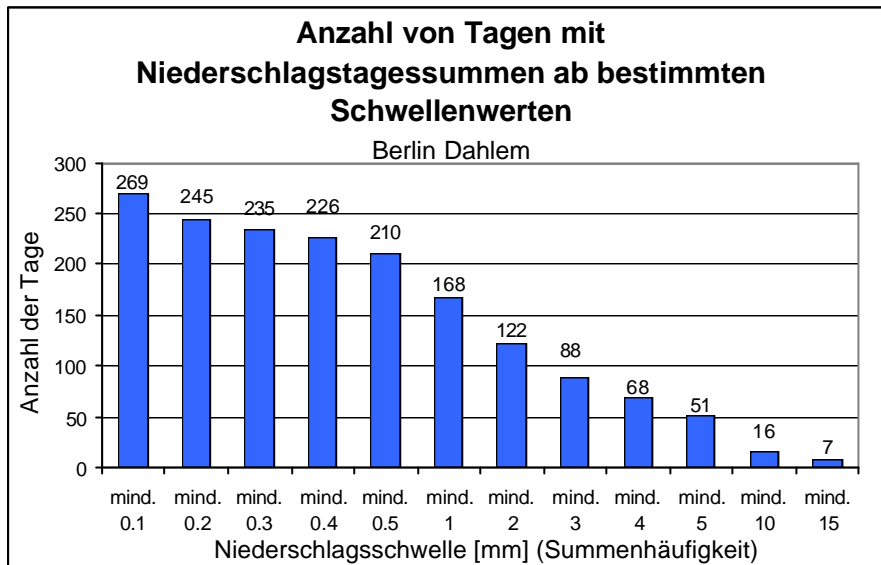


Abbildung 6-9: Niederschlagstagesummen ab Schwellenwerten im Untersuchungszeitraum

Die nachfolgende Betrachtung von Schadstoffkonzentrationen erfolgt aufgrund der Verteilung der täglichen Verkehrsmenge getrennt nach Werktagen, Sonnabenden sowie Sonntagen. In die Sonntage fließen zudem alle Feiertage mit ein.

Die Anzahl von Niederschlagsereignissen, unabhängig von deren Menge, variiert im Wochendurchschnitt um ca. 20 % (s. **Abbildung 6-10**). Es zeigt sich aber, dass beispielsweise an Sonnabenden im Durchschnitt mehr als doppelt soviel Niederschlag fiel wie an Freitagen (siehe **Abbildung 6-11**). Innerhalb der Werktage ist die Differenz der Niederschlagssummen geringer. Dennoch lagen die Niederschläge im Untersuchungszeitraum an Dienstag um circa 50 % höher als an Freitagen.

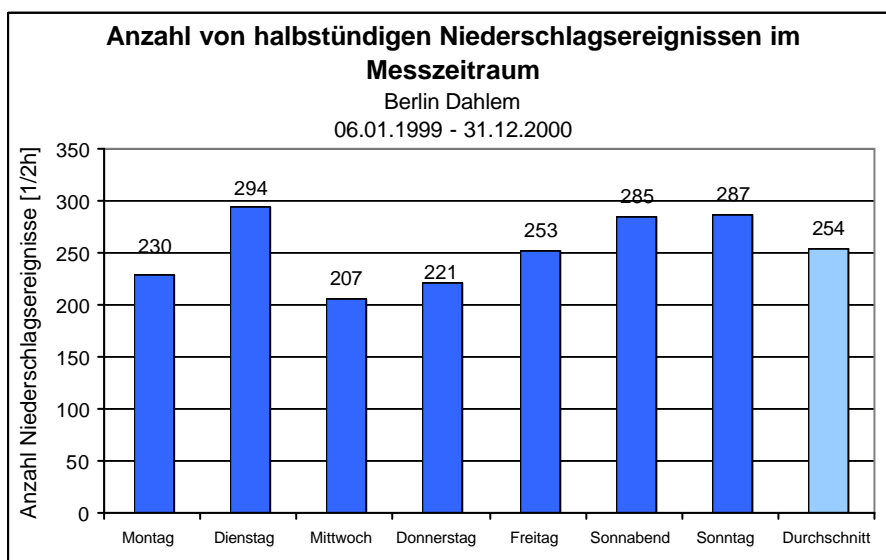


Abbildung 6-10: Halbstündige Niederschlagsereignisse nach Wochentagen

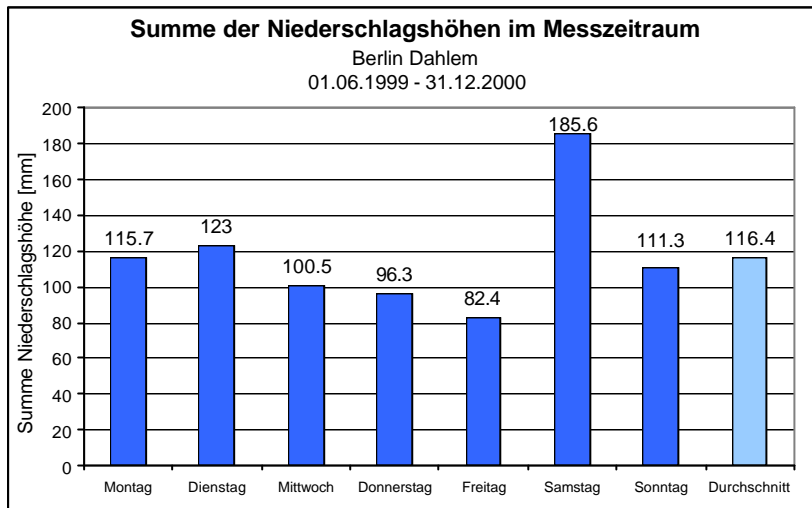
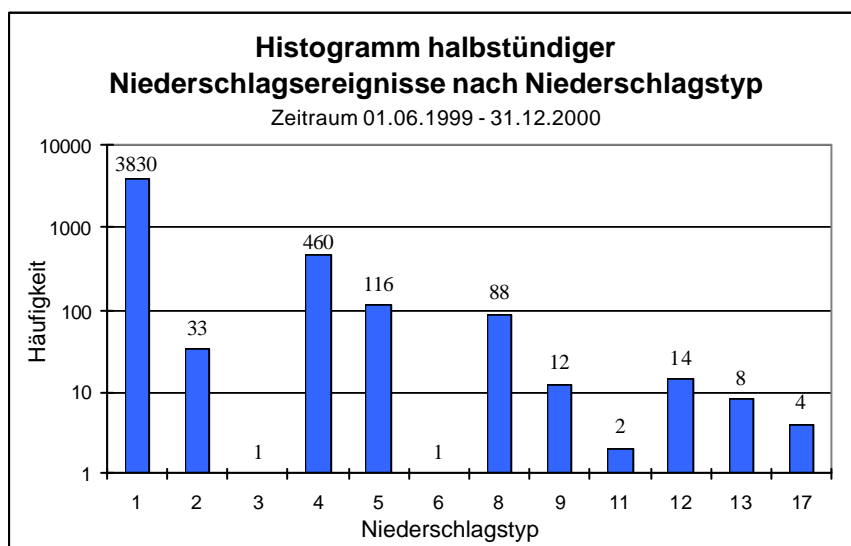


Abbildung 6-11: Tagesniederschlagssummen nach Wochentagen

In **Abbildung 6-12** ist das Auftreten von Niederschlagstypen dargestellt. Die Erläuterungen der Niederschlagstypen sind der Legende zu entnehmen. Aus der Darstellung geht hervor, dass Regenereignisse erwartungsgemäß in der Anzahl überwiegen, da fester Niederschlag weitestgehend auf die Wintermonate beschränkt ist. Die Unterscheidung zwischen den Niederschlagsarten ist aber wichtig, da beispielsweise bei Schnee und Eisglätte Streusand bzw. -salz eingesetzt werden, die Einfluss auf die PM10-Konzentration in der Luft nehmen können. Zur Vereinfachung sind in **Abbildung 6-13** die Häufigkeitsverteilungen der Niederschläge noch einmal dargestellt, wobei nur zwischen flüssigem und festem Niederschlag unterschieden wird.



- 1 Regen, Sprühregen, Regentropfen
- 2 Regen (gefrierend), Sprühregen (gefrierend)
- 3 1 und 2
- 4 Schnee, Schneeflocken
- 5 1 und 4
- 6 2 und 4
- 8 Graupel, Schneegriesel, Reif- und Frostgraupel
- 7 1; 2 und 4
- 8 Graupel
- 9 1 und 8
- 11 1; 2 und 8
- 12 4 und 8
- 13 1; 4 und 8
- 17 Hagel und 1

Abbildung 6-12: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagstypen (logarithmische Skalierung!)

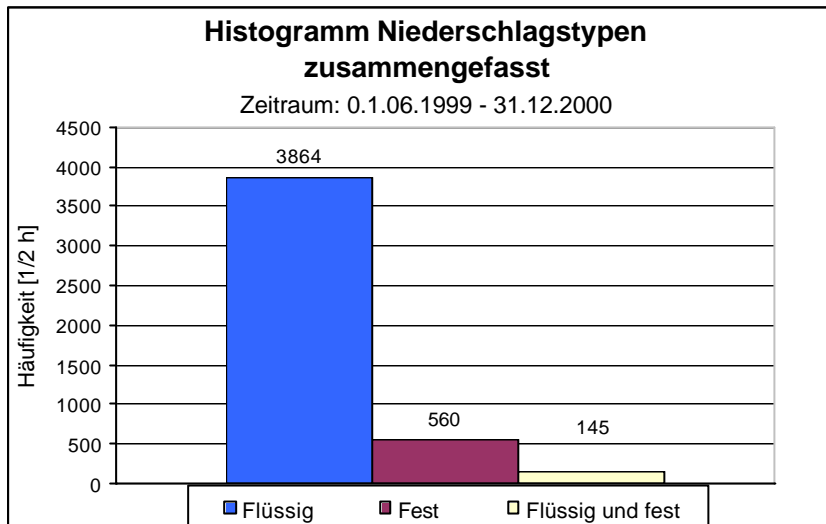


Abbildung 6-13: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagstypen zusammengefasst

6.3 PM10 und relative Luftfeuchte

In einem ersten Schritt wurde die PM10-Gesamtbelastung aller Stationen mit der relativen Feuchte der Station Schöneberg⁶ gegenübergestellt. Aus den Diagrammen (siehe Anhang A3-1 bis A3-6) kann abgelesen werden, welche PM10-Werte bei welchen Luftfeuchtwerten auftreten.

Die extrem hohen PM10-Belastungen, die beim Abbrennen des Feuerwerks zur sog. Jahrtausendwende entstanden sind, sind Ausreißerwerte, die in eine Analyse nicht mit einfließen können, da sie sonst die Durchschnittswerte erheblich verändern. Erwähnenswert ist aber, dass diese extrem hohen Konzentrationen, mit teilweise mehr als $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁷ PM10 in einer Stunde, zu Zeiten sehr hoher Luftfeuchte (99 %) auftraten.

Korrelationsanalysen über den gesamten Untersuchungszeitraum ergaben, dass in allen betrachteten BLUME-Stationen kein korrelativer Zusammenhang zwischen PM10-Belastung und relativer Feuchte auftritt. Der *PEARSON*-Korrelationskoeffizient⁸ lag immer um 0 (**Tabelle 6-2**). Die in den Diagrammen A3-1 bis A3-6 eingezeichnete lineare Trendlinie der PM10-Konzentration unterstreicht dies. Sie ist jeweils eine Gerade mit annähernder Nullsteigung. Allerdings ist im Allgemeinen ein leichter Anstieg der PM10-Konzentration bei sehr hohen Luftfeuchtwerten (größer 90 bis 95 %) erkennbar.

Wenn vorerst keine Korrelation der relativen Luftfeuchte mit der PM10-Konzentration erkennbar ist, stellt sich die Frage, inwieweit das Erreichen des Deliqueszenzpunktes (siehe

⁶ Die ersten Auswertungen erfolgten aufgrund der derzeitigen Datenlage anhand der Station Schöneberg.

⁷ Der 24-Stunden-Grenzwert beträgt $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siehe Tabelle 3-1

⁸ Der *PEARSON*-Korrelationskoeffizient ist ein Maß, inwieweit eine lineare Abhängigkeit zwischen zwei Datensätzen besteht. Herleitung siehe Anhang A 11

Kapitel 3.5) bei hohen Luftfechtigkeiten die PM10-Konzentrationen beeinflussen kann. Ab diesem Punkt beginnen salzhaltige Partikel zu quellen (*LUFTHYGIENEAMT BEIDER BASEL ET AL. 1999*), die Größe und das Gewicht verändern sich. Eine Staubaufwirbelung, besonders bei feuchtem Untergrund, wird möglicherweise reduziert. Wie schon erwähnt, wird aber keine Abnahme der Konzentration bei hohen Feuchten beobachtet.

Allerdings muss beachtet werden, dass eine mögliche Korrelation auch von anderen Faktoren wie Windgeschwindigkeit, Verkehrsaufkommen etc. überlagert werden kann. Zudem wird wahrscheinlich die relative Luftfeuchte auch weniger Einfluss auf PM10-Immissionen haben als beispielsweise Niederschlagsereignisse. In weiteren Auswertungen müssen also kleinere Betrachtungszeiträume gewählt und mögliche ‚Störgrößen‘ ausgeklammert werden.

*Tabelle 6-2: Korrelationskoeffizienten von PM10 und relativer Luftfeuchte
(gemessen an Station 318 Schöneberg) über den gesamten Messzeitraum*

Station	Frankfurter Allee	Schildhornstraße	Stadtauto-bahn	Nansenstraße	Mitte	Buch
Korrelationskoeffizient (Pearson) v. PM10 und relative Luftfeuchte	0,060	0,025	-0,018	0,036	0,066	-0,063

6.4 Korrelationen von PM10- und NO_x- Gesamtbelastungen bei Niederschlagsereignissen

6.4.1 VORGEHENSWEISE

Im Folgenden werden die Konzentrationen der PM10- und NO_x-Gesamtbelastung den Niederschlagsereignissen gegenübergestellt. Angaben über die Niederschlagssituation finden sich bereits im Abschnitt 6.2. Die Gesamtbelastungen sollen hierbei in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe untersucht werden. Neben PM10 wurde die selbe Auswertung auch für NO_x durchgeführt, um eventuelle Unterschiede zwischen dem Gas NO_x und den Partikeln zu erkennen.

Die Tagesmittelwerte der PM10- und NO_x -Gesamtbelastung an Tagen mit Niederschlag wurden an den einzelnen Stationen untereinander verglichen. Bei den Tagesmittelwerten flossen nur die Tage in die Berechnungen ein, an denen mindestens 90 % der Messwerte zur Verfügung standen (= 43 von 48 Messwerten pro Tag), um die statistische Sicherheit zu gewährleisten. Eine Auflistung der Tage, die nicht mit in die Berechnungen einfließen, findet sich im Anhang A4 wieder. An Stationen mit hohen Messausfällen wird der Datenumfang

und somit auch der Anteil potenziell auszuwertender Niederschlagstage deshalb entsprechend geringer. Bei der Frankfurter Allee fallen somit beispielsweise 67 Tage aus der Betrachtung heraus.

Bei den Auswertungen soll besonderer Augenmerk auf die Werkzeuge gelenkt werden, wo das Verkehrsaufkommen jeweils etwa den gleichen Tagesgang aufweist und, bedingt durch das stärkere Verkehrsaufkommen, höhere verkehrsbedingte Luftschadstoffbelastungen auftreten. So erfolgt die Auswertung für etwa gleichwertige Verkehrsbedingungen, und ein eventueller Niederschlagseinfluss sollte somit besser erkennbar sein. Abbildungen befinden sich dazu im Anhang A5.

Die Auswertung erfolgt zuerst für Tage mit einer festgelegten Mindestniederschlagshöhe. Es wurden dabei 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 1,0 mm sowie 5 mm als Schwellenwerte der Niederschlagshöhe (Niederschlagsschwellen) gewählt und die zugehörigen Schadstoffkonzentrationen denen von Tagen ohne Niederschlag und dem Gesamtdurchschnitt gegenübergestellt. Auf diese Weise soll abgeschätzt werden, ab welcher Niederschlagshöhe überhaupt Änderungen zu erwarten sind.

Für eine Betrachtung der Konzentrationen in verschiedenen Klassen wurden folgende Intervalle festgelegt: kein Niederschlag (0 mm), 0,1-0,5 mm, >0,5-1,0 mm, >1,0-5,0 mm, >5,0-10,0 mm und >10 mm. Dieser Betrachtungsansatz wurde gewählt, um Besonderheiten in den Änderungen von PM₁₀ und NO_x bei Niederschlagsereignissen verschiedener Höhen zu verdeutlichen.

6.4.2 VERGLEICH DER GESAMTBELASTUNG BEI VERSCHIEDENEN NIEDERSCHLAGSSCHWELLEN

Bei der Betrachtung der einzelnen Stationen kann keine einheitliche Tendenz bezüglich einer PM₁₀- bzw. NO_x -Konzentrationsveränderung nachgewiesen werden, doch gibt es ähnliche Trends, die an allen Stationen beobachtet werden können.

Wie schon aus den Wochengängen der PM₁₀- und NO_x -Konzentration im Abschnitt 6.1 erkennbar wurde, treten die höchsten PM₁₀- und NO_x - Tagesmittelwerte an Stationen mit hohem Verkehrsaufkommen wie beispielsweise an der Schildhornstraße oder der Stadtautobahn auf. An Stationen im städtischen Hintergrund liegen die Werte z. T. deutlich darunter.

Die Ausbreitungsbedingungen an den einzelnen Stationen beeinflussen die Luftschadstoffbelastung ebenfalls deutlich. Obwohl beispielsweise die Verkehrsbelegung in der Schildhornstraße niedriger ist als an der Stadtautobahn, treten dort höhere PM₁₀- und NO_x -

Gesamtbelastungen auf. Dies resultiert aus den eingeschränkten Ausbreitungsbedingungen aufgrund der Bebauung in der Schildhornstraße (Straßenschlucht).

Betrachtet man das Verhalten von PM10 und NO_x an Tagen, an denen eine bestimmte Mindestmenge an Niederschlag auftrat, ist festzustellen, dass an allen Stationen die PM10- bzw. NO_x -Konzentrationen bei Niederschlag im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag zurückgehen, unabhängig von der Niederschlagshöhe. Die Reduktionen liegen bei etwa 15 bis 25 %, je nach Station und Niederschlagshöhe. In **Tabelle 6-3** sind die absoluten Werte und die prozentualen Abweichungen der PM10- und NO_x - Gesamtbelastungen an Tagen mit ausgewählten Niederschlagsschwellen im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag dargestellt.

Tabelle 6-3: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Gesamtbelastungen an Werktagen mit verschiedenen ausgewählten Mindestniederschlagshöhen mit Werktagen ohne Niederschlag

	PM10-Gesamtbelastung, werktags [µg/m ³]				NO _x -Gesamtbelastung, werktags [µg/m ³]			
	0 mm	0.1mm	1.0 mm	5.0 mm	0 mm	0.1mm	1.0 mm	5.0 mm
Stadtautobahn	38,5	28,9	30,4	31,0	221,8	156,9	169,5	196,6
Schildhornstraße	39,7	34,4	33,9	31,6	221,1	204,1	195,1	178,6
Frankfurter Allee	43,7	35,2	34,6	31,7	147,5	136,2	128,6	112,3
Mitte	34,7	28,5	28,4	27,4	65,9	59,8	57,9	52,7
Nansenstraße	30,3	24,8	24,8	24,5	52,2	47,6	46,1	40,9
Buch	25,5	19,1	19,1	18,9				
	Reduktion der PM10- Gesamtbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag				Reduktion der NO _x -Gesamtbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag			
	0 mm	0.1mm	1.0 mm	5.0 mm	0 mm	0.1mm	1.0 mm	5.0 mm
Stadtautobahn		-24,9	-21,0	-19,4		-29,3	-23,6	-11,4
Schildhornstraße		-13,3	-14,5	-20,4		-7,7	-11,8	-19,2
Frankfurter Allee		-19,3	-20,8	-27,3		-7,7	-12,8	-13,9
Mitte		-17,9	-17,9	-20,8		-9,3	-12,1	-20,1
Nansenstraße		-18,1	-18,1	-19,2		-8,9	-11,8	-21,8
Buch		-25,0	-25,2	-26,1				

An der Stadtautobahn, einem Gebiet mit freier Luftanströmung, zeigen PM10- und NO_x - Gesamtbelastung an Tagen mit Niederschlag ein ähnliches Verhalten. Der prozentuale Rückgang der NO_x -Konzentration während Niederschlagsereignissen ist dort ein wenig höher als bei PM10.

Im Unterschied dazu werden an den Stationen in Straßenschluchten wie in der Schildhornstraße während Niederschlagsereignissen im Allgemeinen höhere Reduktionen in der PM10-Belastung beobachtet als für die NO_x-Belastung.

Außer an der Stadtautobahn und eingeschränkt für PM10 an der Nansenstraße und der Station Buch ist in der Gesamtbelastung an allen anderen Stationen zudem die Tendenz zu beobachten, dass mit zunehmender Niederschlagshöhe die PM10- und NO_x-Konzentrationen weiter abfallen. Einen deutlicheren Hinweis auf eine Reduktionszunahme in höheren Niederschlagsbereichen findet sich in den PM10-Konzentrationswerten an Tagen mit wenigstens 5 mm Niederschlag. Hier treten in der PM10-Gesamtbelastung im Vergleich zu trockenen Tagen Reduktionen zwischen ca. 19 und 27 % auf (bei NO_x ca. 11 % bis 22 %). Niederschlagsereignisse mit mehr als 5 mm Niederschlag am Tag umfassen etwa 20 % aller Niederschlagstage, so dass mindestens an einem Fünftel aller Niederschlagstage Reduktionen der PM10-Gesamtbelastung um etwa 20 % zu verzeichnen sind. Die Reduktionen müssen aber immer mit Blick auf die geringere Datenbasis für Ereignisse mit größeren Niederschlagsmengen betrachtet werden, wo die statistische Genauigkeit abnimmt.

Für die NO_x-Gesamtbelastung sind außer an der Stadtautobahn die Abnahmen, wie schon angesprochen, insbesondere bei Niederschlagsmindesthöhen von 0,1 mm bis 1,0 mm deutlich geringer als die PM10-Gesamtbelastung.

6.4.3 VERGLEICH DER GESAMTBELASTUNG IN NIEDERSCHLAGSKLASSEN

Analog zu Abschnitt 6.4.2 werden nun PM10- und NO_x-Konzentrationen in verschiedenen Niederschlagsklassen miteinander verglichen. Vorgehend sind in **Tabelle 6-4** die absoluten und prozentualen Werte für die jeweiligen PM10- und NO_x-Konzentrationen angegeben. Diagramme zum Verlauf finden sich im Anhang A5.

In den Niederschlagsklassen sind die Tendenzen für die PM10- und NO_x-Gesamtbelastung ähnlich ausgeprägt, wie dies schon für die Niederschlagsschwellen beobachtet werden konnte. Für alle Stationen ist festzustellen, dass bei Auftreten von Niederschlag die PM10-Gesamtbelastung schon in der untersten Klasse von 0,1 bis 0,5 mm relevant um etwa 10 bis 29 % absinkt. An der Stadtautobahn steigen die Werte in den höheren Klassen dann wieder an, wobei hingegen an den anderen Stationen in den oberen Niederschlagsklassen die PM10-Konzentrationen weiterhin abnimmt.

Ab 10 mm Niederschlag allerdings ist auch an einigen anderen Stationen (Schildhornstraße, Frankfurter Allee, Mitte, Nansenstraße ein erneuter Anstieg in der PM10-Konzentration feststellbar (siehe Abbildungen im Anhang A4). Das Ergebnis basiert aber auf der

Auswertung von nur 23 Tagen, an denen mehr als 10 mm Niederschlag wurden, so dass dieser Trend statistisch eher unsicher ist.

