

Universität Bielefeld  
Fakultät für Gesundheitswissenschaften

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

„Doctor of Public Health“

**Bewertung gesundheitlicher Risiken durch  
Hitzeextreme in Deutschland**

vorgelegt von Sascha Georgy

Gutachter: Prof. Dr. med. Alexander Krämer

Zweitgutachter: Prof. Dr. Lutz Katzschner

Bamberg, November 2016

## **Danksagung**

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Alexander Krämer und seiner Arbeitsgruppe für die wissenschaftliche und methodische Unterstützung.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Lutz Katzschner für das aus der Zusammenarbeit im Projekt KLIMZUG entstandene Vertrauen in meine Arbeit, das letztlich die Dissertation erst ermöglichte. In diesem Zusammenhang danke ich auch für die wissenschaftliche Unterstützung.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Lautenbach, dessen methodische Unterstützung letztlich die Generierung fundierter Ergebnisse möglich machte.

Ich danke Herrn Dr. Heiko Jahn für seine methodisch inspirierenden Perspektiven wie auch seine wissenschaftlichen Expertisen.

Den Mitarbeitern der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder Herrn Dr. Janisch (Leiter der Statistischen Ämter) und Herrn May danke ich für ihre konstruktiven Ratschläge und die Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Bernhild.

Bamberg im November 2016,

Sascha Georgy

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretischer Hintergrund	6
2.1 Umwelt im gesundheitswissenschaftlichen Kontext	8
2.2 Umwelt und Lebensbereiche	10
2.3 Entstehungsbedingungen für Gesundheit & Krankheit	12
2.4 Indikatoren für Gesundheit und Krankheit	13
2.4.1 Biomedizinische Indikatoren	13
2.4.2 Soziale, ökonomische und räumliche Kontextindikatoren	18
2.5 Krankheitsverteilung und Ursachenforschung	19
3. Fragestellung	23
4. Methoden	24
4.1 Ziel und Studienpopulation	24
4.2 Indexierung der Exposition Hitze	27
4.2.1 Meteorologisch-klimatologische Phänomene	28
4.2.2 Herangezogene meteorologische Daten	30
4.2.3 Thermoregulatorische Bedingungen	31
4.2.4 Indexierung relativer Belastungsbereiche	33
4.2.5 Der Heat Index	34
4.3 Ko-Exposition Feinstaub (PM <sub>10</sub> )	41
4.3.1 Herangezogene PM <sub>10</sub> -Daten	41
4.4 Geostatistische Aufbereitung der Expositionsdaten	44
4.4.1 Variogrammschätzung & Kriging	44
4.4.2 Interpolation der Expositionsdaten	46
4.4.3 Validierung der interpolierten Werte	53
4.5 Sozialräumliche Kontextfaktoren	57
4.5.1 Integration der Kontextfaktoren in das statistische Modell	59
4.5.2 Hauptkomponentenanalyse (PCA)	62
4.6 Statistische Umsetzung	64
4.6.1 Case-crossover-Design	64
4.6.2 Regressionsansatz	67
4.6.3 Geostatistische Herangehensweise	71
5. Ergebnisse	76
5.1 Klima- und Feinstaubtrends im Beobachtungszeitraum	76
5.1.1 Thermische Exposition	77
5.1.2 Feinstaubexposition	83
5.1.3 Klima- und Feinstaubexposition	89
5.1.4 Zusammenschau Klima- und Feinstaubtrends	93
5.2 Mortalität und Morbidität im Beobachtungszeitraum	95
5.2.1 Das Mortalitätsgeschehen im Beobachtungszeitraum	96
5.2.2 Mortalität im zeitlichen Fortgang	97
5.2.3 Mortalität im Kreistyp	102
5.2.4 Häufigkeitsverteilung der Mortalität	103
5.2.5 Mortalität im Regressionsmodell	104
5.2.6 Das Morbiditätsgeschehen im Beobachtungszeitraum	107

5.2.7 Morbidität im zeitlichen Fortgang	108
5.2.8 Morbidität im Kreistyp & unterste Beobachtungseinheiten	114
5.2.9 Häufigkeitsverteilung Morbidität	115
5.3 Darstellung der Analyseergebnisse	117
5.3.1 Ergebnisse der logistischen Regression	118
5.3.1.1 Analyseergebnis Mortalität - Ebene BRD	119
5.3.1.2 Ergebnisse Mortalität - Ebene Kreistyp	122
5.3.1.3 Ergebnisse Mortalität - unterste Beobachtungseinheiten	128
5.3.2 Vorhersage mit dem Regressionsmodell	134
5.4 Geostatistische Modellierung der Kontextfaktoren	136
5.4.1 Ergebnisse der linearen Regression	140
5.4.1.1 Welchen Einfluss üben die signifikanten Variablen aus?	141
5.4.1.2 Local Indicators of Spatial Association	145
5.5 Ergebnisse der Regressionsanalysen - Morbidität	147
5.5.1 Analyseergebnis Morbidität - Ebene BRD	147
5.5.2 Ergebnisse Morbidität - Ebene Kreistyp	151
5.5.3 Ergebnisse Morbidität - unterste Beobachtungseinheiten	152
5.5.4 Ergebnisse der log-level Regression	155
6. Diskussion	158
6.1 Synthese der Studienergebnisse	159
6.2 Theoretische Fundierung der Studienelemente	164
6.3 Datenmanagement	170
6.4 Datenauswertung	173
6.5 Fundierung der Studienergebnisse	185
6.5.1 Case-crossover-Design - Charakterisierung & Kritik	186
6.5.2 Vergleich mit europäischen Studienergebnissen	194
6.5.3 Erkenntnisse im allgemeinen Ätiologiemodell	196
6.6 Perspektiven für die weitere Arbeit	199
7. Schlussfolgerung	205
Anhangsverzeichnis	209
Literatur	211



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Fachwissenschaftliche Zugänge zu Umwelt und Gesundheit	9
Tabelle 2 Abgrenzungskriterien der Regionstypen	12
Tabelle 3 Hitzeassoziierte Mortalität 2003 in Europa	15
Tabelle 4 Hitzeassoziierte Todesfälle im Sommer 2003 in Baden-Württemberg	16
Tabelle 5 Erhebungsmerkmale der Todesursachenstatistik	25
Tabelle 6 Erhebungsmerkmale der Krankenhausstatistik	26
Tabelle 7 Einflussgrößen der Apparent Temperature	35
Tabelle 8 Meteorologisches Element Wind in der Apparent Temperature	36
Tabelle 9 Temperatur-Luftfeuchterelation des Heat Index	37
Tabelle 10 Risikoniveaus nach Rothfus	38
Tabelle 11 Anzahl der herangezogenen PM <sub>10</sub> -Messstationen 2002 - 2006	42
Tabelle 12 Distanzmatrix für 7 Messstationen	48
Tabelle 13 Anzahl möglicher Kontextfaktoren	57
Tabelle 14 PCA - ladungsstarke Variablen 1 - 12	63
Tabelle 15 Häufigkeiten Expositionstage nach Kreistypen	79
Tabelle 16 Häufigkeiten PM <sub>10</sub> -Belastungstage nach Kreistypen	83
Tabelle 17 Korrelationen Heat Inex-Werte & PM <sub>10</sub> -Konzentrationen nach Quartalen	92
Tabelle 18 Mortalität nach Risikostufen	96
Tabelle 19 Todesursachen im Jahr 2003	98
Tabelle 20 Kleinräumige Mortalität	101
Tabelle 21 Mortalität im Kreistyp - Einwohnerzahl (100.000)	102
Tabelle 22 Morbidität nach Risikostufen	107
Tabelle 23 Hitzeassoziierte Morbidität 20.7. - 20.8.2002/6	110
Tabelle 24 Morbidität im Jahr 2003	110
Tabelle 25 Assoziierte Morbidität unter Exposition im Kreistyp bei mittlerer Einwohnerzahl (100.000)	114
Tabelle 26 Kleinräumige Morbidität unter Exposition ( $\geq 80$ °F)	114
Tabelle 27 Analyseergebnis - adjustierte Odds Ratios	120
Tabelle 28 Analyseergebnisse Kreistypen 1 - 9	126
Tabelle 29 Berücksichtigte Kontextfaktoren	138
Tabelle 30 Effekte der signifikanten Kontextfaktoren	142
Tabelle 31 Moran`s I - Ausreißer	146
Tabelle 32 Mittlere Odds Ratios der Variablen Heat Index, PM <sub>10</sub> und Alter   Mortalität	162
Tabelle 33 Mittlere Odds Ratios der Variablen Heat Index, PM <sub>10</sub> , Geschlecht wbl. und Alter   Morbidität	162
Tabelle 34 Visualisierung der in das Modell eingegangenen Daten	173
Tabelle 35 Exzessmortalität in Deutschland & Europa 2003	195

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Klimawandelbedingte bzw. klimavariabilitätsbedingte Risiken	4
Abb. 2 Retrospektive Forschung i. d. Epidemiologie	20
Abb. 3 Grundmodell der allgemeinen Ätiologie	21
Abb. 4 Umgebungsbedingungen und Wärmeabgabe	32
Abb. 5 Autokorrelation ausgewählter PM <sub>10</sub> -Werte	47
Abb. 6 Auto- und Kreuzkorrelation der PM <sub>10</sub> -Daten	48
Abb. 7 Empirisches Variogramm für den PM <sub>10</sub> -Datensatz	49
Abb. 8 Empirisches Variogramm für die Maximaltemperatur	50
Abb. 9 Variogrammplots für PM <sub>10</sub> und Maximaltemperatur	51
Abb. 10 Gegenüberstellung Variogrammmodelle PM <sub>10</sub> -Datensatz	51
Abb. 11 Gegenüberstellung Variogrammmodelle Temperaturdatensatz	52
Abb. 12 PM <sub>10</sub> -Konzentrationen Kassel, Kassel aggregiert & Interpolation	54
Abb. 13 Maximaltemperaturen Kassel, Region Kassel & Interpolation	55
Abb. 14 Gegenüberstellung Maximaltemperatur Kassel Stadt mit Interpolation	55
Abb. 15 Gegenüberstellung relative Luftfeuchtigkeit Stadt Kassel mit Interpolation	56
Abb. 16 Clusteranalyse zur Überprüfung auf Kollinearität	60
Abb. 17 Korrelationsmatrix als Scatterplot (Variablenauswahl)	61
Abb. 18 Screeplot der erklärten Varianz je Hauptkomponente	62
Abb. 19 Referenzperioden im Case-crossover-Design	66
Abb. 20 Nachbarschaftskriterien im Raum	75
Abb. 21 Aggregierte Hitzetage - Raumbezug ges. Untersuchungsgebiet	78
Abb. 22 Aggregierte Hitzetage - Raumbezug Kreistyp 1 2003 - 2006	80
Abb. 23 Aggregierte Hitzetage - Raumbezug Kreistyp 9 2003 - 2006	80
Abb. 24 Häufigkeit Tage mit Heat Indexwerten $\geq 80$ °F im Zeitraum 2002 - 2006	81
Abb. 25 Maximale Heat Indexwerte am 13.08.2003 in den Untersuchungsgebieten	82
Abb. 26 Maximale Heat Indexwerte am 15.08.2003 in den Untersuchungsgebieten	82
Abb. 27 Aggregierte PM <sub>10</sub> -Belastungstage - Raumbezug ges. Untersuchungsgebiet	84
Abb. 28 Aggregierte PM <sub>10</sub> -Belastungstage - Raumbezug Kreistyp 1	85
Abb. 29 Aggregierte PM <sub>10</sub> -Belastungstage - Raumbezug Kreistyp 9	86
Abb. 30 Häufigkeit Tage mit PM <sub>10</sub> -Konzentration $> 29$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Zeitraum 2002 - 2006	87
Abb. 31 PM <sub>10</sub> -Konzentrationen am 13.08.2003 in den Untersuchungsgebieten	88
Abb. 32 PM <sub>10</sub> -Konzentrationen am 15.08.2003 in den Untersuchungsgebieten	88
Abb. 33 Ausprägungen Expositionsparameter - Raumbezug BRD (01.04. - 30.09.2003)	89
Abb. 34 Ausprägungen Expositionsparameter - Raumbezug Kreistyp 1 (01.04. - 30.09.2003)	90
Abb. 35 PM <sub>10</sub> -Konzentration vs. Heat Index-Ausprägung, nach Jahreszeiten (2003)	91
Abb. 36 Mortalität im Beobachtungszeitraum	97
Abb. 37 Mortalität nach Altersklassen und Quartal	100
Abb. 38 Häufigkeitsverteilung Mortalität	103
Abb. 39 Mortalität unter Exposition (Heat Index-Werten $\geq 80$ °F)	104
Abb. 40 Das stratifizierte Case-Crossover-Design	106
Abb. 41 Morbidität im Beobachtungszeitraum	108
Abb. 42 Hitzeassoziierte Morbidität im Beobachtungszeitraum	109
Abb. 43 Fallzahl hitzeassoziiierter Diagnosen ( $\geq 80$ °F) in den Quartalen 2 und 3	112
Abb. 44 Häufigkeitsverteilung Morbidität	115
Abb. 45 Häufigkeitsverteilung Morbidität (hohe therm. Belastung)	116
Abb. 46 Korrelation Response- und Expositionsvariablen	118
Abb. 47 Analyseergebnis - Ebene BRD	119
Abb. 48 Analyseergebnisse AT und PM <sub>10</sub> getrennt - Ebene BRD	119
Abb. 49 Analyseergebnisse - Ebene Kreistyp 1 - 9	123
Abb. 50 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9   Variable Heat Index	124
Abb. 51 Streudiagramm Odds Ratios   Variable Heat Index	125

Abb. 52 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9   Variable PM <sub>10</sub>	125	
Abb. 53 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9   Variablenkombination HI & PM <sub>10</sub>		126
Abb. 54 Ausprägung OR - Beobachtungseinheiten im Kreistyp 1   Variable HI	128	
Abb. 55 Ausprägung OR - Beobachtungseinheiten im Kreistyp 2 & 5   Variable HI		129
Abb. 56 Ausprägung OR - Beobachtungseinheiten im Kreistyp 9   Variable HI	130	
Abb. 57 Odds Ratios für alle Beobachtungseinheiten	131	
Abb. 58 Heatmap - Auswahl Kreistyp 1 & 9	132	
Abb. 59 Vorhergesagte Erfolgswahrscheinlichkeiten unter Exposition	134	
Abb. 60 Vorhergesagte Erfolgswahrscheinlichkeiten nach Geschlecht	135	
Abb. 61 Häufigkeitsverteilung log Odds im Histogramm   Variable Heat Index	137	
Abb. 62 Dichteverteilung Odds Ratios   Variable Heat Index	137	
Abb. 63 Analyseergebnis Kontextfaktoren   Gesamtmodell	140	
Abb. 64 Analyseergebnis Kontextfaktoren   finales Modell	141	
Abb. 65 Siedlungsdichte in den Untersuchungsgebieten	143	
Abb. 66 Moran-Scatterplot	145	
Abb. 67 Analyseergebnis - Ebene BRD	148	
Abb. 68 Analyseergebnis 2003 - Ebene BRD	148	
Abb. 69 Analyseergebnis nach Altersklassen (2003)	150	
Abb. 70 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9   Variable Heat Index	151	
Abb. 71 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9   Variable PM <sub>10</sub>	152	
Abb. 72 Analyseergebnis - Hauptstadt Berlin & Landkreis Ostvorpommern	152	
Abb. 73 Häufigkeitsverteilung Odds Ratios im Histogramm   Variable Heat Index	153	
Abb. 74 Odds Ratios für ausgewählte Beobachtungseinheiten	154	
Abb. 75 Verteilung Odds Ratios   Variable Heat Index	155	
Abb. 76 Analyseergebnis   finales Modell	156	
Abb. 77 Der Forschungsprozess im Überblick	158	
Abb. 78 Modellwahl mittels Devianzanalyse   Mortalität	175	
Abb. 79 Devianz-Residuen des GLM - Ebene Kreistyp	178	
Abb. 80 ROC-Kurve   Mortalität	179	
Abb. 81 Streudiagramm Residuen lineares Modell	180	
Abb. 82 Residuen- & Eigenvektorplot	181	
Abb. 83 Modellwahl mittels Devianzanalyse   Morbidität	183	
Abb. 84 ROC-Kurve   Morbidität	183	
Abb. 85 Residuen für das lineare gemischte Modell	184	

## Abkürzungsverzeichnis

Akaikes Informationskriterium	AIC
Apparent temperature	AT
Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung	BBSR
Center for Disease Control and Prevention	CDC
Forschungsdatenzentrum	FDZ
Gastwissenschaftlicher Arbeitsplatz	GWAP
Gesundheitsberichterstattung des Bundes	GBE
Generalisiertes additives Modell	GAM
Generalisiertes lineares Modell	GLM
Generalisiertes lineares gemischtes Modell	GLMM
Gefühlte Temperatur	GT
Deutscher Wetterdienst	DWD
Heat Index	HI
Herz-Kreislauf-Erkrankung	HKE
Herz-Zeit-Volumens	HZV
Intergovernmental Panel of Climate Change	IPCC
Klima-Michel-Modell	KMM
Lineares Modell	LM
Lineares gemischtes Modell	LMM
Local Indicators of Spatial Autocorrelation	LISA
Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung	INKAR
Nordrhein-westfälisches Landesinstitut für den öffentlichen Gesundheitsdienst	lögd
Odds Ratio	OR
Particulate Matter	PM
Physiologisch Äquivalente Temperatur	PET
Predicted Mean Vote	PMV
Principal Component	PC
Principal Component Analysis	PCA
Umweltbundesamt	UBA
United Nations Environment Programme	UNEP
Universal Thermal Climate index	UTCI
Wahrscheinlichkeit	P
World Meteorological Organization	WMO

## 1. Einleitung

Die World Meteorological Organization (WMO) und das United Nations Environment Programme (UNEP) riefen 1988 den Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC oder auch Weltklimarat) ins Leben. WMO und UNEP beauftragten das zwischenstaatliche Gremium mit der wissenschaftlichen Bewertung der Erkenntnisse zum Klimawandel und der Begutachtung potentieller Konsequenzen auf das Ökosystem, die Wirtschaft sowie Gesellschaft. Seinem Auftrag folgend legte der Weltklimarat im Zeitraum 2013 / 2014 den nunmehr fünften Sachstandsbericht vor.

Im Bericht belegt er unzweifelhaft den fortdauernden Klimawandel und den hierfür verantwortlichen anthropogenen Einfluss. Der Weltklimarat dokumentiert erneut die tendenziell steigende globale Durchschnittstemperatur der unteren Atmosphäre, die Erwärmung der Ozeane, das Abschmelzen der Gletscher, das Auftauen der Permafrostböden, den Masseverlust der Eisschilde und das Ansteigen des Meeresspiegels (IPCC 2013). Bei fortdauerndem Wandel verschieben sich Klima- und folglich auch Vegetationszonen, das Niederschlagsregime variiert, Wetterextreme nehmen zu (Zebisch 2005; Dombois/Braun-Fahrländer 2004). Mit dem aktuellen Bericht konsolidiert der Weltklimarat seine grundlegenden Annahmen für die bereits im Sonderbericht 1997 und auch 10 Jahre später im 4. Synergiebericht gegebenen Expertisen wahrscheinlicher Folgeerscheinungen für die regional differenzierten Lebensbedingungen des Menschen (Nahrung, Wasser, Ökosysteme und Gesundheit) (IPCC 2007). Die Auswirkungen des Klimawandels sind auf verschiedenen, interdependenten Ebenen zu betrachten. Ausgehend von seiner globalen Dimension, über die kontinentale, nationale Ebene, der urban oder rural geprägten Umwelt, bis hin zur individuellen Lebenswelt. Zu unterscheiden ist dabei, ob Effekte direkter oder indirekter Natur sind. Direkte Folgen ereignen sich im Zuge extremer Wetterphänomene, wie Hitzeperioden, Unwetterlagen und Starkniederschlägen. Der Mensch steht hier unmittelbar im Kontakt mit der kritischen Exposition. So geschehen im Zuge der Hitzeperiode 2010 über dem Gebiet Russlands. Experten schätzen die Zahl der wegen dieser verstorbenen Menschen auf ca. 55.000. Allerdings kam ein Teil der Opfer nicht allein infolge der Hitzeeinwirkung ums Leben, sondern starb an der hohen Rauchbelastung und/oder Luftverschmutzung. Die Russische Föderation verlor 25 % ihrer Jahresernte und musste die niedergebrannte Fläche von ca. 1 Million Hektar hinnehmen. Den wirtschaftlichen Schaden für die Region beziffert die Weltbank auf 15 Milliarden US \$ (The World Bank 2012).

---

Indirekte Gesundheitsgefahren erwachsen aus veränderten Umweltbedingungen auf regionaler und subregionaler Ebene. Dürren stellen bspw. die ausreichende Verfügbarkeit von sauberem Trinkwasser sowie gewerblich-industriell benötigtem Nutzwasser infrage. Ebenfalls ist die Landwirtschaft bei der Nahrungsmittelproduktion beeinträchtigt. Einerseits wegen Wasserknappheit, andererseits aufgrund größerer Schädlingspopulationen auf den Böden. Zudem verbreiten sich krankheitsübertragende Vektoren in einem für sie günstigen Klima besser. Mit steigenden Vektorpopulationen nimmt das Infektionsrisiko zu (Zebisch 2005; Dombois/Braun-Fahrländer 2004).

Global wirken die Konsequenzen des Klimawandels bereits heute fatal (Global Humanitarian Forum 2009; Jahn et al. 2013). Das Global Humanitarian Forum schätzt, dass ca. 500 Millionen Menschen sehr stark betroffen sind und ca. 300.000 dieser Betroffenen jährlich versterben.

### **Regionale Risiken des Klimawandels**

Verglichen mit wohlhabenden Regionen werden weniger weit entwickelte Regionen ausnehmend betroffen sein. Nach Einschätzung des Weltklimarates könnten bis 2020 in Afrika 75 bis 250 Millionen Menschen an Wasserknappheit leiden. Einige afrikanische Länder müssten im selben Zeitraum mit Ertragseinbußen in der auf Regen angewiesenen Landwirtschaft um bis zu 50 Prozent rechnen. Setzt sich der Wandel fort, dann bedroht der vorausberechnete Anstieg des Meeresspiegels die in tief gelegenen Küstenregionen lebende Bevölkerung. Schutzmaßnahmen kosten den betroffenen Entwicklungsländern dann fünf bis zehn Prozent ihres Bruttoinlandsprodukts. Betroffen wären auch manche küstennahe Megadeltas in Süd-, Ost- und Südostasien. In den dicht besiedelten Regionen steigt mit zunehmendem Überschwemmungsrisiko auch das Risiko auf den Anstieg endemischer Krankheiten und Todesfälle. Für Lateinamerika werden ungünstige Folgen für die Nahrungssicherheit projiziert, da die Ertragsfähigkeit bedeutsamer Nutzpflanzen zurückgehen und die Produktivität in der Nutztierhaltung sinken könnte. Dem entgegen stünde zu erwarten, dass Erträge einzelner Nutzpflanzen wachsen. Insgesamt zeigen die Projektionen die Zunahme des Hungerrisikos in der lateinamerikanischen Region. Für diese stellen Projektionen eine nachweislich eingeschränkte Nutzbarkeit von Trink- sowie Nutzwasser heraus.

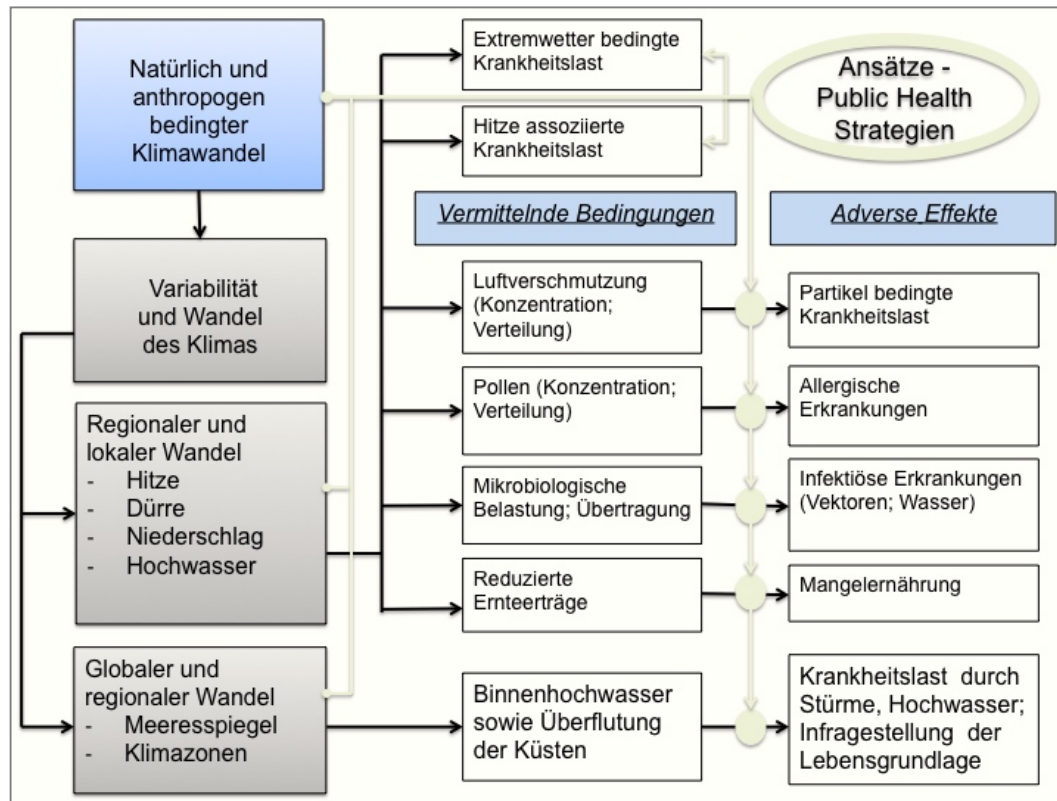
Weiter entwickelte Regionen, wie Europa oder auch Nordamerika, werden aller Voraussicht nach regional unterschiedliche Einbußen ihrer natürlichen Ressourcen

und Güter erfahren. Wasserknappheit betrifft insbesondere den Süden Europas, wobei der Mangel auch zu einer deutlichen Abnahme des Wasserkraft-Potenzials führt.

Neben indirekten gesundheitlichen Risiken, die aus der mangelnden Verfügbarkeit von (Trink)Wasser und Energie resultierten, wird in den Ballungszentren der entwickelten Länder das unmittelbare Gesundheitsrisiko durch Hitzewellen deutlich ansteigen. Direkte Risiken für die menschliche Gesundheit ergeben sich daneben aus den prognostizierten Zunahmen von Überschwemmungen im Binnenland und den Küstenregionen (IPCC 2007).

Abbildung 1 (folgende Seite) zeigt die klimatischen Auswirkungen, untergliedert nach Ebenen und differenziert nach direkten sowie vermittelten Risiken, ergänzt um mögliche Ansatzpunkte spezifischer Public Health Strategien.

Abb. 1 Klimawandelbedingte bzw. Klimavariabilitätsbedingte Risiken



Quelle: in Anlehnung an Heines et al. (2006)

Heines und Kollegen dringen auf Public-Health-Strategien zur Vermeidung bzw. Minderung dieser Risiken. Die Autoren sehen zudem die Notwendigkeit Surveillance-Systeme zu etablieren, die mit den unter Unsicherheit einzuordnenden Anforderungen und systemischen Voraussetzungen der Länder korrespondieren (Heines et al. 2006). Wie aus der graphischen Darstellung hervorgeht, erfordern Ursachen, Variabilität und belegbarer Wandel des Klimas, dessen unmittelbaren sowie intermediär verursachten Risiken aufeinander abgestimmte Vermeidungsstrategien. Public Health als »[...] process of mobilizing and engaging local, state, national, and international resources to assure the conditions in which people can be healthy (...)« (Oxford Textbook of Public Health) kann im Kontext seiner drei bestimmenden Handlungsfelder einen bedeutsamen Beitrag leisten. Diese umfassen: die Beurteilung der gesundheitlichen Situation der Bevölkerung bzw. Bevölkerungsgruppen, wobei vornehmlich epidemiologische Studien erkenntnisgebend sind (*Assessment*), die Ausarbeitung und Kommunikation allgemeiner bzw. spezifischer Politiken (*Policy*), die Gewährleistung einer am Bedarf angepassten und unter finanziellen Gesichtspunkten adäquaten



---

gesundheitlichen Versorgung, die Prävention und Gesundheitsförderung gleichermaßen einschließt (*Assurance*) (Oxford Textbook of public health 2000; Schwarz 2012). Für die den Handlungsfeldern zuzuordnenden Arbeiten sind im Kontext von Klimawandel und Gesundheit interdisziplinär und auch multidisziplinär ausgerichtete Arbeitsansätze unverzichtbar, da die dynamisch miteinander interagierenden Risikofaktoren zu einer kaum identifizierbaren Ursache-Wirkungsbeziehung führen. Hierfür »muss« die Public Health-Forschung nach Xun und Kollegen (2009): »(...) *developing new approaches and the integration of other disciplines such as geography and climatology, with an emphasis on informing policy-making and disseminating knowledge beyond the field.*«

*Die Ableitung von Public-Health-Strategien zur Vermeidung bzw. Minderung gesundheitlicher Risiken benötigt ein Assessment, welches bestehendes Wissen aufgreift und in den von Xun und Kollegen (2009) geforderten Forschungsansatz integriert. Für den Kontext der hitzeassoziierten Gesundheitsrisiken sucht vorliegende Dissertation dem zu entsprechen.*

Dafür werden im Kapitel 2 der theoretische Hintergrund Umwelt und Gesundheit konturiert, Indikatoren für Gesundheit und Krankheit herausgearbeitet und leitende Aspekte der Krankheitsverteilung wie auch Ursachenforschung dargestellt. Das Kapitel 3 hebt die forschungsleitenden Hypothesen mit zugehörigen Forschungsfragen hervor. Im Kapitel 4 erfolgt dann die Darstellung des methodischen Vorgehens. Neben der Beschreibung der Studienpopulationen, der Determination der herangezogenen Expositionen erfolgt hier die Veranschaulichung der statistischen Umsetzung. Die Ergebnisdarstellung nimmt im Kapitel 5 auf die räumliche und zeitliche Verteilung der Zielvariablen Mortalität und Morbidität, die Exposition Hitze und die Ko-Exposition Feinstaub sowie die aus der Analyse hervorgegangenen Ergebnisse Bezug. Das im Kapitel 4 dargestellte Vorgehen wie auch die im Kapitel 5 dargelegten Erkenntnisse werden anschließend im Kapitel 6 diskutiert. Die Dissertation abschließend, führt das Kapitel 7 die gewonnenen Erkenntnisse in einer Schlussfolgerung zusammen.

## 2. Theoretischer Hintergrund

Der Public Health-Schwerpunkt *Umwelt und Gesundheit* repräsentiert das wissenschaftliche Bezugssystem, welches die Realisierung der Forschungsarbeit leitet, die Erkenntnisse rahmt und die sich herausbildenden Prognosen integriert.

Die Thematik Umwelt und Gesundheit ist in das europaweit ausgerichtete Rahmenkonzept der World Health Organization *Gesundheit für alle* eingebunden. Dieses Konzept stellte die WHO bereits 1978 auf der Konferenz »Primäre Gesundheitsversorgung« in Alma-Ata vor (WHO 1978; WHO 2005). Konkretisierende Akzente zur Einnahme einer ökologischen Perspektive auf Gesundheit setzte die WHO auf ihrer »Ersten Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit« 1989 in Frankfurt am Main, bei der sie die *Charta für Umwelt und Gesundheit* verabschiedete (Hornberg/Pauli 2011; Elvers 2005; WHO 1989). Die Charta ist als handlungsleitende Richtlinie für den Zuständigkeitsbereich der Europäischen Union zu verstehen. Sie artikuliert den Anspruch jedes Menschen auf eine Umwelt mit bestmöglichen Voraussetzungen für Gesundheit und Wohlbefinden. Ebenso verpflichtet das Grundsatzdokument alle Menschen zu einem sorgsamem Umgang mit ihrer Umwelt. Die *Charta für Umwelt und Gesundheit* enthält neben Rechten und Pflichten allgemeine Grundsätze, strategische Elemente sowie Prioritäten. Mit dem Grundsatzdokument legt die WHO den europäischen Ländern u. a. nahe, auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene prioritär:

- Umweltprobleme und die Folgen des Klimawandels zu berücksichtigen,
- Stadtentwicklung, Stadtplanung und Stadtsanierung unter gesundheitsförderlichen Gesichtspunkten zu verwirklichen und
- für sichere und unbedenkliche Lebensmittel Sorge zu tragen (WHO 1989).