Tabelle 6-4: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Gesamtbelastungen an Werktagen in verschiedenen ausgewählten Niederschlagsklassen mit Werktagen ohne Niederschlag

	PM10-Gesamtbelastung, werktags					NO _x -Gesamtbelastung, werktags				
	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm
Stadtautobahn	38,5	27,5	25,6	30,4	31,5	221,8	138,0	139,1	163,6	199,9
Schildhornstraße	39,7	35,7	34,7	34,2	32,2	221,1	219,6	216,7	199,9	179,5
Frankfurter Allee	43,7	37,1	35,5	35,0	32,3	147,5	149,7	145,8	134,2	110,7
Mitte	34,7	29,1	28,3	28,5	27,1	65,9	62,6	62,9	60,2	52,1
Nansenstraße	30,3	25,7	24,1	24,6	24,0	52,2	50,3	48,6	48,3	40,8
Buch	25,5	20,2	18,3	18,7	18,0					
	Reduktion der PM10-Gesamtbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag					Reduktion der NO _x -Gesamtbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag				
	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm
Stadtautobahn		-28,6	-33,4	-21,9	-18,0		-37,8	-37,3	-21,2	-9,9
Schildhornstraße		-10,0	-12,4	-13,7	-18,9		-0,7	-2,0	-9,6	-18,8
Frankfurter Allee		-15,1	-18,6	-19,8	-26,0		+1,5	-1,2	-9,0	-25,0
Mitte		-6,1	-18,4	-17,7	-21,8		-5,1	-4,5	-8,7	-21,0
Nansenstraße		-15,4	-20,5	-19,0	-20,7		-3,7	-7,0	-7,6	-21,8
Buch		-21,0	-28,1	-26,6	-29,3					

Ein anderer Trend ist hingegen für die NO_x-Konzentration festzustellen. Mit Ausnahme der Stadtautobahn ist hier eine deutlichere Reduktion um bis zu 10 % im Allgemeinen erst in den Klassen ab 1,0 mm Niederschlag ersichtlich. Bis dahin gehen die Werte nur sehr leicht zurück bzw. steigen im Falle der Frankfurter Allee leicht an. In der obersten gewählten Niederschlagsklasse von >5 bis 10 mm reduzieren sich die NO_x-Konzentrationen dann etwa in gleichem Maße wie die PM10-Konzentrationen um etwa 20 bis 25 %.

Eine Ausnahme stellt auch hier wiederum die Stadtautobahn dar. An dieser Station sinkt die NO_x-Konzentration zu Beginn in stärkerem Maße als die PM10-Konzentration (um etwa 38 %) und ebenfalls stärker im Vergleich zu den anderen Stationen, wo die Reduktionen zumeist deutlich unter 10 % lagen. In den höheren Klassen steigt dann die NO_x-Konzentration in stärkerem Maße wieder an als die PM10-Konzentration.

6.5 Korrelationen zwischen PM10- und NO_x- Zusatzbelastungen bei Niederschlagsereignissen

6.5.1 EINFÜHRUNG UND VORGEHENSWEISE

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Gesamtbelastung von PM10 und NO_x in Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen analysiert. Nun soll die Zusatzbelastung betrachtet werden, d.h. diejenige Belastung, die zusätzlich zur städtischen Hintergrundbelastung im Bereich der jeweiligen Station realisiert wird. Es handelt sich dabei hauptsächlich um KFZ-bedingte Immissionen.

Dazu wurden von den halbstündig gemessenen PM10- und NO_x -Werten der verkehrsbeeinflussten Stationen Mitte, Frankfurter Allee und Schildhornstraße die Werte der städtischen Hintergrundstation Nansenstraße abgezogen. Dabei auftretende Negativwerte wurden gleich Null gesetzt, um sie in der Auswertung zu behalten. Zu diesen Zeitpunkten ist die Gesamtbelastung an der jeweiligen Messstelle geringer als an der Hintergrundstation Nansenstraße.

Die Stadtautobahn wird vorerst nicht betrachtet, da dort infolge der Ausbreitungsverhältnisse eine andere Vorbelastungssituationen als an der Nansenstraße zu erwarten ist.

Analog zu den vorhergegangenen Analysen wurden zuerst die Wochengänge der NO_x - und PM10-Zusatzbelastungen anhand ihrer halbstündigen Mittelwerte ermittelt. Der Einfluss des Niederschlages wurde dann entsprechend der Berechnung der Gesamtbelastung unter Verwendung von Tagesmittelwerten untersucht. Dabei wurden wiederum nur Werktage betrachtet.

In die Einteilung der Niederschlagsklassen wurde der Wert 2,5 zusätzlich als Klassengrenze aufgenommen, da sich bei der Klasseneinteilung für die Gesamtbelastung gezeigt hat, dass größere Reduktionen erst ab 5mm Tagesniederschlag auftreten. So sollte ein möglicher früherer Einfluss des Niederschlages untersucht werden, der in der größeren Klassenaufteilung von 1 bis 5mm eventuell untergegangen ist.

6.5.2 MITTLERE WOCHENGÄNGE DER ZUSATZBELASTUNG

Die durchschnittlichen Wochengänge der Zusatzbelastung zeigen ein ähnliches Bild wie die der Gesamtbelastung. Sie werden deshalb nicht mit im Text aufgenommen und können dem Anhang A6 entnommen werden.

Der Lebensrhythmus der Menschen spiegelt sich auch in der Zusatzbelastung deutlich wieder. Spitzenkonzentrationen werden in den späten Morgen- bzw. frühen Mittagsstunden erreicht.

Ein zweites kleineres Maximum zeigt sich zur Zeit des Nachmittagsberufsverkehrs. In der Nacht sind die Belastungen aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens sehr niedrig. Die PM10-Zusatzbelastungen sind dort oft annähernd Null. Auch am Wochenende sind die Konzentrationen niedriger und die Doppelspitze der Maxima verschmilzt zu einer einfachen. In **Tabelle 65** werden die durchschnittlichen Zusatz- und Gesamtbelastungen einander gegenüber gestellt.

Tabelle 6-5: Vergleich der durchschnittlichen Gesamt- und Zusatzbelastung

	Gesamtbelastung PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Zusatzbelastung PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[%]	Gesamtbelastung NO _x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Zusatzbelastung NO _x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[%]
Schildhornstraße	37,2	10,3	27,7	213,1	163,6	76,8
Frankfurter Allee	39,9	11,9	29,8	142,2	91,9	64,6
Mitte	31,8	5,3	16,7	63,1	16,3	25,8

Es zeigt sich, dass der Anteil der Zusatzbelastung an der Gesamtbelastung für PM10 je nach Station bei etwa 15 bis 30 %, für NO_x bei etwa 25- 75 % liegt.

Das relative Verhalten von PM10 an NO_x ist bei der Zusatzbelastung an den Stationen Schildhornstraße und Frankfurter Allee deutlich niedriger und über den Tag ausgeglichener, als bei der Gesamtbelastung beobachtet werden konnte (siehe Abbildungen in Anhang A6). An der Station Mitte ist das Verhältnis ebenfalls geringer, aber es ist noch ein deutlicher Tagesgang erkennbar.

Die unterschiedlichen Anteile an den einzelnen Stationen liegen in den Besonderheiten im Umfeld der jeweiligen Station begründet bzw. auch in der Eignung der Nansenstraße als Hintergrundstation für diese drei Messstellen.

6.5.3 VERGLEICH DER ZUSATZBELASTUNG BEI VERSCHIEDENEN NIEDERSCHLAGSSCHWELLEN AN WERKTAGEN

Das Verhalten der Zusatzbelastung, betrachtet nach Niederschlagsschwellen, zeigt nicht immer ähnliche Tendenzen wie in der Gesamtbelastung. Diagramme zu den einzelnen Stationen befinden sich im Anhang A7. An allen drei beobachteten Stationen ist ein Absinken der PM10- bzw. NO_x -Konzentration unter Niederschlagseinfluss zu beobachten. Hier jedoch finden sich im prozentualen Rückgang einige Unterschiede zwischen den Stationen und zur Gesamtbelastung.

Von allen Stationen insgesamt werden die höchsten Abnahmen in der PM10-Zusatzbelastung an der Frankfurter Allee festgestellt. Sie liegen zwischen etwa 10 % ab 0,1 mm Niederschlag und 38 % ab 5 mm Niederschlag. Diese Minderungen sind aber in den unteren Niederschlagsschwellen prozentual geringer als für die Gesamtbelastung der Frankfurter Allee selbst beobachtet werden konnte. Erst ab 5 mm Tagesniederschlag sind die PM10-Reduktionen in der Zusatzbelastung deutlich höher als in der Gesamtbelastung.

In der Schildhornstraße ist der Rückgang der PM10-Konzentration anfangs nur gering (ca. 1 %). Erst ab 1 mm bzw. 2,5 mm Niederschlag sind größere Reduktionen zu beobachten (ca. 5- 21 %), die jedoch nicht höher sind als in der Gesamtbelastung. In der Gesamtbelastung hingegen war in der Schildhornstraße schon ab 0,1 mm Niederschlag ein deutlicher Rückgang um etwa 13 % feststellbar (siehe **Tabelle 6-6** und vgl. Kapitel 6.4.3, Anhang A7). Ab 5 mm Niederschlag ist kein Unterschied im Verhalten von PM10 zwischen Gesamt- und Zusatzbelastung feststellbar.

In Berlin Mitte ist das Verhalten von PM10- Gesamt- und Zusatzbelastung annähernd ähnlich. Bei einer Niederschlagshöhe von mindestens 5 mm können für die PM10- Zusatzbelastung leicht höhere Abnahmen (ca. 25 %) festgestellt werden als in der Gesamtbelastung (ca.21 %). Für NO_x ist das Verhalten der Zusatzbelastung ähnlich dem der Gesamtbelastung. Jedoch ist dort ab 5 mm Niederschlag die Reduktion von NO_x in der Zusatzbelastung (14,5 %) geringer als in der Gesamtbelastung (ca. 22 %).

In den **Abbildungen 6-14 bis 6-17** (am Ende des Kapitels 6.6.3) werden Zusatz- und Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen noch einmal vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 6-6: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Zusatzbelastungen an Werktagen bei verschiedenen ausgewählten Niederschlagsschwellen mit Werktagen ohne Niederschlag

	PM10-Zusatzbelastung, werktags [µg/m ³]				NO _x -Zusatzbelastung, werktags [µg/m ³]			
	0 mm	0.1 mm	1.0 mm	5.0 mm	0 mm	0.1 mm	1.0 mm	5.0 mm
Schildhornstraße	10,3	10,2	9,8	8,2	169,3	157,2	149,7	138,0
Frankfurter Allee	12,5	11,2	10,4	7,8	94,4	89,1	82,5	71,4
Mitte	5,7	4,8	4,7	4,1	17,1	15,5	14,8	14,7
	Reduktion der PM10-Zusatzbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag				Reduktion der NO _x -Zusatzbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag			
	0 mm	0.1 mm	1.0 mm	5.0 mm	0 mm	0.1 mm	1.0 mm	5.0 mm
Schildhornstraße		-1,1	-5,6	-20,9		-7,1	-11,6	-18,5
Frankfurter Allee		-10,2	-17,2	-37,8		-5,6	-12,6	-24,5
Mitte		-15,6	-17,8	-27,2		-9,5	-13,6	-14,0

Die Unterschiede im Verhalten der NO_x -Zusatzbelastung in den einzelnen Niederschlagsschwellen sind im Vergleich zur Gesamtbelastung eher gering. Das heißt, die prozentuale Abnahme der NO_x -Konzentration ist bei allen Niederschlagshöhen sowohl für die Gesamt- als auch -Zusatzbelastung im Allgemeinen etwa gleich. Je nach Station und Niederschlagsschwelle werden Minderungen zwischen ca. 6 bis 24 % festgestellt. Lediglich in der Frankfurter Allee sind in der Zusatzbelastung deutlich höhere Abnahmen ab 5,0 mm Niederschlag feststellbar als für die Gesamtbelastung ermittelt wurden, und in Mitte ist im Unterschied dazu ab 5 mm Niederschlag kaum eine weitere Abnahme feststellbar. Die Reduktionen sind hierbei geringer als bei der Gesamtbelastung. Somit folgt ab 5 mm Niederschlag NO_x - nicht dem Trend der PM_{10} -Zusatzbelastung.

Für NO_x lässt sich demnach schlussfolgern, dass Niederschlag im Allgemeinen den gleichen Einfluss auf NO_x -Gesamt- wie auf die Zusatzbelastung ausübt. Das Verhalten von NO_x -Gesamt- und Zusatzbelastung unterscheidet sich nicht grundlegend. Jedoch wirken die Bedingungen während Niederschlagstagen andersartig auf die PM_{10} -Zusatzbelastung. Der Einfluss steigt erst ab hohen Niederschlagsschwellen (5 mm). Daraus kann u. U. geschlossen werden, dass die Bedingungen bei höheren Niederschlägen einen größeren Einfluss auf die PM_{10} -Zusatzbelastung ausüben als auf die Zusatzbelastung von NO_x .

Zusammenfassend lässt sich außerdem feststellen, dass an allen drei Stationen bei Betrachtung von Niederschlagsschwellen die PM_{10} - und NO_x - Reduktion in der Zusatzbelastung um so größer ausfallen, je höher die zugrunde gelegten Niederschlagsschwellen sind. Zur Interpretation der Ergebnisse siehe Abschnitt 6.6.

6.5.4 VERGLEICH DER ZUSATZBELASTUNG IN VERSCHIEDENEN NIEDERSCHLAGSKLASSEN AN WERKTAGEN

Das Verhalten der PM_{10} - und NO_x -Zusatzbelastung in den gewählten Niederschlagsklassen weist größere Unterschiede zum Verhalten der Gesamtbelastung bzw. zur Betrachtung nach Niederschlagsschwellen auf. Aber auch zwischen den Stationen treten z.T. deutliche Abweichungen zu dem schon festgestellten Trend auf, dass mit zunehmender Niederschlagshöhe auch die PM_{10} - bzw. NO_x -Konzentrationen fallen.

In **Tabelle 6-7** sind PM_{10} - und NO_x -Konzentrationswerte der Zusatzbelastung dargestellt. Ausführlichere Abbildungen befinden sich wieder in Anhang A6.

Tabelle 6-7: Vergleich der absoluten Werte und der prozentualen Abweichungen der Zusatzbelastungen an Werktagen in verschiedenen ausgewählten Niederschlagsklassen mit Werktagen ohne Niederschlag

		PM10-Zusatzbelastung, werktags [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
Niederschlagsklasse	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 2,5 mm	>2,5 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm	
Schildhornstraße	10,3	10,8	11,2	11,0	9,5	8,2	
Frankfurter Allee	12,5	12,6	12,6	12,3	10,2	8,0	
Mitte	5,7	4,8	5,3	5,2	4,6	4,2	
		Reduktion der PM10-Zusatzbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag					
Niederschlagsklasse	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 2,5 mm	>2,5 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm	
Schildhornstraße		+4,5	+8,1	+6,5	-8,3	-20,9	
Frankfurter Allee		-0,5	+0,6	-1,5	-18,5	-36,4	
Mitte		-15,0	-6,2	-8,7	-19,5	-24,9	
		NO _x -Zusatzbelastung, werktags [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
Niederschlagsklasse	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 2,5 mm	>2,5 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm	
Schildhornstraße	169,3	170,7	167,6	157,9	147,5	138,0	
Frankfurter Allee	94,4	100,9	97,2	83,9	88,1	70,5	
Mitte	17,1	16,4	16,6	14,5	15,4	14,6	
		Reduktion der NO _x -Zusatzbelastung, werktags [%] im Vergleich zu Tagen ohne Niederschlag					
Niederschlagsklasse	0 mm	? 0,1 – 0,5 mm	>0,5 – 1,0 mm	>1,0 – 2,5 mm	>2,5 – 5,0 mm	>5,0 – 10,0 mm	
Schildhornstraße		+0,8	-1,0	-6,7	-12,8	-18,5	
Frankfurter Allee		+6,9	+3,0	-11,2	-6,6	-25,3	
Mitte		-4,2	-3,0	-14,8	-9,7	-14,5	

Wurde für die Zusatzbelastung mit steigender Niederschlagsschwelle ein Rückgang der PM10- und NO_x-Konzentrationen festgestellt, trifft dies in den Niederschlagsklassen nur noch bedingt zu. Unterschiede und Besonderheiten innerhalb bestimmter Niederschlagshöhen werden besser deutlich.

An der Frankfurter Allee folgt das Absinken der PM10-Konzentration im Allgemeinen zwar dem schon angesprochenen Trend, jedoch wird deutlich, dass eine Reduktion der PM10-Zusatzbelastung erst in höheren Niederschlagsbereichen auftritt. Bis 2,5 mm Niederschlag wird hier eine Konzentrationsminderung von maximal 1,5 % festgestellt. In Klassen mit mehr als 2,5 mm Niederschlag werden dann Minderungen zwischen 18,5 und 36 % ermittelt. Im Gegensatz dazu liegen die entsprechenden NO_x-Konzentrationen bei Niederschlagsmengen

kleiner 1,0 mm über der durchschnittlichen Konzentration von Tagen ohne Niederschlag. Erst ab 1 mm Niederschlag wird in diesem Betrachtungsansatz eine Abnahme der NO_x - Zusatzbelastung um ca. 11 % festgestellt.

An der Schildhornstraße tritt dagegen der umgekehrte Fall auf: Die NO_x -Konzentrationen fallen mit steigender Niederschlagshöhe bis etwa 19 % kontinuierlich ab. Die durchschnittliche PM_{10} -Konzentration liegt hingegen zu Beginn über den Werten von niederschlagsfreien Tagen (zwischen 4,5 und 6,5 %) und fällt erst ab den Klassen ab 2,5 mm Niederschlag unter den Durchschnitt niederschlagsfreier Tage. Die Reduktionen betragen dabei ca. 8 bis 21 %.

An der Station Mitte liegen sowohl PM_{10} - als auch NO_x - Konzentrationswerte der Zusatzbelastung unter den Werten für niederschlagsfreie Werkzeuge, der Rückgang ist zwar weniger ausgeglichen, aber der Trend einer höheren Abnahme mit steigender Niederschlagsklasse ist ebenfalls zu beobachten. Dabei werden bei PM_{10} Reduktionen zwischen ca. 6 und 25 % und bei NO_x zwischen ca. 3 und 15 % festgestellt.

Es bestätigt sich aber, dass die Unterschiede zwischen NO_x -Gesamt- und Zusatzbelastung weniger ausgeprägt sind als bei PM_{10} .

6.6 Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

6.6.1 GESAMTBELASTUNG

Aus den in den Abschnitten 6.4.2 und 6.4.3 angesprochenen Ergebnissen der Auswertungen wurde deutlich, dass Niederschlag bzw. die mit Niederschlag einhergehenden Witterungsbedingungen einen Einfluss auf die PM_{10} - und NO_x -Gesamtbelastung an den beobachteten Stationen ausüben. Stets konnte bei Niederschlag eine Verringerung der PM_{10} -Gesamtbelastung nachgewiesen werden. Diese kann bis zu ca. 30 % betragen. Im Allgemeinen war dabei auch eine Reduktion in der NO_x -Konzentration erkennbar. Bereits bei der sehr niedrigen Tagesniederschlagsmenge von 0,1 mm werden signifikante Reduktionen der PM_{10} -Konzentration festgestellt, die abgesehen von der Messstelle an der Stadtautobahn deutlich größer sind als bei NO_x . In den **Abbildungen 6-14, 6-15, 6-18 und 6-19** (an Ende des Kapitels 6.6.3) ist das Verhalten von PM_{10} - und NO_x -Gesamtbelastung aller Stationen noch einmal zusammengefasst dargestellt. Da die Stadtautobahn ein anderes Verhalten zeigt als die anderen Station, bleibt sie vorerst aus der Diskussion ausgeklammert und wird zum Schluss separat am Ende der Ausführungen erläutert.

Die PM10-Gesamtbelastung zeigt in der Betrachtung nach Niederschlagsschwellen schon ab 0,1 mm Niederschlag Abnahmen der Konzentration zwischen ca. 13 % an der Schildhornstraße und 25 % an der Station Buch. Die NO_x -Gesamtbelastung hingegen zeigt dort nur Reduktionen zwischen jeweils ca. 8 und 9 %. (An der Station Buch liegen wurden keine NO_x -Messungen durchgeführt).

Bei der Annahme, dass sich in den Änderungen der NO_x -Konzentration nur die mit Regenereignissen korrelierten Änderungen der Ausbreitungsverhältnisse (Windrichtung und -geschwindigkeit etc.) widerspiegeln, sollten sich in der Differenz zwischen der Reduktion der NO_x -Konzentration und PM10-Konzentration der emissionspezifische Einfluss des Niederschlages finden lassen. **Tabelle 6-8** listet diese für die jeweiligen Stationen auf.

Tabelle 6-8: NO_x-Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab Niederschlagsschwellen (Gesamtbelastung)

Niederschlags-schwelle	Schildhornstraße	Frankfurter Allee	Mitte	Nansenstraße
0,1 mm	-5,6 %	-11,6 %	-8,6 %	-9,2 %
1,0 mm	-2,7 %	- 8,0 %	-5,8 %	-6,3 %
5,0 mm	-1,2 %	-13,4 %	-0,7 %	+2,6 %

Aus den Diagrammen und den Ergebnissen von **Tabelle 6-8** wird deutlich, dass die PM10-Gesamtbelastung bei Niederschlagsschwellen von 0,1 mm signifikante Abnahmen aufweist, die zwischen 0,7 und 11,6 % größer sind als bei NO_x. Es wird ebenfalls sichtbar, dass bis auf die Frankfurter Allee, der Unterschied mit steigender Niederschlagshöhe kleiner wird. Insgesamt sind an der Schildhornstraße die geringsten und an der Frankfurter Allee die höchsten Minderungseffekte feststellbar.

Ein ähnliches Verhalten kann auch in der Betrachtung von Niederschlagsklassen beobachtet werden (**Tabelle 6-9**).

Tabelle 6-9: NO_x-Änderung [%] minus PM10-Änderung bei Niederschlag [%] in Niederschlagsklassen (Gesamtbelastung)

Niederschlags-klasse	Schildhornstraße	Frankfurter Allee	Mitte	Nansenstraße
0,1 - <0,5 mm	-9,3 %	-16,6 %	-11,0 %	-11,7 %
0,5 - <1,0 mm	-10,4 %	-17,4 %	-13,9 %	-13,5 %
1,0 - <5,0 mm	-4,1 %	-10,8 %	-9,0 %	-11,4 %
5,0 - <10,0 mm	-0,1 %	-1,0 %	-0,8 %	+1,1 %

Die PM10-Gesamtbelastung, betrachtet in Niederschlagsklassen, zeigt bereits bei Niederschlagshöhen zwischen 0,1 und 0,5 mm Abnahmen auf, die ca. 9 bis 17 % größer sind als bei NO_x. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei 0,5 bis 1,0 mm Niederschlag (10 % bis 17 %).

Bei größeren Mengen (1,0 bis 5,0 mm) nimmt dieser Abstand auf ca. 4 bis 11 % ab. Bei Tagesniederschlägen von mehr als 5 mm ist kein signifikanter Unterschied im Verhalten von PM10 und NO_x feststellbar. Die Schildhornstraße zeigt immer die geringsten und die Frankfurter Allee im Allgemeinen die höchsten Effekte.

6.6.2 ZUSATZBELASTUNG

Im Allgemeinen ist für die PM10- und NO_x -Gesamtbelastungen bei Niederschlag ein anderes Verhalten als in der Zusatzbelastung feststellbar. Es zeigte sich, dass in der PM10- bzw. NO_x -Gesamtbelastung schon kleinere Niederschlagsmengen eine Konzentrationsminderung bewirken. In den Zusatzbelastungen können deutliche Reduktionen erst ab größeren Niederschlagsmengen festgestellt werden. Dies ist ein wesentlicher Unterschied.

In **Tabelle 6-10** werden die prozentualen Unterschiede in der Zusatzbelastung von NO_x und PM10 nach Niederschlagsschwellen und in **Tabelle 6-11** nach Niederschlagsklassen aufgelistet.