Diese Bestrebungen fortführend beschlossen die beteiligten Minister im Juni 1994 bei der »Zweiten Europakonferenz für Umwelt und Gesundheit« in Helsinki auf Basis eines ausführlichen Sachstandsberichts den *Aktionsplan Umwelt und Gesundheit* für Europa (EHAPE). Zur Übernahme der formulierten Ziele in nationale Aktionspläne verpflichteten sich die beteiligten Staaten. Demgemäß stellten das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) 1999 das *Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit* (APUG) vor (Hornberg/Pauli 2011; BMG 2005; Elvers 2005). Das Programm strukturiert die Bearbeitung typischer Umweltrisiken unter besonderer Berücksichtigung der Gesundheit von Kindern (BMG 2005). Damit entsprach die

Bundesrepublik Deutschland dem auf der »Dritten Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit« 1999 in London u. a. weitergeführten Thema Umwelt und die Gesundheit von Kindern (Elvers 2005; WHO 1999). In konsequenter Fortsetzung verabschiedete die »Vierte Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit« 2004 in Budapest den *Aktionsplan zur Verbesserung von Umwelt und Gesundheit der Kinder in der Europäischen Region*. Die im Aktionsplan enthaltenen Aspekte: Vorsorge, Chancengerechtigkeit, Armutsbekämpfung und Gesundheitsförderung griff die »Fünfte Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit« 2010 in Parma in einigen Aspekten auf und band diese in sich abzeichnende umfassendere Szenarien ein (WHO 2010a). Die bis heute im Fokus stehenden Problembereiche umfassen: Chancengleichheit in Fragen der Gesundheit, des Klimas und der Umwelt (Hornberg/Pauli 2011; WHO 2010a). An die Staaten richtete die Ministerkonferenz den Appell: »*soziale Gerechtigkeit, Gesundheit und Nachhaltigkeit im Mittelpunkt politischer Handlungskonzepte*« zu stellen (WHO 2010a: 10).

Eine auf der fünften Ministerkonferenz eingerichtete Sonderarbeitsgruppe Klimawandel und Gesundheit arbeitete die zentralen gesundheitspolitischen Herausforderungen für die Folgejahre heraus und entwarf einen Handlungsrahmen für die Europäische Region. Dieser enthält fünf leitende Ziele wie auch angegliederte Maßnahmen. Herauszustellen ist das Ziel: »*Stärkung von Gesundheitssystem, Sozialwesen und Umweltschutz, um ihre Fähigkeit zur Verhinderung des Klimawandels bzw. zur Vorbereitung auf seine Folgen und deren Bewältigung zu stärken*« (WHO 2010b: 5). Hinsichtlich der Zielerreichung empfiehlt die WHO u. a. Maßnahmen zur rechtzeitigen Identifizierung klimawandelbedingter Gesundheitsrisiken und die frühzeitige Sensibilisierung vulnerabler Bevölkerungsgruppen.

Aus den internationalen Anstrengungen erwuchs eine große Anzahl an Maßnahmen und Programmen zum Schutz der Gesundheit gegenüber umweltbedingten Risiken (Hornberg/Pauli 2011; Elvers 2005). Als ein Beispiel ist die *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel* anzusprechen. Mit dieser konzeptuellen Fassung initiierte der Bund einen sukzessiven Anpassungsprozess, in dessen Rahmen die Bundesländer gemeinsam mit anderen gesellschaftlichen Akteuren Risiken bewerten, Handlungsbedarf eruieren, Anpassungsmaßnahmen entwickeln und umsetzen (Claßen et al. 2013; Elvers 2011; Bundeskabinett 2008).

## 2.1 Umwelt im gesundheitswissenschaftlichen Kontext

Ein sozioökologischer Zugang zu Gesundheit berücksichtigt physikalische, chemische, biotische und psychosoziale Umweltaspekte (vgl. Eis 2012; Fehr et al. 2011; Hornberg/Pauli 2011; Fehr et al. 2005; Fehr 1993). Der Umweltbegriff lässt sich dabei auf die Lebens(-Umwelten) des Menschen dimensionieren: Die globale Welt (alles Menschen umgebende), das Heimatland, die Region, urbane bzw. rurale Lebenswelt und das unmittelbare Umfeld von Bevölkerungsgruppen und des einzelnen Menschen. Zu differenzieren ist dabei, ob man dezidiert von einer spezifischen Gruppe, vom »Menschen« oder einer Person spricht, da diese Kategorien die eben angesprochenen Umwelten konstruieren (Eis 2012).

Für solcherart konzeptualisierte Lebenswelten quantifizieren ökologische Studien - ausgehend von den Umweltmedien Boden, Wasser und Luft wie auch Nahrungsmittel und Gegenstände des täglichen Bedarfs - die Auswirkungen sog. Noxen. *»Noxen sind Stoffe und Faktoren aus der Umwelt, welche Organismen schädigen können; dazu gehören sowohl chemische Schadstoffe, physikalische Faktoren wie Lärm und Strahlung sowie mikrobiologische Faktoren wie Bakterien Pilze und Viren; im weiteren Sinne auch soziale Faktoren wie »Crowding« oder sozialer Stress.«* (Fehr et al. 2005: 14)

Traditionelle Disziplinen im Kontext Umwelt und Gesundheit quantifizieren die Wirkungen toxischer Substanzen auf Zellen, Zellsysteme, Organe oder auch Organsysteme. Berücksichtigt wird dabei die sog. umweltmedizinische Wirkungskette, d. h.: Entstehung, Transfer und Wirkung einer Umwelttoxine. Diagnostik und medizinische Behandlung orientieren sich an der Art der schädigenden Substanz (Systematisierung nach Umweltmedien). Zur Quantifizierung von Umwelteinflüssen werden epidemiologische/umweltepidemiologische Konzepte und Auswertungsmethoden herangezogen. Derartige Studien sind immer wieder mit sehr unterschiedlichen wie auch schwierig fassbaren Latenzzeiten, geringen und somit nicht einfach nachweisbaren Effekten sowie Überlagerungen durch Kofaktoren konfrontiert (Fehr et al. 2012; Hellbrück/Kals 2012; Hornberg/Pauli 2011; Knol et al. 2010; Bolte/Kohlhuber 2009; Eikmann/Herr 2006; Fehr et al. 2005).

Anders als bei den zuvor angesprochenen, auf technisch messbaren Expositionen beruhenden Forschungsarbeiten heben gesundheitswissenschaftliche Analysen auch auf die Erforschung von Effekten struktureller Rahmenbedingungen und sozialen

Interaktionsprozessen auf die Wahrnehmungen von Menschen ab. Von wissenschaftlichem Interesse sind dabei die aus persönlichen oder gruppenzugehörigen Wahrnehmungen hervorgehenden psychosomatischen Belastungen (vgl. Eis 2012; Bolte/Kohlhuber 2009). Derartig komplexe Relationen interpretieren die Entstehung von Gesundheit und Wohlbefinden unter einem Umweltbegriff, der *Lebens- und Bezugsraum, Erholungsraum, Ort der Nahrungsmittelproduktion sowie Transport* ist (Eis 2012; Hornberg/Pauli 2011; Fehr et al. 2005; Fehr 1993).

Bei dieser Annäherung verkörpert Umwelt auch die lebensweltlichen Ressourcen, deren Nutzung potenziell konflikthaft ist. Beispielsweise steht die Erhaltung und Anlage der zur Erholung dienenden städtischen Räume der Nutzung selbiger als Wohnfläche entgegen. Hornberg und Pauli (2011: 197) sprechen in diesem Kontext auch von »*environmental bads*« und »*environmental goods*«. Gesundheit resultiert hier aus einem fortwährenden Aushandlungsprozess zwischen Ressourcen und umweltlichen Anforderungen.

Somit greifen die mit der Thematik Umwelt und Gesundheit befassten Disziplinen ihren Gegenstandsbereich aus divergenten - respektive in Teilbereichen einander ähnelnden - Betrachtungsweisen auf. Tabelle 1 gibt einen Überblick zu diesen, ohne Vollständigkeit zu beanspruchen. Mit der Zusammenstellung wird angestrebt, die thematische Breite von Umwelt und Gesundheit im Kontext von Public Health abzubilden.

Tabelle 1 Fachwissenschaftliche Zugänge zu Umwelt und Gesundheit

Disziplinen und Diskurse mit dem Gegenstand Umwelt und Gesundheit	
Umwelthygiene	Nachhaltigkeit
Umweltmedizin	Umweltgerechtigkeit
Umwelttoxikologie	Klimawandel
Gesundheitstoxikologie	Sozioökologie
Humantoxikologie	Umweltsoziologie
Umweltchemie	Umweltpsychologie
Umweltepide miologie	Ökologische Gesundheitsförderung

Quelle: eigene Zusammenstellung

In der linken Spalte der Tabelle sind die Kerndisziplinen mit dem Gegenstand Umwelt und Gesundheit aufgeführt (vgl. Eis (2012) Umweltmedizin → Environmental Public Health-

Medicine → Environmental Health Science/-s). Die rechtsseitige Darstellung zeigt neuere Diskurse, die zur intensivierten Bearbeitung des Problemfeldes beitragen, respektive beitragen (vgl. Hornberg/Pauli 2011).

## 2.2 Umwelt und Lebensbereiche

Die zuvor angesprochene Konzeptualisierung von *Umwelt als Lebens- und Bezugsraum, Erholungsraum, Ort der Nahrungsmittelproduktion sowie Transport* wird im Folgenden mit dem sozialgeographischen Entwurf der Lebensbereiche interpretiert.

*»Lebensbereiche bezeichnen sozio-ökonomische Handlungsfelder, die sich an den Daseins-Grundfunktionen wie Ernährung, Wohnen, Bildung, Arbeit und Erholung orientieren und in denen für individuelles, soziales und politisches Handeln jeweils ein Spektrum an Alternativen für Handlungen zur Verfügung stehen.«* (Fehr 2005: 88f)

Ein mit einem gesundheitlichen Risiko besetzter Lebensbereich lässt sich ähnlich konzeptualisieren wie das sog. Setting im Settingansatz der Gesundheitsförderung. Unter einem Setting wird ein soziales System verstanden, im Rahmen dessen diverse Umwelteinflüsse auf unterschiedliche Bevölkerungsgruppen wirken, und auf dessen Ebene die Voraussetzungen für Gesundheit und Krankheit geschaffen werden (vgl. Altgeld/Kickbusch 2012; Schott/Hornberg 2011; Engelmann/Halkow 2008).

Von diesem »zugangorientierten« Ansatz grenzt Fehr (2005: 89) das »entscheidungsorientierte« Konzept der Lebensbereiche ab<sup>1</sup>, da sich mit diesem fragen lässt, in welchem Bereich welche Entscheidungsalternative besteht. Grundlegend für diesen Zugang ist die Differenzierung in primäre und sekundäre Lebensbereiche, wobei Letztere aus den primären Bereichen (Daseins-Grundfunktionen → DSGF) hervorgehen. Primäre Lebensbereiche nehmen auf die unmittelbaren Bedürfnisse: Ernährung, Wohnen, Arbeit oder Transport Bezug. In diesen erfolgt die Umsetzung energetischer und materieller Ressourcen und die damit verbundene Freisetzung schädigender Stoffe wie auch die Erzeugung von Unrat (sekundäre Lebensbereiche). Morphologisch konstituieren somit technisch-materielle sowie soziale Gebilde den jeweiligen Lebensbereich.

Mit Bezug auf die in den sozioökonomischen Handlungsfeldern der Lebensbereiche zu führenden Aushandlungsprozesse macht Fehr gesundheitsschützende Maßnahmen im Sinne »kleiner« und »großer Alternativen« plastisch. Im Lebensbereich Verkehr

---

<sup>1</sup> Mit dem Konzept der Lebensbereiche trägt Fehr dem Faktum Rechnung, dass das Gut Gesundheit in entscheidendem Maße in Bereichen des Lebens außerhalb des Medizinsystems entsteht. Das Konzept ist im Kontext des ökologischen Quintetts - den »Hauptdimensionen der ökologischen Perspektive« - zu verorten. Das ökologische Quintett wird im Anhang gezeigt.

sind Tempolimits und die Nutzung von Katalysatoren kleine Alternativen. Eine große Alternative im Bereich Energie wäre etwa der komplette Umstieg auf erneuerbare Energien (Fehr 2005).

### **Kreistyp - umweltliche Bezugsebene**

Die umweltliche Bezugsebene zur Analyse von hitzeassoziierten Gesundheitsrisiken repräsentiert neben den 439 kreisfreien Städten, Landkreisen, Kreisen, Stadtkreisen und einer Hansestadt der vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumplanung (BBSR) zur laufenden Raumbewertung als Analyseraster definierte siedlungsstrukturelle Kreistyp<sup>1</sup>.

Das Analyseraster für die Raumbewertung unterscheidet die unten tabellarisch aufgeführten 3 Regionsgrundtypen mit zugehörigen Kreistypen. Die räumliche Ebene zur Bildung der Kreistypen sind nicht die 439 deutschen Stadt- und Landkreise, sondern 363 Kreisregionen. Auf der Ebene der 439 deutschen Stadt- und Landkreise geschieht die Verknüpfung der taggenauen personenbezogenen Mortalitäts- wie auch Morbiditätsdaten. Die statistische Untersuchung erfolgt aus Gründen der Umsetzbarkeit und der visuellen Darstellbarkeit auch auf den Analyseebenen des BBSR.

In der Systematik der siedlungsstrukturellen Kreistypen nehmen kreisfreie Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern den Rang einer Kernstadt ein. Außerhalb der Kernstädte erfolgt die Differenzierung der Kreise und Kreisregionen nach der mittleren Anzahl der Einwohner pro Fläche (s. Tab. unten).

---

<sup>1</sup> Informationen von der Website des BBSR: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbewertung/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html>, letzter Aufruf 20.06.2014

Tabelle 2 Abgrenzungskriterien der Regionstypen

Abgrenzungskriterien	
Regionsgrundtyp 1: <b>Agglomerationsräume</b>	Regionsgrundtyp 2: <b>verstäderte Räume</b>
Kreistyp 1: <b>Kernstädte</b> Kreisfreie Städte über 100.000 Einwohner	Kreistyp 5: <b>Kernstädte</b> Kreisfreie Städte über 100.000 Einwohner
Kreistyp 2: <b>Hochverdichtete Kreise</b> Kreise mit einer Dichte über 300 Einwohner/km <sup>2</sup>	Kreistyp 6: <b>Verdichtete Kreise</b> Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte über 150 Einwohner/km <sup>2</sup>
Kreistyp 3: <b>Verdichtete Kreise</b> Kreise mit einer Dichte über 150 Einwohner/km <sup>2</sup>	Kreistyp 7: <b>Ländliche Kreise</b> Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte unter 150 Einwohner/km <sup>2</sup>
Kreistyp 4: <b>Ländliche Kreise</b> Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte unter 150 Einwohner/km <sup>2</sup>	
Regionsgrundtyp 3: <b>ländliche Räume</b>	
Kreistyp 8: Ländliche Kreise höherer Dichte Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte über 100 Einwohner/km <sup>2</sup>	
Kreistyp 9: Ländliche Kreise geringerer Dichte Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte unter 100 Einwohner/km <sup>2</sup>	

Quelle: BBSR<sup>1</sup>

Zur Spezifizierung der räumlichen Merkmale differenzieren die drei Regionsgrundtypen nach der siedlungsstrukturellen Lage.

Die den Regionstypen untergeordneten Einheiten sind nach ihrem Bezug zu den Grund-

typen definiert.

### 2.3 Entstehungsbedingungen für Gesundheit & Krankheit

In den Gesundheitswissenschaften werden heterogene Theorien über die Entstehungsbedingungen von Gesundheit und Krankheit erörtert (Krämer et al. 2011; Hurrelmann 2006a). Die bevölkerungsbezogene Analyse der Verbreitung von Krankheit setzt eine biomedizinische Konzeptualisierung von Gesundheit und Krankheit voraus (Hurrelmann 2006a; Schwartz et al. 2012; Fehr et al. 2005). Die vorliegende Dissertation internalisiert im Kern eine Public Health-Theorie mit eben dieser biomedizinischen Ausrichtung. Gegenstandsangemessen leitet das Forschungsverständnis der von Badura und von dem Knesebeck (2012: 195) skizzierte »naturwissenschaftlich-somatische Kausalpfad«. Damit verbunden ist der analytische Zugang zu Gesundheit und Krankheit durch die Einbindung in ein professionelles Bezugssystem, mit objektivierbaren Normen und belegten physiologischen Regulations- und Funktionsmechanismen. Krankheiten und Syndrome sind dabei im professionellen medizinischen Bezugssystem definierte Fehlregulationen und Dysfunktionen. Von diesen sind in der ärztlichen Heilkunde derzeit über 30.000 beschrieben. Diesen Krankheiten sind spezifische Symptome zugeordnet, welche über die in physiologischen Spannbreiten definierten äußeren sowie inneren Körperfunktionen hinaus-

<sup>1</sup> Die Systematik wurde der Webseite des BBSR entnommen: [http://www.bbsr.bund.de/nm\\_1067638/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html](http://www.bbsr.bund.de/nm_1067638/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html). Letzter Zugriff am 06.01.2014.



gehen und ursächlichen Faktoren zuzuordnen sind. Unter Syndromen versteht die Medizin symptomatische Befunde, für die mehrere Ursachen in Betracht zu ziehen sind und/oder eine definitivische Ursachenzuschreibung noch aussteht.

Mit der Abgrenzung physiologischer Regelungs- und Funktionszustände von unphysiologischen Erscheinungen geht zwangsläufig eine Dichotomisierung zwischen den absoluten Befunden gesund und krank einher (Klemperer 2012; Schwartz et al. 2012). Insofern wird Gesundheit als »*Abwesenheit von Krankheit*« bestimmt (Göckenjan 1991: 16).

## 2.4 Indikatoren für Gesundheit und Krankheit

Für den hier zu erforschenden »*naturwissenschaftlich-somatischen Kausalpfad*« (Badura/von dem Knesebeck 2012: 195) kommen seinem Charakteristikum entsprechend Indikatoren in Betracht, welche die aufgrund endo- und/oder exogenen Faktoren evozierten Pathologien im Organismus des Menschen dokumentieren (vgl. Schwartz et al. 2012; Hurrelmann et al. 2012; Kreienbrock et al. 2012).

### 2.4.1 Biomedizinische Indikatoren

Die nach dem internationalen statistischen Klassifikationssystem der Krankheiten und zugehörigen Gesundheitsprobleme (ICD-10) diagnostizierten Todes- und Krankheitsfälle eignen sich zur wissenschaftlichen Analyse der Verteilung von Gesundheit und Krankheit in der Bevölkerung (Schwartz et al. 2012; Kreienbrock et al. 2012).

Entsprechend der zuvor angesprochenen medizinischen Dichotomisierung interessiert in Anlehnung an Göckenjan (1991) der unter der Exposition Hitze auftretende Status »*Anwesenheit von Krankheit*« beziehungsweise das Auftreten pathologischer Endpunkte in der Bevölkerung unter Berücksichtigung von Vulnerabilitätsfaktoren (vgl. Schwartz et al. 2012; Gordis 2001).

Das hitzeassoziierte Diagnosespektrum wurde aus der internationalen Literatur abgeleitet (s. Anhang: Hitzeassoziierte ICD-10-Diagnosen). Grundlage hierfür bilden Erkenntnisse zur Krankheitslast durch die Exposition Hitze aus der internationalen Literatur (s. u.). Jene Studien, die Mortalität als Zielvariable nutzen, zeigen primär das Ausmaß des hitzeassoziierten Risikos wie noch die Relevanz von Vulnerabilitätsfaktoren (hohes Alter, Geschlecht). Spezifische, hitzeassoziierte ICD-10-Diagnosen können Studien entnommen werden, welche Morbidität als abhängige Variable definieren. Auch hier wurden Vulnerabilitätsfaktoren herausgearbeitet.

### **Krankheitslast durch die Exposition Hitze**

Für die europäische Region sind hitzebedingte Gesundheitsfolgen bereits belegt. Europa verzeichnete im Juli und August 2003 eine außerordentliche Hitzeperiode, bei der extreme Temperaturen mit Werten über 40 °C im Schatten auftraten. Die Wärmegrade hielten sich in zahlreichen Nächten über 20 °C. In diesem Zeitraum verstarben nach Studienlage europaweit 55.000 - 70.000 Menschen zusätzlich (Bouchama et al. 2003; Dombois/Braun-Fahrländer 2004; Kovats/Kristie 2006; Vandentorren et al. 2006). Das nahezu epidemische Sterbegeschehen veranlasste zahlreiche Länder - darunter Frankreich, Italien, Portugal, Deutschland, Niederlande, Österreich und auch die Schweiz - das Mortalitäts- und Morbiditätsgeschehen für den Sommer 2003 teils systematisch aufzuarbeiten. Zu den Erkenntnissen gibt die Recherche in den Datenbanken MEDLINE, EMBASE, CINAHL und Cochrane Library einen Überblick. In die Betrachtung gingen Mortalität, Morbidität und vulnerable Aspekte ein.

### **Hitzeassoziierte Mortalität**

Im Zuge der Hitzeperiode 1. bis 15. August 2003 konstatierten französische Behörden eine landesweite Übersterblichkeit von 14.802 Fällen. Portugiesische Behörden wurden auf 1.300 - 1.900 Todesfälle aufmerksam, die der Hitzeexposition zuzuschreiben waren. Die Zahl entspricht einer nahezu 37%igen Steigerung der Sterblichkeit (Bouchama 2003; Dombois/Braun-Fahrländer 2004; Zebisch et al. 2005; Nogueira et al. 2005). Garssen und Kollegen (2005) beziffern für die Niederlande die Exzessmortalität auf 1.400 bis 2.200 Tote. Für die im Nordwesten Italiens gelegenen Städte Turin sowie Mailand konstatierten Michelozzi und Kollegen (2005) für über 75-Jährige eine Übersterblichkeit, die 23 % über vergleichbaren Zeiträumen lag und überwiegend Frauen betraf. Ähnlich stellten sich die Situationen in Rom (19 %) und Bologna dar, wobei die Autoren speziell für Rom überdurchschnittliche Raten bei Personen mit niedrigen sozioökonomischen Status (17,8 %) und unterem Bildungsniveau (43 %) feststellten (Michelozzi et al. 2005; Michelozzi et al. 2007). Simon und Kollegen (2005) beobachteten über 3.200 Todesfälle in Spanien. Mit 15 % waren unter diesen Menschen der Altersgruppe 75-85 Jahre und mit 29 % über 85-jährige Personen vertreten. Für England und Wales berechneten Johnson et al. (2005) ebenfalls für den August in 2003 eine abrupt auftretende Übersterblichkeit von 2.091 Toten (16 %). Auch unter den englischen und walisischen Hitzeopfern waren über 75-jährige Menschen überdurchschnittlich vertreten. Allein für London

betrug dieser Anteil 59 % (Hajat et al. 2007; Johnson et al. 2005). Der Hitzesommer 2003 traf Österreich nicht so stark wie etwa Frankreich. Gleichwohl registrierten Hutter et al. (2007) für die Hauptstadt Wien ca. 180 Extratote, von denen nach Ansicht der Autoren 130 durch präventive Maßnahmen vermeidbar gewesen wären. Die hitzeassoziierte Mortalität 2003 in Europa zeigt folgende Tabelle im Überblick.

Tabelle 3 Hitzeassoziierte Mortalität 2003 in Europa

Land / Stadt	Exzessmortalität	Steigerung	Referenzwert
Frankreich	14.802 Tote im Zeitraum 1.-20.8.2003	60% , in Großstädten bis 78%	Durchschnitt der Sterbefälle für den selben Zeitraum aus den Jahren 2000 – 2002
Niederlande	500 Tote im Zeitraum 31.7.-13.8.2003 Sommer 2003: 1400 - 2200 Tote	3 – 5%	berechneter Wert auf Basis eines Regressionsmodells
Österreich	180 Tote im August 2003	ca. 13% (Säuglinge: 24%)	Durchschnittsdaten der Jahre 1998 – 2004
Schweiz	975 Todesfälle	7%	Todesfälle im selben Zeitraum in den Jahren 1990 – 2003
Spanien	3.166 – 4.151 Tote	Sommer: 8-11 % August: 17%	berechneter Wert auf Basis eines Regressionsmodells
Portugal	1.316 Tote Zeitraum 30.7.-12.8.2003	36%	Todesfälle im Zeitraum 15.-28.7.2003
Italien (Rom)	944 Zeitraum Juni - August	19%	Berechnung auf Grundlage der Todeszahlen für den selben Zeitraum der Jahre 1995 – 2002
England	2.091 Tote Zeitraum 4.-13.8.2003	16%	Todesfälle vergleichbarer Zeitraum in den Jahren 1998-2002

Quelle: Anlehnung an Kovats et al. 2008

Hitzeassoziierte Mortalität in Europa im Hitzesommer 2003. Berücksichtigt sind Übersterblichkeit, Angaben zum untersuchten Zeitraum und herangezogenen Referenzperioden.

Für die Bundesrepublik Deutschland liegen Erkenntnisse für die Bundesländer Hessen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg vor. Sie zeigen deutlich erhöhte Sterblichkeit im August 2003. In Frankfurt am Main stieg die Fallzahl von durchschnittlich 14 Toten am Tag auf über 27, wobei am 10. Hitzetag (13. August) ein Peak mit 51 Todesfällen zu verzeichnen war. In Frankfurt stieg der Anteil hoch-

altriger Menschen im Vergleich zur Mortalität der Monate Juni und Juli desselben Jahres in der Gruppe 60-70-Jähriger um 66 % und in der Gruppe der 70-80-Jährigen sogar um 100 %. Die Sterblichkeit der Gruppe über 90-Jähriger erhöhte sich um 149 %. Betroffen waren gleichermaßen häuslich gepflegte und stationär versorgte Menschen (Püllen/Heudorf 2005). Das nordrhein-westfälische Landesinstitut für den öffentlichen Gesundheitsdienst (lögD) stellte einen Vergleich der Mortalitätsdaten aus den Jahren 2001, 2002 und 2003 an, verzeichnete dabei erhöhte Sterberaten für die sommerlichen Monate 2003. Einschränkend bemerkt das Institut, dass präzise Aussagen mit den herangezogenen Sterbedaten nicht möglich seien, da sie nicht taggenau, sondern monatsweise vorliegen. Das *lögD* veranlasste zwei weitere Studien in Regionen mit differierenden geographischen sowie bevölkerungsstrukturellen Attributen. Im Blick stand der Kreis Siegen-Wittgenstein, als vergleichsweise dünn besiedelte ländliche Region und die kreisfreie Stadt Essen. Die Großstadt Essen mit ca. 570.000 Einwohnern und einer Bevölkerungsdichte von 2700/km<sup>2</sup> liegt in der Metropolregion Rhein-Ruhr. Für Essen war Übersterblichkeit deutlicher erkennbar als für den Kreis Siegen. Die Autoren schreiben der Exposition Hitze insgesamt triggernde Effekte zu (Hellmeier et al. 2007). Im Auftrag des baden-württembergischen Sozialministeriums werteten Koppe und Jendritzky (2004) die Mortalitätsdaten für den Zeitraum 01.01.1998 bis 30.09.2003 mit den Variablen Hitzewarnung in 2003 und Todesfolge nach zusammenhängenden Hitzeperioden aus. Die vom Statistischen Landesamt taggenau zur Verfügung gestellten Mortalitätsdaten wurden um interpolierte Bevölkerungsdaten ergänzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Sterbedaten ohne Harvesting Effekt, also ohne vorverlegte Todesfälle dargestellt sind. Die Autoren schreiben dem Harvesting Effekt weniger als ein Viertel der hitzebedingten Todesfälle zu. Tabellarisch wird die Übersterblichkeit nach Episoden und nach Geschlecht getrennt dargestellt.

Tabelle 4 Hitzeassoziierte Todesfälle im Sommer 2003 in Baden-Württemberg

Episode	Hitzeopfer Männer	Hitzeopfer Frauen	Hitzeopfer gesamt
05.05. – 08.05.03	37	22	51 (13)
29.05. – 17.06.03	111	93	152 (8)
23.06. – 30.06.03	97	52	108 (14)
08.07. – 11.07.03	35	2	16 (4)
15.07. – 26.07.03	157	149	249 (21)
01.08. – 24.08.03	532	937	1410 (56)
18.09. – 22.09.03	4	73	51 (10)

Quelle: Koppe/Jendritzky 2004: 12

Übersterblichkeit nach Hitzeepisoden, differenziert nach Geschlecht. In der Spalte Hitzeopfer gesamt stellen die eingeklammerten Zahlen die tägliche

Übersterblichkeit dar. Die auffallenden Unterschiede der nach Geschlechtern

getrennten Todesfallzahlen und der Gesamtzahlen führen die Autoren auf Unsicherheiten der herangezogenen Erwartungswerte zurück (Koppe/Jendritzky 2004).

### **Hitzeassoziierte Morbidität**

Das Morbiditätsgeschehen unter thermischer Belastung wurde für die Vereinigten Staaten von Amerika erforscht: Während der einwöchigen Hitzeperiode 1995 verzeichneten Krankenhäuser in der Metropolregion Chicago 11 % mehr Notaufnahmen (1072 Fälle), überwiegend wegen Hitzschlag, Hitzeerschöpfung, Volumenmangel, Störungen des Wasser- und Elektrolythaushaltes sowie akutem Nierenversagen. Ein Großteil der Übersterblichkeit betraf über 65-jährige Menschen (838 Fälle). Zwar stellten die Autoren keine anderen signifikanten Hauptdiagnosen fest, aber sie identifizierten bei den Nebendiagnosen kardiovaskuläre Erkrankungen (23 %), Diabetes mellitus (30 %) und Nierenerkrankungen (52 %) enorme Zuwächse. Ursächlich für die zunehmende Fallzahl bei kardiovaskulären Erkrankungen scheint den Autoren zufolge, dass vorgeschädigte Herzen durch den Anstieg des Herzzeitvolumens infolge subkutaner Hyperämie bei der Thermoregulation an ihre Leistungsgrenze geraten. Zwar fanden die Autoren keine Erhöhung der Fallzahlen bei Herzinfarkt, hingegen aber bei Angina Pectoris. Wie sie hervorheben, trat Herzinfarkt „ohne nähere Erläuterung“ während Hitzewellen überdurchschnittlich häufig als Todesursache auf. Der Frage nach der Diskrepanz zwischen Mortalitäts- und Morbiditätsdiagnosen wird mit der Annahme begegnet, dass sich bei stark gefährdeten Menschen der Allgemeinzustand rasch verschlechtert, wodurch eine aktive Inanspruchnahme der medizinischen Versorgung nicht mehr möglich sei (Semenza et al. 1999; Kovats/Hajat 2008).

Der Erklärungsansatz für Diabetes mellitus hebt in erster Linie auf die besondere Stoffwechselsituation und deren pathologische Folgen für das Gefäßsystem ab. Vorgeschädigte periphere Gefäße seien unter thermischer Belastung nicht hinreichend in der Lage die für hohe Temperaturen notwendige thermoregulatorische Leistung zu erbringen (Medina-Ramon 2006). Das Ausmaß akuter Nierenversagen führen die Autoren auf Rhabdomyolyse zurück. Hochaltrige Menschen mit Rechtsherzinsuffizienz scheinen zudem unter Hitzeexposition zur Kompensation ihrer Vorschädigung nicht in der Lage, woraus eine Unterversorgung von Nieren und Leber resultieren kann (Semenza et al. 1999; Hansen et al. 2008).

#### **2.4.2 Soziale, ökonomische und räumliche Kontextindikatoren**

Veränderung und Fragilität der familialen Konstellation, des partnerschaftlichen Bezugs, der regionalen Erwerbsstruktur und Arbeitslosigkeit sowie die Ungleichverteilung der Einkommen nehmen auf spezifische Mortalitätsrisiken Einfluss (Schwartz et al. 2012; Starfield 2007; Wilkinson/Pickett 2006; Marmot 2005; Mielck/Bloomfield 2001).

*»Zusammenhänge zwischen sozioökonomischen Bedingungen bzw. zwischen konjunkturell-wirtschaftlicher Lage und Gesundheit können heute als etabliert gelten.« (Schwartz et al. 2012: 58)*

Wie Schwartz und Kollegen (2012) ausführen, sollte diese auf ökologischen Studien basierende Erkenntnis nicht als eindimensionale Korrelation verstanden werden. Treffend interpretiert ist die markante Abhängigkeit zwischen der Nivellierung der inhomogenen Einkommensverteilung und der Steigerung der durchschnittlichen Lebenserwartung anzuerkennen. Durch die Minderung der ungleich verteilten Einkommen scheinen Unterschiede der Lebens-, Wohn- und Arbeitsbedingungen reduzierbar, was augenscheinlich förderliche Konstellationen für das Gesundheitsverhalten hervorbringt (Schwartz et al. 2012; vgl. Starfield 2007; Wilkinson/Pickett 2006).