Tabelle 6-10: NO_x-Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab Niederschlagsschwellen (Zusatzbelastung)

Niederschlagsschwelle	Schildhornstraße	Frankfurter Allee	Mitte
0,1 mm	+6,0 %	-4,6 %	-6,1 %
1,0 mm	+6,0 %	- 4,6 %	-4,2 %
5,0 mm	-2,4 %	-13,3 %	-13,2 %

Aus obiger Tabelle wird der genannte Unterschied gut ersichtlich. In der Schildhornstraße können erst ab 5,0 mm Niederschlag Reduktionen in der PM10-Zusatzbelastung festgestellt werden, welche die von NO_x überschreiten, jedoch nur um ca. 2,4 %.

An der Frankfurter Allee ist ebenfalls zu beobachten, dass es erst ab größeren Niederschlagsmengen deutliche Unterschiede in der Abnahme der PM10-Konzentration im Vergleich zur NO_x -Minderung gibt. PM10 weist im Gegensatz zur Schildhornstraße aber stets höhere Abnahmen auf als NO_x. Bis 5,0 mm Niederschlag sind die Abnahmen von PM10 an der Frankfurter Allee um etwa 4,6 % höher als von NO_x. Ab 5 mm Niederschlag beträgt der Unterschied etwa 13 %.

Die Zusatzbelastung an der Station Mitte zeigt bei Niederschlägen ein ähnliches Verhalten wie die Frankfurter Allee. Die Reduktionen der Zusatzbelastung von PM10 sind stets höher als bei NO_x. Bis 5,0 mm Niederschlagshöhe beträgt diese Differenz etwa 4 % bis 6 %. Ab 5,0 mm zeigt PM10 wie an der Frankfurter Allee eine Reduktion, die um ca. 13 % höher ist als von NO_x.

Die Betrachtung der Niederschlagsklassen offenbart wieder die Unterschiede in der Abnahme von PM10 und NO_x bei verschiedenen Niederschlagshöhen. Die Schildhornstraße zeigt bis 2,5 mm Niederschlagshöhe eine Zunahme der PM10-Konzentration bezüglich zu trockenen Tagen um bis zu etwa 8 % (vgl. **Abbildung 6-20**). Erst dann ist eine Reduktion sichtbar. Die NO_x -Zusatzbelastung (**Abbildung 6-21**) nimmt dagegen bereits ab 0,5 mm Niederschlag ab. Die Abnahmen sind bis auf die letzte gewählte Niederschlagsklasse (5,0 bis 10,0 mm) höher als bei PM10 und betragen zwischen 1,0 % bis 18,5 %.

An der Frankfurter Allee ist bis 2,5 mm Niederschlag kaum eine Änderung in der PM10-Zusatzbelastung sichtbar. Danach erfolgt jedoch eine Reduktion um bis zu 36 %. NO_x zeigt dagegen bis 1,0 mm noch eine Zunahme der Belastung und sinkt dann um bis zu 25 % ab.

An der Station Mitte nehmen sowohl PM10 als auch NO_x -Konzentration bei Niederschlägen ab. Die Abnahmen von PM10 sind bis auf die Klasse 1,0 bis 2,5 mm höher als für NO_x.

An der Frankfurter Allee und in Mitte liegen die Differenzen in der Abnahme von PM10 und NO_x wie auch schon bei den Niederschlagsschwellen auf ca. gleichem Niveau und sind generell um so höher je höher die gefallene Niederschlagsmenge ist.

Tabelle 6-11: NO_x -Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag in Niederschlagsklassen (Zusatzbelastung)

Niederschlagsklasse	Schildhornstraße	Frankfurter Allee	Mitte
0,1 - <0,5 mm	+3,7 %	-7,4 %	-10,8 %
0,5 - <1,0 mm	+9,1 %	-2,4 %	-3,2 %
1,0 - <2,5 mm	+13,2 %	+9,7 %	+6,1 %
2,5 - <5,0 mm	+4,5 %	-11,9 %	-9,8 %
5,0 - <10,0 mm	-2,4 %	-11,1 %	-10,4 %

Tabelle 611 verdeutlicht das eben erwähnte Verhalten. Hier wird auch ein wesentlicher Unterschied zur Gesamtbelastung sichtbar. Die Differenzen zwischen PM10- und NO_x sind um so höher (im Sinne einer Abnahme von PM10 und NO_x), je größer die zugrundegelegte Niederschlagshöhe ist. Erst ab 2,5 mm Niederschlag sinkt PM10 um etwa 10 % deutlich mehr als NO_x. An der Schildhornstraße tritt dieser Effekt erst ab 5,0 mm Niederschlags ein und ist weniger stark ausgeprägt. Der Unterschied liegt dann nur bei 2,4 %.

Ein Erklärungsansatz für das doch recht unterschiedliche Verhalten der Zusatzbelastung im Vergleich zur Gesamtbelastung könnte eventuell darin zu sehen sein, dass die Vorbelastung nicht direkt gemessen wurde. Die hilfsweise Zuordnung der Station Nansenstraße als Vorbelastungsmessung zu den einzelnen Stationen liefert nur eine Abschätzung der Vorbelastung. Möglicherweise treten Korrelationen der Vorbelastung und/ oder der

Zusatzbelastung zu meteorologischen Bedingungen bei Regen auf, die durch die räumlichen Strukturen umliegender Quellen für NO_x und PM_{10} möglicherweise unterschiedlich sind.

6.6.3 RELATIVE LUFTFEUCHTE

Eine reduzierende Wirkung der relativen Luftfeuchte auf die PM_{10} -Zusatzbelastung konnte in dem Zusammenhang nicht festgestellt werden. Die Zusatzbelastung verhält sich unabhängig von der Luftfeuchte. Wie bei der Gesamtbelastung sind zwar bei hohen Luftfeuchten – zumindest optisch im Diagramm – auch hohe Zusatzbelastungen sichtbar (siehe Anhang A7). Dies ist allerdings nicht signifikant.

6.6.4 DISKUSSION DER DATEN FÜR GESAMT- UND ZUSATZBELASTUNG

Insgesamt sind die gefundenen Abnahmen in den Konzentrationen (an der Schildhornstraße nur mit Abstrichen) für PM_{10} - zumindest in den höheren Niederschlagsbereichen - allgemein höher als für NO_x .

Bei der Interpretation der gewonnenen Daten muss allerdings noch Folgendes angesprochen werden:

Vergleicht man den Rückgang der NO_x -Konzentration an den Stationen ab verschiedenen Niederschlagsschwellen und in Niederschlagsklassen, ist möglicherweise irritierend, dass bei der Betrachtung der NO_x -Konzentration in Niederschlagsklassen die NO_x -Konzentration zunächst auf etwa einem Niveau verbleibt und, wie erwähnt, erst später absinkt. Bei einer Betrachtung der NO_x -Konzentration nach Niederschlagsschwellen sinkt diese aber sofort ab. Dieser scheinbare Widerspruch ist in den unterschiedlichen Ansätzen in der Auswertung begründet. Beispielsweise in der Niederschlagsklasse $\geq 0,1$ bis $0,5$ mm werden nur die NO_x -Werte betrachtet, die an Tagen mit derartigen Niederschlagshöhen auftreten. In die Betrachtung der Niederschlagsschwelle $\geq 0,1$ mm fließen hingegen alle Tage ein, an denen mindestens $0,1$ mm Niederschlag gemessen werden konnte. Da die kleinste erfasste Niederschlagshöhe $0,1$ mm beträgt, fließen in die Betrachtung der Werte ab einer Niederschlagsschwelle von $0,1$ mm folglich alle NO_x - bzw. PM_{10} -Konzentrationen ein, die an Niederschlagstagen im Sinne der Definition auftraten.

Abschließend sollen auftretende Unsicherheiten in der Datenanalyse und –auswertung umrissen werden.

Mit zunehmender Niederschlagshöhe nimmt die Datengrundlage ab. Somit sind die Ergebnisse, die für höhere Niederschlagsbereiche erzielt wurden, kritischer zu betrachten.

Seltene und außergewöhnliche Ereignisse treten dort mehr in den Vordergrund. Vor allem ist aber zu beachten, dass die verwendeten Niederschlagsdaten nicht 100 %ig die Situation an den einzelnen Messstellen widerspiegeln, da sie von nur einer Station (Dahlem) übernommen wurden (siehe Kapitel 5.2.2). Besonders bei kleinräumigen Niederschlagsereignissen bzw. hohen Niederschlagsmengen in kurzen Zeiträumen ist möglicherweise der räumliche und zeitliche Bezug der Station Berlin Dahlem zur betreffenden Straßenmessstelle nicht mehr gegeben. So werden u. U. an einzelnen Stationen trockene Tage Niederschlagstagen zugeordnet und umgekehrt bzw. eine falsche Niederschlagshöhe zugrunde gelegt. Lediglich für die Station Schildhornstraße, die sich in der Nähe der Station Berlin Dahlem befindet, können die verwendeten Niederschlagsdaten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit als zeitlich repräsentativ angesehen werden.

Ein wichtiger Punkt ist, dass in allen Auswertungen nur die absolute Niederschlagshöhe eines gesamten Tages betrachtet wurde, nicht aber die Verteilung des Niederschlags über den ganzen Tag. Somit werden Unterschiede in der Niederschlagsintensität, also ob beispielsweise 5 mm Niederschlag in einer oder zwölf Stunden fielen, überdeckt. Die Niederschlagsintensität könnte aber die PM₁₀- und NO_x-Konzentration durchaus beeinflussen.

Weiterhin wurde der Niederschlag als einziges Klimaelement untersucht. Beispielsweise wurden Einflüsse der Windgeschwindigkeit ausgeklammert, obwohl an Tagen mit Niederschlag oft auch die Windgeschwindigkeit erhöht ist. Dies führt zwangsläufig zu niedrigeren Konzentrationen. Auch ist es möglich, dass Partikel, durch die bei Niederschlag auftretende Feuchtigkeit zwar gebunden werden, sich aber trotzdem nicht absetzen und fortgespült werden, sondern aufgrund höherer Windgeschwindigkeiten wieder aufgewirbelt werden können.

Wind ist nur ein möglicher Einflussparameter. Es konnte weiterhin nicht auf Besonderheiten an jeder einzelnen Straße eingegangen werden, die im Messzeitraum eventuell auftraten. Das Vorhandensein einer Straßenbaustelle, der Abriss, Neu- oder Umbau von Häusern, die an die Messstation grenzen, Baumverschneidungen etc. können (kurzzeitig) auf die PM₁₀-Belastungen Einfluss nehmen und somit auch auf die Untersuchungsergebnisse.

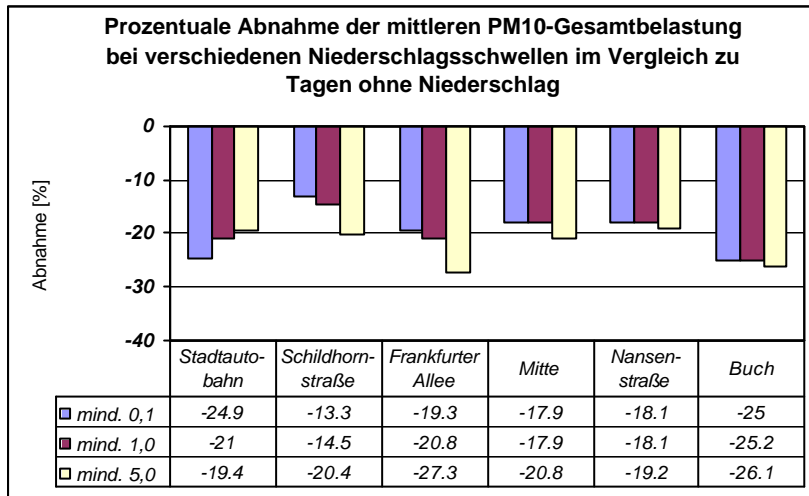


Abbildung 6-14: Vergleich der PM10-Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen

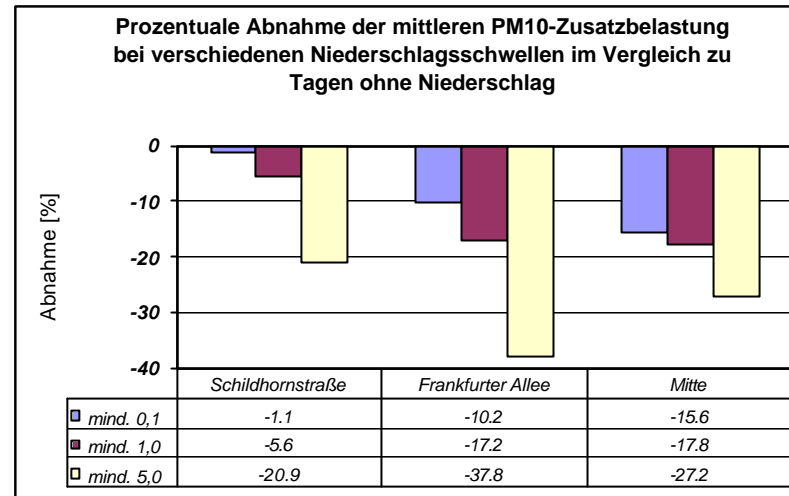


Abbildung 6-16: Vergleich der PM10-Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen

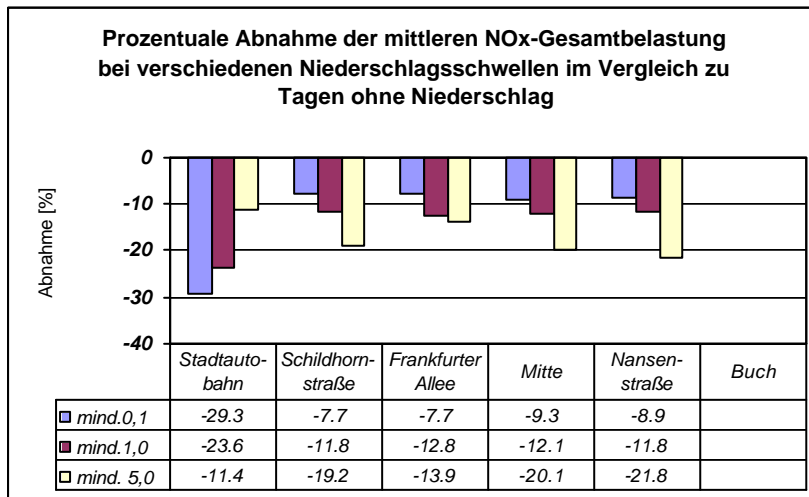


Abbildung 6-15: Vergleich der NO_x-Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen

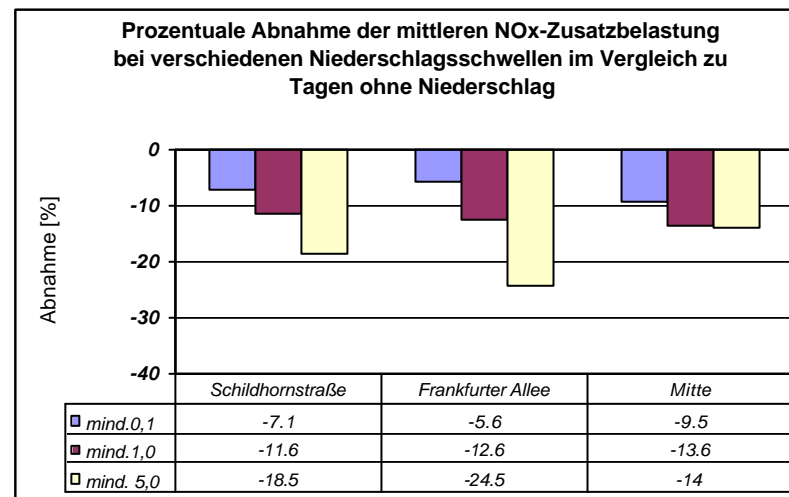


Abbildung 6-17: Vergleich der NO_x-Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen ab Niederschlagsschwellen

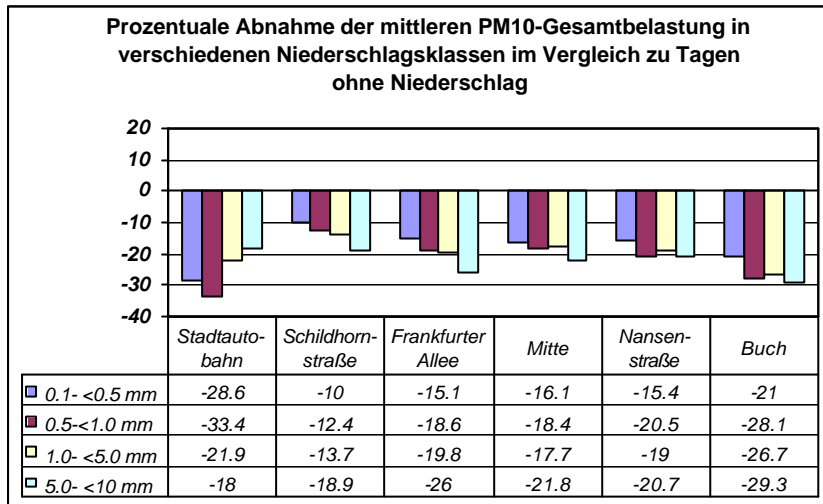


Abbildung 6-18: Vergleich der PM10-Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen

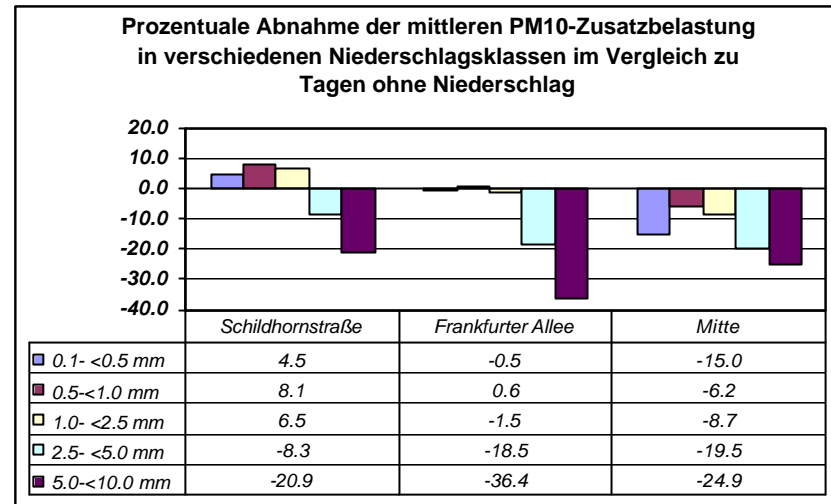


Abbildung 6-20: Vergleich der PM10-Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen

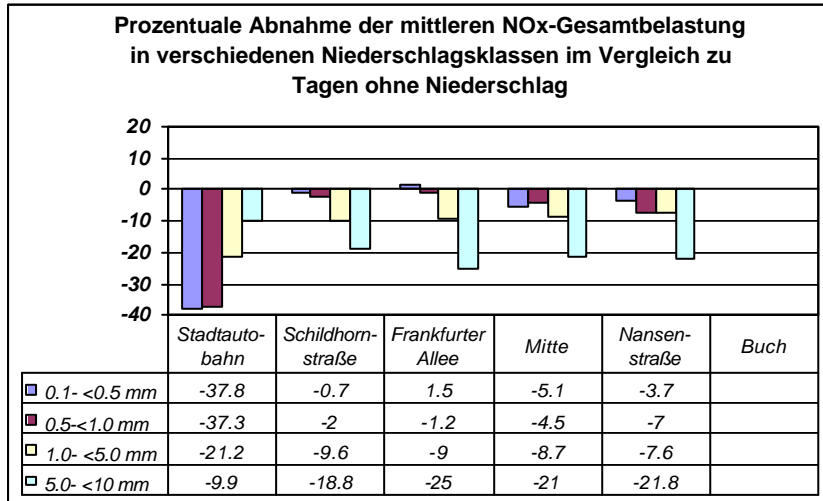


Abbildung 6-19: Vergleich der NO_x-Gesamtbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen

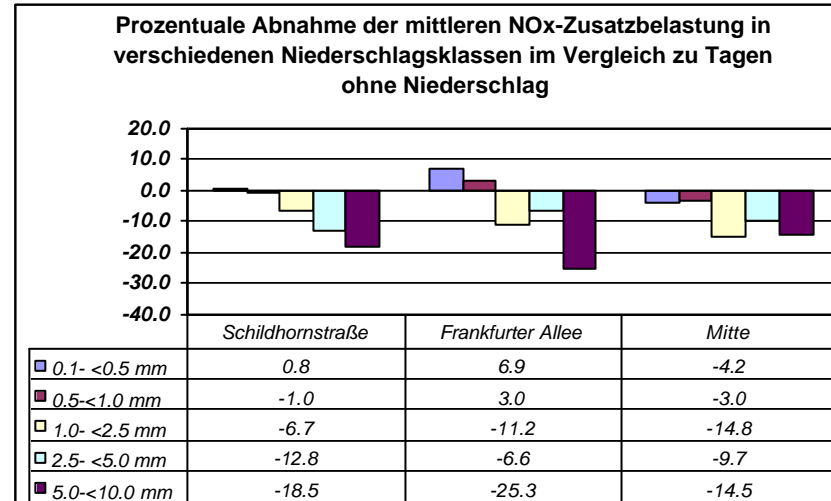


Abbildung 6-21: Vergleich der NO_x-Zusatzbelastungen der einzelnen Stationen in Niederschlagsklassen

6.6.5 BESONDERHEITEN AN DER STADTAUTOBAHN UND IN WINDRICHTUNGSSEKTOREN

Im Vergleich mit den anderen Stationen ist, wie bereits angesprochen, auffällig, dass an der Stadtautobahn bei Niederschlagsereignissen sowohl PM₁₀- als auch NO_x -Konzentrationen zwar zurückgehen, dann aber mit zunehmender Niederschlagshöhe wieder ansteigen. Dies kann aus den vorliegenden Ergebnissen nur schwer erklärt werden, ist aber sicherlich in hohem Maße in der besonderen Lage begründet (siehe auch Lageskizze Anhang A1). Die Messstelle am Lerschpfad befindet sich westlich an der an dieser Stelle leicht nach Nordwest verlaufenden Autobahn.

Luv- und Lee-Effekte spielen bei der Messung der Luftschadstoffbelastung eine wichtige Rolle. Lage bzw. Ausrichtung der Messstelle zur betreffenden Windrichtung können wichtige Einflussfaktoren auf die gemessenen Konzentrationen sein. Orographische Gegebenheiten, die auch die städtische Bebauung einschließen, haben Einfluss auf die Luftströmung. Hinter Hindernissen können sich bei Queranströmung beispielsweise Leewirbel ausbilden. Die Luftaustauschsituation ist in diesem Falle schlecht. Hohe Bodenrauigkeit in der Stadt kann die vertikale turbulente Durchmischung verstärken (vgl. Warnecke 1991). Bei Längsanströmung ist es möglich, dass die Winde kanalisiert werden, die Windgeschwindigkeit wird dabei erhöht und die Luft wird schnell ausgetauscht bzw. Luftschadstoffe schnell abtransportiert. Es kann aber auch zu einer Schadstoffakkumulation kommen.

An Tagen ohne Niederschlag treten an der Stadtautobahn im Vergleich zu Niederschlagstagen häufiger östliche Windrichtungen auf. Das bedeutet, dass dann die Schadstoffe, welche an der Autobahn emittiert werden, häufiger direkt zur Messstelle transportiert werden als an Niederschlagstagen, wenn Winde aus östlicher Richtung zu Gunsten von Westwinden stärker zurücktreten. An Niederschlagstagen mit höherer Westwindhäufigkeit, wird die Messstelle hingegen mehr von der Situation beeinflusst, wie sie westlich der Autobahn auftritt. Diese mit Niederschlag einhergehenden Unterschiede in der Windrichtung können unter Umständen auch höhere PM₁₀- und NO_x - Messwerte an Tagen ohne Niederschlag im Vergleich zu Tagen mit Niederschlag verursachen bzw. erklären, warum sich Niederschlag bereits in unteren Klassen stärker auf die PM₁₀- und NO_x -Konzentration auswirkt als an den anderen untersuchten Stationen.