Analytisch zugänglich ist der Zusammenhang zwischen sozialräumlichen Faktoren und dem auf subjektiven Daten beruhenden Gesundheitsrisiko über die Zusammenführung dieser Statistiken auf der Ebene der 439 deutschen kreisfreien Städte, Kreise, Landkreise, Stadtkreise, Stadtverbände und einer Hansestadt. U. a. für diese Bezugsebene stellt das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung mit den *Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung in Deutschland und in Europa* (INKAR) eine regionalisierte Indikatorenbatterie zur Verfügung (über 600 statistische Kenngrößen). Das teilweise seit 1995 kontinuierlich aktualisierte Datenmaterial beinhaltet in seiner Gesamtheit statistische Auswertungen zu den Themen: »Arbeitslosigkeit, Bauen und Wohnen, Beschäftigung und Erwerbstätigkeit, Bevölkerung, Bildung, Privateinkommen und private Schulden, Flächennutzung und Umwelt, medizinische und soziale Versorgung, öffentliche Haushalte und raumwirksame Mittel, Siedlungs- und Sozialstruktur, Verkehr und Erreichbarkeit sowie Wirt-

schaft und Fremdenverkehr«. Möglich ist dementsprechend die räumliche Klassifizierung der Lebensbedingungen der Menschen zu einem Zeitpunkt, hier bezogen auf die Kalenderjahre 1995 - 2010, sowie die Identifikation raumspezifischer Entwicklungen im zeitlichen Fortgang des genannten Zeitraums. Neben den Zahlen, die überwiegend amtlich-statistisch durch die entsprechenden staatlichen Institutionen erstellt wurden, enthält das Datenpaket auch thematische Karten und Grafiken<sup>1</sup>.

## 2.5 Krankheitsverteilung und Ursachenforschung

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Verteilung von Krankheiten, Krankheitsursachen und Krankheitsfolgen in der Bevölkerung beziehungsweise in Bevölkerungsgruppen ist primäre Aufgabe der Epidemiologie. Ergo ist die Epidemiologie als wissenschaftliche Disziplin ein elementares Arbeitsgebiet der interdisziplinär ausgerichteten Health Sciences (vgl. Dreier et al. 2012). Aus gesundheitswissenschaftlicher Perspektive interessiert für den Aspekt der Krankheitsverteilung das Ausmaß erkrankter Individuen in einer Population ebenso wie die Anzahl neu-erkrankter Individuen zu einem bestimmten Zeitpunkt.

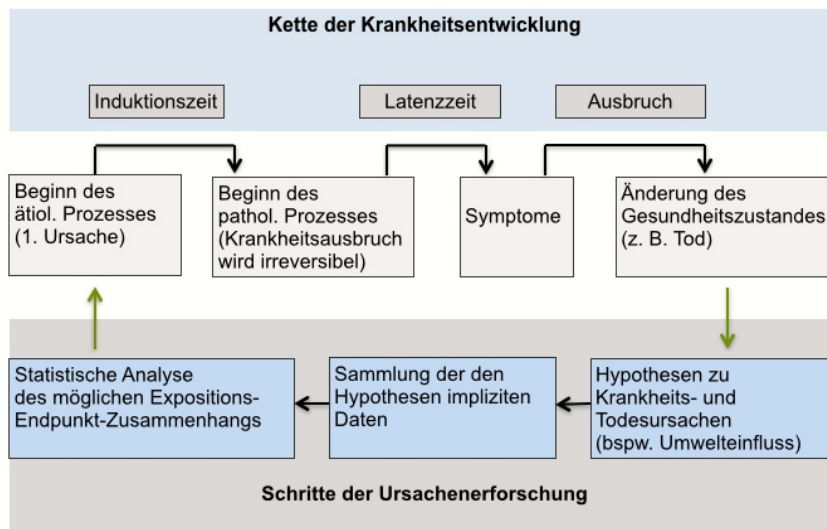
Bei der Betrachtung von zahlreichen Krankheiten steht die Epidemiologie vor der Herausforderung ursächliche Faktoren ohne die Durchführung von experimentellen Studien zu identifizieren, da sich Experimente aus ethischen Gründen verbieten. Experimentelle Studien böten prinzipiell den günstigsten Weg zur Generierung von Erkenntnissen, da sie am »freiesten« von verzerrenden Effekten sind.

Der alternative Gruppenvergleich von Individuen mit diagnostizierter bzw. ohne manifestierte Erkrankung bietet ebenfalls die Möglichkeit zur Einordnung potentieller Risikofaktoren. Zahlreiche Studien zum Einfluss des Nikotinkonsums auf die Entstehung von Lungenkrebs zeigen dies. Gemein ist ihnen ebenso wie anderen Arbeiten der rückblickende Erkenntnisgewinn, ausgehend von der Wirkung auf den (oder einen) ursächlichen Einfluss - und nicht - wie in überwiegend experimentell ausgerichteten Wissenschaften, von der Ursache zur Wirkung (Kreienbrock et al. 2012). Abbildung 2 zeigt die retrospektiv orientierte Ursachenforschung in der Epidemiologie, die von Hypothesen geleitet ist.

---

<sup>1</sup> Das Datenmaterial ist als Einzelplatzlizenz vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung unter: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/INKAR/inkar.html?nn=371936> gegen Gebühr erhältlich.

Abb. 2 Retrospektive Forschung i. d. Epidemiologie



Quelle: In Anlehnung an Hilgers et al. 2007: 237; eigene Erweiterung

Retrospektiv orientierte Ursachenforschung in der Epidemiologie. Dargestellt ist auch die von Hilgers et al. (2007) beschriebene »Kette der Krankheitsentwicklung«, deren Glieder insbesondere bei prospektiv angelegten Studien im Blick stehen.

Die epidemiologische Ursachenforschung orientiert sich generell an einer ätiologischen Krankheitstheorie. In der einschlägigen Literatur sind zahlreiche Theorien über die Entstehung von Gesundheit und Krankheit ausgearbeitet. Sie basieren überwiegend auf dem Grundmodell der allgemeinen Ätiologie. Die Theorien grenzen sich i. d. R. durch die Betonung einzelner Aspekte des Grundmodells voneinander ab (Eis et al. 2012). Da bereits das Grundmodell der allgemeinen Ätiologie sehr anschaulich die möglichen Einflüsse aus der Umwelt auf die Gesundheit respektive Krankheit entfaltet, erscheint es für die Bearbeitung der Problemstellung freilich geeignet.

### Grundmodell der allgemeinen Ätiologie

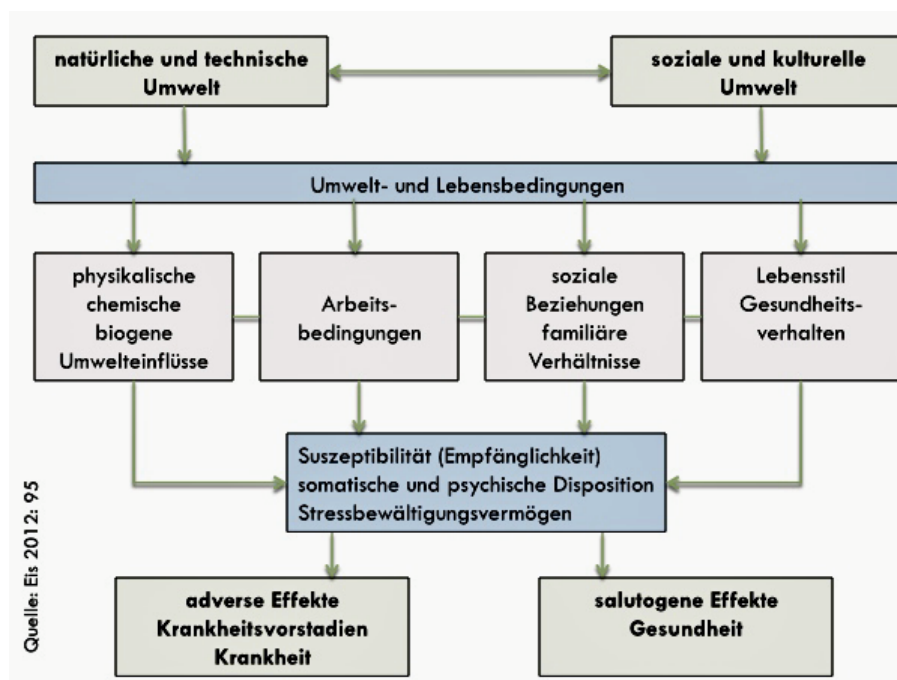
Quantitative Prognosemodelle über die Entstehung von Gesundheit und Krankheit ziehen in unterschiedlicher Tiefe und Breite die Komponenten des profunden Ätiologiemodells heran. Das ätiologische Grundmodell integriert exogene Faktoren (Umweltexpositionen) wie auch endogene Faktoren. Endogene Faktoren schließen dispositive Eigenschaften wie hereditäre Merkmale sowie Vor- und Begleiterkrankungen ein. Eine solche subjektive Prädisposition gegenüber einem krankheitsaus-



lösenden beziehungsweise einem verstärkenden Risikofaktor wird in der Epidemiologie als Suszeptibilität bezeichnet.

Das ätiologische Grundmodell berücksichtigt prinzipiell Konstellationen zwischen suszeptibilitätsbestimmenden Faktoren und Faktoren, welche das Ausmaß der Exposition statuieren. Diese Konstellationen wirken ggf. auf physiologische Regulationsmechanismen und/oder Funktionen, psychosoziale Prozesse, Lebensläufe, Lebenslagen und gesundheits- bzw. krankheitsbezogene Verhaltensweisen (Eis 2012; Bolte/Kohlhuber 2009; Gordis 2001).

Abb. 3 Grundmodell der allgemeinen Ätiologie



Das ätiologische Grundmodell zeigt die abstrahierten Wirkmechanismen zwischen Umwelt- und Lebensbedingungen, Expositions- sowie Suszeptibilitätsfaktoren und den gesundheitlichen Endpunkten Krankheit respektive Gesundheit.

Das ätiologische Grundmodell integriert Expositionsfaktoren und suszeptible Faktoren, die vereint auch unter dem Begriff Vulnerabilität systematisiert werden können. Adaptiert an hitzeassoziierte Gesundheitsrisiken konstituiert sich die subjektive Gefährdung auf den Ebenen: »*physikalische, chemische und biogene Umwelteinflüsse*« sowie »*Suszeptibilität*«. Das assoziierte Risiko lässt sich durch eine statis-

tische Analyse zeitbezogener Expositions-, Mortalitäts- und Morbiditätsdaten erheben.

Wechselwirkungs- und Rückkopplungsprozesse sind in der Systematik ansatzweise abgebildet. Zeitliche Prozesse (bspw. wechselseitig beeinflussende und kumulative Prozesse, Latenzperioden, Anpassungsmechanismen) bleiben allerdings unberücksichtigt (vgl. Eis 2012).

Jede nicht experimentelle epidemiologische Studie steht vor dem Problem zu evaluieren, inwieweit die gewonnenen Ergebnisse einen kausalen Charakter tragen. Damit die festgestellten Assoziationen adäquat eingeordnet werden, ist es nach Rothman und Kollegen (2008) in der Epidemiologie üblich, die Ergebnisse vor etablierten Kausalitätskriterien zu diskutieren.

### **Assoziation und Kausalität in epidemiologischen Studien**

Statistische Analysen setzen in der Epidemiologie u. a. Wirkungen mit Ursachen in Bezug. Eine derartige Beziehung muss allerdings nicht kausal sein, weshalb zunächst von einer »Assoziation« gesprochen wird. Zur Fundierung berechneter Zusammenhänge sind zusätzliche Kriterien zu erfüllen, welche die Evidenz stützen (vgl. Rothman et al. 2008; Rothman/Greenland 2005; Dreier et al. 2012). Kreienbrock und Kollegen (2012: 59 f) erkennen Kausalität zwischen einem Risikofaktor und einem Endpunkt dann an, wenn die drei folgenden Kriterien erfüllt sind:

- Die Exposition geht der Erkrankung zeitlich voraus.
- Eine Veränderung in der Exposition geht mit einer Veränderung in der Krankheitshäufigkeit einher.
- Die Assoziation von Risikofaktor und Krankheit ist nicht die Folge einer Assoziation dieser Faktoren mit einem dritten Faktor.

Diese drei Kausalitätskriterien bieten sich zur Klassifizierung statistischer Ergebnisse aus ökologisch orientierten Studien an. Daher sollen sie später als Gradmesser herangezogen werden.

### 3. Fragestellung

Aus den in den Kapiteln 1.1 und 1.2 ausgeführten Erkenntnissen sind nach Hilgers und Kollegen (2007: 237) im Sinne der retrospektiven Forschung i. d. Epidemiologie zunächst Hypothesen abzuleiten:

#### Forschungsleitende Hypothesen

- a) *Hitzeextreme erhöhen das Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko.*
- b) *Über 65-jährige Menschen sind in besonderem Maße gefährdet.*
- c) *Kleinräumige Charakteristika (sozioökonomisch, alters- und siedlungsstrukturelle, Flächennutzung, etc.) beeinflussen das Risiko.*
- d) *Feinstaub (PM<sub>10</sub>) kann als Kofaktor das Risiko moderieren.*
- e) *Für die Stadt- und Raumplanung ergibt sich die Notwendigkeit, gesundheitsschützende Maßnahmen in ihre Planungen aufzunehmen.*

Nach dem Prinzip der epidemiologischen »Wirkungs-Ursache-Forschung« (vgl. Kreienbrock 2012: 4) ist es dann angezeigt, Belege zur Stärkung oder Falsifizierung der Hypothesen zu generieren. Hierfür sind nachfolgende Fragen zu beantworten:

#### Forschungsfragen

1. *In welchem Ausmaß war (ist) die deutsche Bevölkerung durch die Exposition Hitze gefährdet?*
2. *Liegt eine soziodemografische Risikodifferenzierung vor?*
3. *Inwieweit vergrößert eine Expositionszunahme das Gesundheitsrisiko?*
4. *Welche Kontextfaktoren mit den Schwerpunkten: Soziales, Demografie, Bildung, Gesundheit, Wirtschaft, Wohnen und Flächennutzung beeinflussen das Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko?*
5. *Differieren die gesundheitlichen Risiken in verschiedenen räumlichen Einheiten?*
6. *Inwieweit verstärkt die Exposition PM<sub>10</sub> das gesundheitliche Risiko?*

Eine Forschungsarbeit, welche hierauf Antwort geben möchte, steht vor der Herausforderung, eine multidisziplinäre Perspektive einzunehmen, da nach Xun und Kollegen (2009) die dynamisch miteinander interagierenden Risikofaktoren zu einer kaum identifizierbaren Ursache-Wirkungsbeziehung führen. Vorliegende Dissertation verknüpft demgemäß: *Public Health, Epidemiologie, Klimatologie, Geostatistik sowie Blickpunkte der Stadt- und Raumplanung.*

## 4. Methoden

Im Methodenkapitel wird die Bearbeitung der einzelnen Studienelemente referiert.

Das Kapitel folgt dem Aufbau:

- Darlegung der Ziel- und Studienpopulation
- Indexierung der Exposition Hitze
- Einbezug der Ko-Exposition Feinstaub (PM<sub>10</sub>)
- Geostatistische Aufbereitung der Expositionsdaten
- Einbezug der sozialräumlichen Kontextfaktoren
- Genutzte statistische Analysewerkzeuge

### 4.1 Ziel und Studienpopulation

Die Zielpopulation umfasst die Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland. Zur Studienpopulation zugehörig sind spezifische Mortalitäts- und Morbiditätsfälle unter Hitzeexposition.

Es lässt sich von einer Vollerhebung für das Mortalitätsgeschehen sprechen. Bei den Hospitalisationen trifft dies gleichermaßen zu. Daten der vertragsärztlichen Versorgung wurden nicht berücksichtigt.

Die Merkmale der Studienpopulation, die bei den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder abgefragt wurden, werden nachfolgend zusammengefasst.

#### **Studienpopulation: Mortalität**

Mortalität als Endpunkt wird anhand von Daten der Todesursachenstatistik der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder analysiert. Aus der Todesursachenstatistik wurden sämtliche Todesfälle für den Beobachtungszeitraum 2002 - 2006 abgefragt und die interessierenden Diagnosen selektiert. Die bereits durch die Statistischen Ämter des Bundes und der Länder anonymisierten Erhebungsmerkmale der Todesursachenstatistik sind in der Tabelle unten zusammengefasst. Die Spalte Feldbezeichnung beinhaltet die den Merkmalen zugehörigen Bezeichnungen der Datensatzbeschreibung. Diese ist der Arbeit beigelegt (Anhang Datensatzbeschreibung Todesursachenstatistik)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Die Datensatzbeschreibung der Todesursachenstatistik ist unter:

<http://www.forschungsdatenzentrum.de/datenangebot.asp> frei zugänglich. Zuletzt abgerufen am 31.12.2013.

## Hintergrund

In Deutschland sind Todesfälle meldepflichtig, weshalb für den Untersuchungszeitraum regionalisiert für jeden Bevölkerungsteil nahezu vollständige Datensätze vorliegen. Nach Bedarf können fein gegliederte Daten abgerufen werden, die von Todesfällen mit externen Ursachen und Personen, die zum Zeitpunkt der Exposition nicht in der Untersuchungsregion lebten, bereinigt sind (Kreienbrock et al. 2012; vgl. auch McGregor et al. 2007). Die Todesursachenstatistik gibt die zugrundeliegende Todesursache (Grundleiden) und weitere bestimmende Krankheiten zurück, die mit zum Tode führten. Die Statistik ermöglicht die Kombination medizinischer und demographischer Informationen, da zusätzlich zur Todesursache auch Angaben zum Alter, Geschlecht, Familienstand und Nationalitätsstatus zur Verfügung stehen. Mithilfe des Datenangebots können die gesundheitliche Situation der Bevölkerung abgebildet und Anhaltspunkte für präventive Maßnahmen generiert werden<sup>1</sup>.

Tabelle 5 Erhebungsmerkmale der Todesursachenstatistik

Feldbezeichnung	Merkmal
EF304	Wohnort der/des Verstorbenen – Kreis
EF305	Sterbedatum der/des Verstorbenen – taggenau
EF306	Geschlecht
EF316	Todesursache - Grundleiden ( <i>ICD-Schlüssel – Eingeschränkt auf 3-Steller</i> )
EF317	Todesursache – Ursache der Schädigung ( <i>ICD-Schlüssel – Eingeschränkt auf 3-Steller</i> )
EF320	Sterbealter in Jahren
EF326	Standesamt (Land, Regierungsbezirk, Kreis)

Quelle: Zusammenstellung durch das Statistische Landesamt des Freistaates Sachsen (2013)

Die Daten werden nicht auf der Individualdatenebene, sondern

auf der Ebene der kreisfreien Städte, Landkreise, Kreise, Stadtregionen und einer Hansestadt abgegeben. Die Verknüpfung erfolgt dabei mit Hilfe der Merkmale Sterbedatum und des Wohnortes in den genannten Einheiten durch einen Mitarbeiter des Forschungsdatenzentrums.

<sup>1</sup> Angaben der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Quelle: <http://www.forschungsdatenzentrum.de/bestand/todesursachen/index.asp>. Zuletzt abgerufen am 31.12.2013.

### Studienpopulation: Morbidität

Alle ICD-10-diagnostizierten Fälle wurden als Satz von Erhebungsmerkmalen der Krankenhausstatistik der Jahre 2002 - 2006 abgefragt und anschließend nach Assoziation selektiert. Nachfolgende Tabelle zeigt die Erhebungsmerkmale der Krankenhausstatistik. Die Merkmale stellen das anonymisierte Einzelmaterial der Morbiditätsstatistik durch die Statistischen Ämter des Bundes und der Länder dar. In der linken Spalte sind die Feldbezeichnungen aus der Datensatzbeschreibung aufgeführt. Auch diese ist zur Veranschaulichung für die Patientendaten als Anhang beigefügt<sup>1</sup>.

Tabelle 6 Erhebungsmerkmale der Krankenhausstatistik

Feldbezeichnung	Merkmal
EF3	Geschlecht
EF5	Zugangsdatum (taggenau)
EF8	Sterbefall
EF9UG1	Hauptdiagnose (3-stellig) nach ICD-10 (ohne Fälle mit unbekannter Diagnose)
EF11	Fachabteilung mit der längsten Verweildauer
EF31	Verweildauer in Tagen (zensoriert bei 85 Tagen)
EF33	Alter in Jahren
EF22UG1	Regionalangaben des Patientenwohnortes – Kreis (Bundesland-Regierungsbezirk-Kreis mit führender "0" falls Wohnort in Deutschland/ 3-stelliger Länderschlüssel ohne führende "0" falls Wohnort im Ausland/ 999999 falls Wohnort unbekannt)
EF79U1	Regionalangaben des Krankenhauses – Bundesland

### Die Erhebungsmerkmale

Geschlecht, Sterbefall, Hauptdiagnose, Altersgruppe, Patientenwohnort (Kreisebene) lassen sich mit der Expositionsvariablen über das Zugangsdatum auf der Kreisebene zusammenführen. Die Verknüpfung erfolgt dabei mit Hilfe der Merkmale Zugangsdatum und dem Patientenwohnort → Kreis durch einen Mitarbeiter des Forschungsdatenzentrums.

Quelle: Zusammenstellung durch das Statistische Landesamt des Freistaates Sachsen (2013)

### Hintergrund

Die Daten enthalten grundsätzlich die Krankenhausesfälle gemäß § 3 Nr. 14 KHStatV. Der für jede Patientin bzw. jeden Patienten durch sämtliche deutschen Krankenhäuser auszufüllende Erhebungsbogen ist als Muster der Arbeit angehängt (Anhang Erhebungsbogen Krankenhausstatistik). Mithilfe der Krankenhausstatistik sind Aussagen über regionale Kumulierungen spezifischer Krankheiten möglich.

<sup>1</sup> Der Erhebungsbogen und die Datensatzbeschreibung der Krankenhausstatistik sind unter: <http://www.forschungsdatenzentrum.de/datenangebot.asp> frei zugänglich. Zuletzt abgerufen am 31.12.2013.

## 4.2 Indexierung der Exposition Hitze

Gesundheitswissenschaftliche Forschungsarbeiten integrieren in Ihre Zusammenhangsanalysen zwischen der Exposition Hitze und den gesundheitlichen Endpunkten Morbidität und Mortalität verschiedene Kennzahlen. Wie zum Beispiel die Außenlufttemperatur in Form von Tagesmittel-, Tagessmaximal- und Tagesminimalwerten (Kysely/Huth 2004; vgl. auch Basu 2009; Rocklöv/Forsberg 2008; Basu/Samet 2002). Daneben sind Apparent Temperature (AT) von Steadman, der Heat Index (HI) sowie der Humidex relevante Expositionsparameter (Leone et al. 2013; Basu 2009; Basu/Ostro 2008; Rainham/Smoyer-Tomic 2003; Smoyer-Tomic/Rainham 2001).

Die medizinmeteorologisch ausgerichtete Forschung konzentrierte sich auf die Etablierung von Indexzahlen, welche das Wärmehaushaltsmodell des Menschen möglichst umfassend integrieren: Predicted Mean Vote, Gefühlte Temperatur, Physiologisch-äquivalente Temperatur und Universal Thermal Climate index (Jendritzky et al. 2012; Blazejczyk et al. 2012; Jendritzky et al. 2009; DWD 2007).

Mit den angesprochenen Indizes wurden, ausgenommen Apparent Temperature, Heat Index und Humidex, die im deutschen Sprachraum überwiegend verwendeten herausgegriffen. Wie Epstein und Moran (2006) zeigen, handelt es sich dabei um eine minimale Auswahl der in ihrer Arbeit synoptisch aufgeführten Messgrößen (45 Indizes). Brake und Bates (2002) sprechen in ihrer Publikation sogar von 60 Indizes, die seit den 20iger Jahren des letzten Jahrhunderts eingeführt wurden. Die Indikatorauswahl orientiert sich vor diesem Hintergrund an folgenden Kriterien:

*Der zu wählende Indikator soll klimabedingte Belastung kennzeichnen, den Wärmehaushalt dabei berücksichtigen und praktikabel auf das Bundesgebiet projizierbar sein.*

Die Indexierung von gesundheitlichen Risiken im Kontext klimatischer Einflussfaktoren bedarf also zunächst der Betrachtung meteorologisch-klimatischer Charakteristika. Die anschließend dargestellten meteorologischen Elemente, welche zur Beschreibung der Exposition herangezogen werden, sind als interne Treiber mikrometeorologischer respektive mikroklimatischer Umgebungsbedingungen anzusehen.

Die Thermoregulation - i. w. S. die Möglichkeit zur Abgabe von Wärme an die Umgebung - prädisponiert die thermische Sensitivität des Menschen. Thermo-

---

regulatorische Größen fließen ebendeswegen in die Metriken der Indizes ein oder bilden Referenzpunkte für das den jeweiligen Indikatoren zugrundeliegende Gleichungssystem. Daher stehen nachfolgend auch relevante Mechanismen der Thermoregulation im Blick.

Die mehr oder minder belastenden thermischen Umgebungsbedingungen werden durch Indikatoren in ihrer Ausprägung beschrieben. Bei der Besprechung des gewählten Indikators (hier Heat Index) erfolgt ein Verweis auf die zugehörige Skalierung, d. h., auf die mit dem Heat Index indizierbaren Risikoniveaus.

#### **4.2.1 Meteorologisch-klimatologische Phänomene**

Bei der Betrachtung meteorologisch-klimatologischer Phänomene ist es notwendig, die Termini Wetter und Klima in ihren Bezügen zu verdeutlichen.

Wetter bezeichnet die räumlich eng umschriebenen temporären Verhältnisse in der unteren Atmosphäre. Der Wetterbegriff schließt die Variabilität von Wetterverhältnissen ein. In Abhängigkeit der Jahreszeiten treten charakteristische Konstellationen über mehrere Tage bis zu mehreren Wochen auf. Gesprochen wird bei mehreren Tages- und auch Wochenphänomenen von Witterung. Wetter resultiert aus einem komplexen Zusammenspiel meteorologischer Elemente, deren Parameter bspw. an den vom DWD betriebenen Messstationen in engmaschiger Abfolge erhoben werden (Luftfeuchte, Lufttemperatur, Niederschlag, Windstärke, etc.) (Jahn et al. 2013; Kappas 2009). Die Fachgebiete Meteorologie, Geographie oder auch Geologie können somit auf kleinräumig erhobene Parameter über teils lange Zeiträume (Dekaden) zurückgreifen und in ihre Klimamodelle integrieren.

Aus meteorologischer Perspektive fällt die hier interessierende räumliche Ebene sowie der zeitliche Horizont der Datenerfassung und -nutzung in den Kontext der Mikrometeorologie. Diese Ebene grenzen Meteorologen von der Meso- und Makrometeorologie ab. *Die Relevanz mikrometeorologischer Charakteristika zeigt sich am unmittelbaren Bezug zum »Lebensraum des Menschen«, so Foken (2006: 2).* Die Parameter der Elemente schwanken auf mikroklimatischer Ebene teils deutlich. So unterliegt die Windstärke zwar dem großräumigen Einfluss, variiert jedoch in Abhängigkeit topographischer Eigenschaften. Auf der Mikroskala differieren die Elemente Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit raumübergreifend zumeist nur wenig (Foken 2006).



Werden alle ortsmöglichen Zustände des Wetters in ihrem zeitlichen Fortgang unter Berücksichtigung der Jahreszeiten möglichst umfänglich betrachtet, lassen sich die meteorologischen Phänomene dem Klimabegriff zuordnen. Klimatische Vorgänge unterliegen den wechselseitigen Einflüssen der kontinentalen Landmassen mit den sie umfließenden Weltströmen und der dazugehörigen Erdatmosphäre. Auch die Klimatologie differenziert nach Ebenen (Mikro-, Meso- und Makroklimatologie). Für diese räumlichen Bezüge legt sie Erkenntnisse und Prognosen auf Basis langjähriger Statistiken vor (Jahn et al. 2013; Eis et al. 2013; Kappas 2009; Jacobeit 2007).

Zwangsläufig greifen Klimaangaben auf meteorologische Größen zurück. Dadurch erscheint es bisweilen nicht einfach, die Gegenstände und jeweiligen Sinngehalte voneinander exakt zu trennen. Am ehesten lässt sich eine Unterscheidung treffen, indem die Klimatologie mit ihren weitläufigen Verknüpfungspunkten zu geowissenschaftlichen Ansätzen betrachtet wird (Jacobeit 2007; Foken 2006).

Gegenstände der Mikroklimatologie heben auf mittlere Erscheinungen wie auch periodische Phänomene im Bezugssystem der Mikrometeorologie ab. Von Interesse sind bspw. Zirkulationssysteme der ländlich-maritimen Übergangsregionen oder Berg-Tal-Übergänge mit ihren spezifischen Windsystemen. Mit dem Klima urbaner Räume beschäftigt sich ein eigenes Fachgebiet. Wissensbereich ist u. a. die anthropogene Klimamodifikation, also die lufthygienische Veränderung durch Abwärme und Schadstoffemission (Hupfer/Kuttler 2006). Beide Komponenten tragen zu einer ungünstigen klimatischen Situation während Hitzeperioden bei, indem sie das Auftreten sog. innerstädtischer Wärmeinseln fördern (Rüdiger 2013; Claßen et al. 2013; Buscail et al. 2012; Basara et al. 2010; Fehr 2009; Haines et al. 2006). Anders gesagt entwickelt sich eine Wärmeinsel unter spezifischen Wetter- bzw. Witterungsbedingungen. Sie ist ein Resultat der internen Systemdynamik mikroklimatischer Prozesse (Jacobeit 2007; Foken 2006).

An dieser Stelle wird deutlich, weshalb Jahn und Kollegen (2013) wie auch Eis und Kollegen (2010) gesundheitliche Risiken mit klimatischen Elementen in Relation bringen. Diesem Ansatz ist nachfolgend zu entsprechen, denn mit den Eigenschaften der siedlungsstrukturellen Kreistypen gehen die diesen innewohnenden sozio-geographischen beziehungsweise städtisch-klimatologischen Charakteristika grundsätzlich ein. Aus Public Health-Perspektive böten beide Kontexte teils konvergierende Ansatzpunkte zur Formulierung gesundheitsförderlicher Politiken (vgl. Jahn et al. 2013; Matzarakis 2013).

---

## 4.2.2 Herangezogene meteorologische Daten

Der DWD als teilrechtsfähige Anstalt des öffentlichen Rechts erbringt meteorologische Serviceleistungen u. a. für Nutzer aus den Bereichen Wissenschaft und Wirtschaft. Abgegeben werden Daten sowie Produkte für wissenschaftliche Arbeiten ohne kommerzielle Zielsetzung gegen ein Bereitstellungsentgelt<sup>1</sup>. Eine weitere Aufgabe des DWD besteht in der Herausgabe von amtlichen Warnungen über Wettererscheinungen (BGBl. 1998).

Das bezogene Datenpaket umfasst den Zeitraum 2002 - 2006 und beinhaltet

- tägliches Maximum der Lufttemperatur in C °,
- tägliches Minimum der Lufttemperatur in C °,
- Lufttemperatur im Tagesmittel in C ° und
- Tagesmittel der relativen Luftfeuchte in %

von 547 Messstationen<sup>2</sup>, die das Bundesgebiet flächig abdecken. Ausgewiesen sind Stationsnummer<sup>3</sup>, Stationsort, geographische Breite und Länge der Messstation sowie deren Höhe und Laufzeit.

### Charakterisierung des Datenmaterials

Zur Datennutzung ist es bei diesem Datenmaterial notwendig, die Werte der meteorologischen Elemente mit ihrem numerischen Bezug zur Messstation sowie die Stationskennung mit Ortsbezug zu gruppieren und in geeigneter Form zusammenzuführen.

Die Aufbereitung der Messdaten für die 547 Stationen ergibt für den Beobachtungszeitraum 851.167 Expositionstage<sup>4</sup> mit erhobenen Werten, wobei die Kontinuität der Messtage zwischen den Stationen in manchen Fällen deutlich differiert. Dies begründet der Deutsche Wetterdienst mit unterschiedlich langen Nutzungszeiten einzelner Messstationen<sup>5</sup>. Zu erkennen ist die Spannbreite der Messtage zwischen 1 und 1826

---

<sup>1</sup> Leistungen für Forschung und Lehre, Quelle: <http://www.dwd.de/>, letzter Aufruf 15.10.2014

<sup>2</sup> Anhang: Allgemeine Klimaauskunft DWD

<sup>3</sup> Anhang: Hauptamtliches Stationsmessnetz des DWD

<sup>4</sup> Die Zahl beschreibt die aufaddierten Tage mit Messungen aller Stationen im Beobachtungszeitraum in den kreisfreien Städten, Landkreisen, Kreisen, etc.. Da diese Raumeinheiten nebeneinander betrachtet werden, können die Daten addiert werden.

<sup>5</sup> Anhang: Anzahl Messtage je Messstation

Beobachtungstagen<sup>1</sup> je Messstation (Mittelwert 1557). Sofern der DWD sein Messnetz zwischen 2002 und 2006 durchgängig betrieben hätte, wären 998.822 (547 räumlich verteilte Stationen \* 1826 Beobachtungstage) aufaddierte Tage mit Expositionsmessungen zu verzeichnen gewesen. Wie die Quantile der ausgezählten Lauf-tage der Stationen zeigen, betrieb der DWD das deutschlandweite Messnetz überwiegend über den gewählten Beobachtungszeitraum (25-%-Quantil liegt bei 1491, das 75-%-Quantil bereits bei 1826 Tagen = 5 Jahre).

Nach der Extraktion fehlender Werte (NA) eignet sich der Datensatz zur Aggregation wie auch zur Interpolation. Einerseits mit dem Ziel nicht vorhandene Werte zu ersetzen und zum anderen, um die Relation mit den räumlichen Zentren der siedlungsstrukturellen Kreistypen herzustellen.