Es darf dabei aber nicht außer Acht gelassen werden, dass trotz dieses beobachteten Anstiegs der PM₁₀- und NO_x -Konzentrationen in höheren Niederschlagsklassen, diese immer noch unter den Konzentrationen liegen, wie sie an Tagen ohne Niederschlag ermittelt wurden. Zudem ist der Zusammenhang zwischen Windrichtung an Niederschlagstagen und

niederschlagsfreien Tagen für den betrachteten Untersuchungszeitraum nur schwach signifikant.

Aufgrund der erwähnten Unplausibilitäten an der Stadtautobahn in der Gesamtbelastung wurde das Verhalten von PM₁₀ und NO_x in den Windrichtungssektoren von 220° bis 310° und von 135° bis 225°⁹ betrachtet. Der Westwindsektor wurde zuerst gewählt, da die meisten Niederschlagsereignisse mit dieser Windrichtung gekoppelt sind. Um möglichst viele Fälle in die Auswertung einzubeziehen, wurden Niederschlagsereignisse mit Windrichtungen aus 220° bis 310° und nicht aus 225° bis 315° zu Grunde gelegt. Die Untersuchungen erfolgten wieder anhand von Tagesmittelwerten. Dabei wurden nur jene Tage betrachtet, an denen zu mindestens 75 % Winde aus den zugrundegelegten Richtungen wehten.

An der Stadtautobahn wird bei der Analyse des Westwindes nur die Situation des Hintergrundes (Friedhof und Wohngebiet) betrachtet, da Queranströmung vorliegt. Die Belastung an PM₁₀ und NO_x, welche direkt von der Autobahn stammen, bleiben unberücksichtigt. Die Analysen zeigen für die Gesamtbelastung, die in diesem Falle die Vorbelastung ist, ein Absinken der PM₁₀- und NO_x-Konzentration. Das ist umso höher, je höher die zugrunde liegende Niederschlagsschwelle ist. Ab 0,1 mm Tagesniederschlag werden Reduktionen in der Gesamtbelastung von PM₁₀ von ca. 10 % ermittelt, ab 5,0 mm Niederschlag treten Abnahmen von ca. 46 % auf. Bei NO_x wird schon ab einer Niederschlagsmenge von 0,1 mm eine Abnahme von etwa 34 % festgestellt, ab 2,5 mm Niederschlag vermindert sich die NO_x-Konzentration sogar um ca. 44 %.

Im Allgemeinen wird der Trend, der im Vorfeld für die anderen Stationen festgestellt wurde, auch in dieser Analyse wieder beobachtet. Eine Besonderheit zeigt sich indes auf: Die Abnahmen der NO_x-Konzentration sind bei Westwind an allen Stationen deutlich höher als für PM₁₀. Dies widerspricht den im vorab gewonnenen Ergebnissen. Bei PM₁₀ tritt hierbei genau der umgekehrte Fall ein. Die Abnahmen sind deutlich geringer als in der Analyse aller Windrichtungen festgestellt wurde. Dabei wird ebenfalls deutlich, dass bei Westwind an allen Stationen die mittleren Tageskonzentrationen der Gesamtbelastung für PM₁₀ unter den für alle Windrichtungen ermittelten Konzentrationen liegen (siehe Tabelle A23 und A24). Für NO_x wird dies an der Stadtautobahn ebenfalls beobachtet. Um dieses Phänomen besser beurteilen zu können, wurde, wie angesprochen, die Analyse auf den Südwindsektor erweitert und eine geringere Datengrundlage in Kauf genommen.

⁹ Folgende Aufteilung wurde zu Grunde gelegt: 0° = Nordwind, 90° = Ostwind, 180° = Südwind, 270° = Westwind

Winde aus südlichen Richtungen spiegeln eine andere Belastungssituationen wieder. An der Stadtautobahn tritt bei südlichen Winden Längsanströmung auf. In diesem Fall wird die Luftschadstoffbelastung der Straße durch die Messstelle erfasst. Die Tendenz einer höheren Reduktion der Gesamtbelastung von NO_x als von PM_{10} wird im Gegensatz zur Westwindrichtung nicht mehr beobachtet. Die Gesamtbelastung von PM_{10} weist deutlich höhere Abnahmen auf als von NO_x , wobei ab 0,1 mm Niederschlag für PM_{10} eine Abnahme von etwa 21 % (für NO_x ca. 10 %) und ab 5,0 mm Niederschlag von 33 % (bei NO_x 18 %) festgestellt wurden

6.7 Ausblick: Betrachtung der PM_{10} - und NO_x - Gesamt- und Zusatzbelastungen innerhalb einzelner Quartale

6.7.1 VORBEMERKUNG

Niederschlagsmenge, -art und -häufigkeit sind über das Jahr nicht gleichmäßig verteilt. Deshalb scheint es sinnvoll, den Einfluss des Niederschlages auf die PM_{10} - und NO_x - Konzentrationen innerhalb der Jahresquartale zu betrachten, was an dieser Stelle überblicksartig geschehen soll. Im Folgenden sollen Gesamt- und Zusatzbelastungen betrachtet werden. Die Analyse erfolgt wiederum nur für Werktage.

Die Quartale wurden in etwa den Jahreszeiten entsprechend gewählt. Quartal 1 umfasst den Frühjahrszeitraum von März bis Mai, Quartal 2 den Sommer von Juni bis August, Quartal 3 den Herbst von September bis November und Quartal 4 den Winter von Dezember bis Februar.

Da für das Jahr 1999 die Datengrundlage nicht vollständig ist, beziehen sich die Auswertungen nur auf das Jahr 2000. Die Niederschlagsschwellenanzahl wurde in den unteren Bereichen zwischen 0,1 mm und 0,5 mm reduziert, da sich bei den Betrachtungen der Gesamt- und Zusatzbelastungen gezeigt hat, dass dort noch keine wesentliche Veränderung auftritt. Es wurden nun Tage betrachtet, in denen mindestens 0,1 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 2,5 mm sowie 5,0 mm am Tage Niederschlag auftrat. Die Niederschlagsklassen entsprechen denen der Zusatzbelastung (0 mm, 0,1 – 0,5 mm, >0,5 – 1,0 mm, >1,0 – 2,5 mm, >2,5 – 5,0 mm, >5,0 – 10 mm). Die absoluten und prozentualen Konzentrationswerte sind dem Anhang A8 zu entnehmen.

Dem Anhang A8 sind den Abbildungen A8-1 und A8-2 die Summen der Niederschlagshöhen und die absolute Anzahl von Niederschlagsereignissen (30minütiger Zeitraum) zu entnehmen. Es wird deutlich, dass beide Größen aufgrund der geographischen Lage Berlins nicht einheitlich über das Jahr verteilt sind. Dies wurde für das langjährige Mittel bereits im Kapitel 4 besprochen. Der geringste Niederschlag fällt im Herbst. Eine hohe Niederschlagsanzahl geht nicht immer mit hohen Niederschlagshöhen einher und umgekehrt. Im Sommer treten im Gegensatz zum Winter weniger Niederschläge auf, jedoch mit einer höheren Intensität, was sich in der Niederschlagshöhe widerspiegelt. In den Wintermonaten hingegen ist die Summe der Halbstunden mit Niederschlag deutlich höher, jedoch ist die absolute Niederschlagshöhe geringer als im Sommer.

6.7.2 BETRACHTUNG DER GESAMTBELASTUNG

Im Folgenden soll nicht auf jede Station einzeln eingegangen werden, sondern nur auf allgemeine Besonderheiten. Abbildungen befinden sich im Anhang A8.

Bis auf das Quartal 2 kann im Allgemeinen eine Reduktion der PM10- Gesamt- und Zusatzbelastungen festgestellt werden. Der höchste Einfluss von Niederschlag auf die PM10- und NO_x -Konzentration ist im Winter, Quartal 4 zu beobachten, wenn am häufigsten Niederschläge fallen. Dann werden schon ab 0,1 mm Niederschlag Reduktionen in der PM10- Gesamtbelastung zwischen etwa 23 % und 32 % festgestellt. Im Herbst liegen an Niederschlagstagen die Reduktionen zwischen ca. 7 und 16 %, im Frühjahr zwischen 15 und 29 %, wobei dann bei der Nansenstraße auch Konzentrationswerte ermittelt werden, die über denen niederschlagsfreier Tage liegen.

Im Sommer werden jedoch nur sehr geringer Abnahmen oder wie an der Schildhornstraße oder in Mitte sogar Anstiege im Vergleich zu trockenen Tagen festgestellt. Die höchsten Abnahmen (ca. 14 %) werden an der Frankfurter Allee festgestellt.

NO_x folgt dem Trend von PM10 nur in den Wintermonaten. In den anderen Jahreszeiten werden an Niederschlagstagen sehr oft höhere Konzentrationen als an trockenen Tagen festgestellt.

In **Tabelle 6-12** wurden für die Niederschlagsschwelle 0,1 mm die prozentualen Abweichungen der NO_x -Konzentration an Niederschlagstagen zu trockenen Tagen mit denen von PM10 subtrahiert. In den Unterschieden sollten sich wieder die emissionsspezifischen Besonderheiten von PM10 widerspiegeln.

Tabelle 6-12: NO_x-Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab einer Niederschlagsschwelle von 0,1 mm (Gesamtbelastung)

Quartal	Stadtautobahn	Schildhornstraße	Frankfurter Allee	Mitte	Nansenstraße
I	-30,00 %	-13,36 %	-16,40 %	-18,86 %	+24,35 %
II	+6,40 %	-9,10 %	-26,80 %	-16,08 %	-14,24 %
III	-11,90 %	-19,08 %	-13,60 %	-24,05 %	-10,27 %
IV	+5,50 %	+1,57 %	-3,30 %	-8,42 %	-3,22 %

Aus den Ergebnissen wird sichtbar, dass bis auf Ausnahmen, die PM10-Konzentrationen bei Niederschlägen wesentlich stärker abnehmen bzw. weniger stark zunehmen.

6.7.3 BETRACHTUNG DER ZUSATZBELASTUNG

In der Zusatzbelastung treten wieder wesentliche Unterschiede zur Gesamtbelastung allgemein aber auch zu den einzelnen Quartalen auf.

Im Sommerquartal können an keiner betrachteten Station Reduktionen in der PM10- oder NO_x -Zusatzbelastung beobachtet werden. Während der anderen Jahreszeiten sind Reduktionen bei Niederschlag, zumindest ab höheren Niederschlagsschwellenwerten, nur in Mitte und an der Frankfurter Allee feststellbar. Lediglich im Winter werden auch an der Schildhornstraße PM10- und NO_x -Reduktionen festgestellt. In diesem Zeitraum werden in der Zusatzbelastung, wie auch schon in der Gesamtbelastung gezeigt wurde, die höchsten PM10-Minderungen erreicht.

In **Tabelle 6-13** werden die prozentualen Unterschiede zwischen NO_x und PM10 in den Abweichungen an Niederschlagstagen für Niederschlagstage ab 0,1 mm Niederschlag aufgelistet.

Tabelle 6-13: NO_x-Änderung [%] minus PM10-Änderung [%] bei Niederschlag ab einer Niederschlagsschwelle von 0,1 mm (Zusatzbelastung)

Quartal	Schildhornstraße	Frankfurter Allee	Mitte
I	+16,8 %	-2,1 %	-21,6 %
II	+4,4 %	-1,7 %	+32,7 %
III	-0,2 %	-11,2 %	-4,5 %
IV	-0,9 %	+6,0 %	-58,5 %

Die Ergebnisse in der Tabelle unterstreichen noch einmal den Unterschied zwischen Gesamt- und Zusatzbelastung. Es ist abzulesen, dass die Abnahmen von PM10 wesentlich geringer sind als von NO_x bzw. aber auch mehr ansteigen. Auch sind die Abnahmen, wie schon für das

Gesamtjahr festgestellt wurde, zumindest in unteren Niederschlagshöhen in der Zusatzbelastung weniger hoch.

6.7.4 ZUSAMMENFASSUNG

Bei einer Aufschlüsselung der Konzentrationsbetrachtung nach Quartalen zeigen sich Unterschiede in den PM₁₀- und NO_x - Konzentrationen. In den feuchten Winter- und Herbstmonaten führt Niederschlag zu niedrigeren PM₁₀-Konzentrationen als im Sommer, wo bei Niederschlägen oft höhere Konzentrationen als im Mittel auftreten.

Es bleibt zunächst festzustellen, dass im Sommer schauerartige, stärkere Niederschläge dominieren. Im Winter dauern die Niederschläge dagegen länger an, sind aber schwächer.

Es wird darauf hingewiesen, dass PM₁₀ außer im Sommer höhere Konzentrationsabnahmen bei Niederschlagsereignissen aufweist als NO_x. Im Sommer hingegen liegen sowohl die PM₁₀- als auch die NO_x - Konzentrationen bei Niederschlag über den Werten von niederschlagsfreien Tagen, wobei PM₁₀ die Konzentration von niederschlagsfreien Tagen stärker überschreitet als NO_x.

Es lässt sich schlussfolgern, ohne tiefer in diese Thematik einzudringen, dass jahreszeitliche Variationen in den Witterungsbedingungen zu einem unterschiedlichen Verhalten der PM₁₀- und NO_x- Gesamt- und Zusatzbelastung bei Niederschlägen führen können.

7 Auswertungen von Intensivmessungen an der Schildhornstraße

7.1 Datengrundlage und -verfügbarkeit

In der Schildhornstraße liegen Daten zum Verkehrsaufkommen und zur PM10- bzw. NO_x - Gesamtbelastung aus einer Intensivmesskampagne aus dem Zeitraum vom 13.11.2000 bis 15.12.2000 vor. Zur Berechnung der PM10- Zusatzbelastungen wurde die Paulsenstraße als Hintergrundstation herangezogen, die sich in unmittelbarer Nähe der Schildhornstraße befindet. Die PM10-Messungen sowohl an der Schildhornstraße als auch an der Paulsenstraße erfolgten kontinuierlich mit FH- Geräten.

Ziel ist die Berechnung der stündlichen PM10-Emissionsfaktoren und daraus die Ableitung der stündlichen PM10-Emission. Die Emissionsfaktoren sollen dann auf mögliche Korrelationen zu Luftfeuchtigkeit und Niederschlag untersucht werden.

Unter Emissionsfaktoren versteht man i. A. die Emission bestimmter Stoffe, welche auf die Menge der eingesetzten und erzielten Produkte bezogen wird. Im Straßenverkehr geben Emissionsfaktoren die emittierte Schadstoffmasse pro gefahrenen Kilometer und pro Fahrzeug an (UBA 1989).

Trotz des relativen kurzen Messzeitraums treten zum Teil relativ starke Messausfälle, insbesondere im Verkehrsaufkommen auf (siehe **Tabelle 7-1**). In den folgenden Auswertungen werden nur Werktage als Berechnungsgrundlage benutzt, da sich diese im Verkehrsaufkommen von den Wochenenden grundsätzlich unterscheiden. Die Datenlage für eine separate Auswertung der Wochenenden ist aber zu gering.

Die Datenlücken im Verkehrsaufkommen werktags wurden durch Mittelwerte der entsprechenden Stunden an Werktagen mit vollständiger Datengrundlage im jeweiligen Monat ergänzt. Das heißt für fehlende Werte im November wurden Mittelwerte des Monats November und analog dazu für Messausfälle im Dezember die entsprechenden Stundenmittel des Monats Dezember eingesetzt.

Tabelle 7-1: Fehlende Messwerte (Stundenmittel) Intensivmessung Schildhornstraße

Werktage	NO_x	PM10	Verkehr
Anzahl fehlender Werte	24	43	282
Prozent von theoretischer Gesamtzahl (600)	4,0 %	7,17 %	47,0 %

7.2 Überblick über die Niederschlagsituation

Die meteorologischen Daten stammen von der Messstation Berlin Dahlem. Sie lagen als halbstündige Werte vor und wurden auf Stundenwerte gemittelt bzw. summiert.

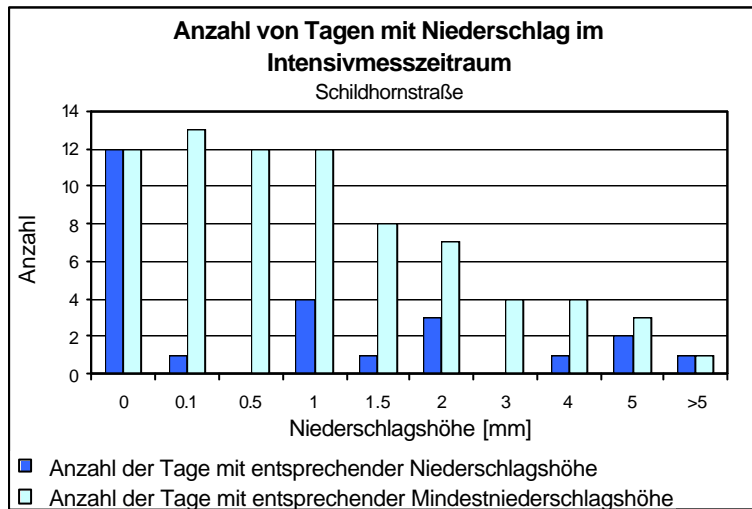


Abbildung 7-1 zeigt die Häufigkeit des Auftretens von Tagen mit Niederschlägen an. Daraus geht hervor, dass an etwa der Hälfte aller Tage Niederschläge von mindestens 0,1 mm auftraten.

Abbildung 7-1: Tage mit Niederschlag im Intensivmesszeitraum

Mindestens 1,5 mm Niederschlag treten noch an etwa einem Viertel aller Tage auf. Tage, an denen wenigstens 5 mm Niederschlag fallen, sind selten. Die gemessenen Niederschläge treten nur in Form von Regen auf.

7.3 Berechnung stündlicher Emissionsfaktoren in der Schildhornstraße

Unter Verwendung von NO_x als Tracer und bekannten NO_x - und PM_{10} -Zusatzbelastungen sowie NO_x -Emissionsfaktoren können die PM_{10} -Emissionsfaktoren ermittelt werden, unter der Annahme, dass sich NO_x und PM_{10} in unmittelbarer Straßennähe gleichartig ausbreiten. Dies ist vorteilhaft, da auf diese Weise keine komplizierten Modelle verwendet werden müssen. Die Berechnung erfolgt über einen einfachen Dreisatz:

[G1]

$$eF_{(PM10)} = \frac{ZB_{(PM10)} * eF_{(NOx)}}{ZB_{(NOx)}}$$

mit: $eF_{(PM10)}$ = Emissionsfaktor PM_{10}

$eF_{(NOx)}$ = Emissionsfaktor NO_x

$ZB_{(PM10)}$ = Zusatzbelastung PM_{10}

$ZB_{(NOx)}$ = Zusatzbelastung NO_x

Allerdings muss die Formel erweitert werden, da das Verkehrsaufkommen, dessen LKW-Anteil und die entsprechenden Fahrmuster auf die Emission Einfluss nehmen und in der Berechnung berücksichtigt werden müssen.

Emissionsfaktoren unterscheiden sich signifikant vom Fahrzeugtyp. LKW's und Schwerlastfahrzeuge haben höhere Emissionsfaktoren als PKW's oder Zweiradfahrzeuge (*EUROPEAN COMMISSION 1999, S. 62; INFRAS 1999*) und müssen daher gesondert betrachtet werden.

Ähnliche Kennwerte im Fahrverhalten werden zu Fahrmustern zusammengefasst. Die jeweiligen Fahrmuster werden beispielsweise durch die Durchschnittsgeschwindigkeit und den Zeitanteil der einzelnen Betriebszustände (Leerlauf im Stand, Beschleunigung, Bremsverzögerung etc.) charakterisiert (Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen 2001, S.5).

Die NO_x -Emissionsfaktoren wurden dem *Handbuch für Emissionsfaktoren (INFRAS 1999)* entnommen. Sie variieren, wie angesprochen, in Abhängigkeit vom jeweiligen Fahrmuster, welches typisch für bestimmte Straßen ist. Die gewählten Fahrmuster sind der **Tabelle 7.2** zu entnehmen.

Tabelle 7-2: Verkehrsmuster und NO_x -Emissionsfaktoren

Fahrmuster	Mittlere Fahr- geschwindigkeit der PKW [km/h]	Emissionsfaktor NO_x für PKW [g/(km · Fzg)]	Emissionsfaktor NO_x für LKW [g/(km · Fzg)]
HVS 3: vorfahrtsberechtigte Hauptverkehrsstraße mit mittleren Störungen, innerorts	46	0,453	7,63
LSA 3: Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlage, starke Störungen, innerorts	24	0,495	10,66
LSA 2: Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlage, mittlere Störungen, innerorts	28	0,478	10,03
IO Kern: Innerortsstraßen im Stadtkern	20	0,512	10,93

Quelle: INFRAS, 1999

In der Nähe der Messstelle befindet sich eine Lichtsignalanlage (LSA). Da der Verkehrsfluss aufgrund dessen in Ost- und Westrichtung nicht einheitlich ist, wurden für jede Richtung unterschiedliche Fahrmuster zugrunde gelegt. Von der Ampel kommende Fahrzeuge weisen höhere Geschwindigkeiten auf als solche, die sich auf die Ampel zubewegen, da sie durch Verkehrsstauungen während Rotphasen aufgehalten werden. Höhere Geschwindigkeiten der

Fahrzeuge werden auch auf den beiden mittleren Fahrspuren beobachtet. Für die Straßenseite in Ostrichtung wurde entsprechend der stündlich gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrzustände vor Ort folgende Verteilung gewählt:

LSA 3: von 9.00 bis 21.00 Uhr

LSA 2: von 22.00 bis 5.00 Uhr

IO Kern: von 6.00 bis 8.00 Uhr

In Westrichtung ist die Fahrweise aufgrund der von der Lichtsignalanlage wegfahrenden Verkehrsströme hingegen relativ ausgeglichen, so dass nur ein Fahrmuster zugrunde gelegt worden ist: *HVS 3*.

Unter Beachtung des LKW-Anteils und aus den Fahrmustern abgeleiteten NO_x -Emissionsfaktoren, ergibt sich nun folgende Formel zur Berechnung der mittleren stündlichen PM10-Emissionsfaktoren:

$$[G2] \quad eF_{PM10} = \frac{\frac{ZB_{PM10} \cdot eF_{NOx, PKW}}{ZB_{NOx}} \cdot n_{PKW} + \frac{ZB_{PM10} \cdot eF_{NOx, LKW}}{ZB_{NOx}} \cdot n_{LKW}}{n_{PKW} + n_{LKW}}$$

- mit:
- $eF_{PM10, PKW}$ = PM10 - Emissionsfaktor für PKW
 - $eF_{PM10, LKW}$ = PM10 - Emissionsfaktor für LKW
 - $eF_{NOx, PKW}$ = NO_x - Emissionsfaktor für PKW
 - $eF_{NOx, LKW}$ = NO_x - Emissionsfaktor für LKW
 - ZB_{PM10} = PM10 - Zusatzbelastung
 - ZB_{NOx} = NO_x - Zusatzbelastung
 - n_{PKW} = Anzahl PKW
 - n_{LKW} = Anzahl LKW

Aus den berechneten Emissionsfaktoren kann bei bekanntem stündlichen Verkehrsaufkommen auch auf die stündliche Emissionsdichte [g PM₁₀/ (km · h)] geschlossen werden:

$$[G3] \quad e_{(PM10)} = eF_{(PM10)} * DHV$$

mit: $e_{(PM10)}$ = PM₁₀-Emissionsdichte [g/(km · h)]

$eF_{(PM10)}$ = Emissionsfaktor PM₁₀ [g/(km · Fzg)]

DHV = durchschnittliche stündliche Verkehrsdichte [Fzg/ h]

7.4 Korrelation der PM₁₀-Emissionsfaktoren mit Niederschlagshöhe und Luftfeuchtigkeit

7.4.1 VORGEHENSWEISE

Bei Annahme einer von Luftfeuchte und Regen unabhängigen NO_x -Emission und einem gleichen Ausbreitungsverhalten von PM₁₀ und NO_x im Straßenraum, werden bei Verwendung von Emissionsfaktoren ausbreitungsbedingte Einflüsse wie z. B. Windgeschwindigkeit und Windrichtung eliminiert, da diese sich bereits in der NO_x -Zusatzbelastung widerspiegeln. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber den zu Beginn der Arbeit angestellten Betrachtungen der Konzentrationen dar.