Fehlende Werte in Summe aller teilweise genutzten Stationen:

- Maximaltemperatur: 64.039 NAs
- Minimaltemperatur: 64.070 NAs
- Mitteltemperatur: 7.574 NAs
- Luftfeuchte: 0

Überblickend sind die in der Beobachtungszeit auf Messtage bezogenen fehlenden Parameter Messstationen zuzuordnen, die im Norden Deutschlands stehen. Beispielsweise die Stationen: Dörpen und Nordholz im Bundesland Niedersachsen; Itzehoe, Leck, Sankt Peter-Ording und Hattstedt in Schleswig-Holstein oder auch Bergen im Land Mecklenburg-Vorpommern.

### 4.2.3 Thermoregulatorische Bedingnisse

Die Thermoregulation des Menschen umfasst alle autonomen Prozesse wie auch individuellen Handlungen, welche darauf zielen, eine möglichst schwankungsfreie Wärmebilanz im Körperinneren zu gewährleisten. Als homöothermes Wesen ist der Mensch auf ein physiologisches Körpertemperaturniveau von 36,3 bis 37,4 °C angewiesen. Volatilitäten der Körperkerntemperatur bis 1 °C bleiben folgenlos. Sofern der Organismus daran gehindert wird Wärme abzugeben, kann die Körperkerntemperatur aufgrund der durch den Stoffwechsel produzierten Wärme auf ein kritisches Level steigen (über 1 - 1,5 °C). In besonderen Fällen, etwa bei schwerer körperlicher Arbeit oder sportlicher Anstrengung, ist es möglich, dass die Aktivität des Stoffwechsels auf das Fünffache steigt und sich gleichsam die Temperatur um ca.

---

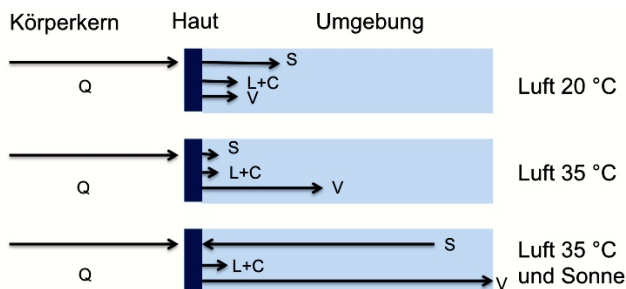
<sup>1</sup> Eine Raumeinheit, bspw. kreisfreie Stadt, wird im Untersuchungszeitraum 2002 - 2006 = 1826 Tage beobachtet.

3 °C erhöht (Thews et al. 2007). In Ruhe produziert der menschliche Organismus stündlich etwa 400 kJ Wärme. Dieser Wert kann sich unter extremen Einflussfaktoren rasch verzehn- bis verzwanzigfachen (Schmidt et al. 2007; Classen et al. 1998). Zur Bilanzierung zwischen der stoffwechselbedingten Wärmeproduktion und der physiologischen Kerntemperatur gibt der Mensch Wärme ab über:

- Konduktion: Ableitung von Wärme über feste bzw. flüssige Körper oder Gase.
- Konvektion: Bei mittlerer Hauttemperatur von ca. 33 °C gibt der Organismus Wärme an die Umgebungsluft ab, sofern ein thermisches Gefälle vorliegt. Vom Körperkern transportiert das Herzkreislaufsystem die Wärme zur Hautoberfläche.
- Strahlung: Über die Haut abgegebene Infrarotstrahlung, unabhängig von leitenden Materialien. Unter Behaglichkeitstemperaturen verliert der Mensch so deutlich unter 50 % seiner Wärme. Die Bekleidung nimmt hierauf Einfluss.
- Evaporation: exokrine Schweißsekretion (s. u.)
- Perspiratio insensibilis: Flüssigkeit diffundiert über Haut, Schleimhaut und Atmung (ca. 500-800 ml/Tag). Freisetzung bis zu 20 % der Gesamtwärme.
- Regulatorische Beeinflussung: Wahl adäquater Kleidung, Aufsuchen kühler Orte.

Ausschlaggebender Mechanismus der Thermoregulation bei höheren Temperaturen ist die exokrine Schweißsekretion, da sie im oberen Temperaturbereich vergleichsweise effektiv zur Wärmeabgabe beiträgt (s. Abb. 4). Sie wird durch sympathisch-cholinerge Impulse vitalisiert. Physiologischerweise liegt die Sekretrate ohne übermäßige körperliche Anstrengungen und unter behaglichen Umgebungstemperaturen bei 100 bis 200 ml täglich. Sportliche Aktivität wie auch Hitzebelastung führen zu einer raschen Steigerung der Schweißabgabe bis auf 2 l/h, vorausgesetzt die umgebende Luft kann genügend Flüssigkeit binden (Schmidt et al. 2007; Thews et al. 2007; DWD 2007; Classen et al. 1998).

Abb. 4 Umgebungsbedingungen und Wärmeabgabe



Quelle: nach Marktl (1993: 56)

Wärmeabgabe unter differierenden Bedingungen.

Die Pfeillängen zeigen die Relationen der Abgabewege.

$Q$  = Wärmebildung im

Körper → Abfluss zur Haut,  $S$  = Wärmestrom durch Strahlung,  $L + C$  = Wärmestrom durch Leitung & Konvektion,  $V$  = Wärmestrom durch Verdunstung von Schweiß

Im Fortgang wärmerer respektive heißer Tage erfolgt die physiologische Adaptation an das thermische Extrem durch veränderliche Regulationsmechanismen des Wärmehaushalts. Menschen tolerieren die belastende Umgebung nun länger bei reduzierter Beanspruchung. Ein Zeichen dieser Anpassung ist früheres Einsetzen der Schweißsekretion bei gleichzeitig gesteigertem Sekretionsvolumen.

Oberhalb dieses physiologischen Adaptationsbereiches erfolgt die Anpassung als körpereigene Abwägung zwischen der Sicherung der essenziellen Körpertemperatur, faktischer Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislaufsystems wie noch tolerierbarer Wasser-Elektrolytausscheidung.

Innerhalb des physiologischen Toleranzbereiches, wie auch darüber hinaus, ruft die Notwendigkeit zur Wärmeabgabe die Steigerung des zirkulierenden Blutvolumens, die Zunahme des Herz-Zeit-Volumens (HZV) ebenso wie den Anstieg der Herzfrequenz hervor. Die zuvor angesprochene Leistungsfähigkeit des exokrinen Systems fängt teilweise die mit einer gesteigerten Herz-Kreislauf-Tätigkeit verbundenen Gesundheitsrisiken ab, bringt jedoch gleichzeitig eigene Risiken mit sich, welche mit einem übermäßigen Wasser- und Elektrolytverlust einhergehen können (Schmidt et al. 2007; Classen et al. 1998). Obschon der Elektrolytgehalt im Sekret während besonders belastender Phasen um das 10fache reduziert ist, können Risiken für vulnerable Bevölkerungsgruppen resultieren (vgl. Basu/Samet 2002; Semenza et al. 1998).

Unabhängig davon ob Menschen gesundheitlich oder auch altersstrukturell vulnerabel sind, präveniert ausreichende Flüssigkeitsaufnahme das hitzeassoziierte Gesundheitsrisiko. Denn adäquates Plasmavolumen bei angemessenem Proteingehalt trägt zur Aufrechterhaltung des venösen Rückstroms unter gestiegenem HZV bei. Reduzierte sich der Rückfluss, folgte daraus die Verminderung des Schlagvolumens (Schmidt et al. 2007; Classen et al. 1998).

#### 4.2.4 Indexierung relativer Belastungsbereiche

Zur Klassifikation thermischer Belastungsbereiche ist es erforderlich, ein Behaglichkeitsklima zu arretieren. Der ANSI / ASHRAE<sup>1</sup>-Standard 55, auf den relevante Indizes zurückgreifen, fasst behagliches Klima als *»that condition of mind which expres-*

<sup>1</sup> American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

*»ASHRAE Standard 55 specifies the combinations of indoor thermal environmental factors and personal factors that produce thermal environmental conditions acceptable to a majority of the occupants within a space.«* (Schiavon et al. 2014)

---

*ses satisfaction with the thermal environment*« zusammen (ANSI/ASHRAE 2014: 2). Die subjektive Komponente des Standards beruht auf zahlreichen Studien unter Laborbedingungen, mit Hilfe derer die ASHRAE-Skala zur Bewertung thermischer Umgebungsbedingungen konzipiert wurde. Behagliches Klima zeigt bei dieser der Wert 0 an, positiv steigende Werte stehen für die Zunahme thermischen Diskomforts, negative entsprechend für die Bewertung kühlerer Umgebungseinflüsse (ANSI/ASHRAE 2014). Der Behaglichkeitsbereich stimmt mit der so empfundenen Bewertung von 80 % der Probandinnen und Probanden überein (sitzend oder bei leichter Aktivität). Komfortabel wäre in den Sommermonaten der Bereich 23 - 27 °C und im Winter 20 - 25 °C. Dabei steht thermischer Komfort für:

- eine ausgeglichene Wärmebilanz,
- die durchschnittliche endokrine Sekretionsrate und
- eine angenehme Hauttemperatur.

In illustrativen Größen spiegelt die Körperkerntemperatur 36,5 bis 37,5 °C wie auch die an den Extremitäten gemessene Hauttemperatur von 30 °C thermischen Komfort wieder. Eine Abweichung von diesen Werten führt zum Empfinden thermischen Diskomforts und in Abhängigkeit der Temperatursteigerung (Senkung der Temperatur) zu objektiven physischen wie auch psychischen Beeinträchtigungen (Epstein/Moran 2006; Jendritzky et al. 2007; Basu/Samet 2002; Fanger 1973).

Im Rahmen seiner Studien berücksichtigte Fanger verschiedene Populationen mit differierenden Aktivitätsniveaus. Da die Bewertung des thermischen Komforts nahezu deckungsgleich ausfiel, erkennt die Medizinmeteorologie an, dass physiologische Parameter bei gegebener Exposition populationsübergreifend nur wenig schwanken, weshalb die identifizierten Komfortvoraussetzungen international anwendbar seien (Jendritzky et al. 2007).

#### **4.2.5 Der Heat Index**

Das hitzeassoziierte Morbidität- und Mortalitätsrisiko fixiert der am Tag ebenso wie in der Nacht auftretende Hitzestress. Zur Modellierung dieses Zusammenhangs sind die oben angesprochenen Indizes weitverbreitet. Sie heben sich durch die Integration einzelner meteorologischer Elemente wie auch der Berücksichtigung latenter Größen des menschlichen Wärmehaushalts voneinander ab (Eis et al. 2010; Jendritzky 2009).

Zur Anwendung kommt hier der von Rothfus und dem National Weather Service (USA) - Southern Region Headquarters (1990) etablierte Heat Index.

Der Heat Index, im Deutschen auch als Hitze-Index oder Temperatur-Feuchte-Index bezeichnet, basiert auf Steadman's Apparent Temperature (Rothfusz 1990; Steadman 1979a/b; Burkart/Endlicher 2011). Er kennzeichnet die gemeinsame Einflussnahme von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit auf das subjektive Wohlbefinden des Menschen.

Steadman (1979b) modellierte für die Apparent Temperature ein Spektrum an behaglichen (unbehaglichen) Umgebungsbedingungen in Abhängigkeit variierender Feuchtigkeitskonzentrationen, verbunden mit hohen bzw. niedrigen Umgebungstemperaturen.

Das Modell der Apparent Temperature basiert auf einschlägigen Studien, mit Hilfe derer Steadman die tabellarisch dargestellten Einflussgrößen integrierte.

Tabelle 7 Einflussgrößen der Apparent Temperature

Parameter	Charakterisierung	Eingangsgröße
Dampfdruck	Umgebungsampfdruck der Atmosphäre	1.6 kPa
menschliche Proportion	Bestimmung der Hautoberfläche	5' 7" tall, 147 pounds
Haut: Abstrahlungs- bzw. Aufnahmeffläche	Verhältnis, welches durch unterschiedliche Oberflächen determiniert ist	0,8
Körpervolumen	Volumen und Dichte	
Bekleidung	lange Hosen und Kurzarm-Shirt werden gesetzt	84% coverage
Kerntemperatur	interne Körpertemperatur	98.6°F
Kerndampfdruck	bestimmt durch Kerntemperatur und Salzgehalt	5.65 kPa
Oberflächentemperaturen und Dampfdrücke von Haut und Kleidung	beeinflusst Wärmeübertragung (Konvektion und Strahlung)	
Aktivität	Bestimmt Stoffwechselleistung; Modellperson geht zu Fuß im Freien mit einer Geschwindigkeit von 3,1 mph	
Windgeschwindigkeit	durchschnittliche Windgeschwindigkeit und Aktivität	5 kts
Widerstand der Kleidung gegenüber Flüssigkeitsabgabe	Menschen tragen bei Hitze dünne Sachen (Mindestbekleidung), daher wird sie vernachlässigt	
Wärmeabstrahlung über die Haut	Integration eines Koeffizienten aus anderen Studien	
Konvektion an der Hautoberfläche	s. o.; bestimmt durch Zusammensetzung der Luft und Windgeschwindigkeit	
Evaporationsrate	durchschnittliche Zusammensetzung im nicht abtropfenden Zustand	

Quelle: Selektiert von Rothfusz (1990) aus Steadman (1984)

Einflussgrößen der AT. Aufgeführt sind die den Größen eigenen Charakteristika (mittlere Spalte) wie auch einige Eingangsgrößen.

Gemeinsam bilden die Parameter dieser »Submodelle« Fundamente der Apparent Temperature-Gleichung (Steadman 1979a/b & 1984; vgl. Burkart/Endlicher 2011; Schoen 2005; Anderson et al. 2013). Es zeigte sich, dass einige Einflussgrößen für den Nutzungsbereich der AT (16 - 50 °C) eng mit der umgebenden Lufttemperatur korrelieren (Dampfdruck, Windgeschwindigkeit, Sonnen- sowie UV-Strahlung). Daraufhin adaptierte Steadman sein prädiktorisches Modell (Steadman 1984). Kritiker erkennen bei Steadman`s Ansatz, dass das meteorologische Element Wind nicht hinlänglich Anerkennung fände. Dies aufgreifend verweist Rothfusz (1990) auf die Berücksichtigung der Luftbewegung über der Haut und die Einflussnahme der Windgeschwindigkeit auf die Atmung. Berechnungsgrundlage sind dabei 5 knots (9,3 km/h). In Abhängigkeit des Gehalts an Luftfeuchtigkeit trägt diese Turbulenz zur Wärmeabgabe über die Atmung bei. Sie wirkt auf den Hautwiderstand wie auch die unmittelbare Grenzschicht über der Haut, beeinflusst demnach das Konvektionsvermögen.

Tabelle 8 Meteorologisches Element Wind in der Apparent Temperature

Parameter	Charakterisierung	Eingangsgröße
Durchlüftungsrate	Wärmeverlust über Atmung	2-12%, abhängig von Luftfeuchte
Hautwiderstand gegenüber Wärmeübertragung	Funktion von Aktivität und Hauttemperatur	
Hautwiderstand gegenüber Feuchtigkeit	Funktion der Dampfdruckdifferenz über der Haut abhängig von Luftfeuchte; nimmt mit steigender Aktivität zu	
Widerstand der Hautoberfläche hinsichtlich Wärmeabgabe	sofern Abstrahlung und Konvektion über Haut zunehmen sinkt der Widerstand	
Widerstand der Hautoberfläche hinsichtlich Flüssigkeitsabgabe	s.o.; abhängig von den Bedingungen der unmittelbaren Grenzschicht über der	

Parameter der AT, welche in Kombination Windgeschwindigkeit, Wärme und Feuchtigkeitsabgabe mitberücksichtigen.

Quelle: Rothfusz (1990)

Forschungsaktivitäten, in deren Fokus die Variablen der Apparent Temperature stehen, zeigen, dass das von Steadman vereinfachte Modell gleiche Ergebnisse für die Sommermonate hervorbringt. Etabliert wurde mit Hilfe dieser der Heat Index. Er wird aufgrund seiner Entwicklungsgeschichte bisweilen mit der Apparent Temperature synonym verwendet (Anderson et al. 2013; Kalkstein/Valimont 1986; Watts/Kalkstein 2004).



### Relevanz des Heat Index

Charakteristisch für den Heat Index (die Apparent Temperature) ist, dass er bei unterschiedlich hohen Temperaturen differierende Luftfeuchtigkeitsniveaus aufnimmt. Unter heißen Temperaturen bedarf es einer in Relation zu niedrigen Temperaturen geringeren Luftfeuchtigkeit zur Ausprägung hoher Werte. Tabelle 9 zeigt diese Abhängigkeit. Die Temperatur ist in Grad Fahrenheit exemplarisch für den Bereich 90 - 105 °F angegeben (32 - 40,5 °C).

Tabelle 9 Temperatur-Luftfeuchterelation des Heat Index

RH (%)	Temperature (° F)															
	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
90	119	123	128	132	137	141	146	152	157	163	168	174	180	186	193	199
85	115	119	123	127	132	136	141	145	150	155	161	166	172	178	184	190
80	112	115	119	123	127	131	135	140	144	149	154	159	164	169	175	180
75	109	112	115	119	122	126	130	134	138	143	147	152	156	161	166	171
70	106	109	112	115	118	122	125	129	133	137	141	145	149	154	158	163
65	103	106	108	111	114	117	121	124	127	131	135	139	143	147	151	155
60	100	103	105	108	111	114	116	120	123	126	129	133	136	140	144	148
55	98	100	103	105	107	110	113	115	118	121	124	127	131	134	137	141
50	96	98	100	102	104	107	109	112	114	117	119	122	125	128	131	135
45	94	96	98	100	102	104	106	108	110	113	115	118	120	123	126	129
40	92	94	96	97	99	101	103	105	107	109	111	113	116	118	121	123
35	91	92	94	95	97	98	100	102	104	106	107	109	112	114	116	118
30	89	90	92	93	95	96	98	99	101	102	104	106	108	110	112	114

Quelle: Spellmann/Bieber 2012: 470

Temperatur-Luftfeuchtigkeitsrelation des Heat Index (Temperatur = x-Achse, Luftfeuchtigkeit = y-Achse - RH = Relative Humidity). Der linke untere Tabellenabschnitt zeigt, dass bei niedrigen Werten beider Elemente auch geringe Indexausprägungen vorliegen. Ganz im Gegensatz dazu ergeben hohe Temperatur- und Feuchtigkeitswerte extreme Scores (oben re.).

Charakteristisch ist beispielsweise, dass bei steigender Feuchtigkeit auch die Bedeckung in der unteren Atmosphäre zunimmt. Infolge dessen reduziert sich der energetische Einfluss der Sonnenstrahlen (Rothfus et al. 1990; Steadman 1979b).

### Thermophysiologische Anknüpfungspunkte des Heat Index

Gut lässt sich die Aussagekraft des Heat Index unter Beachtung der Luftfeuchtigkeit erkennen. Denn mit steigender Feuchtigkeit der Luft sinkt das Wasserabgabevermögen über der Hautoberfläche, die Fähigkeit zur Abgabe überflüssiger Wärme sinkt, die Abkühlung des Körpers ist erschwert und das Risiko zu erkranken steigt (vgl. Schmidt et al. 2007).

Die pathologischen Folgen schwüler Hitze sind vielfach durch die Integration des Hitzeindex in Zusammenhangsanalysen belegt (exemplarisch: Golden et al. 2008;

Smoyer et al. 2000; Semenza et al. 1999). Dabei handelt es sich überwiegend um chronische Krankheiten, deren Verlauf durch die unter Exposition notwendige Regulierung des Wärmehaushalts ungünstig beeinflusst wird (Herz-Kreislaufkrankungen, nephrologische Erkrankungen, etc.). Beschrieben sind ebenso direkte gesundheitliche Folgen (vgl. von Wichert 2004, Semenza et al. 1999). Da deren quantitatives Auftreten im Vergleich zu den vermittelten gesundheitlichen Folgen eher gering ist, stehen sie weniger im Interesse der Forschung. Gleichwohl gibt die für diese gesundheitlichen Folgen formulierte Risikoskala einen guten Hinweis auf die mit den Ausprägungen der Heat Index-Werte verbundenen Risikoniveaus (Tabelle 10). Bei diesen handelt es sich um Prognosen für schattige Umgebungsbedingungen. Unter direkter Sonneneinstrahlung können Werte erreicht werden, die bis zu 15 °F über den in obiger Tabelle *Temperatur-Luftfeuchterelation des HI* liegen (Rothfusz 1998).

Tabelle 10 Risikoniveaus nach Rothfusz

Category	Heat Index	Heat stroke or sunstroke likely
<b>Extreme Danger</b>	130° or higher (54° or higher)	Heat stroke or sunstroke likely.
<b>Danger</b>	105 - 129° (41 - 54°)	Sunstroke, muscle cramps, and/or heat exhaustion likely. Heatstroke possible with prolonged exposure and/or physical activity.
<b>Extreme Caution</b>	90 - 105° (32 - 41°)	Sunstroke, muscle cramps, and/or heat exhaustion possible with prolonged exposure and/or physical activity.
<b>Caution</b>	80 - 90° (27 - 32°)	Fatigue possible with prolonged exposure and/or physical activity.

Quelle: Rothfusz<sup>1</sup> (1998)

Die Skala lässt sich, bei genauer Betrachtung der pathophysiologischen Implikationen, auf die ursächlichen Faktoren hitzeassoziiierter Mortalität und Morbidität übertragen:

Nach den Risikostufen ist Hitzschlag als lebensbedrohliche Gesundheitsstörung (10 bis 20%ige Letalität) die schwerste Form unter den unmittelbaren Gesundheitsfolgen. Bei ausbleibender Intervention führt Hitzschlag aufgrund eines generalisierten Wärmestaus (→ absolutes Missverhältnis der Thermoregulation) zum Exitus. Ursächlich für den Kollaps der Thermoregulation kann neben starker thermischer Belastung auch Schwerarbeit bei Hitze sein. Unter beiden Einflüssen setzt der Schweißsekretionsmechanismus zur Abkühlung des Körperkerns aus, woraufhin sich dessen Temperatur auf über 39 °C erhöhen kann. Bei Ausbleiben medizinischer Not-

<sup>1</sup> National Weather Service USA, Quelle:<http://ehs.okstate.edu/heatindx.htm>, letzter Abruf 12.11.2014; vgl. auch Anhang National Weather Service Heat Index Chart

fallmaßnahmen droht die zentral gesteuerte Thermoregulation gänzlich zu versagen, die metabolische Produktion von Wärme führt dann zum Endzustand.

Weniger gefahrvoll als Hitzschlag ist der Hitzekollaps. Unter den direkten Hitzefolgen erscheint Hitzekollaps am häufigsten bei Personen mit zeitlich verlangsamtem Adaptationsvermögen, insbesondere bei rascher Hitzeeinwirkung in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit und geringer Windgeschwindigkeit. Auch hier kann die Kerntemperatur auf 39 °C steigen. Die Thermoregulation ist besonders gefordert Wärme über die Haut abzugeben. Sofern die zuvor genannte kleinklimatische Konstellation vorliegt, gestaltet sich die konvektive Entwärmung schwierig.

Die dem Gefahrenniveau »Extreme Caution« zugeordnete Hitzeerschöpfung tritt bei langanhaltender körperlicher Anstrengung unter Hitzeeinfluss auf. Der Erschöpfungszustand resultiert aus dem mit der Abgabe von Schweiß verbundenem Flüssigkeits- und Salzverlust. Dieser kann in einem Volumenmangelschock bei gleichzeitiger peripherer Vasokonstriktion enden. Mit der gesteigerten Abgabe von Schweiß erwächst also die Gefahr einer Dehydrierung. Ist die Bilanz zwischen Flüssigkeitsabgabe und Aufnahme derart gestört, dass 3 bis 6 % des Körpergewichts ausgeschwitzt wurde, kommt es bspw. zu motorischer Unkoordiniertheit, Müdigkeit, Urteilsschwäche oder auch Desorientiertheit. Das Ausscheiden von 10 bis 20 % der Körperflüssigkeit führt zu substanziellen Gesundheitsfolgen mit organischen Schäden.

Bereits im beschriebenen Gefahrenbereich »Caution« sind Ermüdungszustände möglich. Betroffen sind vorwiegend ältere Menschen (Schmidt et al. 2007; Mücke/Becker 2008; Klose 2007; von Wichert 2004; Classen et al.1998).

Die von Rothfusz (1998) vorgelegte Skalierung soll das Risikopotential der thermischen Umgebung reflektieren. Es ist durchaus schlüssig, dass die pathophysiologischen Mechanismen der direkten Hitzeerkrankheiten mit jenen Erkrankungen korrespondieren, welche als hitzeassoziiert beschrieben sind (u. a. Herz- Kreislauf- und nephrologische Erkrankungen). Da der Heat Index die verhältnismäßige Hitzebelastung reflektiert, entwickelt er seinen Sinngehalt oberhalb 25 °C (77 °F).

---

### Heat Index (NWS) Algorithmus

Wie Anderson und Kollegen (2013) zeigen, nutzen zahlreiche Studien den Heat Index zur Expositionsmessung. Angewendet werden jedoch heterogene Algorithmen. Die Autoren wählten 21 Algorithmen aus einschlägigen Studien aus und validierten diese unter Zuhilfenahme der von Steadman ursprünglich herangezogenen Daten. Im Ergebnis lieferten fast alle Gleichungssysteme zutreffend-kohärente Ergebnisse. Anderson und Kollegen legen die Nutzung des aus ihrer Arbeit als konsistent hervorgegangenen Algorithmus des USA National Weather Service nahe (Anderson et al. 2013). Insofern fand das von Anderson und Peng (2012) für das Statistikprogramm R vorgelegte CRAN Package: »weathermetrics« Verwendung (Andersen et al. 2013). Die im Package integrierte Gleichung lässt sich wie folgt darstellen (Rothfusz 1990):

$$HI = -42.379 + 2.04901523T + 10.14333127R - 6.83783 \times 10^{-3}T^2 \\ - 5.481717 \times 10^{-2}R^2 + 1.22874 \times 10^{-3}T^2R + 8.5282 \times 10^{-4}TR^2 - 1.99 \times 10^{-6}T^2R^2$$

T = ambient dry bulb temperature (°F)

R = relative humidity (integer percentage)

### Spezifikation der Expositionsperioden im statistischen Modell

Expositionstage- bzw. Expositionsperioden sind sämtliche Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F. Für Umgebungstemperaturen, welche diese Schwelle erreichen respektive darüber hinaus ansteigen, sind Gesundheitsrisiken beschrieben (Rothfusz 1998).

### 4.3 Ko-Exposition Feinstaub (PM<sub>10</sub>)

Die gesundheitlichen Folgen durch die fortwährende oder auch kurzfristige Exposition Feinstaub sind bereits vielfach belegt (vgl. Pinheiro et al. 2014; Shaposhnikov et al. 2014; Ahmadnezhad et al. 2013; Kan et al. 2012; Jahn et al. 2011; Greven et al. 2009; Downs et al. 2006; Bell et al. 2004; Pope et al. 2002; Duhme et al. 1998).

Die Feinstaubkorngröße bedingt die gesundheitliche Beeinträchtigung (Boldo et al. 2006; Bell et al. 2004). Die in die Arbeit aufgenommene Feinstaubfraktion bezieht sich auf Partikelgrößen mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner 10 µm. Feinstaub dieser Klasse wird als PM<sub>10</sub> bezeichnet (PM = Particulate Matter).

PM<sub>10</sub>-Partikel gehen direkt aus emittierten Abgasen und Schadstoffen sowie aus Stäuben, welche aus gasförmigen Vorläuferstoffen entstanden sind, hervor (bspw. aufgrund von Ammoniakemissionen i. d. Landwirtschaft) (Groneberg et al. 2009).

Dringen größere Partikel wie PM<sub>10</sub> in die Nasenhöhle, Bronchien oder Lungenalveolen ein, führt dies zu Reizungen der Schleimhaut oder auch zu lokalen Entzündungen. Ultrafeine Partikel (Durchmesser kleiner 2,5 µm → PM<sub>2,5</sub>) gelangen sogar bis in den Blutkreislauf, woraus kardiovaskuläre Folgeschäden resultieren können (Heinrich et al. 2005; vgl. UBA 2009). Betroffen sind im Besonderen susceptible Menschen (vgl. Pinheiro et al. 2014; Fischer et al. 2014; Xu et al. 2014; Shahmohamadi et al. 2011; Groneberg et al. 2009; Heinrich et al. 2005; Lim et al. 2014). Um sie geht es primär auch bei der Betrachtung von hitzeassoziierten Gesundheitsrisiken. Synergistische Effekte der Expositionen Hitze und der Exposition Feinstaub stehen zu erwarten, weswegen mit PM<sub>10</sub> ein in dieser Hinsicht belegter Vertreter in die Studie eingeht.

#### 4.3.1 Herangezogene PM<sub>10</sub> Daten

Vom Umweltbundesamt (UBA) wurden die mittleren Tageskonzentrationen für die Feinstaubfraktion PM<sub>10</sub> bezogen.

Das Umweltbundesamt und die Bundesländer ermittelten/ermitteln deutschlandweit an über 1600 Messstationen<sup>1</sup> die Belastung der Luft mit Schadstoffen. Dabei realisieren die Anlagen unterschiedliche Messprogramme. Die Stationen registrieren die

---

<sup>1</sup> Umweltbundesamt, Quelle: <http://www.env-it.de/stationen/public/open.do>, letzter Aufruf 01.03.2015

Werte der Umweltmedien: Feinstaub, Kohlenmonoxid, Ozon, Schwefel- und Stickstoffmonoxid, ggf. mit inhomogenen Verfahrensweisen.

Taggenau sind die Werte der genannten Medien kostenfrei abzufragen. PM<sub>10</sub>-Daten liegen für den Zeitraum 2002 - 2006 von 354 - 452 Stationen vor (keine durchgängigen Messungen). Manche Anlagen quantifizieren die Partikellast gleichzeitig mit 2 Verfahren. Die betreffenden Stationen erscheinen im Rohdatensatz doppelt. Sie nutzen nach Auskunft des UBA einmal das neuere europaweit einheitlich eingesetzte Referenzverfahren und weiterhin das durch einen hohen Anteil der Messstationen umgesetzte herkömmliche Messverfahren. Sofern nach dem Referenzverfahren gemessene Daten vorliegen, empfiehlt das UBA die Nutzung dieser Werte. Sie unterscheiden sich jedoch teils deutlich von den ebenda herkömmlich dokumentierten Zahlen. Da die Nichtnutzung der ausschließlich konventionell erhobenen Daten eine eher dünne deutschlandweite Abdeckung böte, wurden PM<sub>10</sub>-Mittelwerte für die Stationen mit dualisierten Datenreihen gebildet. Die Werte von Messstationen, die nur nach der alten Methode Daten erhoben und die gemittelten Werte jener Stationen mit beiden Messverfahren gingen dann gemeinsam in die Interpolation (unten) ein.

Anders als bei dem vom Deutschen Wetterdienst vorgelegten Datenpaket wurde der PM<sub>10</sub>-Datensatz nach den Beobachtungsjahren 2002 - 2006 getrennt abgegeben. Zu entnehmen sind der Tabelle unten die Anzahl der nahezu durchgängig betriebenen Stationen in den jeweiligen Jahren. Das UBA charakterisiert den Standort der Messstation nach: rural, suburban und urban. Die zahlenmäßige Verteilung auf diese Klassen ist ebenfalls angegeben.

Tabelle 11 Anzahl der herangezogenen PM<sub>10</sub>-Messstationen 2002 - 2006

	Beobachtungszeitraum				
	2002	2003	2004	2005	2006
Anzahl Stationen	354	355	393	429	452
davon rurale Region	70	76	82	79	77
davon suburbane Region	89	93	93	96	102
davon urbane Region	195	186	218	254	273

Quelle: UBA, eigene Zusammenstellung

Die unterschiedlich langen Laufzeiten einzelner Stationen sowie der hohe Anteil fehlender Werte bei zahlreichen Messstationen standen einer direkten Zusammenführung der Zeitreihen entgegen. Die taggenaue Zuordnung der Feinstaubexposition zu den kreisfreien Städten, Landkreisen, Kreisen, Stadtverbänden und Hansestädten, die die Bezugsebene der statistischen Analyse bilden, geschah erst nach der unten

beschriebenen Interpolation. Sie ermöglichte die Ersetzung der NA's und die treffende Verortung der Feinstaubexposition in den Untersuchungsgebieten.

### **Spezifikation der Ko-Exposition im statistischen Modell**

Die PM<sub>10</sub>-Werte gehen unabhängig von der Konzentrationshöhe in die Studie ein, da sie taggenau je Untersuchungsgebiet (kreisfreie Städte, Landkreise, Kreise, Stadtverbände, etc.) selektiert werden. Die taggenaue Selektion orientiert sich am Auftreten von Heat Index-Werten  $\geq 80$  °F und den zu diesen Expositionstagen durch das Case-crossover-Design auszuwählenden Kontrolltagen.

---

## 4.4 Geostatistische Aufbereitung der Expositionsdaten

Sowohl die vom Deutschen Wetterdienst abgegebenen meteorologischen Daten als auch die vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellten Feinstaubdaten sind punktuell, d. h. nicht flächendeckend über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, und teilweise unregelmäßig erfasst. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die fehlenden Werte für die nicht beziehungsweise nicht durchgängig beprobten Beobachtungsgebiete (kreisfreie Stadt, Landkreis, Kreis, Stadtverband, etc.) zu bestimmen.

Die Geostatistik stellt hierfür verschiedene Verfahren zur räumlichen Interpolation bereit. Diese greifen auf nicht-statistische Ansätze wie etwa die inverse Distanzwichtung oder auf aufwändigere statistische Prozeduren zurück (vgl. Bivand et al. 2008).

Mit Vertretern letztgenannter Verfahren dürfen Werte bestimmt werden, die zwischen beprobten Messpunkten (sogenannten Stützpunkten) liegen. Sollen Werte ermittelt werden, die außerhalb der räumlichen Stützpunktstruktur verortet sind, ist von Extrapolation zu sprechen (Bollman/Koch 2001). Interpolierende Schätzverfahren unterscheiden sich in ihrer methodischen Ausrichtung teils deutlich. Damit einher gehen heterogene Rechenintensitäten, die ggf. über das nutzbare Verfahren mitentscheiden (vgl. Pebesma/Gräler 2014).

Ein prominentes Interpolationsverfahren ist das nach dem südafrikanischen Bergbauingenieur D. G. Krige benannte Kriging (LABO 2003). Es umfasst mehrere Interpolationsansätze. Im Kern schätzen diese die interessierenden Parameterausprägungen mittels linearen Gleichungssystemen, welche räumlich gewichtete Stützpunktwerte integrieren. Hierbei besteht die Möglichkeit, Kennzahlen zur Validität der Werte abzurufen (Bivand et al. 2008; Bollman/Koch 2001; Armstrong 1998).

### 4.4.1 Variogrammschätzung & Kriging

Um Raumdaten geostatistisch verarbeiten zu können, ist das Maximum der »schwachen Stationarität« maßgebend. Es besagt, dass die Bindung räumlicher Daten durch die Distanz ihrer Erhebungsorte zueinander und nicht ihrer faktischen Verortung bestimmt wird. Die Ausprägungen der Werte von Raumdaten unterliegen zudem einem Zufallsprozess (Bivand et al. 2008; Bollman/Koch 2001; Menezes et al. 2005; vgl. Banerjee et al. 2014).



### **Variogrammschätzung**

Wie zuvor angesprochen, ist es mittels Krigesystem (lineares Gleichungssystem) möglich, für jeden Punkt im Raum einen Wert zu schätzen, wenn dieser Punkt innerhalb der räumlichen Stützpunktstruktur liegt.

Die Distanz der Stützpunkte zum Ort der Interpolation wird dabei mit der Kriging-Gewichtung berücksichtigt (LABO 2003; Armstrong 1998). Geostatistisches Werkzeug zur Ermittlung der Kriging-Gewichte ist das Variogramm (Bollman/Koch 2001; vgl. Bivand et al. 2013). Mit der Schätzung des Variogramms ist demgemäß ein bedeutsamer Arbeitsschritt zu thematisieren (LABO 2003). Die Variogrammschätzung erfolgt zweischrittig. Ein empirisches Variogramm liefert die notwendigen Erkenntnisse zur Auswahl einer geeigneten Schätzfunktion für das theoretische Variogramm.

Das empirische Variogramm ordnet die Stützpunkte (Ort der Messstationen mit erhobenen Werten) in  $n$  Schrittweiten ein. Berechnet werden die durchschnittlichen Varianzen der Werte an den jeweiligen Schrittweiten. In Abhängigkeit ihrer Entfernung zum Ziel der Interpolation geben die Varianzen ein funktionales Gewicht im Variogramm. Dem empirischen Variogramm sind drei Kennwerte zu entnehmen: Range (Reichweite), Sill (Grenzwert) und Nugget (Rauschen).

Der Range zeigt die räumliche Distanz der Korrelation des Interpolationsgegenstandes an. Nur Werte, die miteinander korrelieren, dürfen in die Interpolation einbezogen werden. Hinter dem Range verortete Parameter sind aufgrund ihrer größeren Entfernung unabhängig voneinander.

Der Sill gibt mit dem Endpunkt des Range den Extremwert des Variogramms zurück. Als Nugget ist die durch das Modell nicht erklärte Varianz zu verstehen. Ursächlich können Messfehler oder auch eine ungenügende Autokorrelation der Stützpunkte wie noch Mikrodifferenzen sein (Bivand et al. 2013; LABO 2003; Armstrong 1998).

Das empirische Variogramm erlaubt die Selektion der für das theoretische Variogramm heranzuziehenden Schätzgleichung. Eine Vielzahl geostatistischer Grundfunktionen kommt hierfür in Betracht. Allesamt beschreiben mögliche Wechselwirkungen von räumlich gebunden Daten (LABO 2003). In Abhängigkeit der Passung, also der Übereinstimmung von berechneten Werten mittels empirischer und theoretischer Variogrammfunktion, kann aus sphärischen, exponentiellen, linearen, gaußschen und zahlreichen weiteren Funktionen gewählt werden (Banerjee et al. 2014; Bivand et al. 2013). Die im geplotteten Variogramm stimmigste Funktion wird letzt-

---

endlich an die vorliegenden Daten angeglichen (Pebesma/Gräler 2014; Bivand et al. 2013).

### **Ordinary und simple Kriging**

Das Prinzip des hier genutzten ordinary Kriging lässt sich vor dem Hintergrund des simple Kriging gut veranschaulichen. Simple Kriging meint, dass ein Erwartungswert für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet wird. Dieser resultiert als Mittelwert aus den bekannten Parametern. Er wird auch für die unbeprobten Punkte gesetzt. Abgeschätzt wird mittels simple Kriging, in welchem Umfang dieser Schätzer vom wahren Wert abweicht. Nach Bereinigung der Abweichung liegt ein statistisch fundierter Parameterwert vor.

Ein globaler Mittelwert ist für das ordinary Kriging nicht elementar. Punktuell schätzt das Verfahren einen Mittelwert, unter dessen Verwendung das zuvor angerisene Prinzip mit Einbezug der durch das Variogramm erfassten Gewichtung realisiert wird. Voraussetzung zur Umsetzung des »wichtigsten« Krigingvertreter sind konstante Mittelwerte (Stationarität) und eine vernachlässigbare Drift (kleinräumige Fluktuation) (Bollman/Koch 2001).

Zur Anwendung kommt hier mit dem sog. Punktkriging eine ordinary Kriging-Sonderform des Block- bzw. Volumenkriging (Bollman/Koch 2001; vgl. Pebesma 2004).

Die Schritte zur Interpolation mittels Kriging im Überblick:

- Entwicklung eines experimentellen Variogramms anhand gegebener Daten
- Visualisierung der Varianz → Variogrammplot
- Bewertung und Angleichung an eine theoretische Variogrammfunktion
- Kriging mit theoretischem Variogramm → Krigingmethode ist bestimmt durch Verteilung der Daten und des Rechenaufwands
- Validierung der Schätzdaten

#### **4.4.2 Interpolation der Expositionsdaten**

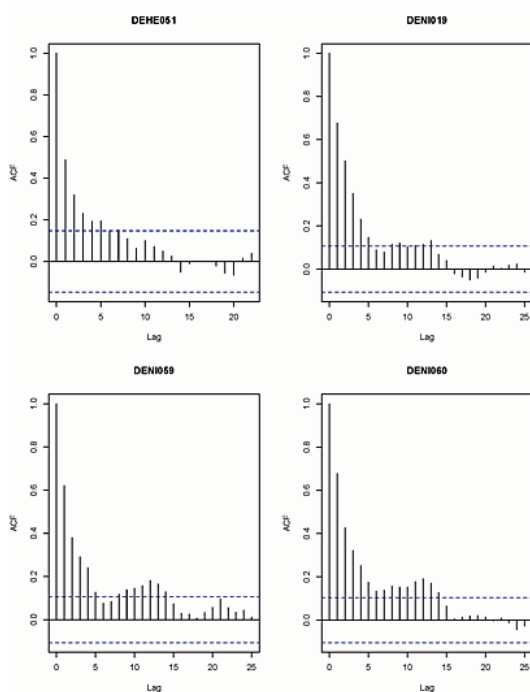
Zur statistischen Datenverarbeitung mit der Programmiersprache R stehen zahlreiche Packages mit diversen Krigingmethoden zur Verfügung. Für Daten mit Raum- und Zeitbezug (dreidimensionale Datenstruktur) eignen sich Prozeduren aus dem Package *gstat: Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modelling, Prediction and Simulation*, die in das Package *spacetime: Classes and Methods for Spatio-Temporal*

*Data* integriert sind (Pebesma 2004; Pebesma 2012; Pebesma/Gräler 2014; Bivand et al. 2013). Gstat hält die Krigingvarianten: universal, ordinary, simple; univariable oder multivariable Kriging bereit. Im spacetimepackage sind Methoden für das ordinary Kriging implementiert. Speziell für das räumlich-zeitliche Kriging erlaubt spacetime die Nutzung eines richtungsunabhängigen (anisotropen) Schätzverfahrens für Raumbezüge, welches die realen Distanzen der Stützpunkte aufnimmt (Pebesma/Gräler 2014; Pebesma 2004).

Voraussetzungen, Umsetzung, Ergebnisse, Ergebnisvalidierung und abzuleitende Konsequenzen werden nachfolgend mit beiden Expositionen (Feinstaub und Hitze) nicht stringent dargestellt. D. h., beispielhaft wird entweder Feinstaub oder Hitze beziehungsweise auch beide Expositionen thematisiert.

Eine grundsätzliche Voraussetzung zur Interpolation von Raumdaten ist in der räumlichen Bindung (Korrelation) der als zufällig aufgetretenen Messwerte zu sehen (Bivand et al. 2008). Für beide Expositionsstränge erfolgten Kontrollen hierauf. An ausgewählten Feinstaubdaten für das Jahr 2002 lässt sich dies veranschaulichen.

Abb. 5 Autokorrelation ausgewählter PM<sub>10</sub>-Werte



Quelle: UBA, eigene Darstellung

Einen ersten Überblick über die räumlichen Korrelationen geben 4 intentional herangezogene Stationen. Gut zu erkennen ist die maximale Autokorrelation bei Lag 0, was man erwarten darf (Time-Lag = Tage). Auch der Rückgang im Zeitverlauf ist in der Tat typisch.

Die räumliche Autokorrelation wie auch Kreuz-Korrelation soll folgend an 7 eher willkürlich ausgewählten Stationen weiter verdeutlicht werden.

Willkürlich meint hier, die Auswahl erfolgte nach Stationsnummern bei verblendeten Stationsnamen. Bei der Beurteilung interessieren auch die räumlichen Distanzen der Stationen zueinander, da diese für die Stärke der Korrelation mit ausschlaggebend sind. Anhand einer Distanzmatrix lassen sich diese darstellen.

Tabelle 12 Distanzmatrix für 7 Messstationen

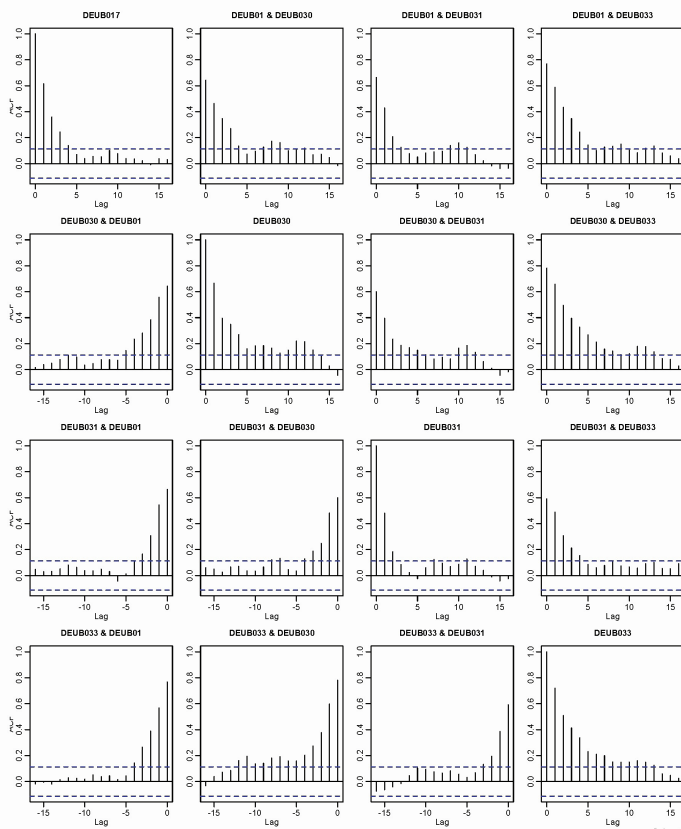
	DEUB017	DEUB030	DEUB031	DEUB033	DEUB035	DEUB039	DEUB042
DEUB017	0,0	322,2	201,5	148,4	122,6	265,8	222,5
DEUB030	322,2	0,0	284,1	180,0	260,0	145,1	500,7
DEUB031	201,5	284,1	0,0	151,4	84,5	150,5	421,1
DEUB033	148,4	180,0	151,4	0,0	90,1	127,3	354,4
DEUB035	122,6	260,0	84,5	90,1	0,0	160,4	345,1
DEUB039	265,8	145,1	150,5	127,3	160,4	0,0	480,4
DEUB042	222,5	500,7	421,1	354,4	345,1	480,4	0,0

Quelle: UBA, eigene Darstellung

Distanzmatrix für 7 ausgewählte UBA-Messstationen. Zu erkennen ist

der teils große Abstand zwischen einzelnen Stationen, der bei der Interpretation des folgenden Plots beachtenswert erscheint. Der Plot zeigt die Auto- und Kreuzkorrelationen für die Werte der ersten drei von den sieben ausgewählten Stationen, ließe sich also entsprechend fortführen.

Abb. 6 Auto- und Kreuzkorrelation der PM<sub>10</sub>-Daten



Quelle: UBA, eigene Darstellung

Ebenso wie bei den vier zuvor geplotteten Werten, autokorrelieren die Werte bei Lag 0 maximal.

Time-Lag umfasst ebenfalls Tage.

Kreuzkorrelationen sind für die entsprechenden Stationswerte bei positiven als auch negativen Lags zu verzeichnen.

Interpretativ leitend sind nach Pebesma und Gräler die Grundsätze (2014: 3):

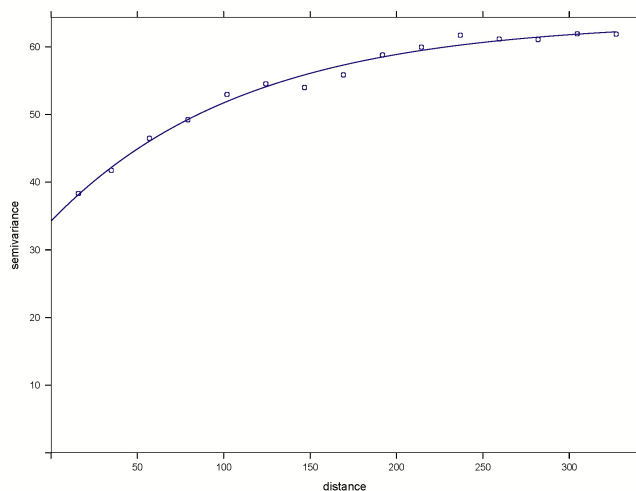
- Autokorrelation für Lag 0 ist immer maximal
- Kreuzkorrelation für Lag 0 ist nicht zwangsläufig absolut
- Kreuzkorrelation kann, muss jedoch nicht asymmetrisch auftreten.

Wie die Abbildung zeigt, korrelieren die Feinstaubwerte symmetrisch und durchaus deutlich. Die flächige Autokorrelation zufällig erhobener  $PM_{10}$ -Werte darf angenommen werden. Ergo ist es möglich, fehlende Werte zu interpolieren.

Bei den meteorologischen Daten erfolgte eine ebensolche Betrachtung mit identischer Schlussfolgerung.

Dem eingangs gegebenen Überblick zur Umsetzung des Kriging folgend ist für die Interpolation ein empirisches (experimentelles) Variogramm zu erstellen. Abbildung 7 zeigt den Variogrammplot für die Tageswerte von 100 zufällig aus dem Feinstaubdatensatz 2002 ausgewählten Stationen.

Abb. 7 Empirisches Variogramm für den  $PM_{10}$ -Datensatz



Quelle: UBA, eigene Darstellung

Empirisches Variogramm mit den  $PM_{10}$ -Werten von 100 per Zufall ausgewählten Stationen. Mit der eingelegten Kurve wird bereits die Funktion für das theoretische Variogramm gefunden.

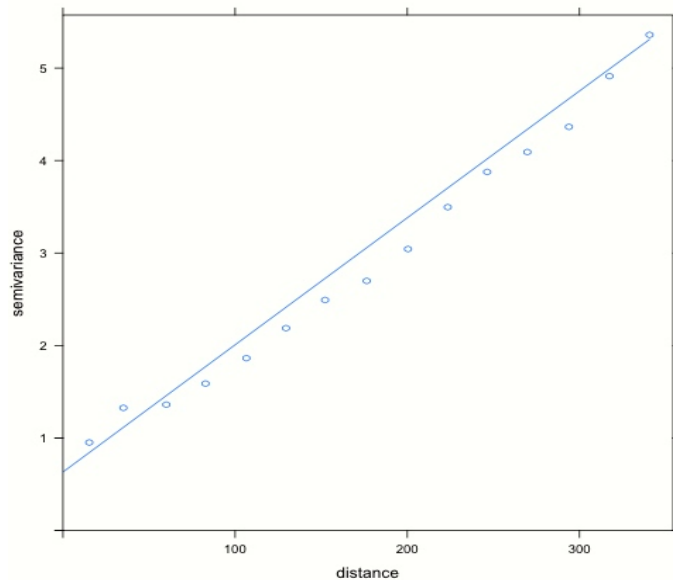
Nach dem Fit(ting) der empirischen Daten mit der gewählten

Funktion zeigt das Modell einen Nugget = 34,2 und Range = 111,7.

Zur Entstehung des Nuggets darf angenommen werden, dass hohe Distanzen und ggf. fehlende Werte einen ungünstigen Effekt ausüben. Zudem schwanken die Feinstaubkonzentrationen zwischen den Regionsstandorten der zufällig ausgewählten Anlagen wahrscheinlich deutlich. Die Funktion beschreibt die Varianz recht gut.

Abbildung 8 gibt die geplotteten Werte für 100 zufällig ausgewählte DWD-Stationen mit ihren zugehörigen Tageswerten für die Maximaltemperatur wider. Die Selektion geschah aus dem gesamten Datensatz 2002 - 2006.

Abb. 8 Empirisches Variogramm für die Maximaltemperatur



Quelle: UBA, eigene Darstellung

Variogrammplot für die täglichen Maximaltemperaturwerte von 100 zufällig aus dem DWD-Datensatz 2002 - 2006 ausgewählten Messstationen.

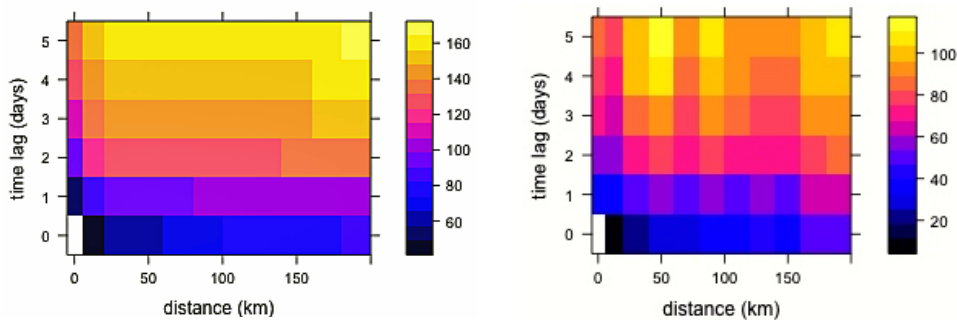
Die Temperatur variiert im Raum verglichen mit  $PM_{10}$  weniger stark. Das Variogramm ist annähernd linear ausgeprägt.

Es zeigt nach dem Fit(ting) die Modellwerte: Nugget = 0.9 und Range = 799.

Die gefundenen Funktionen, die in beiden Variogrammplots durch die eingelegten Kurven bereits visualisiert sind, gehen jeweilig in das theoretische Variogramm ein. Beide wurden in Anlehnung an Pebesma und Gräler (2014: 7) umgesetzt (vgl. Bivand et al. 2013).

Die nachfolgend linke Grafik zeigt den Variogrammplot für die Feinstaubexposition, bei dem die Abszisse die Entfernung und die Ordinate den Time-Lag zurückgeben. Sichtbar ist, dass bei Lag 0, also dem Tag an welchem die Werte in die Interpolation eingehen, bis 20 km Entfernung ein sehr gutes und bis etwa 40 km Distanz ein konsistentes Interpolationsergebnis zu erwarten steht. Durchaus erwartungstreu erscheint die Schätzung für diesen Raumbezug noch bis Lag 1. Anhand der rechten Darstellung wird der Variogrammplot für die maximale Temperatur unter ebensolchen Vorzeichen festgehalten. Die Erkenntnisse sind ziemlich identisch, wobei die Güte der Interpolation höher einzuordnen ist.

Abb. 9 Variogramplots für PM<sub>10</sub> und Maximaltemperatur

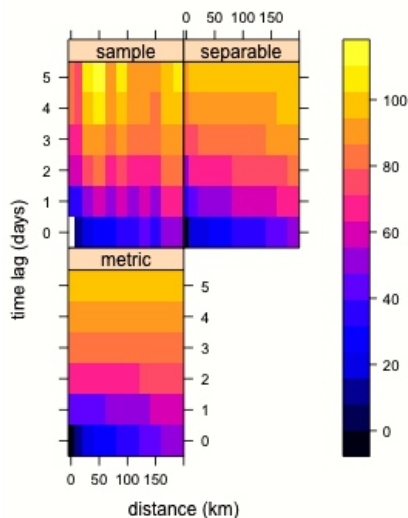


Beschreibung s. o.; Quelle: UBA, DWD, eigene Darstellung

Für die Interpolation lässt sich ableiten, dass die Stützpunktentfernungen möglichst unter 50 km liegen sollten. Ein metrisches Variogrammodell kam mit dieser Limitierung für beide Expositionstränge in Betracht. Beide wurden mit den Daten gefittet. Das Nugget reduzierte sich sowohl beim Modell für den Feinstaubdatensatz als auch jenem für die Temperaturdaten auf den dem metrischen Variogramm eigenen 9.730575 Wert.

Pebesma und Gräler (2014) legen nahe, dem metrischen Variogrammodell ein gesondertes Modell gegenüberzustellen und die Güten beider Ausgleichsansätze zu kontrastieren. Auch das separate Modell integriert nach den Autoren eine exponentielle Modellfunktion, wurde ebenfalls mit den Daten gefittet. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die gegenübergestellten Modelle.

Abb. 10 Gegenüberstellung Variogrammodelle PM<sub>10</sub>-Datensatz

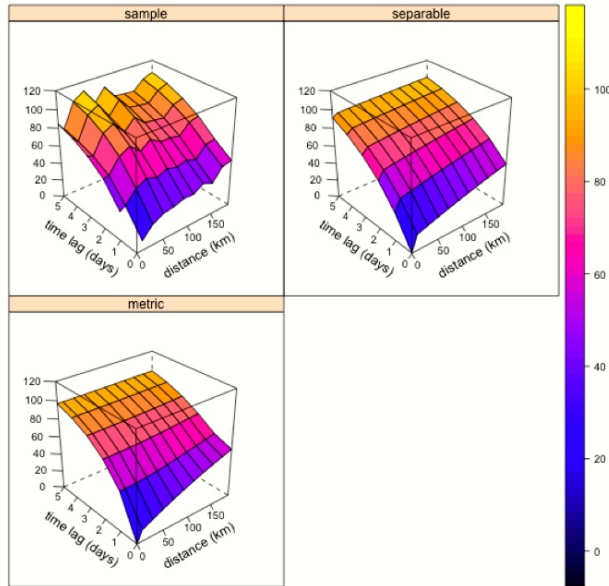


Quelle: UBA, eigene Darstellung

Die Plots für das separate (re. oben) und das metrische Modell (unten) zeigen, dass beide, verglichen mit dem raum-zeitlichen Verhalten der Sample-Daten (li. oben) den unterstellten Zufallsprozess der Werteausprägung recht gut beschreiben, diesen harmonisieren. Für das metrische Modell scheint dies etwas ausgeglichener zu gelingen. Letztlich lässt der visuelle Vergleich die

Frage zu, ob das metrische Variogrammmodell dem separaten überlegen ist. Etwas eindeutiger fällt das Ergebnis für die maximale Tagestemperatur aus.

Abb. 11 Gegenüberstellung Variogrammmodelle Temperaturdatensatz



Quelle: DWD, eigene Darstellung

Auch für den gesamten Datensatz der maximalen Temperatur wurde ein separates (oben re.) dem metrischen Variogrammmodell (u. li.) gegenübergestellt. Verglichen mit dem Sample (o. li.) sind auch hier für beide Modelle deutlich ausgeglichene Funktionsverläufe zu erkennen. Das metrische Modell scheint dem separaten Variogrammmodell

eine Nuance überlegen. Die ersten Interpolationen wurden sicherheitshalber mit beiden Variogrammmodellen durchgeführt. Die darauffolgende Validierung der interpolierten Werte zeigte, dass das metrische Variogrammmodell die Werte am treuesten schätzt.



#### 4.4.3 Validierung der interpolierten Werte

Ein Standardverfahren zur Verifikation der interpolierten Daten ist die sog. Kreuzvalidierung. Bei dieser wird ein bekannter Wert von einer Station, bspw. die gemessene maximale Tagestemperatur, gewählt und mit Hilfe von Werten benachbarter Stationen geschätzt. Das Ausmaß der Differenz zwischen bekanntem und geschätztem Wert bestimmt dann die Güte der Interpolation (Armstrong 1998; vgl. Bivand et al. 2013).

Mit der Treffsicherheit eines unmittelbar vergleichbaren Wertes ließ sich dies im vorliegenden Fall so nicht realisieren, da das Untersuchungsgebiet Bundesrepublik Deutschland wegen des hierfür notwendigen enormen Rechenaufwandes nicht in so kleine räumliche Punkte zu unterteilen war, die den erhobenen Werten an einer Messstation identisch sein könnten.

Daher war die Güte der interpolierten Werte zunächst durch die Umsetzung der Erkenntnisse aus der Variogrammschätzung zu sichern: Es erfolgte die Limitierung der Stützpunktdistanz, d. h., der in die Interpolation einzubeziehenden Stationen, zu ihrem Interpolationsziel auf 44 km Entfernung. Beim Feinstaubdatensatz musste diese Einschränkung für die Jahre 2003 und 2006 wegen mangelnder Abdeckung auf 60 km erweitert werden. Zudem erfolgte die Beschränkung auf unter 20 Messstationen je Interpolationsziel. Ebenfalls ausgenommen der Feinstaubdatensätze 2003 und 2006 war es möglich, die zu nutzenden Messstationen auf 10 - 12 zu limitieren. Damit verbunden sind zwei Vorteile: Zum einen trägt die Datenselektion einer möglichst kleinräumigen Wertegenerierung Rechnung. Zum anderen lässt sich der Rechenaufwand reduzieren.

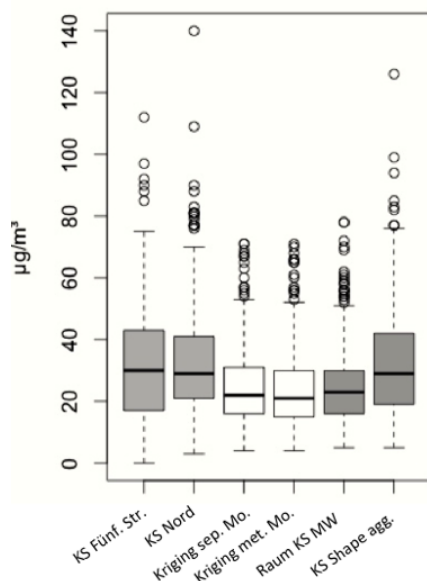
Im Rahmen eines Beratungsgesprächs schlug Herr Prof. Dr. Lautenbach vor, die Temperaturdaten an die Höhe über Null zu adjustieren, da Parameter von Messstationen in die Interpolation eingehen können, welche sich in ihrer Höhenlage und somit in der Aussagekraft ihrer Messwerte deutlich unterscheiden. So nehme im Durchschnitt die Temperatur um ca. 0,65 °C je hundert Meter Höhenzunahme ab (vgl. auch Zürcher/Frank 1998; Pott/Hüppe 2007). Um diesen sogenannten geometrischen Temperaturgradienten (vgl. Foken 2006) wurde die Maximaltemperatur adjustiert und anschließend die Interpolation realisiert. Der DWD-Datensatz lässt diese Verfahrensweise problemlos zu, da die Messstationen mit Höhenangaben versehen sind.

Weiterhin erschien es naheliegend, das Interpolationsergebnis anhand gemittelter Werte von Stationen zu validieren, die gut in den Zielregionen der Interpolation zu identifizieren sind.

So geschehen für die Stadt Kassel. Der Validierungsablauf für die Stadt Kassel im Überblick: Auswahl der Messstationen mit möglichst kompletten Datenreihen. Unterscheidung zwischen der bzw. den Stationen, welche sich direkt in Kassel Stadt befinden und der Stationengruppe, die aufgrund der räumlichen Zuweisung in die Interpolation eingehen würden.

Interpolation mit separatem Variogrammmodell und mit metrischem Modell, da die Variogrammplots (s. o.) nicht sicher zeigen, welcher Ansatz zu bevorzugen ist. Gemeinsame Darstellung und Bewertung der Mittelwerte von allen in Kassel Stadt befindlichen Messstationen und den interpolierten Daten. Begonnen wird mit den  $PM_{10}$ -Daten.

Abb. 12  $PM_{10}$ -Konzentrationen Kassel, Kassel aggregiert & Interpolation



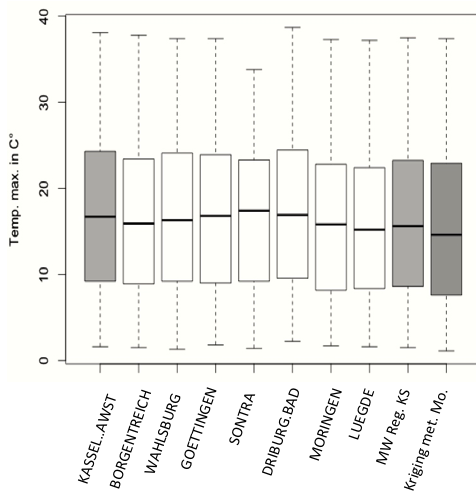
Quelle: UBA, eigene Berechnung

Die sechs Boxplots zeigen die Wertedifferenzen zwischen den unmittelbar in Kassel befindlichen Messstationen Kassel Fünffensterstraße sowie Kassel Nord (von li. 1 und 2 Plot) mit den Interpolationswerten (bd. mittleren Plots) und einem Mittelwert für die im Raum Kassel befindlichen Stationswerte (2 Plot von re.) sowie den im GIS-Layer anhand der Messstationskoordinaten für die Stadt Kassel aggregierten Werten.

Käme  $PM_{10}$  allein als Expositionsvariable in Betracht, wirkte sich dies auf das Studienergebnis wohl in Form einer Fallzahlunterschätzung aus.

Für die Interpolation der maximalen Temperaturwerte ist ein noch besseres Ergebnis festzustellen (s. u.).

Abb. 13 Maximaltemperaturen Kassel, Region Kassel & Interpolation

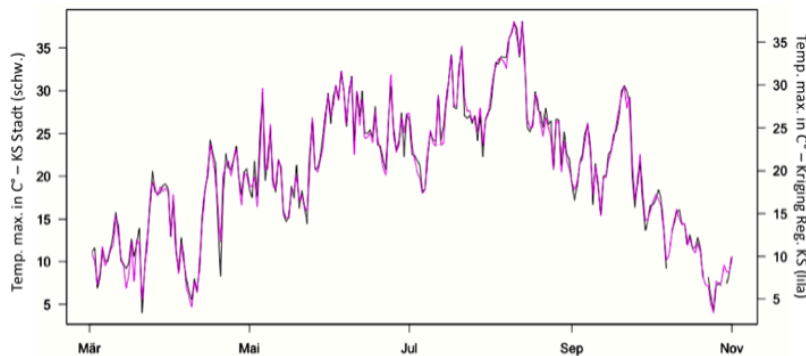


Quelle: DWD, eigene Berechnung

Die Boxplots zeigen: erster (li.), die Ausprägung der maximalen Tagestemperatur an der DWD-Messstation in der Stadt Kassel. Die weißen Plots geben die Werteausprägungen der Stationen im Kasseler Raum zurück, welche der vorletzte Plot (2. von re.) als Mittelwert zusammenfasst. Mit dem dunkelgrauen Boxplot (re.) wird das durchaus stimmige Interpolationsergebnis angezeigt.

Die interpolierten Werte der Maximaltemperatur werden nun den tatsächlich gemessenen Werten anhand einer Zeitreihe gegenübergestellt.