Die ermittelten mittleren stündlichen Emissionsfaktoren (Abbildung A9-1 bis A9-10) zeigen einen charakteristischen Verlauf und liegen im Mittel bei ca. 0,06 in West- und ca. 0,08 g/(km · Fzg) in Ostrichtung. In den Nachtstunden bis 1:00 Uhr morgens werden recht hohe Emissionsfaktoren beobachtet [ca. 0,08 g/(km · Fzg)]. Um 2:00 sinken sie schnell auf ca. 0,02 g/(km · Fzg) ab und steigen ab 6:00 Uhr wieder an. Zwischen 9:00 und 13:00 Uhr werden die höchsten Emissionsfaktoren festgestellt [bis ca. 0,12 g/(km · Fzg)]. Der tägliche Verlauf der berechneten Emissionsfaktoren ist dem Anhang A9 zu entnehmen.

Aufgrund der unsicheren Datenlage, fehlenden Werten und Unplausibilitäten, die sich in der Berechnung der Emissionsfaktoren v.a. in den Nachtstunden ergaben (beispielsweise bedingt durch sehr niedrige Zusatzbelastungen), erfolgt die Analyse der Korrelation der Emissionsfaktoren mit Regenereignissen und Luftfeuchte nur für die Stunden zwischen 7:00 und 21:00 Uhr. Dadurch wird das zugrunde liegende Datenmaterial allerdings erneut

reduziert. **Tabelle 73** listet die Anzahl der nicht zu berechnenden Emissionsfaktoren im Messzeitraum für die jeweiligen Stunden an Werktagen auf.

Tabelle 7-3: Fehlende Emissionsfaktoren im Messzeitraum aufgeschlüsselt nach Stunden

Zeit (0 = 0:00 Uhr usw.)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fehlende Werte [%]	8	28	16	20	24	20	8	8	8	8	12	8
Zeit (0 = 0:00 Uhr usw.)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Fehlende Werte [%]	8	4	4	4	4	8	4	0	0	0	8	4

Auf Grundlage eben genannter Vorbehalte ergibt sich folgender Verlauf der Emissionsfaktoren im Tagesgang im erwähnten tageszeitlichen Rahmen (**Abbildung 7-2**). In der Darstellung wird zwischen den beiden Fahrrichtungen unterschieden.

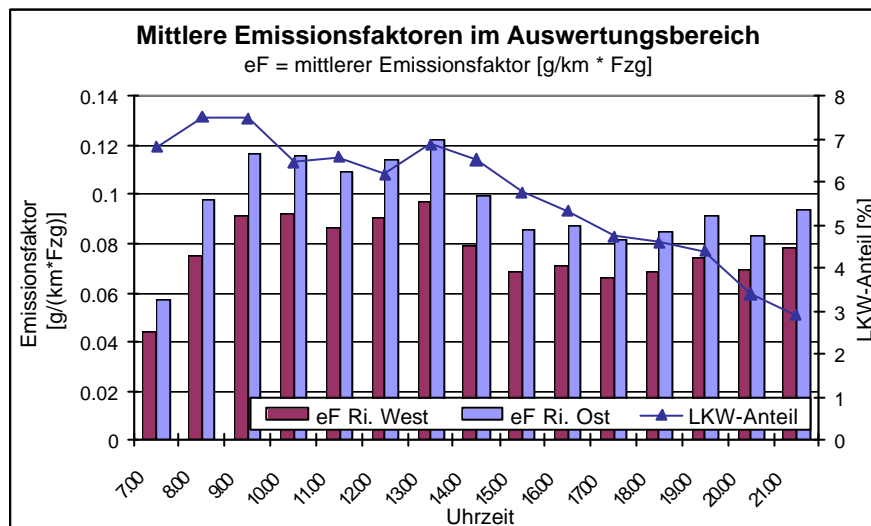


Abbildung 7-2: Tagesgang mittlerer Emissionsfaktoren sowie des LKW-Anteils

In **Abbildung 7-2** ist ebenfalls der durchschnittliche LKW-Anteil für die jeweilige Stunde eingetragen, da ein hoher LKW-Anteil am Gesamtverkehrsaufkommen hohe Emissionsfaktoren verursacht. Im betrachteten Untersuchungsausschnitt ist tagsüber bei hohen berechneten Emissionsfaktoren der LKW-Anteil im Allgemeinen ebenfalls hoch. Am früheren Morgen und am Abend sind die Variationen der berechneten Emissionsfaktoren und dem LKW-Anteil allerdings größer und nicht über den LKW-Anteil erklärbar.

Aufgrund des gewählten Betrachtungszeitraums ist die Datenbasis von Stunden mit Niederschlag eingeschränkt. Regenereignisse in Nachtstunden fallen aus der Betrachtung heraus. Außerdem sind Wochenenden, also Samstage und Sonntage, ebenfalls aus der Betrachtung ausgeschlossen. Es werden somit nur 19 Niederschlagsereignisse

unterschiedlicher Länge ausgewertet. Tritt Niederschlag im nicht berücksichtigten Zeitraum auf und setzt sich im Betrachtungszeitraum fort, wird dieser berücksichtigt. Das gleiche gilt für den Zeitraum nach einem Niederschlagsereignis, wo sich das Niederschlagsereignis selbst in den Nachtstunden befindet, nicht aber die Stunden direkt danach.

Eine einfache mathematische Korrelationsrechnung zwischen Niederschlag und PM10-Emissionsfaktoren erweist sich als schwierig, da die Datengrundlage nicht lückenlos ist, aber auch innere Strukturen im täglichen Verlauf der PM10-Emissionsfaktoren können eine mögliche Abhängigkeit überdecken. So konnte unter Zuhilfenahme des *Pearson Korrelationskoeffizienten* keine Korrelation zu Niederschlag und Luftfeuchte festgestellt werden. Dies muss aber noch nicht bedeuten, dass keine Abhängigkeiten auftreten.

Aus diesem Grunde wurden die Daten nach verschiedenen Gesichtspunkten untersucht:

- 1) Die zeitliche Entwicklung der PM10-Emissionsfaktoren nach einem Niederschlagsereignis.
- 2) Die zeitliche Entwicklung der PM10-Emissionsfaktoren nach einem Niederschlagsereignis unter besonderer Berücksichtigung der Niederschlagshöhe.
- 3) Die zeitliche Entwicklung der PM10-Emissionsfaktoren nach einem Niederschlagsereignis unter besonderer Berücksichtigung der Niederschlagsdauer.

Niederschlagsereignisse mit gleichen Bedingungen wurden zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet. Die Untersuchung des zeitlichen Rahmens erfolgte für jedes Niederschlagsereignis einzeln bis zum Auftreten des nächsten Ereignisses. So ist nicht für alle Niederschlagsereignisse die gleiche zeitliche Betrachtungsgrundlage verfügbar, wenn der Abstand zwischen zwei Ereignissen nur sehr kurz ist.

Um auszuschließen, dass zeitlich bedingte Unterschiede im Tagesgang der PM10-Emissionsfaktoren das Ergebnis beeinflussen, mussten die ermittelten PM10-Emissionsfaktoren vor den Auswertungen normiert werden. Dabei wurden die stündlichen Werte des ermittelten durchschnittlichen Tagesganges der PM10-Emissionsfaktoren als Normierungsgrundlage für die jeweilige Stunde benutzt. Die jeweiligen Emissionsfaktoren wurden durch den mittleren Emissionsfaktor für die jeweilige Stunde dividiert. In die Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren flossen sowohl Stunden mit als auch ohne Niederschlag ein. Die weiteren Auswertungen erfolgen nun auf Grundlage dieser normierten Emissionsfaktoren und demnach immer in Bezug zum Mittelwert aller Emissionsfaktoren. Der Mittelwert (einschließlich von Regenereignissen) ist demnach 1.

7.4.2 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER PM10-EMISSIONSFAKTOREN VOR UND NACH EINEM NIEDERSCHLAGSEREIGNIS

Vor einer differenzierteren Betrachtung der Niederschlagsereignisse soll zuerst nur die Tatsache interessieren, ob Niederschlag im Untersuchungszeitraum auftrat oder nicht, und dessen Wirkung auf die normierten PM10-Emissionsfaktoren ermittelt werden. So wurden alle Niederschlagsereignisse zusammengefasst und die zugehörigen normierten PM10-Emissionsfaktoren vor, nach und während des Regens bestimmt und entsprechend gemittelt. In die Analysen der PM10-Emissionsfaktoren vor und nach dem Niederschlagsereignis flossen dabei nur jene Stunden ein, an denen kein erneuter Niederschlag auftrat, die also trocken waren. Die Lücken in den Diagrammen bzw. Tabellen (Vermerk: k. A. = keine Angabe möglich) weisen auf den Einbruch eines neuen Niederschlagsereignisses hin bzw. ebenfalls auf nicht zu bestimmende Emissionsfaktoren für diesen Zeitraum.

Das durchschnittliche Verhalten der normierten Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlag kann **Abbildung 7-3** entnommen werden. Die Emissionsfaktoren der Stunden mit Niederschlag wurden auf einen Wert gemittelt. Die Werte der normierten Emissionsfaktoren bis fünf Stunden nach dem Niederschlagsereignis sind in **Tabelle 7-4** vermerkt.

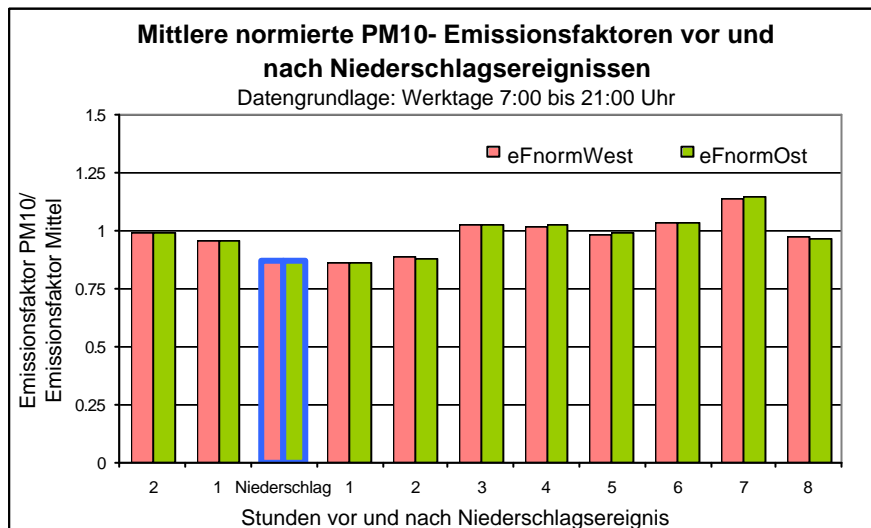


Abbildung 7-3: Entwicklung der Emissionsfaktoren bei Niederschlagsereignissen

Tabelle 7-4: Normierte PM10-Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlag

Stunde	-2	-1	N	1	2	3	4	5
Emissionsfaktor PM10/ mittlerer Emissionsfaktor, Ri. West	0,993	0,961	0,877	0,864	0,886	1,029	1,023	0,986
Emissionsfaktor PM10/ mittlerer Emissionsfaktor, Ri. Ost	0,993	0,958	0,874	0,861	0,884	1,029	1,023	0,991

Da aufgrund der Normierung der Mittelwert aller Emissionsfaktoren ‚eins‘ ist, kann auch das prozentuale Verhalten der normierten PM10-Emissionsfaktoren bezüglich zum Mittelwert ebenfalls direkt aus den Werten abgeleitet werden.

Der mittlere normierte Emissionsfaktor während Niederschlagsereignissen liegt für die Westrichtung bei ca. 0,826 und für die Ostrichtung leicht darunter bei ca. 0,824¹⁰. Schon aus den unterschiedlichen Mittelwerten der Emissionsfaktoren aller Tage und solcher mit Niederschlag lässt sich also ein Niederschlagseinfluss auf die PM10-Emission feststellen. Genauere Analysen folgen nun in den nächsten Abschnitten.

Aus der Abbildung und der Tabelle wird sichtbar, dass während Niederschlag die Höhe des normierten Emissionsfaktors im Vergleich zu den Werten, die vor dem Niederschlagsereignis auftraten, um bis zu ca. 14 % zurückgeht. Im Durchschnitt zeigt sich in der ersten Stunde nach dem Niederschlag ebenfalls noch einmal eine geringe Abnahme des PM10-Emissionsfaktors. In der zweiten Stunde nach dem Niederschlagsereignis liegt der Faktor dann wieder etwa auf dem selben Niveau wie während des Regenereignisses. Schon in der dritten Stunde nach dem Niederschlag liegen die Emissionsfaktoren wieder ähnlich hoch zu Beginn. Das heißt unter Zugrundelegung aller Niederschlagsereignisse zeigt sich, dass die Wirkung des Niederschlages auf die PM10-Emission bis etwa zwei Stunden nach dem Niederschlagsereignis anhält. Ab der dritten Stunde nach dem Niederschlag schwanken die Werte dann mehr oder weniger um den Mittelwert.

Die Wirkung des Niederschlages ist für die vorliegenden Daten demnach nur von kurzer Dauer.

7.4.3 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER PM10-EMISSIONSFAKTOREN NACH EINEM NIEDERSCHLAGSEREIGNIS UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER NIEDERSCHLAGSHÖHE

In den folgenden Auswertungen soll der Einfluss des Niederschlages nach Niederschlagsklassen untersucht werden. Es wird dabei also die Niederschlagshöhe betrachtet, die während eines Niederschlagsereignisses erreicht wurde. Die Dauer wird dabei außer Acht gelassen. Dabei wurde anhand der Datengrundlage folgende Klasseneinteilung vorgenommen: 0,1 mm, >0,1 - 0,5 mm, >0,5 - 1,0 mm, >1,0 - 5,0 mm und mehr als 5,0 mm Niederschlag.

¹⁰ Beschreibung der Normierung siehe 7.4.1

In **Abbildung 7-4** ist die Verteilung der Niederschlagsanzahl nach Niederschlagsklassen dargestellt. Es muss beachtet werden, dass die zugrundeliegenden Daten sehr gering sind. Trotzdem soll aber der Versuch unternommen werden, einen Ausblick zu verschaffen.

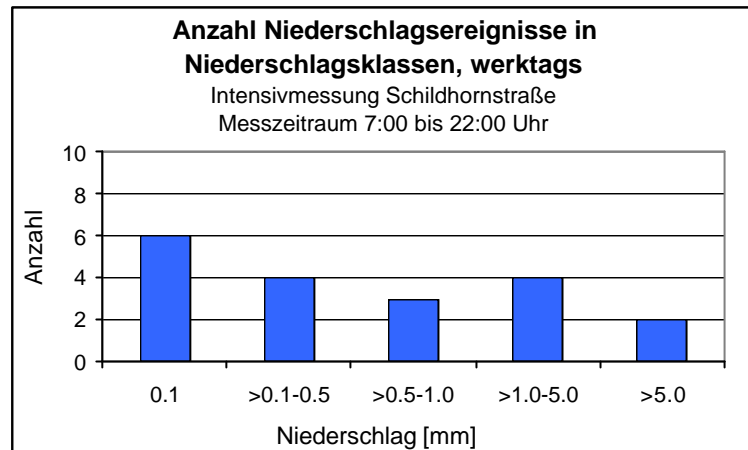


Abbildung 7-4: Niederschlagsereignisse nach Niederschlagshöhe

Die normierten Emissionsfaktoren in Niederschlagsklassen verhalten sich je nach angenommener Niederschlagshöhe nicht immer in einheitlicher Weise. In jedem Fall liegen sie während des Niederschlagsereignisses mehr oder weniger unter dem Mittelwert. Da, wie angesprochen, zwischen den gewählten Klassen keine einheitliche Tendenz wie beispielsweise „hohe Niederschlagsklasse - hoher Rückgang“ oder umgekehrt zu beobachten ist, soll die Diskussion der Ergebnisse für die einzelnen Klassen getrennt erfolgen:

Tabelle 7-5 zeigt das Verhalten der Emissionsfaktoren in Westrichtung in den entsprechenden Klassen auf. Das Verhalten der Emissionsfaktoren in Ostrichtung ist dem Anhang zu entnehmen. Es stimmt im Grunde mit der Westrichtung überein. Diagrammdarstellungen zur Tabelle befinden sich im Anhang A9, Tabelle A-10.

Für ein Niederschlagsereignis von nur $0,1$ mm Niederschlagshöhe stellt sich ein recht klarer Verlauf ein. In der Stunde vor dem Niederschlag sind die normierten Emissionsfaktoren gegenüber dem Mittel leicht erhöht. Die Straße ist trocken. In der Stunde des Niederschlages sinken die Emissionsfaktoren um ca. 14 bis 20 % im Vergleich zu den Werten vor dem Regen ab (siehe auch Anhang A9, Abb. A9-12). Noch bis zur vierten Stunde nach dem Niederschlagsereignis ist eine Wirkung auf die normierten Emissionsfaktoren feststellbar. Danach steigen die Emissionsfaktoren wieder an und pegeln sich um den Mittelwert ein.

Tabelle 7-5: Entwicklung der Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen in Niederschlagsklassen, Richtung West

Grundlage: Stunden mit Niederschlag, Angaben für Richtung West [Emissionsfaktor PM10/ mittlerer Emissionsfaktor]								
Stunden vor und nach dem Niederschlagsereignis	2	1	N	1	2	3	4	5
Niederschlagsklasse								
0,1 mm Niederschlag	0,973	1,068	0,865	0,864	0,933	0,904	0,922	1,151
>0,1 bis 0,5 mm Niederschlag	0,805	0,872	0,645	0,730	0,772	0,904	1,213	1,259
>0,5 bis 1,0 mm Niederschlag	k. A.	0,785	0,764	0,964	0,842	1,224	0,958	0,840
>1,0 bis 5,0 mm Niederschlag	0,955	0,973	0,938	0,968	1,011	1,074	1,227	0,588
>5,0 mm Niederschlag	1,392	1,118	0,984	0,825	0,704	1,300	0,909	0,618

Ein prinzipiell ähnlicher Trend zeigt sich auch in der Klasse zwischen $>0,1$ und $0,5$ mm Niederschlag (Abb. A9-13 im Anhang). Jedoch liegen dabei die normierten Emissionsfaktoren schon vor dem Niederschlagsereignis um ca. 21 % deutlich unter ‚eins‘. Die Reduktion bei Niederschlag ist mit 26 % bezogen auf die Stunde vor dem Niederschlag auch deutlich höher als in der vorangegangenen Klasse. Nach dem Niederschlag steigen die normierten Emissionsfaktoren kontinuierlich an. In der vierten und fünften Stunde nach dem Niederschlagsereignis liegen die Emissionsfaktoren schon über dem Mittelwert und pegeln sich danach wieder ein.

Diese niedrigeren Emissionsfaktoren vor Eintreten des Niederschlages sind darauf zurückzuführen, dass die Abstände zu den vorangehenden Niederschlagsereignissen relativ gering sind und aufgrund der geringen statistischen Grundlage besonders ins Gewicht fallen. So ist es möglich, dass noch die Auswirkungen von vorangegangenen Niederschlagsereignissen in die Ergebnisse einfließen und deshalb die niedrigeren Werte verursachen.

Das gleiche gilt für die nächste Klasse zwischen $>0,5$ und $1,0$ mm Niederschlag (Anhang A9, Abb. A9-14). Die vorangegangenen Niederschlagsereignisse liegen sehr dicht mit nur einer Stunde Abstand zu den nun betrachteten. Der Emissionsfaktor vor Niederschlag liegt deshalb schon deutlich unter dem Mittelwert. Die Reduktion des Emissionsfaktors während des Niederschlagsereignisses im Vergleich zur Stunde davor fällt nur sehr schwach aus (ca. 3 %). Im Anschluss an das Niederschlagsereignis ist das Verhalten der Emissionsfaktoren allerdings recht unregelmäßig und kann schlecht interpretiert werden. Dazu kann vorerst nur auf das geringe Datenkollektiv verwiesen werden.

Auch in der nächsthöheren Niederschlagsklasse von $>1,0$ bis $5,0$ mm Niederschlag (Anhang A8, Abb. A9-15) ist im Vergleich zum Wert der Stunde vor dem Regen ein leichtes

Absinken der Emissionsfaktoren um ca. 4 % während Niederschlag erkennbar. Die Schwankungen der Emissionsfaktoren vor und nach dem Niederschlagsereignis sind jedoch nur äußerst gering. In der dritten Stunde erfolgt ein Anstieg auf Werte über dem Mittelwert, der in der fünften Stunde durch einen abrupten Abfall unterbrochen wird. Die Datenunsicherheit ist auch hier hoch. Weiterführende Aussagen sind nicht möglich, da für die betrachteten Fälle spätestens nach der fünften Stunde erneut Niederschlag auftritt.

In der letzten Niederschlagsklasse $>5,0 \text{ mm}$ Niederschlag sinken die Emissionsfaktoren während Niederschlag um ca. 12 bis 30 % verglichen mit den beiden Stunden vor dem Niederschlag. Nach dem Niederschlagsereignis nehmen sie recht rasch weitere 30 % ab. Der anschließende Verlauf ist relativ unregelmäßig (Anhang A9, Abb. A9-16).

Da die Datengrundlage, wie schon erwähnt, nur sehr gering ist, ist ein weiteres Splitting dieser Analyse nach der Niederschlagsintensität nicht möglich. So wurden v. a. in den letzten beiden Niederschlagsklassen sowohl kurzzeitige Schauer als auch längere Niederschläge geringerer Intensität gemeinsam betrachtet. Die Niederschlagsart, in diesem Sinne, ob Sprühregen oder Schauerniederschläge fallen, kann aber durchaus unterschiedlichen Einfluss auf das Verhalten der PM10-Konzentration in der Luft ausüben.

Es wird deutlich, dass in jedem Falle die Emissionsfaktoren während des Niederschlagsereignisses unter dem Mittelwert liegen. Die Höhe schwankt allerdings zwischen ca. 2 und 35 %. Im Vergleich zu den Stunden vor dem Niederschlagsereignis werden Reduktionen bis zu 30 % beobachtet. Nach dem Niederschlagsereignis wird in drei Fällen (Klassen 0,2 bis 5,0 mm) ein erneuter Anstieg schon in der ersten Stunde nach dem Niederschlag beobachtet. Bei 0,1 mm liegt der Faktor auch noch in der dem Niederschlag folgenden Stunde unter dem Wert, der vor dem Niederschlagsereignis auftrat. Im Falle von mehr als 5 mm Niederschlag steigt der Faktor erst ab der dritten Stunde nach dem Niederschlag wieder kurzzeitig an.

7.4.4 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER PM10-EMISSIONSFAKTOREN NACH EINEM NIEDERSCHLAGSEREIGNIS UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER NIEDERSCHLAGSDAUER

Es traten Niederschlagsereignisse zwischen einer und elf Stunden Dauer auf. Auch wenn die zugrundeliegende Anzahl von Niederschlagsereignissen natürlich die gleiche ist wie in der Betrachtung nach Niederschlagsklassen, ist die Verteilung nach ihrer Dauer wesentlich

weniger ausgeglichen. Am häufigsten treten Niederschläge mit einer Länge von einer Stunde auf (siehe **Abbildung 7-5**).