Abb. 14 Gegenüberstellung Maximaltemperatur Kassel Stadt mit Interpolation



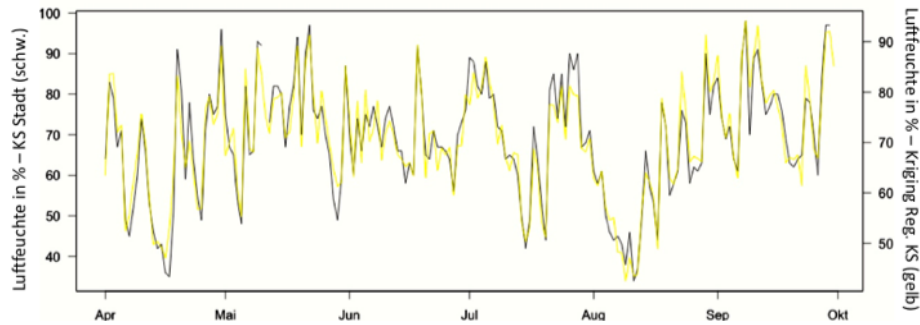
Quelle: DWD, eigene Darstellung

Dargestellt sind die Verläufe der maximalen Temperaturwerte für den Zeitraum 01.03.2003 - 30.11.2003: 1. Werte an der DWD-Messstation in der Stadt Kassel (schwarze Linie) und 2. die räumlich zugehörige Interpolation mit einem metrischen Variogrammodell (lila Linie). Eine Abweichung der Interpolation von den Zielwerten ist kaum auszumachen.

Zweiter, zur Berechnung des Heat Index notwendiger Parameter ist die relative Luftfeuchte. Der Deutsche Wetterdienst gab entsprechende Daten gemeinsam mit den Temperaturdaten ab. Gegensätzlich zum Temperaturdatensatz zeichnet sich dieser Datenblock durch einen geringeren Anteil fehlender Werte aus. Für ihn verlief die

Interpolation gleichartig zur oben geschilderten Herangehensweise. Kompletterend zeigt die nachfolgende Abbildung die übereinandergelegten Werteverläufe am Beispiel Stadt Kassel.

Abb. 15 Gegenüberstellung relative Luftfeuchtigkeit Stadt Kassel mit Interpolation



Quelle: DWD, eigene Berechnung

Die Abbildung zeigt die chronologischen Ausprägungen der relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent für den Zeitraum 01.04.2003 - 30.09.2003: 1. Werte an der DWD-Messstation in der Stadt Kassel (schwarze Linie) und 2. die räumlich zugehörige Interpolation mit einem metrischen Variogrammodell (gelbe Linie). Die Werte liegen nicht so exakt übereinander, wie bei der Maximaltemperatur oben. In Gänze scheint das Ergebnis aber durchaus akzeptabel.

### Konsequenzen der Validierung - meteorologische Daten

Hinsichtlich des weiteren Vorgehens bleibt zu konstatieren:

- Mit den adjustierten Parametern der Maximaltemperatur, ergänzt um interpolierte Werte an Tagen mit NA's, lässt sich statistisch arbeiten.
- Die Rückadjustierung der Temperaturdaten auf das vor der Interpolation bestehende höhenrelative Niveau und die damit realisierbare Berechnung des Heat Index unter Verwendung der flächig aufbereiteten Luftfeuchtigkeitsdaten führt zur räumlich treffenden wie auch zeitlich geschlossenen Nutzbarkeit der Indexwerte.
- Die Zuweisung der interpolierten Parameter zu den nichtbeprobten kreisfreien Städten, Landkreisen, Stadtregionen, etc. ist problemlos möglich.

## 4.5 Sozialräumliche Kontextfaktoren

Sozialräumliche Kontextfaktoren können in ein statistisches Modell zur Erklärung von Umwelteinflüssen auf die Gesundheit des Menschen einfließen. Dafür sind räumlich und zeitlich kongruente Daten obligat. Die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) bereitgestellten Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung (INKAR) kamen hierfür in Betracht, da sie breit gefächerte Kenngrößen aus allen gesellschaftlichen Lebensbereichen für unterschiedliche Raumbezüge beinhalten.

Räumlich beziehen sich die INKAR auf administrative (Länder, Kreise, Gemeindeverbände) und nicht-administrative (Raumordnungsregionen, IHK-Bezirke, Siedlungsstrukturtypen) Einheiten. Ein großer Anteil der Daten läuft in den INKAR 2012 über den Zeitraum 1998 - 2010. Einige Indikatoren zur Abbildung periodischer Veränderungen liegen für die Zeiträume 2005/2007 - 2010 vor. Nach Filterung kamen für den Untersuchungszeitraum 2002 - 2006 insgesamt 112 Indikatoren in Betracht. Für die Dimensionen Flächennutzung und Wohnen, Bevölkerungsstruktur, Einkommen, Beschäftigung und Erwerbstätigkeit, Bildung sowie medizinische und soziale Versorgung teilen sich diese zahlenmäßig wie in Tabelle 13 dargestellt auf.

Tabelle 13 Anzahl möglicher Kontextfaktoren

Flächennutzung - Wohnen - Gebäude	Bevölkerungs- struktur	Einkommen	Beschäftigung und Erwerbstätigkeit	Bildung	Medizinische und soziale Versorgung
31	24	12	30	6	9

Quelle: INKAR 2012, eigene Darstellung

Von diesen 112 Kontextindikatoren wurden nach detaillierterer Inaugenscheinnahme jene ohne Zielgruppenbezug, Mobilitätsindikatoren wie noch finanzbezogene Indikatoren ausgeschlossen. Ohne Zielgruppenbezug meint beispielsweise, dass Einwohneranteile unterhalb der 65-Jahresgrenze unberücksichtigt bleiben. Die Mobilitätsindikatoren beziehen sich auf Salden. Vertreter sind z. B.: Gesamtwanderungssaldo, Arbeitsplatzwanderer, Binnen- oder auch Außenwanderungssaldo. Als entlegene Finanzindikatoren wurden etwa Gewerbe- und Umsatzsteuer sowie Schlüsselzuweisungen klassifiziert.

Nach diesem Schritt kamen 77 Kontextindikatoren für die statistische Analyse in Betracht.

---

### **Änderung des Raumbezuges im Untersuchungszeitraum**

Eine retrospektive Studie berücksichtigt die Neugliederung des Raumbezuges im wie auch nach dem Untersuchungszeitraum. Bei der vorliegenden Arbeit betrifft dies die Kreisgebietsreformen in Sachsen-Anhalt 2007 wie noch in Sachsen 2008, bei denen neue Kreise unter Auflösung alter Gebietsgrenzen gebildet wurden. Weil sich die INKAR 2012 auf die reformierten Gebietseinheiten beziehen, waren die Daten auf die ursprünglichen Einheiten umzurechnen. Für die anderen Bundesländer lagen zwischen 2002 und 2006 respektive 2006 - 2012 stabile Kreis-Gebietsstrukturen vor.

Ungünstig für die statistische Analyse könnte sich die seit 2001 etablierte Kommunalstruktur Region Hannover zeigen. Zur Region Hannover wurden 21 Kommunen, inkl. Hannover Stadt, vereinigt. Den Verband bilden unterschiedlich dicht besiedelte Kommunen. Interessant erschiene eine eigene Analyse für die bevölkerungsreiche Stadt Hannover, die aber aufgrund der Regionszuordnung nicht möglich ist.

Auf die ehemals kreisfreie Stadt Saarbrücken trifft dies ebenso zu. Sie ist in den Regionalverband Saarbrücken integriert. Der Regionalverband ging 2008 aus dem 1974 konstituierten Stadtverband Saarbrücken hervor.

Von dieser Problematik ist die Städteregion Aachen (hier noch) nicht betroffen. Zwar gingen der Landkreis Aachen und die kreisfreie Stadt Aachen 2009 zusammen, ihre kommunale Kennung wurde aber beibehalten.

### **Anpassung der Kontextfaktoren an den Untersuchungszeitraum 2002 - 2006**

Da anzunehmen war, dass die Fallzahlen für manche Untersuchungsgebiete (insbesondere dünn besiedelte Landkreise) nicht ausreichen, um substanzielle Berechnungen durchführen zu können, besteht eine Analysestrategie darin Expositionsperioden über den gesamten Untersuchungszeitraum 2002 - 2006 mit Bezug zur räumlichen Ebene zusammenzufassen. Hierfür wurden für die ausgewählten Indikatoren Mittelwerte aus den Einzeldatensätzen der Jahre 2002 - 2006 gebildet. Sie gehen in sämtliche kontextbezogenen Analysen ein.

Mit den 77 Kontextfaktoren, die nun stimmig für die Beobachtungseinheiten (kreisfreie Städte, Landkreise, etc.) vorlagen, erfolgte die Überprüfung auf Kollinearität.

#### 4.5.1 Integration der Kontextfaktoren in das statistische Modell

Die adäquate Integration kontextueller Variablen sichert die Aussagekraft eines statistischen Modells (Dormann 2013a; Kroll/Lampert 2012; Kreienbrock et al. 2012).

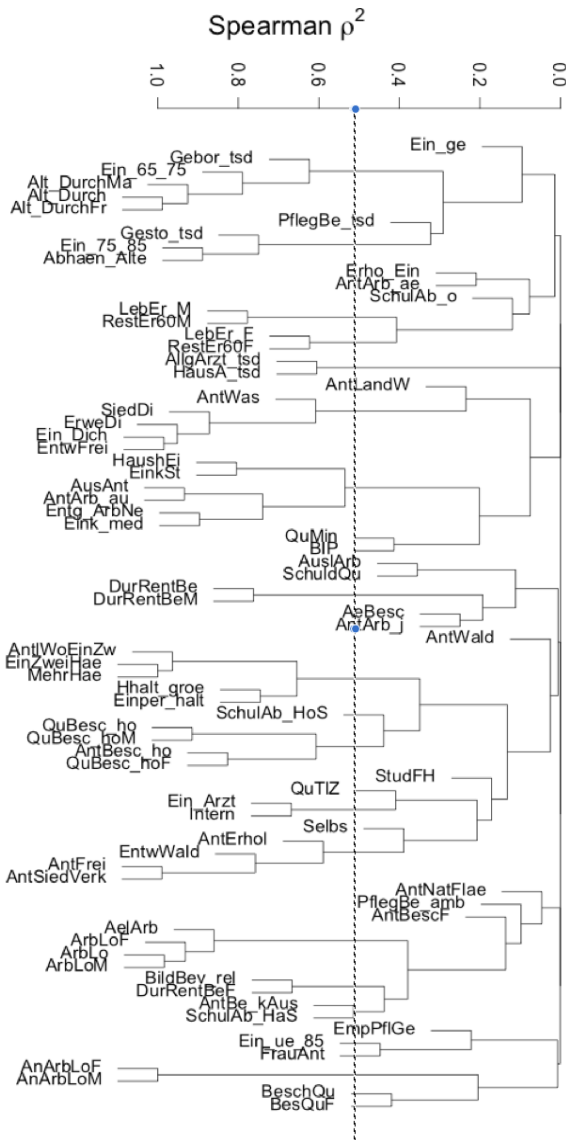
Orientiert man sich an dieser Maxime, ist es erforderlich, potentielle Kollinearität der Kontextfaktoren zu berücksichtigen. Kollinearität bringt das Phänomen zum Ausdruck, dass Variablen miteinander korrelieren. Damit verbinden sich zwei Probleme: Unsicher bleibt, welche der korrelierten Kontextfaktoren nun relevant sind. Daneben bringt Kollinearität »*instabile Schätzer*« im Regressionsmodell mit sich (Dormann 2013a: 274; Wollenschläger 2014).

Mit dem Ziel beides zu vermeiden, erfolgte mittels Korrelationsanalyse eine Überprüfung auf Kollinearität. In der Literatur sind hierfür Werte hinterlegt, die den Zustand »*deutlich korreliert*« im Rahmen einer solchen Inaugenscheinnahme anzeigen. Nach Dormann und Kollegen (2013b) besteht Konsens darüber, dass Koeffizientenwerte ab 0,5 - 0,7 Kollinearität aufdecken (vgl. Dormann 2013a).

Einen ersten Überblick über das Ausmaß der Kollinearität gibt die Clusteranalyse, wiedergegeben in Abbildung 16 auf der folgenden Seite. Die Cluster-Darstellung reflektiert die Kongruenz der Variablen als Baum-Diagramm. Üblicherweise wird dieses auf dem Kopf stehend ausgegeben. So auch im vorliegenden Fall. Das Diagramm ist jedoch aus Platzgründen 90° nach rechts gedreht und daher auch von rechts nach links zu lesen.

Die der Clusteranalyse zugrundeliegende Ähnlichkeitsmatrix nutzt Spearmans  $\rho^2$ . Spearmans Korrelationskoeffizient verzichtet auf die Annahme, dass die Relation unter den Variablen linear ist. Der Koeffizient ist unempfindlich gegenüber Ausreißern (Dormann 2013a; vgl. Timischl 2013).

Abb. 16 Clusteranalyse zur Überprüfung auf Kollinearität



Quelle: INKAR 2012, eigene Berechnung

Das Cluster-Diagramm gibt zahlreiche hoch korrelierte Variablen ( $\rho^2 > 0,6$ ) zurück. So bilden bspw. Variablen ein Cluster, die die Altersstruktur und Einwohnerzahl kennzeichnen (Clustering oben). Ganz ähnlich verhält es sich bei den Kontextvariablen zur Raum- sowie Flächennutzung, Beschäftigung und Einkommen.

Interpretation des Cluster-Diagramms

Die Variablen des obersten Clusters sind folgendermaßen zu lesen: Gebor\_tsd = Geborene je 1000 Einwohner; Ein\_65\_75 = Anteil der Einwohner im Alter 65 bis 75 Jahre; Alt\_DurchMa = Altersdurchschnitt Männer; Alt\_Durch = Altersdurchschnitt; Alt\_DurchFr = Altersdurchschnitt Frauen. Dieses Cluster lässt sich gemeinsam mit dem

darunterliegenden betrachten.

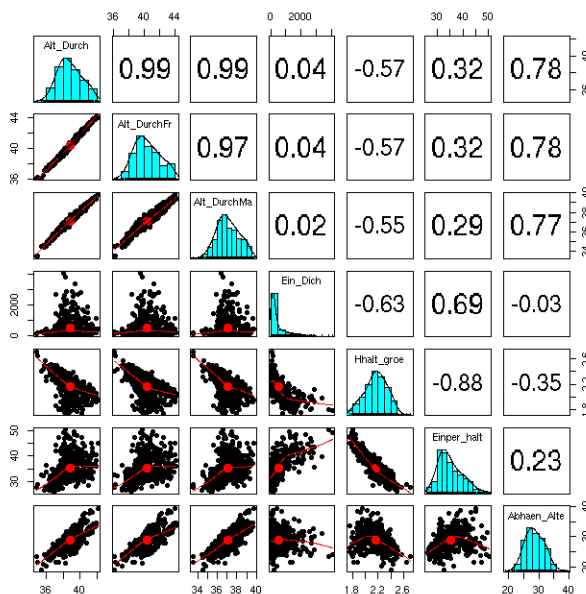
Variablenbenennung: Gebor\_Tsd = Geborene je 1000 Einwohner; Ein\_65\_75 = Anteil der Einwohner im Alter 75 bis 85 Jahre; Abhaen\_Alt = Abhängigenquote Alte. Interessanterweise korrelieren Variablen mit Bezug zur Lebenserwartung in keiner Konstellation mit Variablen der ärztlichen Versorgung. Variablenbenennung: LebEr\_F = Lebenserwartung Frauen; LebEr\_M = Lebenserwartung Männer; RestEr60\_F = Restlebenserwartung der ü. 60 j. Frauen; RestEr60\_M = Restlebenserwartung der ü. 60 j. Männer; AllgArzt\_tsd = Allgemeinärzte j. 100.000 Einwohner; Hau-



sA\_tsd = Hausärzte j. 100.000 Einwohner; Intern = Internisten j. 100.000 Einwohner; Ein\_Arzt = Einwohner je Arzt.

Für die Variablen: Altersdurchschnitt der Bevölkerung gesamt und getrennt nach Geschlecht, Einwohnerdichte, Haushaltsgröße, Anteil der Einpersonenhaushalte sowie der Abhängigenquote alter Menschen veranschaulicht der paarweise Scatterplot Kollinearität im Detail.

Abb. 17 Korrelationsmatrix als Scatterplot (Variablenauswahl)



Quelle: INKAR 2012, eigene Berechnung

Der Plot visualisiert die Korrelationsmatrix der o.g. Variablen in der Reihenfolge ihrer Aufzählung: Diagonale von li. oben nach re. unten: Altersdurchschnitt, Altersdurchschnitt Frauen, Altersdurchschnitt Männer, Einwohnerdichte, Anteil Hochaltrige gesamt, Anteil Einpersonenhaushalte, Abhängigenquote Alte.

Oberhalb der Diagonalen sind die Werte des Korrelationskoeffizienten aufgelistet (Pearsons r). Werte über 0,6 sind als hoch korreliert anzusehen. Unterhalb der Diagonalen sind die Verteilungen der Variablen als Histogramm geplottet. Darunter werden die gepaarten Streudiagramme mit gleitendem Durchschnitt und Gesamtmittelwert dargestellt.

Da nicht durchgängig von annähernder Normalverteilung auszugehen ist, insbesondere nicht bei der Variablen Ein\_Dich = Einwohnerdichte (in der Mitte des Plots), war die Korrelationsanalyse mit Kendalls  $\tau$  zu wiederholen (vgl. Dormann 2013a & Timischl 2013). Das Ergebnis fiel ganz ähnlich aus, wenngleich die korrelierten Werte nicht so hoch auftraten. Sie erreichten aber immer noch mindestens den 0,6-Grenzwert.

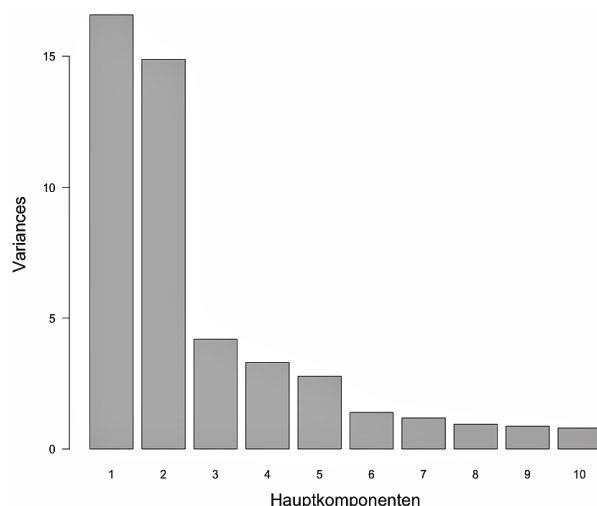
Eine Möglichkeit zur Beseitigung der Kollinearität bestünde nun darin, eine der jeweils hoch korrelierten Variablen aus der Analyse auszuschließen, wobei das Ergebnis der verbliebenen auf die entfernte Variable zu übertragen wäre. Hier steht jedoch anzumerken, dass es sich um eine Auswahl handelt, die nach Betrachtung des Cluster-Diagramms getroffen wurde. Der zweidimensionale Clusterplot kann andere Korrelationen verschleiern (Dormann 2013a).

### 4.5.2 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Mit den hoch korrelierenden Kontextfaktoren wurde eine Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis: PCA) durchgeführt. Bei dieser bilden die Hauptkomponenten (Principal Components: PCs) die Streubreite der gepaarten Variablen ab. Die Anzahl der Hauptkomponenten entspricht dabei der Variablenanzahl. Hoch korrelierte Variablen werden bei der PCA in einem orthogonalen Raum in einen unkorrelierten Zustand überführt. Anstelle der ursprünglichen Variablen nutzt man nachfolgend die Hauptkomponenten. Oder, jene Variablen, welche am stärksten auf die PCs laden. Aus dem vorliegenden Datensatz wurden 12 Hauptkomponenten gewählt, da sie mind. 90 % der Varianz in den Daten abdecken (vgl. Dormann 2013a; Timischl 2013; Handl 2010).

In welchem Umfang die PCs 1 - 10 die Streubreite der Daten abbilden, veranschaulicht ein Screeplot.

Abb. 18 Screeplot der erklärten Varianz je Hauptkomponente



Quelle: INKAR 2012, eigene Berechnung

Der Screeplot zeigt die erklärte Varianz durch die ersten 10 Hauptkomponenten.

Das Bild ist typisch für das Ergebnis einer PCA: Die beiden ersten Komponenten decken bereits einen hohen Anteil der Streubreite in den Daten ab.

Auf die Hauptkomponenten laden die Variablen unterschiedlich stark. Die Ladungsstärke zeigt den Einfluss der

Variable auf die PC an (Dormann 2013a). Entsprechend interpretiert man die Hauptkomponenten. Da die Hauptkomponenten Variablenkombinationen verkörpern, ist die Bezeichnung der einzelnen Kombinationen nicht trivial. Vorliegend wurden deshalb die am stärksten auf die 12 PCs ladenden Variablen gewählt und in die Modellierung übernommen. Die ladungsstarken Variablen 1 - 12 zeigt Tabelle 14.

Tabelle 14 PCA - ladungsstarke Variablen 1 - 12

PC 1 - 3	PC 4 - 6	PC 7 - 9	PC 10 - 12
Siedlungsdichte	Versorgung Allgemeinarzt	Entwicklung Waldfläche	Schulabgänger ohne Abschluss
Arbeitslosigkeit	Rentenbezug	Restlebenserwartung wbl.	Quote hoch qual. Frauen
Lebenserwartung wbl.	Anteil Wasserfläche	Erholungsfläche je EW	Arbeitslose jugendlich

Quelle: INKAR 2012, eigene Darstellung

## **4.6 Statistische Umsetzung**

Zur Untersuchung des Einflusses der Exposition Hitze in Verbindung mit der Exposition Feinstaub auf die menschliche Gesundheit kommt das auf Maclure (1991) zurückzuführende Case-crossover-Design zur Anwendung. Im Rahmen des Designs modelliert eine logistische Regression den Zusammenhang zwischen der/den Exposition(en) und den gesundheitlichen Endpunkten Mortalität und Morbidität.

Gesondert wird der potenzielle Einfluss ausgewählter Kontextfaktoren (bspw. soziostrukturelle, sozioökonomische Faktoren oder auch Kennzahlen zur Flächennutzung → Originalvariablen oder Hauptkomponenten aus Hauptkomponentenanalyse) auf das gesundheitliche Risiko durch die Berücksichtigung räumlicher Autokorrelation in einem geostatistischen Regressionsmodell analysiert.

### **4.6.1 Case-crossover-Design**

In der Vergangenheit nutzten epidemiologische Studien das Design vorwiegend bei der Beurteilung gesundheitlicher Folgen durch die Expositionen: Luftverschmutzung, Hitze, Mobilfunk-Strahlung und Lärm. Seine anwendungsbezogenen Wurzeln liegen u. a. in der klinischen Forschung (Schumacher/Schulgen-Kristiansen 2008), wo es vielfach anstelle von Fall-Kontroll-Studien herangezogen wird. Insbesondere unter dem Umstand, dass nicht genügend Fälle respektive Kontrollen zur Durchführung einer Fall-Kontroll-Studie vorliegen. Dann integrieren Cross-over-Studien Patientinnen und Patienten quasi experimentell als ihre eigenen Fälle wie auch Kontrollen, die mit unterschiedlichen Medikamenten in zeitlich unabhängigen Perioden behandelt werden. Es interessiert bei diesem Versuchsansatz, welche medikamentöse Exposition zu welchem gesundheitlichen Outcome führt.

Auch zur Untersuchung von Assoziationen zwischen kurzfristig auftretenden Hitzeextremen und gesundheitlichen Effekten verwendet das Case-crossover-Design ausschließlich Fälle (Todesfälle oder Hospitalisationen), verglichen mit deren Ausbleiben während ausgewählter Referenzzeiten.

### **Charakteristika einschlägiger Case-Crossover-Studien**

Case-Crossover-Studien zur Analyse der Folgen verschiedener Expositionen auf die menschliche Gesundheit unterscheiden sich im Wesentlichen durch die untersuchte Population (Gesamtbevölkerung, Bevölkerung einer Region, Bevölkerungsgruppen nach Altersklassen und/oder Geschlecht) mit spezifischen Outcome (Mortalität, Mor-

bidität), Länge und Lage der Expositionsperiode, Anzahl und kalendarische Lage der Vergleichsperiode(n) sowie den herangezogenen thermischen Indizes wie noch berücksichtigten Confoundern.

Die Charakteristika im Überblick:

Überwiegend verwenden die zum Forschungsgebiet gehörenden Studien als exponierende Variable die tägliche Durchschnitts- oder Höchsttemperatur wie auch die Apparent Temperature. Zu- und Abnahme der Expositionsintensität definieren unterschiedlich groß gewählte Intensitätsintervalle (bspw. 2 °C, 5 °C oder etwa 10 °F = ca. 12,2 °C) (Basu/Samet 2005; Kyobutungi et al. 2005).

Als Fallperiode fassen manche Autoren den Ereignistag, andere den Ereignistag und diesen Tag verbunden mit dem vorangegangenen Wochentag auf. Auch größere Expositionsperioden, sog. Lag-Phasen (zeitliche Verzögerungsphasen), gehen in die Modelle ein (1 - 6 Tage) (Basu/Samet 2005; Kyobutungi et al. 2005; vgl. auch: Bedada et al. 2012; de'Donato et al. 2008; Stafoggia et al. 2008; Stafoggia et al. 2006; Forastiere 2005, Levy et al. 2001).

Stratifizierte Kontrollperioden identifizieren die stärksten expositionsbedingten Effekte. Um thermische Überlagerungseffekte zwischen den Perioden zu vermeiden, werden diese vor und nach dem Ereignistag gesetzt. Beschrieben sind 3- und 7-tägige Abstände zwischen den Kontrollperioden, wobei die Autoren keine identische Periodenanzahl vor und nach das Ereignis legen (vgl. Basu/Samet 2005).

Fast ausschließlich nutzen die Studien konditionale logistische Regressionsmodelle zur Klassifizierung des gesundheitlichen Risikos unter Exposition (s. u.).

Einige Autoren integrieren potentielle Confounder, bspw. Ozon oder Feinstaub (Buckley/Richardson 2012; Bell et al. 2008; de'Donato et al. 2008).

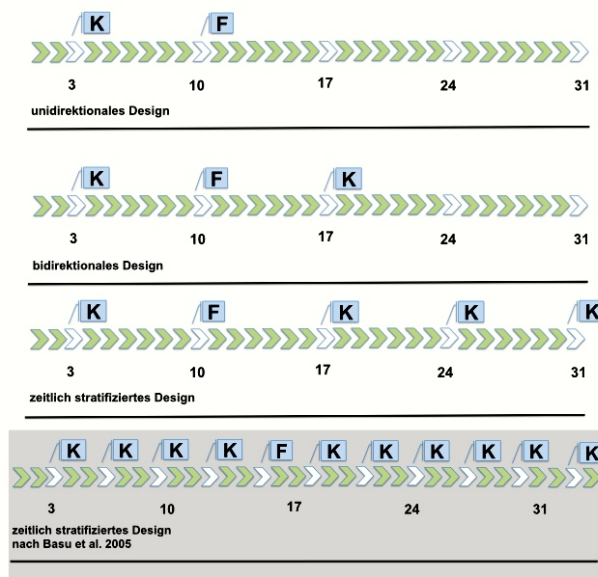
Jene Studien, die mehrere Regionen bzw. mehrere Städte explorieren, realisieren räumlich spezifische Analysen und aufbauend auf diese Metaanalysen (vgl. Stafoggia et al. 2008; Michelozzi 2007).

### **Ableitung des vorliegenden Case-Crossover-Designs**

Wie bereits ausgeführt, kommt der Heat Index als Derivat der Apparent Temperature zur Anwendung. Mit PM<sub>10</sub> geht ein prominenter Umweltkofaktor als Ko-Exposition in die Studie ein. Die Expositionsperiode ist im vorliegenden Fall ein Expositionstag. Expositionstage sind alle Tage mit einem Heat Indexwert  $\geq 80$  °F (s. u.). Daraus ergeben sich ggf. Expositionsperioden. Basu und Samit (2005) nutzten in ihrer Studie 10 zeitlich stratifizierte Vergleichstage im dreitägigen Abstand zueinander, wobei 4

vor und 6 nach dem Ereignis liegen (vgl. Basu/Ostro 2008). In Anlehnung daran erfolgte die Festlegung der Referenzperioden. Sie sind in unten stehender Grafik aufgeführt. In dieser kennzeichnet »F« den Fall und »K« die Kontrollen. Basu und Samet präferieren 10 Kontrolltage, da nach ihrer Expertise dadurch mögliche Verzerrungen vermeidbar sind (vgl. auch Maclure 1991; Rothman et al. 2008).

Abb. 19 Referenzperioden im Case-crossover-Design



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Rothman et al. 2008: 605

Mögliche Referenzperioden im Case-crossover-Design: »F« kennzeichnet den Fall und »K« die Kontrollen. Üblich sind 1 (oben: unidirektionales Design) bis 10 Referenzperioden (unten: stratifiziertes Design).

Aus den vorliegenden Studien ergibt sich weiterhin der unten dargestellte Bezug zur logistischen Regression.

Das Case-crossover-Design nutzt Fälle als ihre eigenen Kontrollen, wodurch potentiell beeinflussende Confounder (Geschlecht, Alter, risikobehaftete Lebensstile etc.) schon durch die Studienanlage kontrollierbar sind. Aufgrund der Ähnlichkeit zur gematchten Fall-Kontroll-Studie, lässt sich im Case-crossover-Design das Odds Ratio als Risikomaß heranziehen (Maclure 1991; vgl. Peng/Dominici 2008).

#### 4.6.2 Regressionsansatz

Regressionsmodelle kommen im Rahmen epidemiologischer Analysen zur Anwendung, um den Zusammenhang zwischen einer Expositions- und einer Endpunktvariablen mittels einer mathematischen Gleichung<sup>1</sup> zu modellieren. Dabei trägt die Gleichung für die gesamte Population Gültigkeit, ist sonach nicht zwingend für jedes Individuum zutreffend. Grundsätzlich zeigen statistische Modelle zur Beschreibung einer Ursache-Wirkungsbeziehung die Struktur

$$y = \text{Funktion}(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, \dots, x^{(m)}). \quad [4.6.2: 1]$$

Dabei benennt die linke Seite der Gleichung, also das  $y$  als Zielvariable den Outcome (Todesfall ja/nein; Hospitalisation ja/nein). Die auf der rechten Gleichungsseite befindlichen Variablen verkörpern die integrierten Expositionsvariablen, bspw.  $x^{(1)}$  die Tagesdurchschnittstemperatur,  $x^{(2)}$  das Alter gruppiert und  $x^{(3)}$  das Geschlecht.

In Abhängigkeit der Variablenausprägung (metrisch, ordinal oder nominal), Anzahl der aufgenommenen Variablen und gewählter Funktion, kommen verschiedene Modelle zur Anwendung. Sie bauen in der Regel auf dem *einfachen linearen Regressmodell* auf, bei dem die Gleichung

$$y = a_{\text{Ziel}} + b_{\text{Ziel}} \cdot x \text{ gilt.} \quad [4.6.2: 2]$$

Für diese Regressionsgleichung beschreibt  $a_{\text{Ziel}}$  den Schnittpunkt mit der Ordinate bei  $x = 0$ . Die Steigung der Funktionsgeraden wird durch  $b_{\text{Ziel}}$  festgelegt. Über die lineare Funktion stehen die  $y$ - und  $x$ -Variable miteinander in Bezug, weshalb man von einer abhängigen Variablen ( $y$ ) und einer unabhängigen Variable ( $x$ ) spricht. In das einfache lineare Modell können metrische Variablen eingehen. Im Rahmen einer Beobachtung ergeben die einzelnen Variablenwerte eine Punktwolke um eine mögliche Gerade, daher wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet, um die Gerade optimal anzupassen. Daraus resultieren Abweichungen einzelner Beobachtungspunkte von der Regressionsgeraden, die man als Residuen bezeichnet. Die

<sup>1</sup> Zur Erstellung des Abschnitts Regressionsanalyse wurden die Quellen:

- Benesch (2013) → grundlegende statistische Zusammenhänge
- Kreienbrock et al. (2012) → grundlegende statistische Zusammenhänge mit Bezug zur Epidemiologie, logistische Regression und OR (inklusive Gleichungen)
- Dreier et al. (2012) → Assoziationsmaß
- Ackermann (2010) → lineare und logistische Regression und OR (inklusive Gleichungen)

herangezogen.

Residuen variieren als natürliches Maß und ermöglichen einen Rückschluss auf die Modellgüte.

Das allgemeine lineare Modell lässt sich verallgemeinern zum *multiplen linearen Regressionsmodell*. In dieses gehen mehrere voneinander unabhängige Einflussvariablen ein. Die verallgemeinerte Gleichung lautet

$$y = a_{\text{Ziel}} + b_{\text{Ziel}} \cdot x^{(1)} + \dots + b_{\text{Ziel}} \cdot x^{(m)}. \quad [4.6.2: 3]$$

Analog zum einfachen linearen Modell wird bei Verwendung dieses Modells die Methode der kleinsten Quadrateschätzung zur Modellierung benutzt.

*Logistische Regressionsmodelle* gehören zu den am häufigsten in der Epidemiologie genutzten Modellklassen, da sie stetige und kategoriale Variablen einschließen können. Im Regressionsmodell wird nicht unmittelbar die Zielvariable (Endpunkt ja/nein) beschrieben. Vielmehr bildet die Funktion die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten unter den berücksichtigten Expositionsfaktoren ab. Die Wahrscheinlichkeit repräsentiert hier der sog. *Logit* bzw. *Log-Odds*. Dieser ist bestimmt durch die Funktion:

$$\text{logit}(P) = \ln[\text{Odds}(P)] = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad [4.6.2: 4]$$

P nimmt als Wahrscheinlichkeit ausschließlich Werte im Intervall 0 bis 1 an. Das Odds(P) umfasst daher prinzipiell alle positiven reellen Zahlen. Durch die Logarithmierung kann die Funktion logit(P) alle positiven und negativen reellen Zahlen annehmen. Aufgrund dessen wird es möglich, der Wahrscheinlichkeit zu erkranken eine dezidierte reelle Zahl - im Bereich minus unendlich = logit(0) und im Bereich plus unendlich = logit(1) - zuzuweisen.

Im logistischen Modell nimmt logit(P) nun den Rang einer Zielvariablen eines linearen Regressionsmodells ein. Allgemein ist dieses *lineare logistische Modell* zu beschreiben als

$$\text{logit}(P) = a_{\text{Ziel}} + b_{\text{Ziel}} \cdot x. \quad [4.6.2: 5]$$

Die Variable x steht für den betrachteten Risikofaktor und P für die Wahrscheinlichkeit auf das Auftreten einer Krankheit unter Exposition. Es gilt daher:



$$P = \Pr(x) = \Pr(Kr = 1 | Ex = x) .$$

Das Auflösen der *linear logistischen Regressionsgleichung* durch Transformation mit der Exponentialfunktion nach P ergibt einen Terminus für die Ursache-Wirkungsbeziehung.

$$\Pr(x) = \frac{\exp(a_{Ziel} + b_{Ziel} * x)}{1 + \exp(a_{Ziel} + b_{Ziel} * x)} \quad [4.6.2: 6]$$

Dargestellt ist die sog. *allgemeine logistische Funktion*, die die Wahrscheinlichkeit unter Exposition zu erkranken beschreibt. Zugrunde liegt dieser Funktion die sog. logistische Verteilungsfunktion, welche dem Funktionsgraf seinen charakteristischen Verlauf gibt. Folgt man diesem, zeigt sich schnell der wirklichkeitsnahe Bezug der funktionalen Zuordnung. Bei  $x = 0$  besteht ohne Exposition ein geringes Risiko zu erkranken, wie es für zahlreiche Krankheiten zutrifft. Mit steigender Intensität der Exposition (steigende x-Werte) nimmt zunächst das Krankheitsrisiko nur wenig, dann beinahe linear zu, um denn bei sehr hoher Expositionsintensität wieder deutlich abzuflachen.

### Logistisches Modell und Odds Ratio

Das logistische Modell weist einen engen Bezug zum Odds Ratio auf, wie Kreienbrock und Kollegen (2012) zeigen<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} \ln(OR_{Ziel}) &= \ln\left(\frac{Odds(\Pr(K = 1 | E = 1))}{Odds(\Pr(K = 1 | E = 0))}\right) && [4.6.2: 7] \\ &= \ln(Odds(\Pr(Kr = 1 | Ex = 1))) - \ln(Odds(\Pr(Kr = 1 | Ex = 0))) \\ &= \text{logit}(\Pr(Kr = 1 | Ex = 1)) - \text{logit}(\Pr(Kr = 1 | Ex = 0)) \\ &= (a_{Ziel} + b_{Ziel} \cdot 1) - (a_{Ziel} + b_{Ziel} \cdot 0) \\ &= b_{Ziel}. \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Das hier Beschriebene baut auch auf den im Kapitel 4 beschriebenen grundlegenden Annahmen der Epidemiologie auf.

Die Logarithmierung in eine Differenz zwischen zwei Logits wandelt dabei das Odds Ratio um. Der Koeffizient  $b_{\text{Ziel}}$  bildet nun den divergierenden Betrag ab. In der Zielpopulation ist aus diesem Grund das

$$OR_{\text{Ziel}} = \exp(b_{\text{Ziel}}) \text{ gültig.} \quad [4.6.2: 8]$$

Da nun  $b_{\text{Ziel}}$  in Beziehung zu  $a_{\text{Ziel}}$  steht und  $a_{\text{Ziel}}$  wiederum mit dem Risiko zu erkranken bei ausbleibender Exposition verbunden ist, dürfen beide Parameter epidemiologisch aufgefasst und interpretiert werden. Einschränkend ist anzumerken, dass dies für  $a_{\text{Ziel}}$  lediglich in Kohortenstudien Gültigkeit besitzt.

Man kann Odds Ratio-Berechnungen für zahlreiche Expositionsverläufe realisieren. Ein so berechnetes OR vergleicht das Risiko eines Individuums bei **interessierender Exposition** mit dem einer Kontrollperson unter einer **abweichenden Expositionintensität**. Nach Kreienbrock und Kollegen (2012) gilt hier:

$$\begin{aligned} \ln[OR_{\text{Ziel}}(x \cdots \text{vs.} \cdots x_0)] &= \log it [\Pr(K = 1 | E = x)] - \log it [\Pr(K = 1 | E = x_0)] \\ &= (a_{\text{Ziel}} + b_{\text{Ziel}} \cdot x) - (a_{\text{Ziel}} + b_{\text{Ziel}} \cdot x_0) = b_{\text{Ziel}} \cdot (x - x_0). \quad [4.6.2: 8] \end{aligned}$$

Insofern ist ein Odds Ratio für die vergleichende Beurteilung zweier Expositionswerte ( $x$  und  $x_0$ ) folgendermaßen zu berechnen:

$$OR_{\text{Ziel}}(x^{(j)} \text{ vs. } x_0^{(j)}) = \exp[b_{\text{Ziel}} \cdot (x^{(j)} - x_0^{(j)})] \quad [4.6.2: 9]$$

Da eine Referenzexposition zugrunde liegt, ist für stetige Variablen ein spezifisches Grundrisiko eingeschlossen, was der Realität noch eher entspricht als die Annahme  $E = 1$  bzw.  $E = 0$ . Zudem berücksichtigt der exponentielle Verlauf einen gleichbleibenden Multiplikator, dessen Zunahme um eine Einheit eine Steigerung des OR um die Größe  $\exp(b_{\text{Ziel}})$  nach sich zieht.

Wie bereits für das einfache und multiple lineare Modell dargestellt, lässt sich auch das logistische Modell zum *multiplen linearen logistischen Regressionsmodell* erweitern. Die Arbeitsweise gleicht dabei dem oben beschriebenen.

### 4.6.3 Geostatistische Herangehensweise

Einflussfaktoren, wie etwa altersstrukturelle, sozioökonomische oder auch Bildung sind bei vielen gesundheitswissenschaftlichen Fragestellungen von hoher Relevanz. Kenntnisse der Geostatistik können helfen, diese Faktoren unter Berücksichtigung räumlicher Differenzierungen adäquat in eine epidemiologische Studie zu integrieren. Dafür ist es notwendig, einige Charakteristika der Geostatistik zu berücksichtigen.

#### Spezifika der Geostatistik

Die räumliche Statistik fasst die Merkmalsausprägungen einer Variablen als räumlich-funktionale Größe auf. Die Ausprägung der Funktionswerte unterliegt dabei u. a. dem Einfluss der Distanz oder dem nachbarschaftlichen Kontext zwischen betrachteten Objekten. Benachbarte Objekte beeinflussen sich ausgeprägt, mit zunehmender Entfernung - also auch mit wachsender Gebietsdifferenzierung - nimmt die Einflussnahme ab (Longley et al. 2005). Tobler (1970: 238) postuliert dies als erstes Gesetz der Geographie mit den Worten: »(...) *everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.*« In diesem Kontext darf man jedoch nicht schlussfolgern, dass entfernte Merkmale deutliche Unterschiede aufweisen. Vielmehr ist die Frage maßgebend, wie weit Einheiten voneinander entfernt sein müssen, damit der Effekt seine Wirkung verliert (Longley et al. 2005).

Im Unterschied zur klassischen Betrachtung, bei welcher die an einer Beobachtungseinheit erhobenen Variablen als Zufallsereignis eingehen, zieht die Geostatistik auch Variablen heran, bei denen ein gegenseitiger Einfluss (sog. Autokorrelation) anzunehmen wäre (Henningsen 2009).

#### Räumliche Autokorrelation

Bei der räumlichen Autokorrelation kommt der Lage der Objekte zueinander und den Ausprägungen der mit den Objekten verknüpften Merkmalen eine wesentliche Bedeutung zu. Von Interesse sind lokale Gemeinsamkeiten und der Grad an Übereinstimmung bei den Ausprägungen. Mittels Korrelationsanalyse lässt sich die Intensität und teilweise auch die Richtung einer (Wechsel)Beziehung zwischen mehreren Merkmalsausprägungen einer alleinigen Variablen aufdecken (Lennon 2000). Dependenz bzw. Interdependenz liegt vor, sofern die Ausprägungen der interessierenden Variablen veränderte Werte aufweisen und gleichsam die Merkmalsausprägungen

selbiger Variablen aus benachbarten Regionen variieren (sog. Spatial effects). Bei festzustellender Abhängigkeit sollte diese Information bei der Erforschung expositionsbedingter Gesundheitsrisiken nicht unbeachtet bleiben (vgl. Koch 2009; Anselin 1988).

### Globale Moran-Statistik

Die wohl verbreitetste Methode zur Analyse räumlicher Autokorrelationen ist die globale Moran's I Statistik (Henningsen 2009; Bivand et al. 2008).

Der Moran-Koeffizient kommt in globaler Form zur Anwendung, um Autokorrelation in einem umfangreichen Datensatz zu identifizieren (Grübner et al. 2011a; Pfeiffer et al. 2008; Behnisch 2008). Dabei testet die Statistik die Abhängigkeit zwischen den Ausprägungen der Beobachtungseinheiten und einem Erwartungswert für alle integrierten Beobachtungen. Der globale Moran's I lässt sich abbilden durch die Gleichung (vgl. Kosfeld et al. 2007):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad [4.6.3: 1]$$

Notation:

n Beobachtungseinheiten

$x_i$  Variablenwert im Raum i

$x_j$  Variablenwert im Raum j

-> es gilt i ist verschieden von j

$\bar{x}$  Mittelwert von x

$w_{ij}$  Gewichtungsfaktor, abhängig von der Beziehung zwischen i und j

Für Moran's I wird die Nullhypothese formuliert: Es besteht keine räumliche Autokorrelation zwischen den Beobachtungseinheiten. Insofern liegt statistische Unabhängigkeit zwischen den beobachteten Einheiten vor. Zeigt die Teststatistik signifikante Abweichungen vom erwarteten Wert, ist die Alternativhypothese anzuerkennen. Räumliche Abhängigkeit liegt demgemäß vor (Grübner et al. 2011a; Aldstadt 2010; Pfeiffer et al. 2008).

Der Moran-Koeffizient kann Werte aus der Zahlenspanne -1 bis 1 annehmen. Die Ausprägung 1 gibt stark positive, die Ausprägung -1 deutlich negative Autokorrelation wieder. Liegt bspw. ein Moran's I nahe bei 1, stimmen die beobachteten Werte benachbarter Raumeinheiten relativ eindeutig überein. Im entgegengesetzten Fall divergieren die erhobenen Variablenausprägungen deutlich (Pfeiffer et al. 2008; Behnisch 2008; Fortin/Dale 2005).

### Lokale Moran-Statistik

Bei der Analyse lokaler Wechselbeziehungen korreliert die lokale Moran-Statistik die Ausprägung einer Variablen für eine einzelne Region zu ihren direkten (ggf. ausgewählten) Nachbarn. Damit wird der Gegebenheit Rechnung getragen, dass räumliche Dependenz zumeist nicht kontinuierlich über das gesamte Untersuchungsgebiet vorliegt. Die Gleichung zur Berechnung des lokalen Moran's I (vgl. Kosfeld et al. 2007; Fotheringham et al. 2000):

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_j - \bar{x})^2 / n} \quad [4.6.3: 2]$$

Der Erwartungswert von  $I_i$  lässt sich bei Verwendung einer standardisierten Gewichtungsmatrix bestimmen, durch (Kosfeld et al. 2007; Fotheringham et al. 2000):

$$E(I_i) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}}{n-1} = -\frac{1}{n-1} \quad [4.6.3: 3]$$

Abschließend gelingt die Signifikanzprüfung der lokalen Koeffizientenwerte auf Basis wiederholt randomisierter Zusammensetzungen der nachbarschaftlichen Relationen in der Matrix (Monte Carlo-Simulation) (vgl. Grübner et al. 2011b; Pfeiffer et al. 2008; Fortin/Dale 2005).

Zu bedenken ist bei der Nutzung der Moran-Statistik, dass ein negativer Wert des lokalen Moran's I auf Ausreißer verweisen kann (sog. »pockets of instationarity«). Ein sehr hoher Koeffizient kann auf relativ starke lokale Konzentration hindeuten, wobei die Art und Weise der vorliegenden Ausprägung durch den lokalen Moran-Koeffizienten nicht direkt ersichtlich ist (vgl. Sundmacher et al. 2014). Erst die Einbindung in ein Korrelogramm oder ein Scatterplot gibt weiterführende Hinweise.

### Räumliche Bezüge im Modell

Ein Modell mit Raumbezug fasst geeignete Kriterien zur Projektion nachbarschaftlicher Relationen ein. Konzipiert werden hierfür Matrizen, in welchen die räumlichen Einheiten als aneinandergrenzende Nachbarn, über eine festgelegte Distanz miteinander verbundene Nachbarn oder aufgrund definierter Charakteristika zusammengehö-

rige Nachbarn erscheinen (Grübner et al. 2001b; Haining 2010; Bahrenberg et al. 2008).

Matrizen, die angrenzende Nachbarn erfassen, kodieren das Vorliegen einer Nachbarschaft mit dem Wert 1 und im entgegengesetzten Fall mit der Ausprägung 0 (binär kodierte Matrizen). Eine solche Matrix  $W$  berücksichtigt die Räume  $i$  und  $j$ .

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{falls } i \text{ und } j \text{ Nachbarn darstellen} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad [4.6.3: 4]$$

Die Aussagekraft der Teststatistik lässt sich durch die Normierung der Zeilenwerte erhöhen. Hierfür erhalten die jeweiligen Nachbarn nicht den Wert 1, sondern einen durch die Anzahl der Nachbarschaften einer Zeile geteilten Faktor [4.6.3: 5]. In Summe ergeben die Zeilenwerte dann 1 (Bahrenberg et al. 2008; Kosfeld et al. 2007; Anselin 1988).

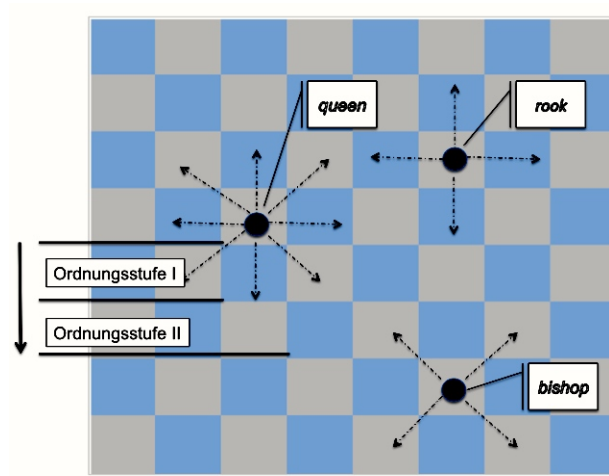
$$w_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad [4.6.3: 5]$$

Darstellbar sind Nachbarschaftsverhältnisse mit spezifischen Randverbindungen. Mit Verweis zum Schachspiel (s. Abbildung: Nachbarschaftskriterien im Raum folgende Seite) gehen aus der Literatur 3 Fälle hervor:

- *rook* (Turm-Fall) verdeutlicht die Beziehung über eine gemeinsame Kante,
- *bishop* (Läufer-Fall) meint die Verbindung über eine zugeschriebene Ecke und
- *queen* (Dame-Fall) als Kombination beider Kontaktmöglichkeiten.

Durch diese Typisierung können Nachbarschaftsbeziehungen systematisiert abgebildet werden (Bahrenberg et al. 2008). Der Nutzen dieses Ansatzes liegt in der relativ problemlosen Erstellung der Matrix. Als nachteilig könnte sich jedoch die teils schwierige Zuordnung der realen Raummerkmale zu den Zugmöglichkeiten der drei Schachfiguren erweisen. Demgegenüber steht der Vorteil, für das Nachbarschaftskriterium auf Basis der Zugmöglichkeiten hierarchische Ordnungsrelationen definieren zu können. So ist es beispielshalber für den Dame-Fall möglich, ein nachbarschaftliches Feld zu überspringen und nun das besetzte Feld mit seinen definitionsgemäß angrenzenden Feldern als Nachbarn höherer oder niedriger Ordnungsstufe zu definieren (Bahrenberg et al. 2008).

Abb. 20 Nachbarschaftskriterien im Raum



Quelle: Anlehnung an Bahrenberg et al. (2008: 355)

Die Relativität räumlicher Strukturen lässt sich daneben durch die Zuordnung inverser Distanzfunktionen modellieren. In die Gewichtungsmatrix gehen dabei linear oder exponentiell zunehmende Distanzen ein (Getis/Aldstadt 2010; Bahrenberg et al. 2008; Anselin 1988).

Für die vorliegende Arbeit wird das Nachbarschaftskriterium *queen* bzw. die Ordnungsstufe 1 gewählt.

Die Berechnung von Moran's I erfolgt mit der Software R, unter Verwendung des Pakets *spdep* (Paradis 2009; Bivand et al. 2008).

## 5. Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse werden in der Reihenfolge ihrer Erarbeitung im Forschungsprozess dargestellt. Zunächst erfolgt die Deskription der Klima- und Feinstaubtrends (Kapitel 5.1). Daran anschließend wird das Mortalitäts- und Morbiditätsgeschehen im Untersuchungszeitraum abgebildet (Kapitel 5.2). Das Kapitel 5.3 zeigt dann die Ergebnisse der statistischen Modellierung des Einflusses von Hitze in Verbindung mit Feinstaub auf das Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko. Dort werden auch die Erkenntnisse aus der Modellierung des Einflusses der Kontextfaktoren auf das gesundheitliche Risiko exponierter Menschen dargestellt.

### 5.1 Klima- und Feinstaubtrends im Beobachtungszeitraum

Vorliegende Studie bringt Hitze als primäres und PM<sub>10</sub> als sekundäres Gesundheitsrisiko zur Darstellung. Daher orientiert sich die Beschreibung in den ersten beiden Unterkapiteln am gewählten Aufbau. Kernpunkte sind dabei der temporäre Expositionsverlauf wie auch die räumliche Verteilung der Exposition. Im Anschluss an die getrennte Betrachtung der beiden Expositionsstränge erfolgt deren Zusammenschau.

#### *Terminologie*

Wird im Folgenden von gesamtem Untersuchungsgebiet/Einheit bzw. gesamtem Beobachtungsgebiet/Einheit gesprochen, dann sind die zum Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zusammengefassten kreisfreien Städte, freien Hansestädte, Stadtkreise, Städteverbände sowie Landkreise und Kreise gemeint.

Die aufgezählten administrativen Einheiten wurden in Abhängigkeit ihrer Bevölkerungsdichte vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung den siedlungsstrukturellen Kreistypen zugeordnet beziehungsweise zu diesen zusammengefasst. Sofern von dieser Analyseebene die Rede ist, treten die Begrifflichkeiten Untersuchungsgebiet/Einheit bzw. Beobachtungsgebiet/Einheit mit entsprechendem Zusatz auf.

Wird vom gesamten Beobachtungszeitraum oder Untersuchungszeitraum gesprochen, dann beziehen sich diese Begriffe grundsätzlich auf den Zeitraum 2002 - 2006. Dieser wird an manchen Stellen auf einzelne Jahre, Jahreszeiten oder Quartale reduziert, was dann ebenfalls entsprechend hervorgeht.

Dem Studiendesign folgend sind Expositionstage identifiziert worden. Dabei handelt es sich um Tage mit Heat Indexwerten (°F), welche den von Rothfus (1998) defi-



nierten Risikostufen zuzuordnen sind. Mit Bezug auf diese Tage wird stellenweise dann von Hitzebelastung oder auch thermischer Belastung gesprochen.

Diese Expositionstage oder ggf. Expositionsperioden wurden für alle Untersuchungseinheiten berechnet. Ebenfalls für sämtliche Untersuchungseinheiten erfolgte die Selektion von Kontrolltagen bzw. -perioden. Sofern periodische Zeiteinheiten angesprochen sind, wird auch der Terminus Vergleichsperioden verwendet, bei Tagen demgemäß von Vergleichstagen.

Die Exposition PM<sub>10</sub> geht taggenau in die Studie ein. Da ihr in Kombination mit thermischer Belastung ein sekundäres Gesundheitsrisiko zugesprochen wird, folgt Expositionsmodellierung den zuvor angesprochenen Tagen mit thermischer Belastung. Weil für die Feinstaubexposition eigene Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit für das Gebiet der Europäischen Union gelten, ist auch bei der Deskription dieser Exposition von Belastung die Rede. Dabei handelt es sich dann um Tage mit PM<sub>10</sub>-Konzentrationen über 50 µg/m<sup>3</sup>, was hervorgehoben wird.

### **5.1.1 Thermische Exposition**

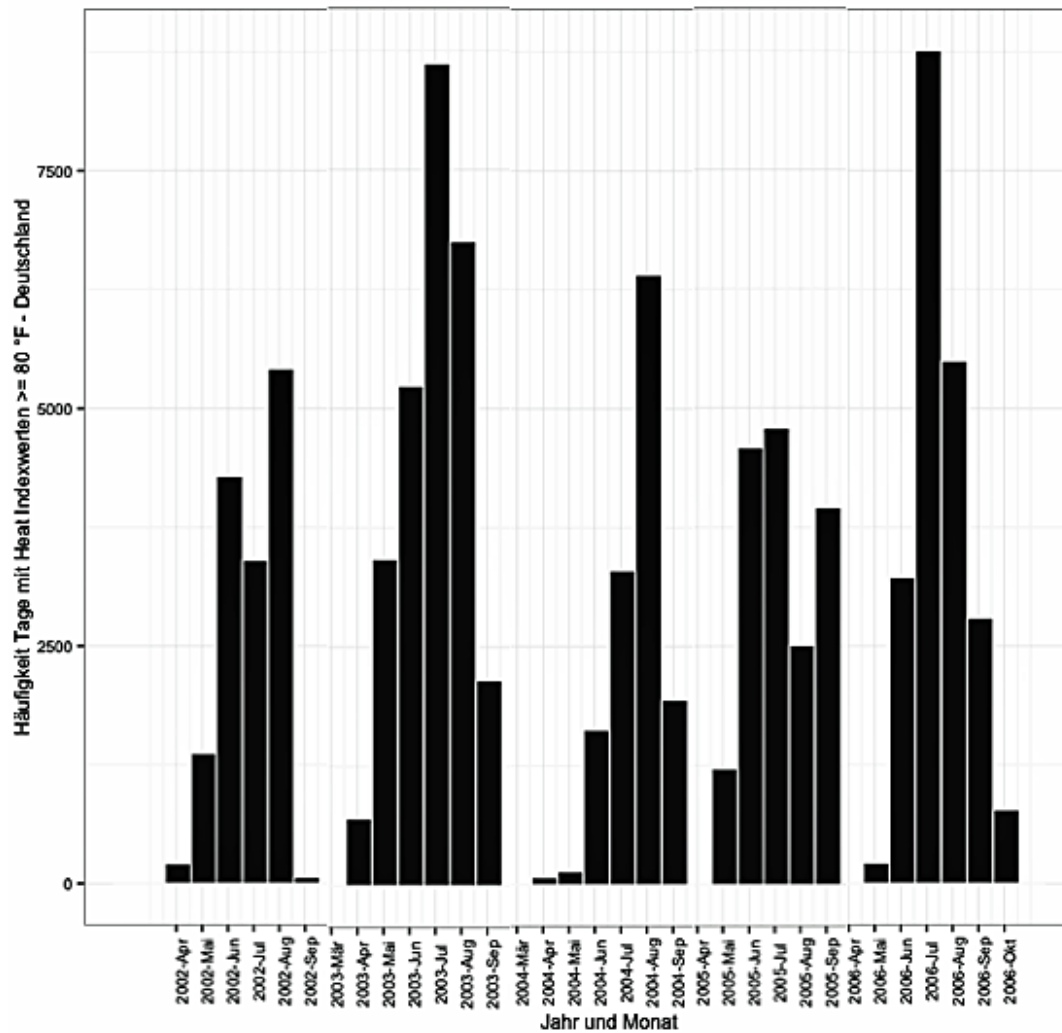
Dargestellt sind zunächst die Expositionshäufigkeiten, d. h., die Anzahl der Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F. Für Umgebungstemperaturen, welche diese Schwelle erreichen respektive darüber hinaus ansteigen, sind Gesundheitsrisiken beschrieben (Rothfus 1998). Auf die 439 Untersuchungsgebiete im Einzelnen einzugehen lenkte sicher vom Wesentlichen ab, weshalb zunächst höher aggregierten Raumeinheiten deskribiert werden.

Im Untersuchungszeitraum 2002 - 2006 sind für die 439 Beobachtungseinheiten 92.420 Tage mit thermischer Belastung hervorzuheben. Ohne die interpolierten Daten umfasste die Expositionsfrequenz etwa 50 % der angegebenen Größe. Es ist nicht möglich, die Belastungstage ohne die interpolierten Werte genau zu benennen, da diese erst die flächige Berechnung der Heat Indexwerte ermöglichen. Die 50%-Schätzung basiert auf den »reinen« Maximaltemperaturen, die auf die Beobachtungseinheiten aggregiert wurden. Dabei wurden Temperaturen oberhalb 27 °C berücksichtigt.

Die große Anzahl an Tagen mit thermischer Belastung entsteht durch Addition aller Hitzetage je Untersuchungsgebiet (439 im Untersuchungszeitraum). Ein solches Gebiet ging 1826-mal (Anzahl der Tage 2002 - 2006) in die Statistik ein.

Das Histogramm zeigt die zusammengefassten Heat Indexwerte  $\geq 80$  °F im Untersuchungszeitraum, aggregiert für die jeweiligen Monate. Die der Statistik zugrundeliegenden Tage gehen als Expositionstage in die Studie ein.

Abb. 21 Aggregierte Hitzetage - Raumbezug ges. Untersuchungsgebiet



Quelle: DWD, eigene Darstellung

Dargestellt sind fünf den Jahren des Untersuchungszeitraums entsprechende Histogramme, verkürzt auf die Quartale 2 und 3. Aggregiert sind die Beobachtungstage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F auf die Ebene der Bundesrepublik Deutschland nach Monaten.

Das «Hitzejahr» 2003 führt die Statistik an. Auch 2006 traten vergleichsweise häufig sehr warme Tage auf. In den Jahren 2002, 2004 und 2005 traten dagegen weniger Expositionstage auf.

Mit dem siedlungsstrukturellen Kreistyp (s. Kapitel 2.2) wurde ein Analyseraster gewählt, welches die Kriterien: Einwohnerdichte, Lagegunst und Zentralität als abgrenzende Kriterien heranzieht. Zwischen den Kreistypen variieren die Häufigkeiten der Expositionstage.

Tabelle 15 Häufigkeiten Expositionstage nach Kreistypen

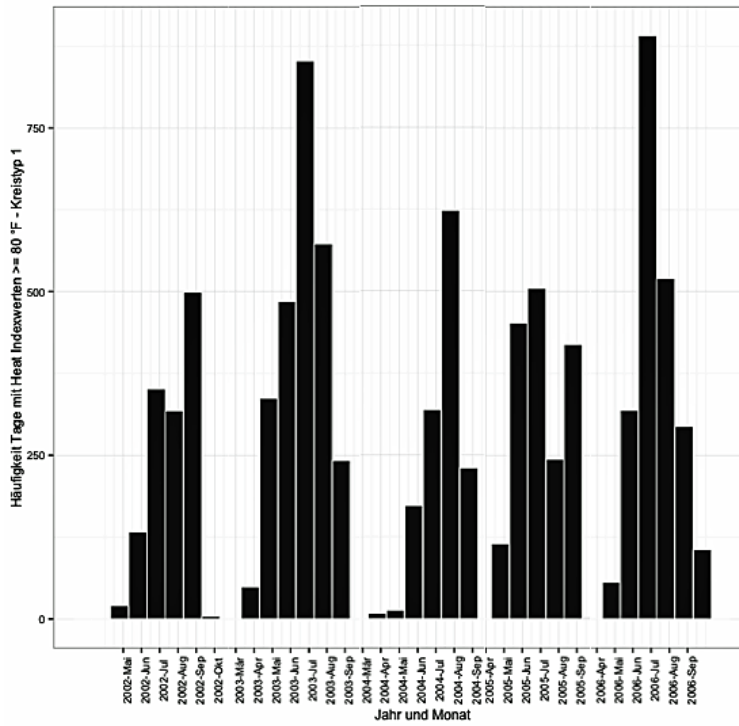
Kreistyp	Anzahl Kreise je Kreistyp	Anzahl HI Tage $\geq 80$ °F
1	41	9.152
2	45	9.454
3	36	6.825
4	20	3.888
5	31	6.260
6	91	19.998
7	74	16.020
8	63	14.453
9	38	6.370

Quelle: DWD, eigene Darstellung

Die 92.420 Expositionstage verteilen sich nach den in der Tabelle dargestellten Häufigkeiten auf die siedlungsstrukturellen Kreistypen 1 - 9.

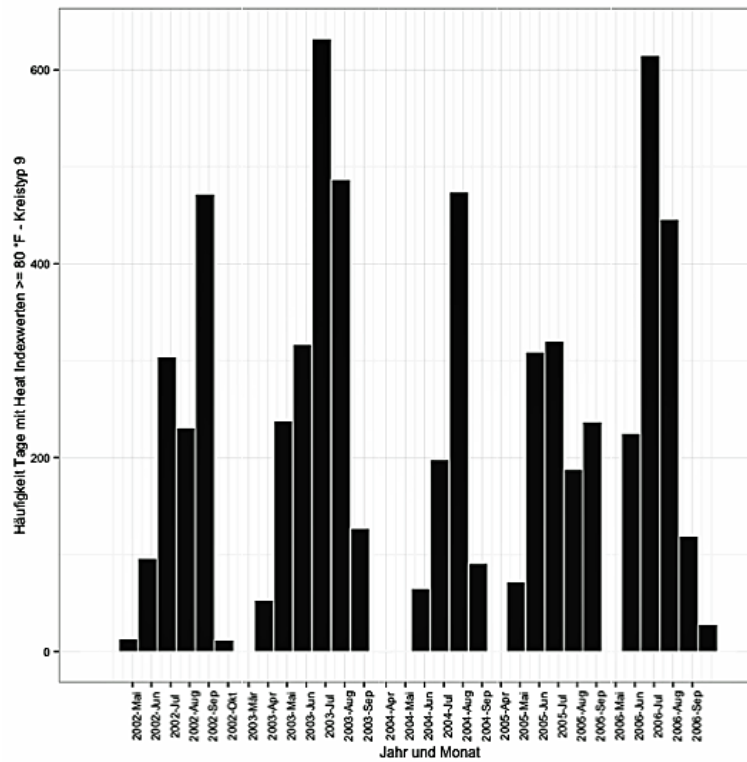
Diesem ersten Überblick folgend, geben die Statistiken für die Kreistypen 1 und 9 einen weiterführenden Einblick zur Expositionsfrequenz. Abbildung 22 zeigt fünf Histogramme für den Kreistyp 1, ebenfalls jeweils für die Quartale 2 & 3 des gesamten Untersuchungszeitraumes. Darunter stellt Abbildung 23 ebensolche Histogramme für den Kreistyp 9 dar. In beiden Darstellungen sind die Häufigkeiten der Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °Fahrenheit berücksichtigt.