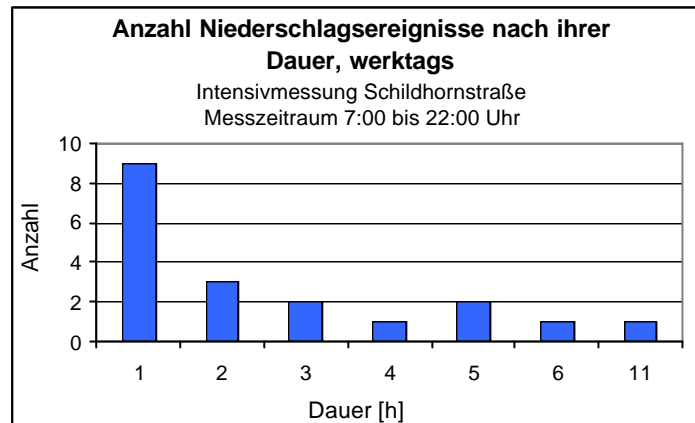


Abbildung 7-5: Niederschlagsereignisse nach Dauer

Es kann in keinem Fall von einer ausreichenden Repräsentativität ausgegangen werden! Niederschlagsereignisse von vier-, sechs- und elfstündiger Dauer bleiben aus der Betrachtung ausgeklammert. Für zwei-, drei- und fünfstündige Ereignisse soll nur ein Ausblick geschaffen werden. Weiterhin ist zu beachten, dass sich die angegebene Dauer auf den stündlichen Messzeitraum bezieht. Es wird also die Niederschlagshöhe zugrunde gelegt, die innerhalb einer Stunde gemessen wurde. Wenn beispielsweise innerhalb einer Stunde nur fünf Minuten Niederschlag auftraten, wurde dieses Ereignis trotzdem als Stunde betrachtet, da die genaue Dauer des Niederschlages aus den Daten nicht ablesbar ist. Analog dazu gilt für mehrstündige Ereignisse, dass es nicht z. B. drei Stunden ununterbrochen geregnet haben muss. Eventuell auftretende Pausen sind, wie schon erwähnt, aus den Daten nicht erschließbar. Die Stundenangabe ist also eine Höchstgrenze der Dauer.

Ebenfalls in dieser Analyse unbeachtet blieben die in den Stunden erreichten Niederschlagshöhen bzw. die Niederschlagsintensität. Dafür ist die Datengrundlage, wie schon im vorangegangenen Abschnitt angesprochen, nicht umfangreich genug.

Bei mehrstündigen Niederschlagsereignissen wurden in den Auswertungen die Emissionsfaktoren gemittelt, so dass für jedes mehrstündige Niederschlagsereignis jeweils nur ein mittlerer Emissionsfaktor zur Verfügung steht.

In **Tabelle 7-6** sind die Höhen der normierten Emissionsfaktoren dargestellt. Da sich die Emissionsfaktoren in West- und in Ostrichtung annähernd gleich verhalten, wird wiederum nur die Westrichtung in die Tabelle aufgenommen. Die Werte für die Ostrichtung befinden sich im Anhang A9, Tabelle A11 und die Diagramme zu den einzelnen Betrachtungen im Anhang A9, Abb. A9-17 bis A9-20.

Im Falle eines *einstündigen Niederschlagsereignisses*, dessen Datengrundlage auch relativ gesichert ist, bestätigt sich der Trend, der schon für die Niederschlagsklassen von 0,1 mm bzw. 0,2 bis 0,5 mm beobachtet werden konnte: In der Stunde des Niederschlagsereignisses sinken die normierten Emissionsfaktoren im Vergleich zu den erreichten Werten vor dem Niederschlag und zum Mittelwert deutlich um etwa 12 % ab. Auch in der ersten Stunde nach dem Niederschlag ist ein weiteres Absinken um weitere 9 % zu beobachten. Danach steigen die normierten Emissionsfaktoren erneut kontinuierlich an. Ab der vierten Stunde nach Ende des Regens werden Werte über dem Mittelwert erreicht. Nach der fünften Stunde ist ein neuerliches Absinken erkennbar. Die Werte schwanken nur noch leicht um den Mittelwert.

Auch im Falle eines *zweistündigen Niederschlagsereignisses* liegen die Emissionsfaktoren während des Niederschlages deutlich unter dem Mittelwert. Allerdings liegt das Niederschlagsereignis hier in einem allgemeinen Aufwärtstrend der Emissionsfaktoren, bedingt durch die Wirkung vorangehender Niederschlagsereignisse. Nach dem Niederschlagsereignis ist kein erneutes Absinken der normierten Emissionsfaktoren erkennbar. Sie steigen sogar um 37 % an. Allerdings liegen die Emissionsfaktoren mindestens bis zur sechsten Stunde nach Niederschlagsende unter dem Mittelwert und pegeln sich erst dann wieder um den Mittelwert ein. Die Wirkung des Niederschlages hält deshalb vergleichsweise länger an.

Bei den zugrundeliegenden *drei- und fünfstündigen Niederschlagsereignissen* ist ein Absinken der Emissionsfaktoren bei Niederschlag zwischen ca. 10 % und 30 % zu den Vorwerten zu beobachten, wobei die Emissionsfaktoren bei einem dreistündigen Niederschlagsereignis in der dem Niederschlag folgenden Stunde weiter sinken und erst in der zweiten Stunde wieder ansteigen. Im Falle eines fünfstündigen Niederschlagsereignisses steigen die Emissionsfaktoren sofort nach dem Niederschlag wieder an. Hier ist die Repräsentativität aber nicht gegeben.

Tabelle 7-6: Entwicklung der Emissionsfaktoren vor und nach Niederschlagsereignissen nach Niederschlagsdauer

Grundlage: Stunden mit Niederschlag, Angaben für Richtung West [Emissionsfaktor PM10/ mittlerer Emissionsfaktor]								
Stunden vor und nach dem Niederschlagsereignis	2	1	N	1	2	3	4	5
einstündiges Ereignis <i>Ri. West</i>	0,917	0,984	0,886	0,807	0,877	0,932	1,099	1,205
zweistündiges Ereignis <i>Ri. West</i>	k. A.	0,290	0,398	0,817	0,677	0,873	0,788	0,840
dreistündiges Ereignis <i>Ri. West</i>	k. A.	1,280	0,905	0,877	1,070	1,271	1,227	1,023
fünfstündiges Ereignis <i>Ri. West</i>	1,019	0,974	0,889	0,947	1,042	1,072	k. A.	0,154

7.4.5 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION SCHILDHORNSTRASSE BEZÜGLICH REGEN

Die vorangegangenen Ausführungen beziehen sich auf den Mittelwert (=1) der normierten PM10-Emissionsfaktoren. Somit sind die Relationen sehr leicht abschätzbar. Die Unterschiede der Reduktion der Emissionsfaktoren in Bezug auf den Mittelwert und zum anderen in Bezug auf die mittleren normierten Emissionsfaktoren niederschlagsfreier Stunden vor dem Regen sind bei dieser Darstellung ablesbar.

Für die Mehrheit der beobachteten Fälle konnte ein Absinken der PM10-Emissionsfaktoren während und auch in der ersten Stunde nach dem Niederschlagsereignis zwischen etwa 2 und 30 % beobachtet werden. Diese Reduktion der Emissionsfaktoren während Niederschlag lässt sich mit der partikelbindenden Wirkung von Feuchtigkeit erklären. Danach ist jeweils ein Anstieg der normierten Emissionsfaktoren feststellbar, der möglicherweise durch das Abtrocknen der Straße bewirkt wird, das die feuchtigkeitsbindende Wirkung verringert. Durchschnittlich treten bis zur dritten Stunde nach Beendigung des Niederschlages PM10-Faktoren auf, die unter dem Mittelwert liegen. Nach einem kurzzeitigen Anstieg auf höhere Werte pegeln sich die Werte dann erneut um den Mittelwert ein. Da bei Niederschlag z. B. mehr Abriebsmaterial auf die Straße aufgebracht werden kann, das danach potenziell zur Aufwirbelung bereitsteht, könnte dies den Anstieg der Emissionsfaktoren erklären, der bis auf Werte über den Mittelwert nach der vierten Stunde hinausläuft.

Es ist ablesbar, dass Niederschlag mindestens etwa zwei bis drei Stunden eine Auswirkung auf die PM10-Emission ausübt. In die Analyse flossen alle Stunden mit Niederschlag für den gewählten Untersuchungszeitraum ein. Dabei wurden die Abstände zwischen zwei Niederschlagsereignissen aufgrund der Datenlage nicht beachtet. Das heißt, es ist möglich, wie dies auch in der Beschreibung der Ergebnisse bereits angesprochen wurde, dass die Wirkung vorangegangener Niederschlagsereignisse noch anhält, währenddessen bereits erneut Niederschlag einsetzt und sich die Auswirkungen beider Niederschlagsereignisse überlagern oder verstärken.

Eine Analyse mit höherem Datenumfang und evtl. auch aus einem anderen Jahreszeitraum müsste allerdings vorgenommen werden, um die erzielten Ergebnisse zu prüfen und auch nach den genannten Gesichtspunkten (Beachtung der Intensität und der Abstände zu vorangegangenen und folgenden Niederschlagsereignissen) zu betrachten. Beispielsweise spiegeln die Messergebnisse und die daraus abgeleiteten Auswertungen eine Situation im Spätherbst wieder. Die Ergebnisse sind also nicht unbedingt auf jede Jahreszeit mit ihren jeweiligen typischen klimatischen Bedingungen übertragbar.

Weiterhin soll noch einmal auf die Unsicherheit der Datengrundlage verwiesen werden. So spiegeln die Ergebnisse nur einen Trend wider und beruhen auf keiner ausreichend gesicherten statistischen Grundlage. So sollen die Ergebnisse deshalb auch verstanden werden! Dazu wurden die PM10-Emissionsfaktoren ebenfalls nur näherungsweise über das Verhältnis der NO_x-Emissionsfaktoren und den Zusatzbelastungen bestimmt. Die NO_x-Emissionsfaktoren wurden wiederum nur aufgrund einer Abschätzung der Verkehrssituation nach Vorlagen des *Handbuches Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs* (INFRAS 1999) bestimmt. Das heißt, in den ermittelten PM10-Emissionsfaktoren selbst stecken bereits Fehlerquellen.

Es soll deshalb noch einmal deutlich gemacht werden, dass die gewonnenen Ergebnisse lediglich als erste Abschätzung betrachtet werden können.

7.4.6 STÜNDLICHE EMISSIONSFAKTOREN UND RELATIVE LUFTFEUCHTE

Es konnte auch für die stündlichen Emissionsfaktoren an der Schildhornstraße kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den ermittelten und normierten Emissionsfaktoren und der relativen Luftfeuchte festgestellt werden. Die Emissionsfaktoren steigen bei sehr hoher relativer Luftfeuchte zwar leicht an, allerdings ist diese Tendenz nur äußerst schwach ausgeprägt. Somit bestätigt sich der Trend, der schon im Abschnitt 6.3 festgestellt worden ist. Ähnliches wurde auch im Rahmen der *BRISKA-Studie* festgestellt. Dort wurden z. T. besonders hohe PM10-Konzentrationen ab 90 % relativer Luftfeuchte festgestellt. (*LUFTHYGIENEAMT BEIDER BASEL 1999*). Dies entspricht nicht den Erfahrungen, dass hohe Luftfeuchtigkeiten reduzierend auf die PM10-Konzentration wirken, wie es beispielsweise *KANTAMANENI ET AL. 1996* feststellten (*KANTAMANENI ET AL. in LOHMEYER 2001*)

7.5 Plausibilitätsanalyse der ermittelten Emissionsfaktoren

Die ermittelten stündlichen Emissionsfaktoren wurden mit errechneten Emissionsfaktoren aus der Intensivmesskampagne (*LOHMEYER 2001*) verglichen. Diese lagen als Tagesmittelwerte vor und wurden im gleichen Messzeitraum einerseits aus gravimetrischen andererseits aus kontinuierlichen Messungen bestimmt. Das kontinuierliche Messverfahren wurde im Abschnitt 5.1 bereits umrissen.

Bei den gravimetrischen Messungen erfolgte die PM10-Immissionsmessung mit *Leckel-LVS3D-Sammelgeräten*. Dabei gelangt die Luft über entsprechende Probenahmeköpfe auf geglähte Quarzfaserfilter und wird anschließend gravimetrisch auf ihre PM10-Staubmassekonzentration hin untersucht (*LOHMEYER 2001*).

Da die Werte aus den früheren Berechnungen als Tagesmittelwerte vorlagen, wurde, um einen Vergleich zu gewährleisten, aus den ermittelten stündlichen Emissionsfaktoren die Tagesmittelwerte jeweils für die Ost- und die Westrichtung der Straße bestimmt. Anschließend wurde aus beiden Richtungen der Mittelwert für die gesamte Straße abgeleitet.

Tabelle 7-7: Vergleich Emissionsfaktoren aus gravimetrischen und kontinuierlichen Messungen

	Diplomarbeit Grundlage: Kontinuierliche Messungen	Lohmeyer 2001 Grundlage: kontinuierliche Messung	Lohmeyer 2000 Grundlage: gravimetrische Messung
Mittlerer Emissionsfaktor [mg/(km Fzg)] (Grundlage: Tagesmittelwerte)	90.253	93.753	99.929
Unterschied		+3.9%	+10.7
Standardabweichung ?	28.4	19.9	52.4

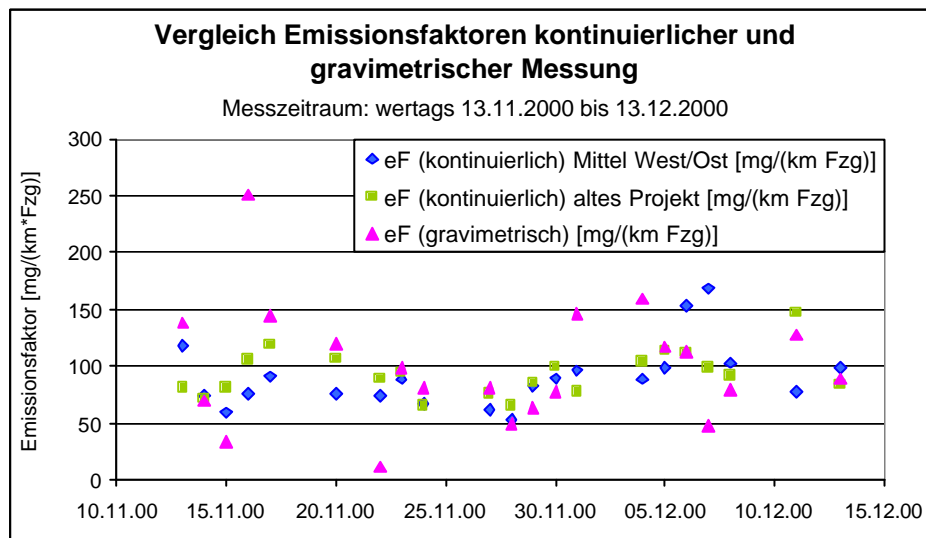


Abbildung 7-6: Vergleich von Emissionsfaktoren nach unterschiedlichen Messverfahren

Es zeigt sich, dass die im Rahmen dieser Diplomarbeit bestimmten Emissionsfaktoren im Durchschnitt unter denen in der früheren Messkampagne bestimmten Emissionsfaktoren liegen. Die Tendenz ist aber gleich. Auf Basis der gravimetrischen Messungen werden die höchsten Emissionsfaktoren beobachtet. Die Ergebnisse auf Grundlage kontinuierlicher Messverfahren sind sich erwartungsgemäß sehr ähnlich, da sie auf dem selben Messverfahren beruhen und dem gleichen Messzeitraum entstammen. Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Ansätze in der Bestimmung der Emissionsfaktoren für die jeweilige Straßenrichtung zurückzuführen. Aus der **Tabelle 7-7** können die durchschnittlichen

Emissionsfaktoren aller Tage entnommen werden. In **Diagramm 76** sind die jeweiligen Tagesmittelwerte der Emissionsfaktoren aufgeführt. Die Streuungen um den Mittelwert sind für die auf kontinuierlicher Messung beruhenden Emissionsfaktoren annähernd gleich und geringer als für die auf gravimetrischen Messungen beruhenden Emissionsfaktoren.

8 Auswertungen von Intensivmessungen an der Frankfurter Allee

8.1 Datengrundlage und Vorgehen

Analog zu den Analysen der Intensivmessungen der Schildhornstraße von Kapitel 7 wurden Daten von der Frankfurter Allee im Zeitraum vom 26.07.1999 bis 19.10.1999 (2044 Stunden) ausgewertet, um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Daten zum Verkehrsaufkommen wurden von Frau *RAUTERBERG-WULFF* aus ihrem Projekt zur Verfügung gestellt (*RAUTERBERG-WULFF, 2000*). Die restlichen benötigten Daten zur Meteorologie stammen aus dem BLUME-Messnetz und dem meteorologischen Institut der FU-Berlin, Station Berlin Dahlem.

Die Auswertungsgrundlage bilden wiederum stündliche PM10-Emissionsfaktoren, die über PM10- und NO_x-Zusatzbelastung, NO_x-Emissionsfaktoren anhand gewählter Verkehrsmuster und das Verkehrsaufkommen (DTV, PKW- und LKW-Anteil) ermittelt wurden. Die Nansenstraße diente hier als Hintergrundstation zur Bestimmung der Zusatzbelastung. Das genaue Vorgehen der Bestimmung der Emissionsfaktoren ist dem Kapitel 7 anhand des Beispiels der Schildhornstraße zu entnehmen. Lediglich die für die Frankfurter Allee spezifischen Unterschiede sollen kurz umrissen werden:

Die Frankfurter Allee ist eine sechsspurige Straße. In der Mitte befindet sich ein Grünstreifen (siehe **Abbildung 8-1**). Die Analysen erfolgten für jede Fahrspur (FS) getrennt, da die jeweilige Höhe des Verkehrsaufkommens sowie dessen Tagesgang auf jeder Spur unterschiedlich sind. Die Fahrspuren 1 bis 3 führen in stadteinwärtige Richtung und die Fahrspuren 4 bis 6 aus der Stadt hinaus. Die beiden äußeren Fahrspuren werden zwischen 19:00 und 6:00 Uhr oft zum Parken benutzt, so dass zu diesen Zeiten das Verkehrsaufkommen nur gering ist.

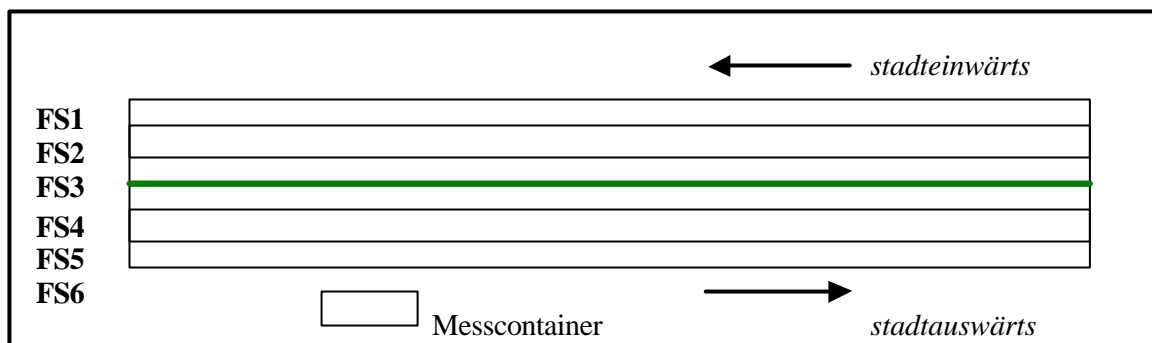


Abbildung 8-1: Skizze Messstation Frankfurter Allee
(geändert nach *RAUTERBERG-WULFF 2000*)

Die Fahrzeuge wurden anhand ihrer Längen als PKW oder LKW klassifiziert. Fahrzeuge mit einer Länge von mindestens 5,80 m flossen als LKW in die Berechnung ein. Bei der Bestimmung des Verkehrsaufkommens wurden nicht zuzuordnende Fahrzeuge (ohne Längenangabe) den PKW's zugeordnet. Fehlende Werte im Verkehrsaufkommen wurden durch Mittelwerte ersetzt, die anhand der vorhandenen Daten bestimmt wurden. Dabei wurde zwischen Werktagen und Wochenenden unterschieden.

Auf Grundlage der mittleren Geschwindigkeiten für jede Fahrspur wurden die Emissionsfaktoren für NO_x bestimmt. Dabei wurde für Werktage folgende Einteilung vorgenommen:

FS 1:	0:00 bis 0:00 Uhr	HVS2	FS4:	0:00 bis 5:00 Uhr	HVS1
FS2:	0:00 bis 5:00 Uhr	HVS2		6:00 bis 14:00 Uhr	HVS2
	6:00 bis 19:00 Uhr	HVS3		15:00 bis 16:00 Uhr	HVS3
	20:00 bis 0:00 Uhr	HVS2		17:00 bis 0:00 Uhr	HVS2
FS3:	0:00 bis 5:00 Uhr	HVS1	FS5:	0:00 bis 8:00 Uhr	HVS2
	6:00 bis 19:00 Uhr	HVS3		9:00 bis 0:00 Uhr	HVS3
	20:00 bis 22:00 Uhr	HVS2	FS6:	0:00 bis 3:00 Uhr	HVS3
	23.00 bis 0:00 Uhr	HVS1		4:00 bis 8:00 Uhr	HVS2
				9:00 bis 0:00 Uhr	HVS3

Die den Fahrmustern entsprechenden Emissionsfaktoren sind **Tabelle 8-1** zu entnehmen. Die Verkehrsmuster, die schon für die Analyse der Schildhornstraße verwendet wurden, werden nicht noch einmal aufgeführt.

Tabelle 8-1: Verkehrsmuster und Emissionsfaktoren

Fahrmuster	Mittlere Fahr- geschwindigkeit der PKW [km/h]	Emissionsfaktor NO_x für PKW [g/(km · Fzg)]	Emissionsfaktor NO_x für LKW [g/(km · Fzg)]
HVS 1: Ortsdurchfahrt, vorfahrts- berechtigt, ohne Störungen	58	0,414	5,66
HVS 2: vorfahrtsberechtigte Haupt- verkehrsstraße mit geringen Störungen	46	0,445	6,91

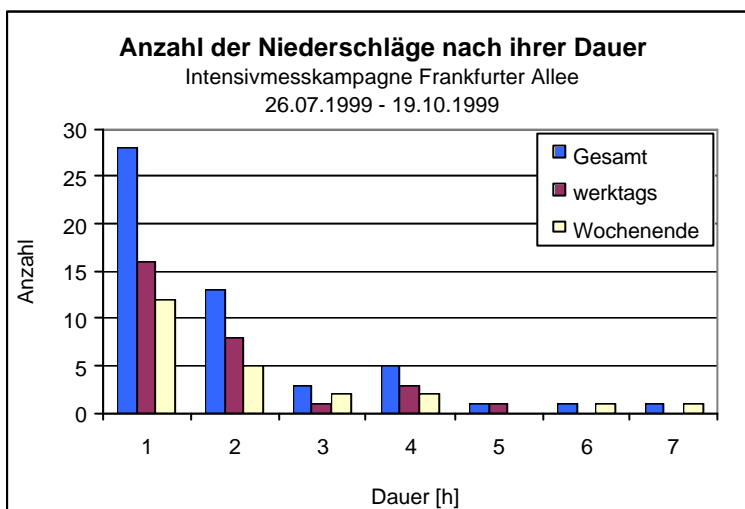
Die ermittelten Emissionsfaktoren wurden wieder auf den Mittelwert der jeweiligen Stunde normiert. Das heißt, die zu ermittelnden Abweichungen der PM_{10} -Emissionsfaktoren beziehen sich auf den Mittelwert aller Emissionsfaktoren sowohl trockener als auch feuchter Tage.

Als Ansatzpunkt der Analyse wurden die Niederschlagsdauer und die während des Niederschlagsereignisses erreichte Niederschlagshöhe zugrunde gelegt.

Anzumerken ist, dass Frau *RAUTERBERG-WULFF* in ihrem Projekt eine zusätzliche Messeinrichtung auf der anderen Straßenseite des Messcontainers benutzt hatte, um bei wechselnder Windrichtung die verkehrsbedingte Zusatzbelastung besser erfassen zu können (vgl. *RAUTERBERG-WULFF* 2000). Diese Unterscheidung wurde in den folgenden Auswertungen nicht getroffen.

8.2 Niederschlagsituation im Untersuchungszeitraum

Insgesamt traten im Messzeitraum 52 Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Dauer und Höhe auf, immer in Form von Regen. Als ein Niederschlagsereignis wurden jene Stunden



betrachtet, die mindestens eine Stunde Abstand zum vorigen und nächsten Ereignis aufweisen. In **Abbildung 8-2** ist die Anzahl der Niederschlagsereignisse nach ihrer Höhe dargestellt. Es wird deutlich, dass einstündige Ereignisse überwiegen und längere Niederschlagsperioden seltener vertreten sind.

Abbildung 8-2: Anzahl der Niederschlagsereignisse nach ihrer Dauer, Frankfurter Allee

Es soll noch einmal deutlich gemacht werden, dass die Stundenangaben die maximale Dauer des Niederschlagsereignisses angeben, sozusagen eine Klassenobergrenze darstellen. Weiterhin soll darauf hingewiesen werden, dass die zugrunde gelegte Klimastation Berlin-Dahlem nicht 100 %ig die meteorologische Situation der Frankfurter Allee widerspiegelt. Auf diese Diskrepanz wurde in vorangegangenen Kapiteln bereits hingewiesen.

Die Häufigkeit von Niederschlagsereignissen in verschiedenen Niederschlagshöhen ist **Abbildung 8-3** zu entnehmen. Die Klasseneinteilung in der Abbildung entspricht jener, die der anschließenden Analyse zugrunde gelegt wurde. Auch hier wird deutlich, dass Niederschlagsereignisse mit geringen Niederschlagshöhen überwiegen.

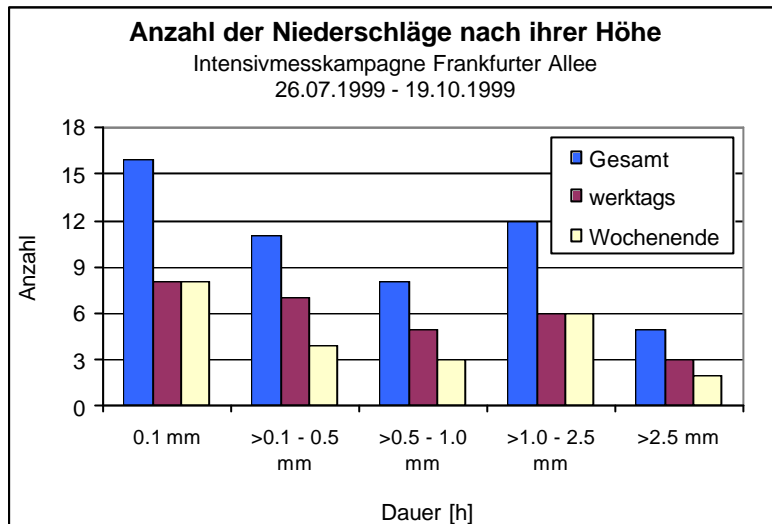


Abbildung 8-3: Anzahl der Niederschlagsereignisse nach ihrer Höhe, Frankfurter Allee

Leider ist, wie aus den Abbildungen ersichtlich wird, die Verteilung der Niederschläge über die Wochentage nicht einheitlich. Knapp die Hälfte des Regens

fällt an Wochenenden. Aufgrund des unterschiedlichen Verkehrsaufkommens und -verhaltens zwischen Werktagen und Wochenenden muss eine Analyse jedoch sinnvollerweise separat erfolgen. Dies hat zur Folge, dass die Datengrundlage (von Stunden mit Niederschlag) geschmälert wird und die Repräsentativität der gewonnenen Daten fraglich bleibt. Die Auswertungen erfolgen für Werktage.

8.3 Analyse der stündlichen PM₁₀-Emissionsfaktoren an der Frankfurter Allee

8.3.1 KORRELATION MIT DEM VERKEHRS-AUFKOMMEN UND DER FAHRZEUGGESCHWINDIGKEIT

Bevor die Abhängigkeiten der ermittelten Emissionsfaktoren von Niederschlagsereignissen diskutiert werden, sollen im Vorfeld einige Überlegungen zum Zusammenhang zwischen den Emissionsfaktoren und dem Fahrverhalten aufgestellt werden.

Schon an der Schildhornstraße wurden für die Nachtstunden äußerst hohe Emissionsfaktoren ermittelt, die anhand der vorliegenden Daten nicht erklärt werden konnten. Das gleiche Phänomen wurde auch an der Frankfurter Allee festgestellt (Abb. A10-1).

Zwischen 22:00 und 2:00 Uhr werden (über alle Spuren gemittelt) die höchsten Emissionsfaktoren mit bis $>0,2 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{Fzg})$ festgestellt. Die niedrigsten Emissionsfaktoren [ca. $0,05 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{Fzg})$] werden gegen 5:00 Uhr, kurz vor Einsetzen des Berufsverkehrs erreicht. Bis 9:00 Uhr steigen sie auf ein zweites kleineres Maximum von $0,016 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{Fzg})$ an. Ein zweites, aber weniger niedriges Minimum wird gegen 16 Uhr erreicht. Danach wird ein erneuter Anstieg ersichtlich.

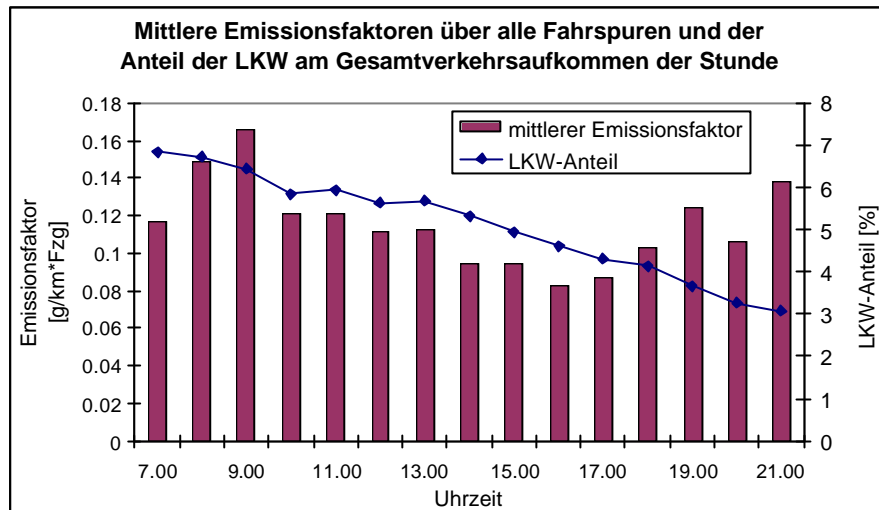


Abbildung 8-4: Mittlere PM10-Emissionsfaktoren und LKW-Anteile

Es zeigt sich, dass wie auch bei der Schildhornstraße ein hoher LKW-Anteil nur teilweise mit der Höhe der Emissionsfaktoren übereinstimmt.

Da die Emissionsfaktoren von meteorologischen Größen wie Windrichtung und -geschwindigkeit weitestgehend unabhängig sein sollten, stellt sich die Frage, ob die hohen nächtlichen Emissionsfaktoren von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig sein könnten, da diese in den Nachtstunden aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens erhöht ist. Höhere Geschwindigkeiten könnten eine höhere PM10-Emission bewirken, da die Aufwirbelung und eventuell auch der Abrieb verstärkt werden. Die Korrelationskoeffizienten der Emissionsfaktoren und der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie sind **Tabelle 8-2** zu entnehmen. Zur Veranschaulichung sind die zugehörigen Scatterplots dem Anhang A10 zu entnehmen. Zumindest in den mittleren Fahrspuren, die nicht zeitweilig zum Parken genutzt werden, zeigt sich eine positive Korrelation mit geringer Signifikanz. Das heißt also dass hohe Fahrgeschwindigkeiten mit hohen Emissionsfaktoren einhergehen.

Zum Vergleich wurden auch die Fahrgeschwindigkeiten von Wochenenden den Emissionsfaktoren gegenüber gestellt. Die Ergebnisse sind mit denen, die für Werktage ermittelt wurden, vergleichbar (Tabelle A12).

Interessant ist auch, dass sich auch zwischen den ermittelten PM10-Emissionsfaktoren und dem Verkehrsaufkommen negative Korrelationen mit deutlicher Signifikanz feststellen lassen (**Tabelle 8-2**). Bei hohem Verkehrsaufkommen werden also i. A. geringe Emissionsfaktoren und bei niedrigerem Verkehrsaufkommen i. A. hohe Emissionsfaktoren beobachtet

Da jedoch Ziel ist, Abhängigkeiten zwischen Niederschlägen und PM10-Emissionsfaktoren aufzudecken, sollen die Aspekte der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Verkehrsaufkommens nicht näher beleuchtet werden

Tabelle 8-2: Korrelation der mittleren stündlichen Emissionsfaktoren mit Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsaufkommen, werktags

	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5	FS6
Korrelationskoeffizienten der mittleren stündlichen Emissionsfaktoren und der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit [r ²]	-0.46 [0,21]	0.50 [0,25]	0.54 [0,29]	0.41 [0,17]	0.44 [0,19]	0.01 [0]
Korrelationskoeffizienten der mittleren stündlichen Emissionsfaktoren und des mittleren Fahrzeugaufkommens [r ²]	-0.35 [0,12]	-0.71 [0,50]	-0.71 [0,50]	-0.55 [0,30]	-0.49 [0,24]	-0.51 [0,26]

Die weiteren Auswertungen erfolgen, wie für die Schildhornstraße, wieder im Zeitraum zwischen 7:00 und 21:00 Uhr. In **Abbildung 8-4** werden die über alle Spuren gemittelten PM10-Emissionsfaktoren dem LKW-Aufkommen für den gewählten Tageszeitraum der Untersuchung gegenüber gestellt. Der Verlauf über den gesamten Tag kann Anhang A10, Abb. A10-1 entnommen werden.

8.3.2 STÜNDLICHE EMISSIONSFAKTOREN UND NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE

Vor einer detaillierteren Analyse soll zuerst wieder nur die Tatsache interessieren, ob Niederschlag auftrat und die zugehörigen normierten Emissionsfaktoren vor und nach dem Niederschlagsereignis verglichen werden. Die entsprechenden Wertetabellen und Abbildungen sind dem Anhang A10 zu entnehmen. In den Abbildungen wurden jeweils alle Spuren einer Fahrtrichtung zusammengefasst. Abbildungen im Text beziehen sich auf Mittelwerte über alle Fahrspuren und sollen einen Überblick verschaffen.

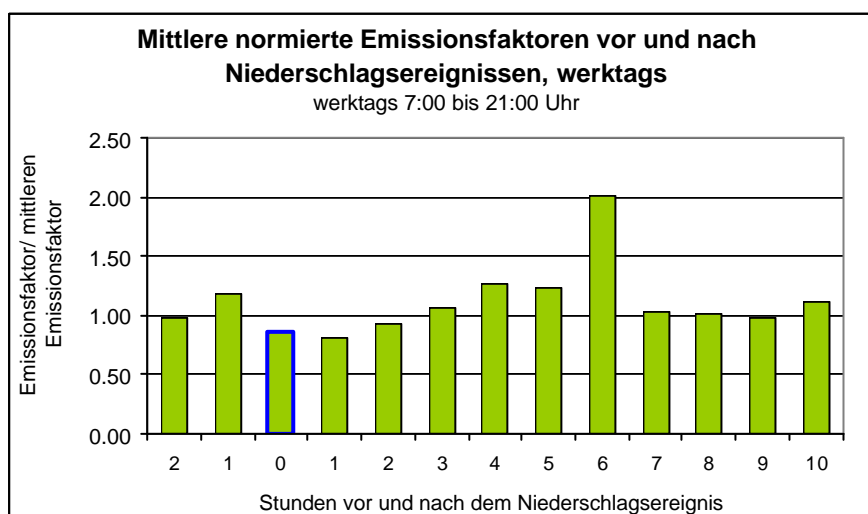


Abbildung 8-5: normierte Emissionsfaktoren bei Niederschlagsereignissen, Frankfurter Allee

Das Verhalten der Emissionsfaktoren ist sehr gut vergleichbar mit den an der Schildhornstraße erzielten Ergebnissen. Vor dem Niederschlagsereignis liegen die Emissionsfaktoren im Durchschnitt auf dem Niveau des Mittelwertes oder leicht darüber. Während des Niederschlages ist ein Absinken zwischen etwa 13 % und 30 % im Vergleich zu den Werten vor dem Regen erkennbar. In der ersten Stunde nach dem Niederschlagsereignis nehmen die normierten Emissionsfaktoren im Mittel noch einmal weitere 6 % ab. Noch bis etwa zwei Stunden nach dem Regenereignis liegen die normierten Emissionsfaktoren unter dem Mittelwert und steigen dann ziemlich deutlich auf Werte über dem Durchschnitt bzw. vor dem Regenereignis. Ab der siebenten Stunde etwa pegeln sich die Emissionsfaktoren wieder um den Mittelwert ein.

8.3.3 STÜNDLICHE EMISSIONSFAKTOREN UND NIEDERSCHLAGSDAUER

In den folgenden Auswertungen wird zwischen ein-, zwei- sowie drei- und mehrstündigen Niederschlagsereignissen unterschieden. Abbildungen und Tabellen befinden sich im Anhang A10.

Im Falle eines einstündigen Niederschlagsereignisses (Abb. A10-8) sinken im Beobachtungszeitraum die durchschnittlichen Emissionsfaktoren um bis zu 15 % im Vergleich zu den Werten vor dem Niederschlag. In der ersten Stunde nach dem Regen wird im Mittel eine weitere Abnahme um ca. 24 % und in der ersten Stunde nach dem Niederschlag um weitere 4 % festgestellt. In der dritten Stunde liegen die Werte noch unter dem Mittelwert, steigen danach aber deutlich an.

Auch während der zweistündigen Niederschlagsereignisse (Abb. A10-9) sinken die Emissionsfaktoren im Durchschnitt um etwa 26 %. Jedoch wird bereits in der ersten Stunde nach dem Niederschlag ein erneuter Anstieg der Emissionsfaktoren bis zur fünften Stunde nach dem Niederschlag sichtbar.

Während dreistündiger Niederschlagsereignisse (Abb. A10-10) sinken die Emissionsfaktoren um etwa 30 % während Niederschlag und in der nächsten Stunde um weitere 11 % ab. Danach steigen sie wieder an und sinken erst 11 Stunden nach dem Niederschlag wieder ab.

8.3.4 STÜNDLICHE EMISSIONSFAKTOREN UND NIEDERSCHLAGSHÖHE

Im letzten Auswertungsschritt werden die ermittelten Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe untersucht (Abb. A10-11 bis A10-14). Dabei muss die letzte festgelegte Klasse $>2,5$ mm (siehe **Abbildung 83**) aufgrund von fehlenden Werten aus der Betrachtung herausgenommen werden.

Auch wenn das Verhalten der Emissionsfaktoren recht unterschiedlich ist, ist im Allgemeinen ein Absinken der Emissionsfaktoren während Niederschlag bzw. in den folgenden zwei Stunden feststellbar.

Der hohe Wert des durchschnittlichen Emissionsfaktors für Niederschlagsereignisse von 0,1 mm resultiert daraus, dass ein sehr hoher Emissionsfaktor in der entsprechenden Datenbasis vorhanden ist. Dieser stellt aber, auf den gesamten Datensatz bezogen, keinen Ausreißerwert dar, rückt aber bei einer geringen Datengrundlage stark in den Vordergrund. Die restlichen normierten Emissionsfaktoren bewegen sich während eines Niederschlagsereignisses von 0,1 mm um Werte, die unter dem Durchschnitt liegen. Ein klarer Trend wird nicht sichtbar. In der ersten Stunde nach dem Niederschlag werden jedoch Abnahmen von ca. 40 % erreicht.

Ebenfalls sehr hohe Abnahmen im Vergleich zum Vorwert (bis etwa 50 %) werden zwischen >0,5 und 1,0 mm Niederschlag erreicht.

Für die Klassen mit größeren Niederschlagsmengen können jedoch anhand der vorliegenden Daten keine höheren Abnahmen der Emissionsfaktoren beobachtet werden. Auch nach ergiebigeren Niederschlagsereignissen ist keine längere Wirkung auf die Emissionsfaktoren festzustellen.

8.3.5 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE DER FRANKFURTER ALLEE

Wie an der Schildhornstraße hält auch an der Frankfurter Allee die Wirkung des Niederschlages nur etwa zwei bis drei Stunden an. Danach werden Emissionswerte errechnet, die z. T. deutlich über dem Durchschnitt liegen. Dies könnte wieder mit dem Abtrocknen der Straße und der höheren Menge aufwirbelbaren Materials nach Niederschlägen in Zusammenhang gebracht werden.

Im Vergleich zur Schildhornstraße treten im Verhalten der Emissionsfaktoren bei Niederschlägen keine nennenswerten Unterschiede auf. Allerdings werden höhere Abnahmen erreicht. Die mittleren Emissionsfaktoren sinken bei Niederschlägen im Allgemeinen um 15 bis 30 %, vereinzelt wurden auch höhere Reduktionen beobachtet.

Anhand der Betrachtung der Tagesmittelwerte der Gesamt- und Zusatzbelastung wurden an der Frankfurter Allee schon für die Immissionen höhere Reduktionen festgestellt als an der Schildhornstraße, so dass dieses Ergebnis nicht überraschend ist.

Die Schwankungen der Emissionsfaktoren sind jedoch größer. Es kann zwar auch auf Grundlage der Ergebnisse auf eine Abnahme der PM10-Emission bei Niederschlägen geschlossen

werden, jedoch kann auch hier kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Niederschlagsdauer und der Höhe der Reduktion der Emissionsfaktoren festgestellt werden.

Es soll hier nur am Rande erwähnt werden, dass auch an der Frankfurter Allee keine Korrelation zwischen relativer Luftfeuchte und den PM10-Emissionsfaktoren festgestellt werden konnte. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten der Fahrspuren lagen jeweils um Null. Jedoch müsste für gesichertere Aussagen auch hier wie an der Schildhornstraße ein größerer Zeitraum zugrunde gelegt werden.

9 Konsequenzen aus den Ergebnissen für die PM10-Emissionsmodellierung

9.1.1 ANSÄTZE ZUR PM10-EMISSONSBERECHNUNG

In Deutschland liegen zur Zeit noch keine allgemein anerkannten Modelle vor, welche die PM10-Partikelemission hinreichend genug beschreiben. Der Einfluss von Niederschlägen auf die PM10-Konzentration blieb bisher weitgehend ununtersucht bzw. unberücksichtigt. Aufgrund von Untersuchungen des *LUA BRANDENBURG* in Brandenburg (2000, in *LOHMEYER 2001*) sowie von *RAUTERBERG-WULFF 2000* an der Frankfurter Allee wurde ein Modell von der US-EPA von 1997, welches Emissionsfaktoren von Partikeln beschreibt, modifiziert und an deutsche Verhältnisse angepasst. Diesem Modell der EPA liegt bezüglich des Einflusses von Niederschlägen die Annahme zugrunde, dass an Tagen mit Niederschlag die PM10-Emission gleich Null ist. *RAUTERBERG-WULFF* ging hingegen davon aus, dass an einem Regentag die verkehrsinduzierten PM10-Emissionen um 50 % reduziert werden. In *LOHMEYER 2001* wird vorgeschlagen, die EPA-Formel auf Grundlage der Modifikationen von *RAUTERBERG-WULFF 2000* und des *LUA BRANDENBURG* (welches die Staubbiladung an die deutschen Bedingungen anpasste) zu verwenden:

$$[G4] \quad e = a \cdot k \cdot (sL)^{0,52} \cdot W^{2,14} \cdot \frac{1}{0,85} \cdot (1 - 0,5 \cdot r)$$

wobei:

- e = Emissionsfaktor [g/(km · Fzg)] für das Bezugsjahr 2000
- a = Korrekturfaktor für die Anwendung auf Straßen in Deutschland
- k = Basisemissionsfaktor der EPA = 0,18 g/km
- sL = PM75- Fraktion der Staubbiladung der Straße
- W = mittleres Gewicht der Fahrzeugflotte
- r = Anzahl der Niederschlagstage (mit mehr als 0,1 mm Niederschlag) pro Jahr dividiert durch 365

Als ein Regentag wurde dabei die Definition des DWD übernommen, ohne aber eine Unterscheidung nach der Niederschlagshöhe zu treffen.

In der Zwischenzeit wurde auch von der US-EPA (2001) ein Vorschlag für eine Modifizierung des Modells von 1997 unterbreitet, welcher auch Niederschläge als Einflussparameter mit berücksichtigt. Dabei werden zwei Optionen zur Berechnung der Emissionen vorgestellt. Die erstere Option bezieht sich auf die Anzahl von Tagen, die zweite

auf die Anzahl von Stunden mit Niederschlag (P) von mindestens 0,1 inch (=0,254 mm) über einen größeren Zeitraum (N).

Für die Option 1 (Tagesbezug) wird als Niederschlagskorrekturfaktor $,1 - P/(2N)'$ angegeben, für die Option 2 (Stundenbezug): $,1 - P/N'$. Option 1 entspricht somit im Wesentlichen der Regenkorrektur, wie sie in Gleichung G4 aufgezeigt ist.

9.1.2 ZUSAMMENSTELLUNG DER GEWONNENEN ERGEBNISSE

Bevor eine Bewertung für die in den Emissionsberechnungen benutzte Regenkorrektur vorgenommen werden kann, sollen die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit unter dem Gesichtspunkt des Einflusses von Niederschlägen auf PM10-Konzentration der Gesamt- und Zusatzbelastung sowie auf die PM10-Emission zusammengefasst werden. (siehe dazu im Vorgriff Kapitel 10):

Tabelle 9-1: Wesentliche Ergebnisse der Arbeit

Auswertungsschwerpunkt	Ergebnis
- Differenzen zwischen den Abnahmen der PM10- und der NO _x - Gesamtbelastungen ab Niederschlagsschwellen, bezogen auf Tagesmittelwerte (Abnahme PM10 [%] minus Abnahme NO _x [%])	maximal 13 % bezogen auf Tage ohne Niederschlag
- Differenzen zwischen den Abnahmen der PM10- und der NO _x - Gesamtbelastungen in Niederschlagsklassen, bezogen auf Tagesmittelwerte (Abnahme PM10 [%] minus Abnahme NO _x [%])	maximal 17 % bezogen auf Tage ohne Niederschlag
- Differenzen zwischen den Abnahmen der PM10- und der NO _x - Zusatzbelastungen ab Niederschlagsschwellen bezogen auf Tagesmittelwerte (Abnahme PM10 [%] minus Abnahme NO _x [%])	maximal 13 % bezogen auf Tage ohne Niederschlag
- Differenzen zwischen den Abnahmen der PM10- und der NO _x - Zusatzbelastungen bei Niederschlag in Niederschlagsklassen bezogen auf Tagesmittelwerte (Abnahme PM10 [%] minus Abnahme NO _x [%])	maximal 12 % bezogen auf Tage ohne Niederschlag
- Rückgang der Emissionsfaktoren in Stunden mit Regen gegenüber trockenen Stunden an der Schildhornstraße	im Mittel 14 % maximal 35 %
- Rückgang der Emissionsfaktoren in Stunden mit Regen gegenüber trockenen Stunden an der Frankfurter Allee	im Mittel 20 % maximal 50 %
- Andauer des ‚Regeneffektes‘ nach Beendigung des Niederschlagsereignisses in Schildhornstraße und Frankfurter Allee	im Mittel 2 Stunden maximal 7 Stunden

9.1.3 SCHLUSSFOLGERUNG

Auf Basis der in der Arbeit gewonnenen Ergebnisse erscheinen folgende Punkte in der Regenkorrektur der EPA kritisch:

- Die EPA-Regenkorrektur geht für die Betrachtung von Niederschlagstagen (wie *RAUTERBERG-WULFF 2000*) davon aus, dass an Tagen mit mindestens 0,1 inch die PM10-Emissionen um 50 % reduziert werden. Dies wird unter Annahme, dass an jedem Tag Niederschlag fiele, ersichtlich ($\text{Reduktionsfaktor} = 1 - 365 / 365 \cdot 2 = 1 - 0,5 = 0,5$).
Im Vergleich der PM10-Tagesmittelwerte trockener und Niederschlagstage werden jedoch in der Gesamt- und Zusatzbelastung nur in Ausnahmefällen derartig hohe Reduktionen beobachtet.
- Der stundenweisen Betrachtung nach Option 2 liegt die Annahme zugrunde, dass in jeder Stunde mit messbarem Niederschlag die Emissionen gleich Null sind.
Jedoch zeigten die Analysen der stündlichen Emissionsfaktoren an den Beispielen der Schildhornstraße und Frankfurter Allee in der Stunde mit Niederschlag durchschnittliche Reduktionen von maximal 50 % (im Mittel 14 bis 20 %). Es wurde außerdem festgestellt, dass die Wirkung des Niederschlages noch mindestens 1 bis 2 Stunden, maximal bis 7 Stunden nach dessen Ende anhält. In diesem Zeitraum liegen die Emissionsfaktoren noch unter den Werten der Stunden vor dem Niederschlagsereignis. Stunden ohne Niederschlag werden in der Formel in keinen zeitlichen Zusammenhang zu den Stunden mit Niederschlag gestellt und auf einen noch möglichen anhaltenden Niederschlagseinfluss hin betrachtet.
- Erst Niederschlagsmengen von 0,1 inch (0,254 mm) innerhalb einer Stunde werden in den USA als Regen gezählt, wobei dies aber nicht eindeutig in dem Entwurf der EPA (2001) beschrieben wurde. In Deutschland wird schon ab Niederschlagsmengen von 0,1 mm gezählt. Am Beispiel der Station Berlin Dahlem würden für das Jahr 2000 etwa 365 Stunden oder 26 Tage Differenz anfallen, da hier Niederschlagshöhen von weniger als 0,254 mm gemessen werden. Jedoch wurden bereits ab 0,1 mm Niederschlag Reduktionen der PM10-Konzentration festgestellt.
- Der EPA-Formel (2001) liegen durchschnittliche amerikanische Verhältnisse zugrunde. Möglicherweise werden dort aufgrund der geographischen Gegebenheiten höhere Reduktionen bei Niederschlag beobachtet.

Eine Anfrage an die EPA, ob die angesetzten 0,254 mm messtechnisch begründet sind oder anderen Überlegungen zugrunde liegen, blieb leider unbeantwortet. Ebenso die Frage, warum

in Stunden mit Niederschlag davon ausgegangen wird, dass die PM10-Emission gleich Null (Option 2) ist. Beispielsweise Auspuffemissionen sollten unabhängig von Niederschlägen sein. Eine Überarbeitung des Entwurfs der EPA zur Berücksichtigung von Niederschlägen in der PM10-Emissionsberechnung ist aber noch im Gange und wird sicher demnächst zu einem Abschluss gebracht werden. Inwieweit die in den genannten Punkten aufgeworfenen Probleme und Fragen Beachtung finden, bleibt allerdings abzuwarten.

Auf Grundlage der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse lässt sich folgendes ableiten:

- a) Eine deutliche Reduktion von PM10-Emissionsfaktoren ist in der Stunde des Regenereignisses zu beobachten. Diese Reduktion liegt an der Schildhornstraße und Frankfurter Allee in den betrachteten Zeiträumen im Mittel bei ca. 14 % bis 20 %, maximal bei 50 %, wobei die Frankfurter Allee stärkere Abnahmen zeigt.
- b) Diese Abnahmen in den Stunden mit Niederschlag werden auch schon bei der Niederschlagsklasse von 0,1 mm gefunden.
- c) Diese Abnahmen bei Regen halten etwa 1 bis 2 Stunden, maximal 7 Stunden nach dem Regenereignis an. Geht man von einem Mittelwert der Regendauer von ca. 2 Stunden und nach Aufhören des Niederschlagsereignisses von einem mittleren Andauern des Regeneffektes von ebenfalls 2 Stunden aus, an denen die Emissionsfaktoren um ca. 20 % reduziert sind, so ergibt sich eine mittlere Reduktion der Emission um ca. 3 % für den gesamten Tag. Dies korrespondiert mit den beobachteten relativ geringen Abnahmen der täglichen PM10-Zusatzbelastung von maximal 17 %, die im Mittel deutlich darunter lagen.
- d) Eine Regenkorrektur in der o. g. EPA-Formel (Gleichung G4) müsste somit für Straßen mit ähnlichen Bedingungen (wie die Schildhornstraße oder die Frankfurter Allee) von einer Minderung von deutlich weniger als 20 % an Regentagen ausgehen. Es ist zusätzlich zu überlegen, ob diese Korrektur aufgrund der geringen Größe des Effektes noch sinnvoll ist.
- e) Dieser an den betrachteten Stationen festgestellte, relativ geringe Einfluss des Regens auf die PM10-Emission deutet eventuell darauf hin, dass hier der Anteil der Aufwirbelung von PM10-Staubpartikeln den Anteilen aus Auspuff- und Abriebemissionen, die von Regen unbeeinflusst sind, untergeordnet ist.

10 Zusammenfassung und Schlussbetrachtung

Die Auswertungen von vorliegenden PM10- und NO_x-Luftschadstoffdaten in Berlin bezüglich Niederschlag und Luftfeuchte zeigten, dass Niederschläge einen wesentlichen natürlichen Faktor zur PM10-Immissionsminderung darstellen können. Dazu wurde der Einfluss von Niederschlägen auf die PM10-Tagesmittelwerte der Gesamt- und Zusatzbelastung an sechs verschiedenen Luftgütemessstellen des Berliner BLUME- Messnetzes betrachtet. Analysiert wurden die Messdaten kontinuierlicher Messungen mittels FH-Geräten aus 19 Monaten. In einem nächsten Schritt wurden auf Grundlage von Daten aus Intensivmesskampagnen an der Schildhornstraße (4 Wochen) und an der Frankfurter Allee (10 Wochen) stündliche PM10-Emissionsfaktoren abgeleitet und ebenfalls auf einen möglichen Niederschlagseinfluss hin untersucht. Dabei wurde auch der engere zeitliche Rahmen um das Niederschlagsereignis (2 Stunden davor und mehrere Stunden danach) in die Analysen einbezogen. Die gewonnenen Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

Verhalten von PM10- und NO_x - Gesamtbelastung:

1. Für die PM10- und NO_x -Gesamtbelastung wurde jeweils ein typischer Tages- und Wochenverlauf beobachtet. NO_x zeigt im Tagesverlauf größere Schwankungen als PM10. Dabei werden hohe PM10-Werte zu Zeiten hoher NO_x -Belastung beobachtet. Die NO_x -Gesamtbelastung steigt tagsüber stärker an als die PM10-Gesamtbelastung, was sich in den Tagstunden in einem kleinen PM10/ NO_x - Verhältnis von ca. 0,2 bis 0,4 widerspiegelt. In den Nachtstunden wiederum sinkt NO_x stärker ab als PM10, so dass die höchsten PM10- NO_x -Verhältnisse (bis ca. 0,8) zwischen 0 und 3 Uhr auftreten.
2. Bei der PM10-Gesamtbelastung ließen sich in der Betrachtung der Niederschlagsschwellen, d. h. ab festgelegten täglichen Mindestniederschlagsmengen bei allen betrachteten Messstationen schon ab 0,1 mm Niederschlag erhebliche Reduktionen der Tagesmittelwerte von bis zu 25 % (im Mittel ca. 20 %) beobachten. Diese Abnahmen waren um ca. 6 bis 12 %-Punkte größer als bei NO_x. Sieht man NO_x als Tracer für die atmosphärischen Ausbreitungsvorgänge an, so sollten sich in der Differenz zwischen PM10- und NO_x -Konzentration möglicherweise PM10-spezifische Emissionsprozesse während Niederschlag widerspiegeln. Außer an der Frankfurter Allee nimmt der Unterschied zwischen PM10- und NO_x -Reduktion zu hohen Niederschlagsschwellen hin ab.

3. In den betrachteten Niederschlagsklassen sind schon bei Niederschlagshöhen von 0,1 bis 0,5 mm bzw. >0,5 bis 1,0 mm Reduktionen in der PM10-Gesamtbelastung zu verzeichnen, die ca. 9 bis 17 % größer sind als bei NO_x. Zwischen 1,0 und 5,0 mm waren die PM10-Reduktionen nur noch 4 bis 11 % höher als bei NO_x. Bei mehr als 5 mm Niederschlag konnten in den Konzentrationsabnahmen keine deutlichen Unterschiede mehr zwischen PM10 und NO_x festgestellt werden.
4. Die Schildhornstraße zeigt in der Gesamtbelastung bei Niederschlag die geringsten Effekte, die Frankfurter Allee die höchsten.

Verhalten von PM10- und NO_x-Zusatzbelastung:

5. Werden die Konzentrationen der städtischen Hintergrundstation Nansenstraße von den gemessenen Gesamtbelastungen der Verkehrsstationen Schildhornstraße, Frankfurter Allee und Berlin Mitte abgezogen, erhält man eine Abschätzung der dortigen verkehrsbedingten Zusatzbelastung. Die Wochengänge der Zusatzbelastung weisen an den betrachteten Stationen einen ähnlichen Verlauf auf wie die Gesamtbelastungen. Das Verhältnis von PM10- zu NO_x-Zusatzbelastung ist jedoch im Durchschnitt kleiner und ausgeglichener und liegt im Mittel bei ca. 0,2.
6. In der Zusatzbelastung traten erst ab mehr als 1,0 mm Niederschlag deutliche Reduktionen in den Tagesmittelwerten der PM10- und NO_x-Zusatzbelastungen auf. Ab 1,0 mm wurden für PM10 um bis zu 6 % höhere Abnahmen festgestellt als für NO_x, ab 5,0 mm Niederschlag 13 %. Dieser Sachverhalt wurde bei der Betrachtung innerhalb der Niederschlagsklassen bestätigt.

Korrelation von PM10- und NO_x-Gesamt- und Zusatzbelastung und relativer Luftfeuchte:

7. Analysen der Abhängigkeit der PM10-Gesamt- und Zusatzbelastung von der relativen Luftfeuchte konnten keine signifikanten Abhängigkeiten zeigen, nur einen leichten Anstieg bei hohen Luftfeuchtigkeiten. Dies widerspricht den Beobachtungen *KANTAMANENIS*, der mit steigender Luftfeuchte eine Minderung der PM10-Konzentration beobachtete (1996, in *LOHMEYER 2001*) und bestätigt die Ergebnisse der *BRISKA*-Studie (1999) aus Basel, in der bei steigender Luftfeuchte ein Anstieg der PM10-Konzentration verzeichnet wurde.

Verhalten der PM10- und NO_x-Gesamtbelastung in Jahreszeiten

8. In den feuchteren Wintermonaten führt Niederschlag zu niedrigeren PM10-Gesamtkonzentrationen als im Sommer. Im Sommer treten bei Niederschlägen oft höhere Konzentrationen auf als an trockenen Tagen.

Im Sommer dominieren kurze und starke Niederschläge, im Winter eher länger dauernde, schwache.

9. PM10 weist in der Gesamtbelastung außer im Sommer im Allgemeinen höhere Konzentrationsabnahmen bei Niederschlag auf als NO_x. Wenn die PM10-Konzentrationen im Sommer über denen von niederschlagsfreien Tagen liegen, sind die NO_x -Konzentrationen im Verhältnis niedriger.

Auswertungen berechneter PM10-Emissionsfaktoren bei Regenereignissen:

10. Für die Auswertung der Intensivmesskampagne an der Schildhornstraße wurden die Messwerte der Paulsenstraße als Hintergrundmessstelle genutzt. Durch einen Dreisatz aus gemessener NO_x -Zusatzbelastung, berechneten NO_x -Emissionen und gemessener PM10-Zusatzbelastung, konnte die stündlichen PM10-Emissionsfaktoren ermittelt werden. Dieses Vorgehen wurde auch für die Frankfurter Allee gewählt. Als Hintergrundmessstelle diente dabei die Nansenstraße.
11. In der Schildhornstraße wurden während Niederschlag im Mittel um ca. 14 % niedrigere Emissionsfaktoren beobachtet als vor dem Niederschlag. Bereits ab Niederschlagsmengen von 0,1 mm konnten Emissionsreduktionen von bis zu 20 % im Vergleich zur Stunde vor dem Niederschlagsereignis festgestellt werden. Gegenüber dem Mittelwert wurden während des Niederschlagsereignisses Reduktionen von bis zu 35 % beobachtet.
12. Eine Wirkung des Niederschlages auf die PM10-Emission ist bis zu 7 Stunden nach dem Ereignis festzustellen.
13. Für länger andauernde Niederschlagsereignisse konnten an der Schildhornstraße keine höheren Abnahmen der PM10-Emission (im Sinne von längerer Niederschlagsdauer ? höhere Abnahme) festgestellt werden als für Niederschlagsereignisse kürzerer Dauer.
14. An der Frankfurter Allee zeigte ein Vergleich der ermittelten Emissionsfaktoren mit den Fahrzeuggeschwindigkeiten eine positive Korrelation (d. h. höhere Fahrzeuggeschwindigkeit -> höhere Emissionsfaktoren) mit geringer Signifikanz. In der Gegenüberstellung der PM10-Emissionsfaktoren mit dem Fahrzeugaufkommen konnte eine negative Korrelation (d. h. höhere Fahrzeugaufkommen -> kleinere Emissionsfaktoren) mit deutlicher Signifikanz festgestellt werden.
15. In der Frankfurter Allee liegen die PM10-Emissionsfaktoren zwischen 13 % und 30 % niedriger als vor den Regenstunden. Der Effekt dauert hier bis etwa 2 bis 3 Stunden nach dem Niederschlagsereignis an.

16. Zwischen Länge des Niederschlagsereignisses und der Reduktion der PM10-Emission konnte in der Frankfurter Allee eine geringe positive Korrelation festgestellt werden (1 Stunde = 24 %, 2 Stunden = 26 %, 3 Stunden = 30 %).

Vergleich der Ergebnisse mit dem Modell der US-EPA (2001):

17. Die an Niederschlagstagen festgestellten Reduktionen der PM10- Emissionen liegen meist deutlich unter den in der Literatur oder von der US-EPA angegebenen Annahmen. Der Regeneinfluss für Straßen, die ein ähnliches Umfeld wie die Frankfurter Allee und die Schildhornstraße aufweisen, sollte von $(1 - 0,5 \cdot r)$ auf mindestens $(1 - 0,2 \cdot r)$ vermindert werden. (r ist dabei die Anzahl der Niederschlagstage mit mehr als 0,1 mm Niederschlag pro Jahr dividiert durch 365). Es ist dabei aber zu beachten, dass an Straßen die ein deutlich höheres Potential an aufwirbelbaren Materialien aufweisen, der Regeneinfluss höher sein kann. Die Niederschlagsschwelle von 0,1 mm kann beibehalten werden.

In Laufe der Arbeit wurde deutlich, wie schwierig und unsicher es ist, die Partikelkonzentration in einer Straße zu bestimmen. Für den Geographen ist es zwar v. a. wichtig, die Auswirkungen der PM10-Belastung im Zuge von Stadtplanungen zu bewerten. Doch dazu ist neben dem Beachten der rechtlichen Normen ebenso ein Verständnis über mögliche Unsicherheiten, die sich in den PM10-Messungen sowie möglichen Minderungsstrategien ergeben, notwendig.

Um die vorgegebenen Luftqualitätsstandards umsetzen und langfristig einhalten zu können, wird deutlich, dass sich unter einer bloßen Berücksichtigung klimatischer und lufthygienischer Zusammenhänge, keine Minderungen der Staubbelastung erreichen lassen. Minderungsstrategien wie z. B. Verkehrsreduzierung oder Verkehrslenkung etc. werden in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

Es bleibt zu hoffen, dass bei künftig hoffentlich zu erwartenden ökologischen Stadtentwicklungs(un-)planungen Überlegungen zur PM10-Minderung in stärkeren Maße mit einfließen.

11 Quellenverzeichnis

11.1 Literatur

- BAUMBACH, G. (1994): Luftreinhaltung, Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen – Messtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften, Stuttgart, S. 307.
- BAYERISCHES AMT FÜR UMWELTSCHUTZ (2000): Stand der Immissionssituation bei Feinpartikeln, Augsburg.
- BENDIKAT, E. (2001): Umweltverschmutzung durch Verkehrsemissionen am Beispiel von Berlin und Paris 1900-1930, in: BERNHARDT, C. (HRSG.) (2001): Environmental Problems in European Cities in the 19th and 20th Century, Umweltprobleme in europäischen Städten des 19. und 20. Jahrhunderts, Münster, S.183-209.
- BERNHARDT, C. (HRSG.) (2001): Environmental Problems in European Cities in the 19th and 20th Century, Umweltprobleme in europäischen Städten des 19. und 20. Jahrhunderts, Münster, S. 20, 192-202.
- BUWAL (HRSG.), HÜGLIN, C. (2000): Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2,5-Immissionen. Chemische Zusammensetzung des Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell, Bericht C4, Bern, S. 1, 18.
- EUROPEAN COMMISSION (HRSG.) (1999): COST 319, Estimation of pollutant emissions from transport, Final report of the action, Brüssel, S.66-67.
- FINKE, L. (1996): Landschaftsökologie, Braunschweig.
- DIN 4049-3, Hydrologie Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie (Stand 1996).
- EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL TRANSPORT (1999): COST 319 – Estimation of pollutant emissions from transport, Final report of the action, Brüssel – Luxemburg.
- FELLENBERG, G. (1999): Umweltbelastungen, Eine Einführung, Teubner Stuttgart, Leipzig, S. 33-41.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN, ARBEITSGRUPPE STRASSENENTWURF (2001): Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen. MluS-2001.
- HAYASHI, Y.; BUTTON, K.; NIJKAMP, P. (HRSG.) (1999): The Environment and Transport, Environmental Analysis and Economic Policy Band 4, Cheltenham, p. xv.
- INFRAS (1999): INFRAS im Auftrag des UBA: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 1.2, Januar 1999, Berlin.

- KALMBACH, S.; SCHMÖLLING, J. (1990): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, Band 2, Berlin.
- LENSCHOW ET AL. (2001): Some ideas about the sources of PM10, in Atmospheric Environment 35 Supplement No. 1 (2001), S23-S33.
- LESER, H. (a) (Hrsg.) (1997): DIERCKE – Wörterbuch Allgemeine Geographie, Westermann und DTV, S.825.
- LESER, H. (b) (1997): Landschaftsökologie, Stuttgart, S. 180ff.
- LOHMEYER, A. (2001): Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Strassen und Quantifizierung der Feinstaubbildung von Strassen, o.Ort.
- RAUTERBERG-WULFF, A. (2000): Untersuchung über die Bedeutung der Staubaufwirbelung für die PM10-Immission an einer Hauptverkehrsstraße, Berlin.
- RICHTLINIE 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (1999), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 163/41.
- SCHÄDLER, G. ET AL. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle, Karlsruhe.
- SEMMLER, T. (2000): Kurzdokumentation Projekt Berlin-Schildhornstraße, o. O., unveröffentlicht.
- SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELTSCHUTZ (1994): Flächennutzungsplan Berlin FNP94, Berlin.
- STRIEDER, P. (1998) in SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG, UMWELTSCHUTZ UND TECHNOLOGIE (1998): Luftverunreinigungen in Berlin im Jahr 1998, Ergebnisse der Berliner Luftgüte-Meßnetzes (BLUME), Berlin, S.2.
- SUKOPP, H. (1990): Stadtökologie: das Beispiel Berlin, Berlin, S. 54ff.
- SUKOPP, H.; WITTIG, R.(1993): Stadtökologie, Stuttgart, S.2ff.
- UBA (HRSG.) (1989): Was sie schon immer über Luftreinhaltung wissen wollten, Berlin, S. 90.
- UBA (1999): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 1.2/Januar 1999. Dokumentation zur Version Deutschland erarbeitet durch INFRAS in Zusammenarbeit mit IFEU Heidelberg.
- VON ROHR, H.-G. (1990): Angewandte Geographie, Das Geographische Seminar, Verlags-GmbH Höller und Zwick, 1. Auflage, Braunschweig.
- WARNECKE, G. (1991): Meteorologie und Umwelt, Eine Einführung, Berlin.
- ZIMM, ALFRED (HRSG.) (1990): Berlin (Ost) und sein Umland, Gotha, S. 237ff.

11.2 Karten

DIERCKE WELTATLAS (1996), Braunschweig

BERLINER SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG: Lageskizzen der Messstationen Stadtautobahn, Frankfurter Allee, Mitte, Nansenstraße, Buch

11.3 Internet

BERLINER SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (2000) [I]: BLUME Berliner Luftgütemessnetz.

in: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/blume/> (zugegriffen am 30.10.01)

BERLINER SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG, UMWELTSCHUTZ UND TECHNOLOGIE (ohne Jahr) [II]: 03.04 Stäube – Emissionen und Immissionen, Berlin.

in: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/k304.rtf
(zugegriffen am 11.02.2002)

EPA (2001): AP-42, Fifth Edition, Volume I, Introduction to Miscellaneous Sources (chapter 13), Section 13.2.2 Paved Roads, Draft Section, October 2001.

in: <http://www.epa.gov>

ERDKUNDE-ONLINE (1999-2000): Verkehr und Kommunikation, PKW-Dichte.

in: www.erdkunde-online.de/statistik/7036.htm (zugegriffen am 01.04.2002)

IHK NORDSCHWARZWALD (2000): Maßnahmen zur Einhaltung der neuen Schwebstaubgrenzwerte.

in: http://www.nordschwarzwald.ihk.de/umwelt/Um_na/0400/Immission4.htm,
(zugegriffen am 11.02.2002)

KUHLBUSCH, T., JOHN, A. (2000): Korngrößenabhängige Untersuchungen von Schwebstaub und Inhaltsstoffen, Abschlußbericht zum Projekt.

in: http://www.uni-duisburg.de/FB9/AMT/reports/AB_MURL.PDF
(zugegriffen am 9.04.2002)

LOHMEYER, A. (2000): Lohmeyer Aktuell, Ausgabe Nr. 4, Dezember 2000.

in: <http://www.lohmeyer.de/lohakt4/Ausgabe4.htm> (zugegriffen am 01.01.01)

LUFTHYGIENEAMT BEIDER BASEL ET AL (1999): Gesundheitsrisiko durch Luftschadstoffe in der Region Basel, 1. Bericht der Studie BRISKA, Analyse der Immissionsmessungen.

in: <http://www.unibas.ch/ispmb/pdf/briska1.pdf> S. 41, (zugegriffen am 30.01.2002)

RISSE, U. (2000): Die Internet-Seiten von Dr. Uwe Risse, Luft - wir brauchen sie zum Atmen.

in: <http://www.kielnet.net/home/uwe.risse/luft.htm> (zugegriffen am 01.10.01)

REINBERG, S. (2001): Infant Deaths Linked to Pollution in U.S. Cities.

in: <http://www.who.int/peh/ceh/articles/pollution.htm> (zugegriffen am 16.01.2002)

SCHÖNIGER, M., DIETRICH, J. (2001): Niederschlag, Begriffe.

in: <http://www.hydroskript.de/hykp0402.html> (zugegriffen am 11.12.2001)

UBA: Detailkarte Berlin.

in: <http://www.umweltbundesamt.de/hid/cluster/berlin.htm>

(zugegriffen am 18.12.2001)

WHO (2000): Guidelines for Air Quality, Chapter 3: Health based Guidelines, Geneva.

in: http://www.who.int/environmental_information/Air/Guidelines/aqguide3.pdf

(zugegriffen am 16.01.2002)

11.4 Gespräche

26. Februar 2002: mit Herrn Reichenbacher in Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie

11.5 Datengrundlage

- *Schadstoffdaten der BLUME – Messcontainer der Straßenstationen*

- 14 Stadtautobahn (Lerschpfad)
- 42 Neukölln (Nansenstraße)
- 71 Mitte (Parochialstraße)
- 77 Buch
- 117 Schildhornstraße
- 174 Frankfurter Allee

- *Meteorologische Daten von Berlin Dahlem der FU-Berlin, Institut für Meteorologie*

- *FU BERLIN, INSTITUT FÜR METEOROLOGIE (2001): Schlüsseltabelle für Wolken und Niederschlag, erhalten als FAX*

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt und nur die im Quellenverzeichnis angeführten Quellen verwendet habe.

Die im Rahmen der Arbeit verwendeten meteorologischen Daten, welche durch das Institut für Meteorologie an der FU-Berlin zur Verfügung gestellt wurden, wurden ausschließlich für die speziellen Auswertungen im Rahmen vorliegender Diplomarbeit genutzt.

Evelyn Schulze