Abb. 22 Aggregierte Hitzetage - Raumbezug Kreistyp 1 2003 - 2006



Quelle: DWD, eigene Darstellung

Abb. 23 Aggregierte Hitzetage - Raumbezug Kreistyp 9 2003 - 2006



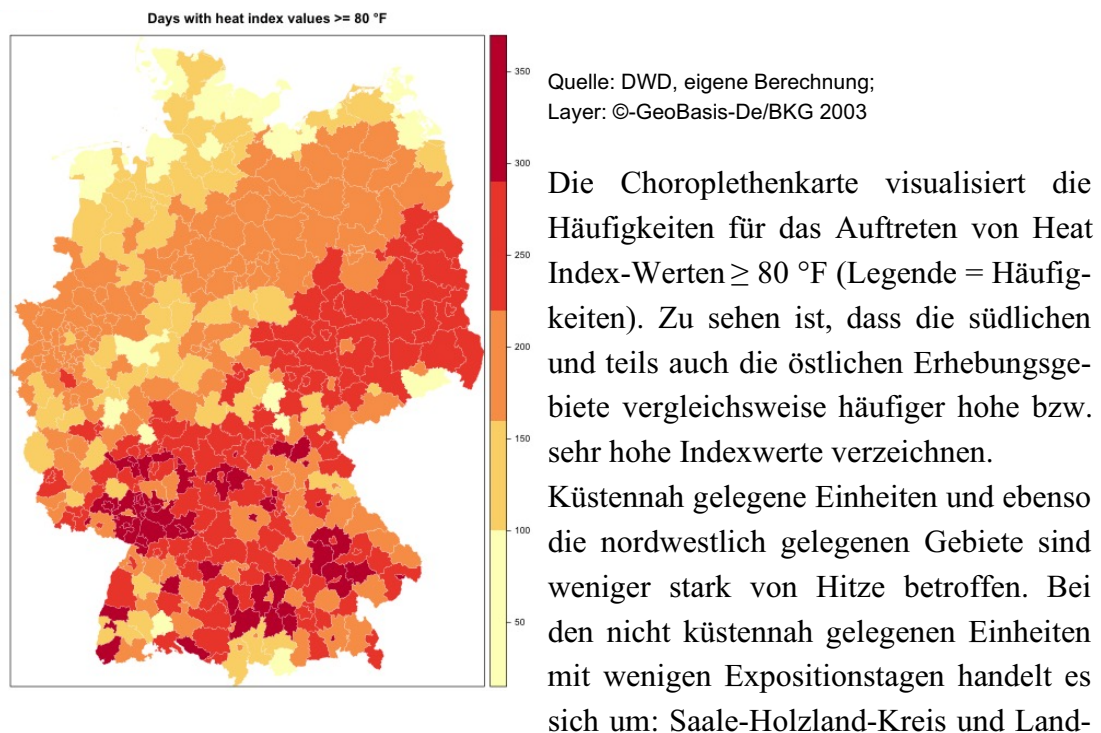
Quelle: DWD, eigene Darstellung

Abbildung 22 und 23: Häufigkeiten für das Auftreten von Tagen mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F auf den Raumeinheiten Kreistyp 1: Städte über 100.000 Einwohner (oben) und Kreistyp 9: Kreise/Kreisregionen mit einer Dichte unter 100 Einwohner/km<sup>2</sup> (unten). Zu bedenken ist dabei, dass 41 Städte mit der Wortmarke Kreistyp 1, dagegen aber 342 Kreise respektive Kreisregionen mit der Klassifizierung Kreistyp 9 vom BBSR definiert wurden.

Die zunächst ganz ähnlich erscheinenden Histogramme legen das nach Quantitäten betrachtete flächenhafte Auftreten von sehr warmen Tagen nahe, denn die Monatsfrequenzen verhalten sich relativ harmonisch. Erst der genaue Blick auf die Einteilungen der y-Achsen zeigt, dass für den Kreistyp 1 deutlich mehr Expositionstage zu verzeichnen waren.

Einen räumlichen Bezug der Expositionshäufigkeiten ermöglichen die folgenden Schaubilder.

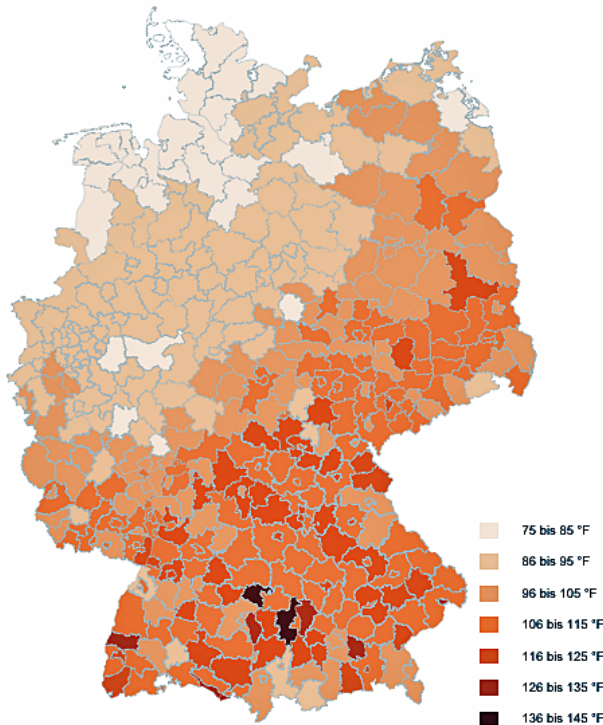
Abb. 24 Häufigkeit Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F im Zeitraum 2002 - 2006



Bei den nicht küstennah gelegenen Einheiten mit wenigen Expositionstagen handelt es sich um: Saale-Holzland-Kreis und Landkreis (LK) Sonneberg (Thüringen), Sächsische Schweiz - Osterzgebirge (Sachsen), Hochtaunuskreis (Hessen), Hochsauerlandkreis sowie Westerwaldkreis (Nordrhein-Westfalen), Landkreis Tuttlingen (Baden-Württemberg) und Garmisch-Partenkirchen (Bayern) allesamt überwiegend bewaldete Landkreise.

Abb. 25 Maximale Heat Indexwerte am 13.08.2003 in den Untersuchungsgebieten

Heat Indexwerte (°F) am 13.08.2003



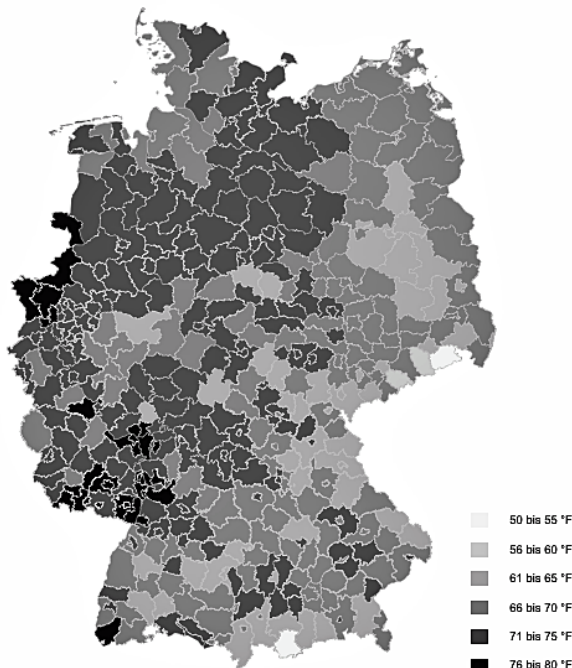
Quelle: DWD, eigene Darstellung

Beispielhaft für die Hitzeperiode 02.08. - 16.08.2003 wird ein Tag ausgewählt. Er soll zeigen, bei welchen Untersuchungsgebieten besonders hohe Werte auftraten.

Herausgegriffen wurde intentional der 13.08.2003.

Abb. 26 Maximale Heat Indexwerte am 13.08.2002 in den Untersuchungsgebieten

Heat Indexwerte (°F) am 13.08.2002



Quelle: eigene Darstellung

Wie oben dargestellt, traten im Jahr 2002 vergleichsweise wenige Tage mit hohen Heat Index-Werten auf. Gezeigt werden die maximalen Heat Indexwerte am 13.08.2002 als Kontrast zum Schaubild oben.

Tage mit HI-Werten, wie sie die Darstellung zeigt, erscheinen dann in der Studie, wenn sie wenige Tage vor (3 - 12) oder nach (3 - 18) einem Tag mit Exposition auftreten (Case-crossover-Design).

### 5.1.2 Feinstaubexposition

Die Deskription der Feinstaubexposition bezieht sich zunächst auf das Auftreten von PM<sub>10</sub>-Tageskonzentrationswerten mit wenigstens 50 µg/m<sup>3</sup> und mehr. Das Vorgehen orientiert sich an der seit Januar 2005 europaweit gültigen Grenzwertsetzung für die Belastung mit PM<sub>10</sub>. Die 50-µg/m<sup>3</sup>-Schwelle sollte nicht öfter als 35-mal jährlich überschritten werden. Mit 40 µg/m<sup>3</sup> wurde ein Jahresmittelwert fixiert, der ebenfalls nicht zu überschreiten ist (Diederichsen 2005; UBA 2009; UBA 2003). Anzumerken ist hierzu, dass es eine sog. Konzentratschwelle - unterhalb welcher eine Gesundheitsgefährdung ausgeschlossen werden kann - nicht gibt (UBA 2009). Unabhängig von der Konzentrathöhe gehen die PM<sub>10</sub>-Werte in die Studie ein, da sie taggenau je Untersuchungsgebiet selektiert werden. Die taggenaue Selektion orientiert sich am Auftreten von Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F und den zu diesen Expositionstagen im Rahmen des Case-crossover-Designs auszuwählenden Kontrolltagen.

Für den Untersuchungszeitraum 2002 - 2006 sind für die 439 Untersuchungseinheiten 44.908 Expositionstage mit PM<sub>10</sub>-Belastung ( $> 50$  µg/m<sup>3</sup>) zu konstatieren. Ohne die interpolierten Daten beliefe sich die Feinstaubexposition auf 25.323 Belastungstage.

Die Expositionstage werden zu Anfang nach dem Auftreten in den Kreistypen 1 bis 9 dargestellt.

Tabelle 16 Häufigkeiten PM<sub>10</sub>-Belastungstage nach Kreistypen

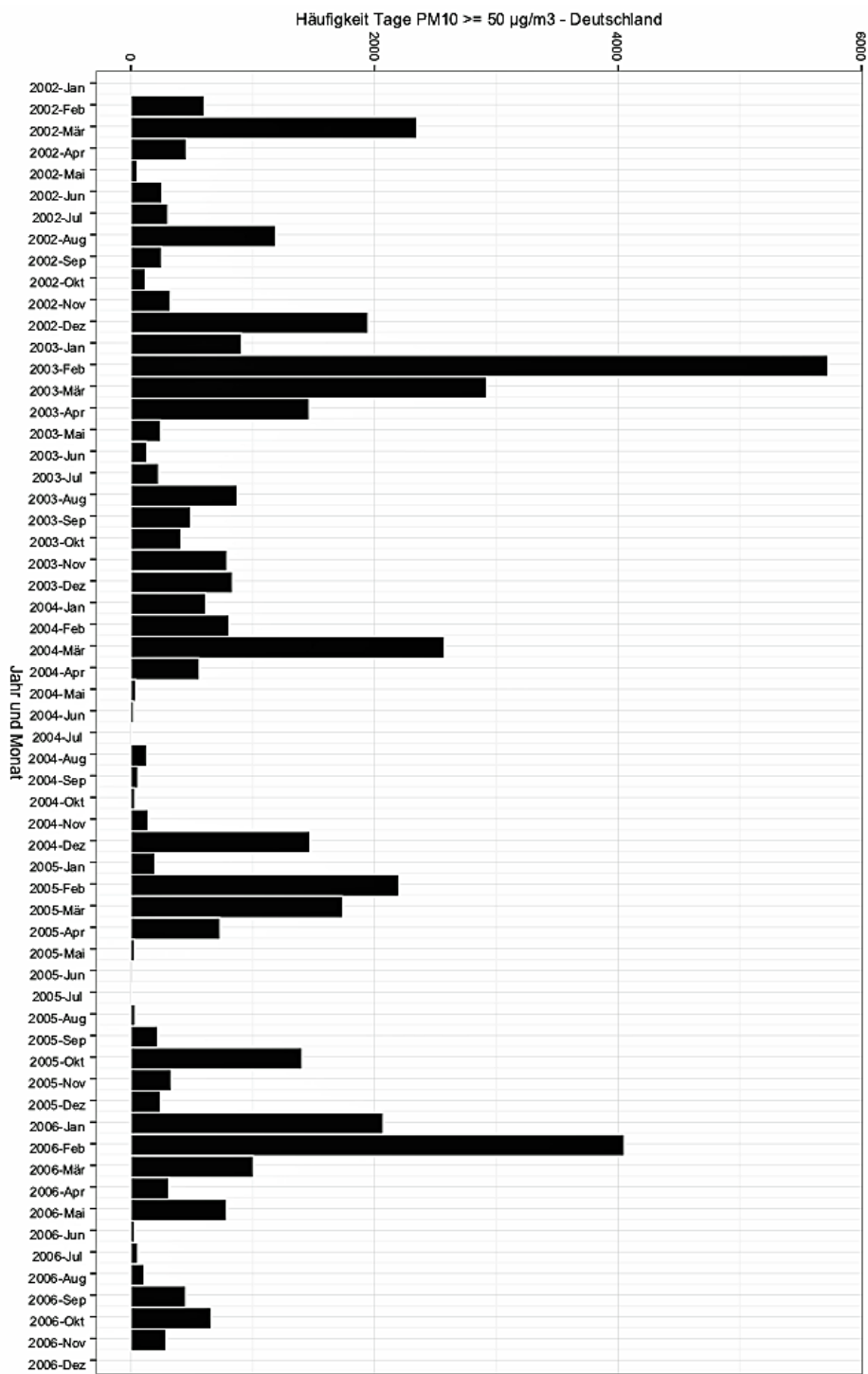
Kreistyp	Anzahl Kreise je Kreistyp	Häufigkeit Tage PM10 $\geq$ 50 µg/m <sup>3</sup>
1	41	5.082
2	45	3.521
3	36	3.093
4	20	1.896
5	31	4.082
6	91	8.480
7	74	7.079
8	63	8.347
9	38	3.328

Quelle: eigene Darstellung

Die Tabelle veranschaulicht die Belastungstage unter der Exposition PM<sub>10</sub> mit wenigstens 50 µg/m<sup>3</sup> je Kreistyp.

Die nach Monaten aggregierte PM<sub>10</sub>-Belastungstage im gesamten Untersuchungszeitraum zeigt die nachfolgende Darstellung.

Abb. 27 Aggregierte PM<sub>10</sub>-Belastungstage - Raumbezug ges. Untersuchungsgebiet



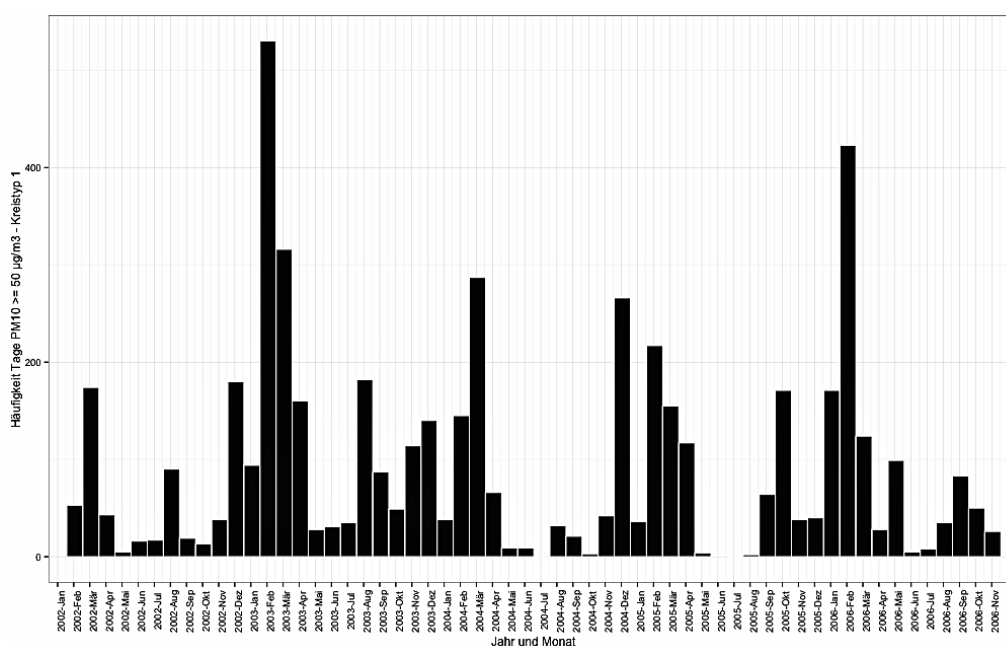
Quelle: UBA, eigene Darstellung

Nach Monaten aggregierte PM<sub>10</sub>-Belastungstage im gesamten Untersuchungszeitraum. Berücksichtigt sind Konzentrationen von 50 µg/m<sup>3</sup> und höher.



Zu erkennen ist ein deutlicher Trend von Tagen mit großen Frequenzen, vorwiegend zu Beginn wie auch im Spätherbst der untersuchten Jahre. Hingegen sind in den interessierenden Sommermonaten vergleichsweise wenige Expositionstage zu verzeichnen. Mit Blick auf die Quartale 2 & 3 beeindrucken am ehesten die Augustmonate der Jahre 2002/3. Die eindrucksvollen Expositionshäufigkeiten in den Februarmonaten 2002 und 2006 beruhen auf außergewöhnlich oft auftretenden Inversionswetterlagen (UBA 2009). Auch das UBA (2009) zeigt diesen Trend in seiner Publikation »Feinstaubbelastung in Deutschland« (vgl. auch UBA 2003). Das ist auch bei der Betrachtung der aggregierten Häufigkeiten für die Analyseebene Kreistyp 1 zu sehen (Abb. unten). Dort fallen zusätzlich zu den angesprochenen Augustmonaten die Monate September 2003, 2005 und 2006 mit hohen PM<sub>10</sub>-Konzentrationen auf. Kontrastierend dazu zeigt das Histogramm (Abb. auf der folgenden Seite) für den Kreistyp 9 die entsprechenden Häufigkeiten mit Feinstaubbelastung (identische Rahmenbedingungen wie zuvor). Auf dieser räumlichen Bezugsebene fallen die Augustmonate 2002/3 und die September der Jahre 2003 und 2006 ins Auge.

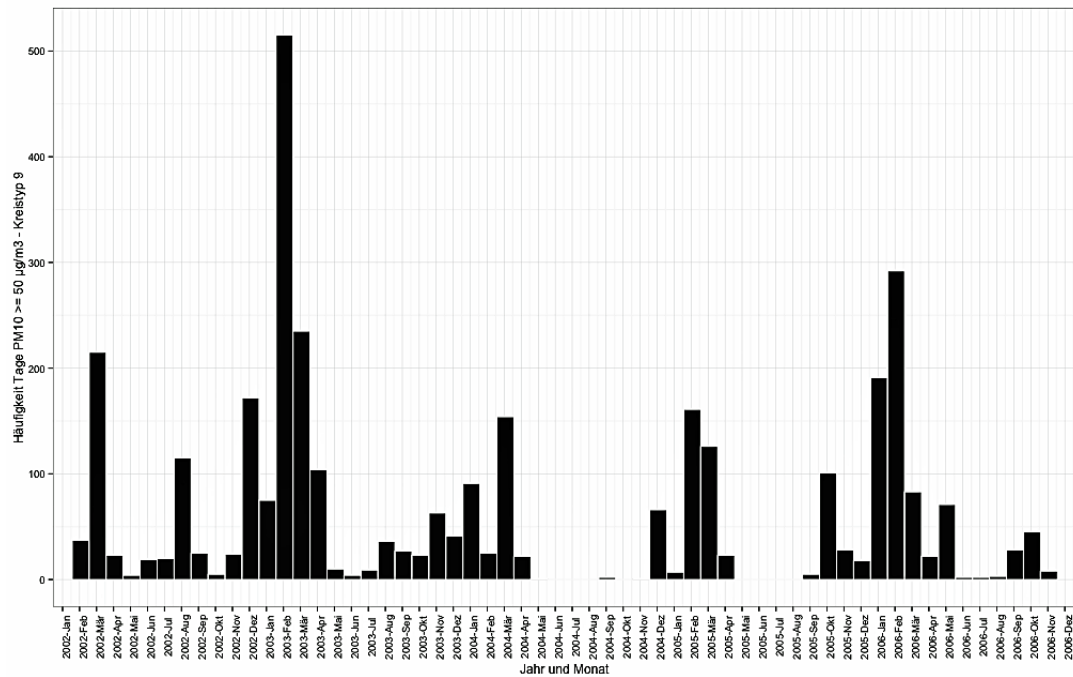
Abb. 28 Aggregierte PM<sub>10</sub>-Belastungstage - Raumbezug Kreistyp 1



Quelle: UBA, eigene Darstellung

Nach Monaten aggregierte PM<sub>10</sub>-Belastungstage im gesamten Untersuchungszeitraum. Räumliche Bezugsebene ist der Kreistyp 1. Berücksichtigt sind Konzentrationen von 50 µg/m<sup>3</sup> und höher.

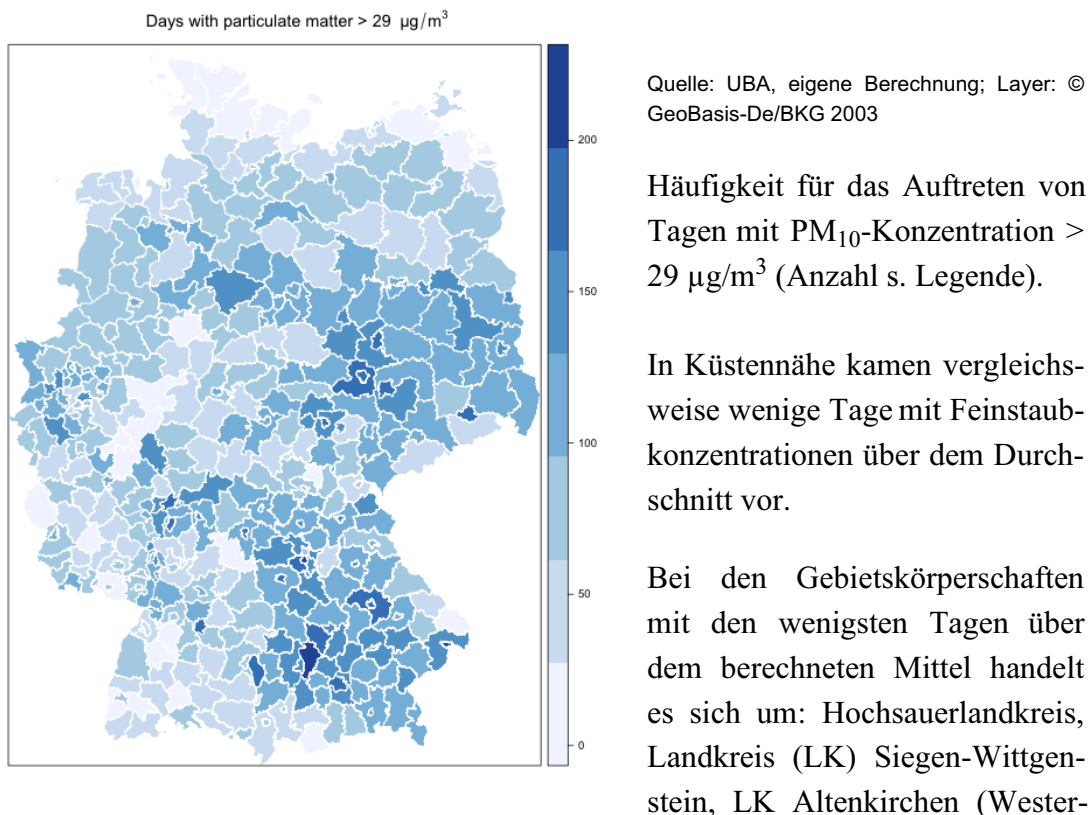
Abb. 29 Aggregierte PM10-Belastungstage - Raumbezug Kreistyp 9



Quelle: UBA, eigene Darstellung

Nach Monaten aggregierte PM<sub>10</sub>-Belastungstage im gesamten Untersuchungszeitraum. Räumliche Bezugsebene ist der Kreistyp 9. Berücksichtigt wurden Konzentrationen von 50 µg/m<sup>3</sup> und höher.

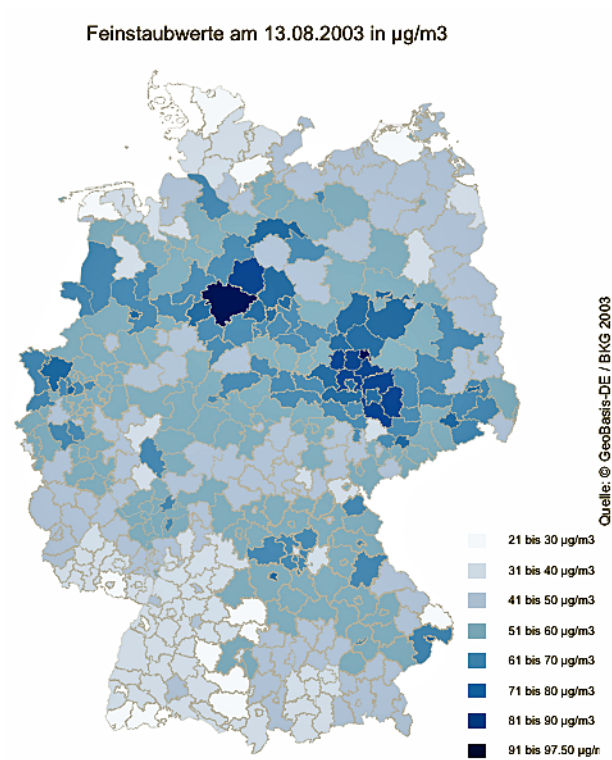
An Tagen mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F verzeichneten die untersten Beobachtungseinheiten die mittlere PM<sub>10</sub>-Konzentration 29 µg/m<sup>3</sup>. Wie häufig dieser Durchschnittswert je Einheit überschritten wurde, zeigt die Choroplethenkarte auf der nächsten Seite.

Abb. 30 Häufigkeit Tage mit PM<sub>10</sub>-Konzentration > 29 µg/m<sup>3</sup> im Zeitraum 2002 - 2006

Bei den Gebietskörperschaften mit den wenigsten Tagen über dem berechneten Mittel handelt es sich um: Hochsauerlandkreis, Landkreis (LK) Siegen-Wittgenstein, LK Altenkirchen (Westerwald), Westerwaldkreis (Nordrhein-Westfalen), Main-Tauber-Kreis und LK Calw sowie LK Offenbach (Baden-Württemberg).

Den zuvor dargestellten Histogrammen lässt sich entnehmen, dass Tage mit PM<sub>10</sub>-Belastung in den Sommermonaten des Untersuchungszeitraums vergleichsweise weniger auftraten. Der Zusammenhang zwischen thermischer Belastung, Feinstaubbelastung und Mortalität sowie Morbidität erscheint somit zunächst nicht automatisch nachweisbar. Diese Hypothese scheinen die geplotteten PM<sub>10</sub>-Konzentrationen für zwei Expositionstage des Sommers 2003 zu stützen (Abbildungen folgende Seite). Auch hier wurde der 13.08.2003 herangezogen. Um die Variabilität der Feinstaubkonzentrationen zeigen zu können, ist mit dem 15.08.2003 ebenfalls ein sehr warmer Tag ausgewählt worden. Die Konzentrationen in den Untersuchungsgebieten unterscheiden sich zwischen beiden Tagen deutlich. Die Betrachtung der gesamten Hitzeperiode 2003 zeigt, dass die PM<sub>10</sub>-Konzentrationen um das Niveau vom 15.08.2003 schwanken und am 13.08.2003 ihr Maxima erreichten.

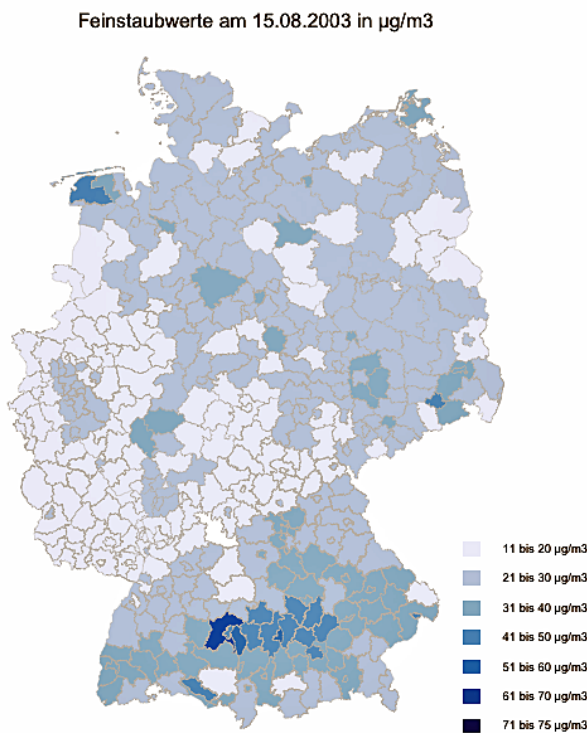
Abb. 31 PM<sub>10</sub>-Konzentrationen am 13.08.2003 in den Untersuchungsgebieten



Quelle: UBA, eigene Darstellung

PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in den Untersuchungsgebieten am 13.08.2003.

Abb. 32 PM<sub>10</sub>-Konzentrationen am 15.08.2003 in den Untersuchungsgebieten



Quelle: UBA, eigene Darstellung

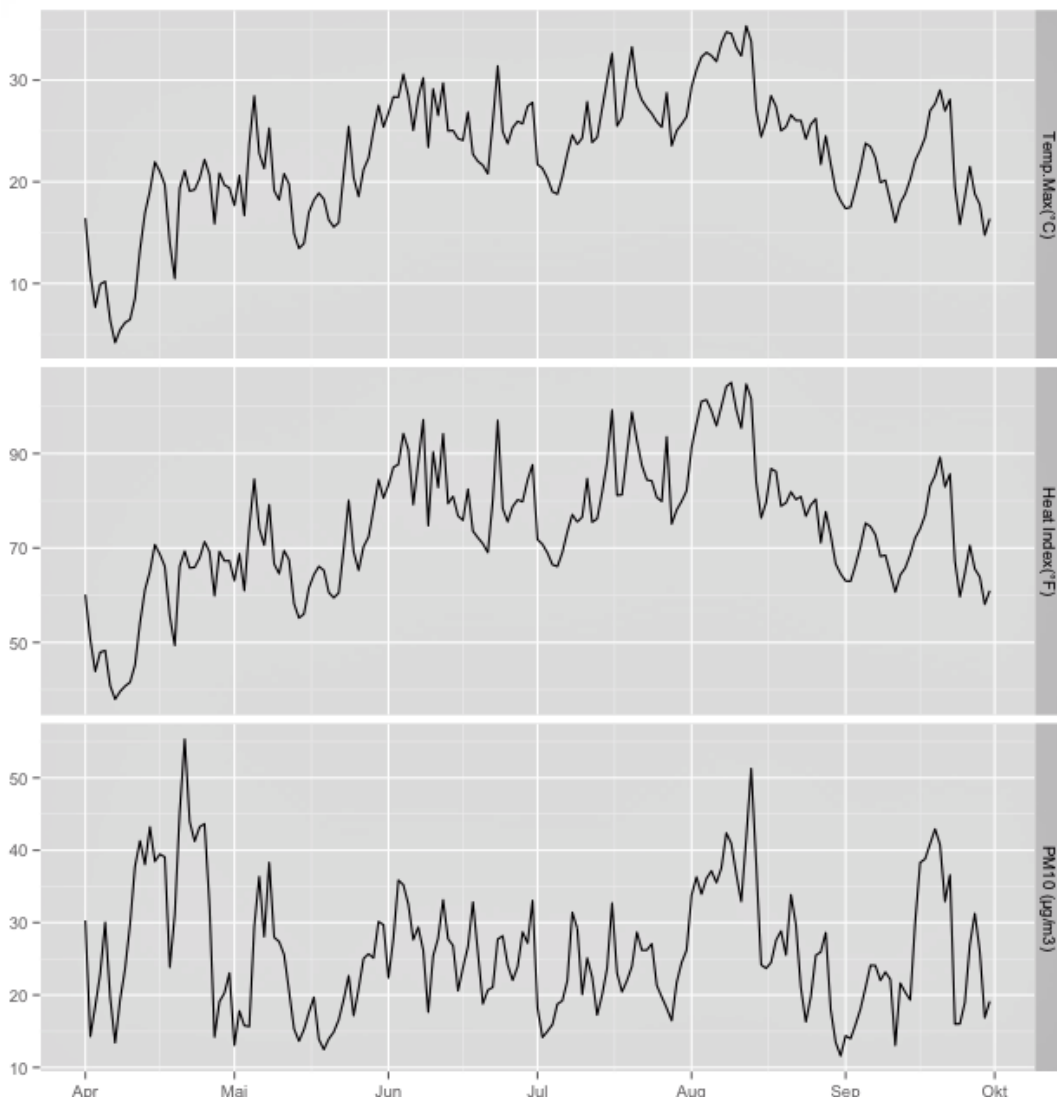
PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in den Untersuchungsgebieten am 15.08.2003.

### 5.1.3 Klima- und Feinstaubexposition

Unabhängig von der in der Deskription verwendeten Konzentratschwelle  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gehen die  $\text{PM}_{10}$ -Werte in die Studie ein. Dass dies durchaus sinnig ist, legen folgende Abbildungen nahe.

Dargestellt sind zweimal drei Zeitreihen für den Beobachtungszeitraum 01.04.2003 - 30.09.2003. Die Abbildung auf dieser Seite enthält die Parameterwerte aggregiert für das gesamte Bundesgebiet. Auf der Folgeseite sind die Werte für die Analyseebene Kreistyp 1 zusammengefasst.

Abb. 33 Ausprägungen Expositionsparameter - Raumbezug BRD (01.04. - 30.09.2003)

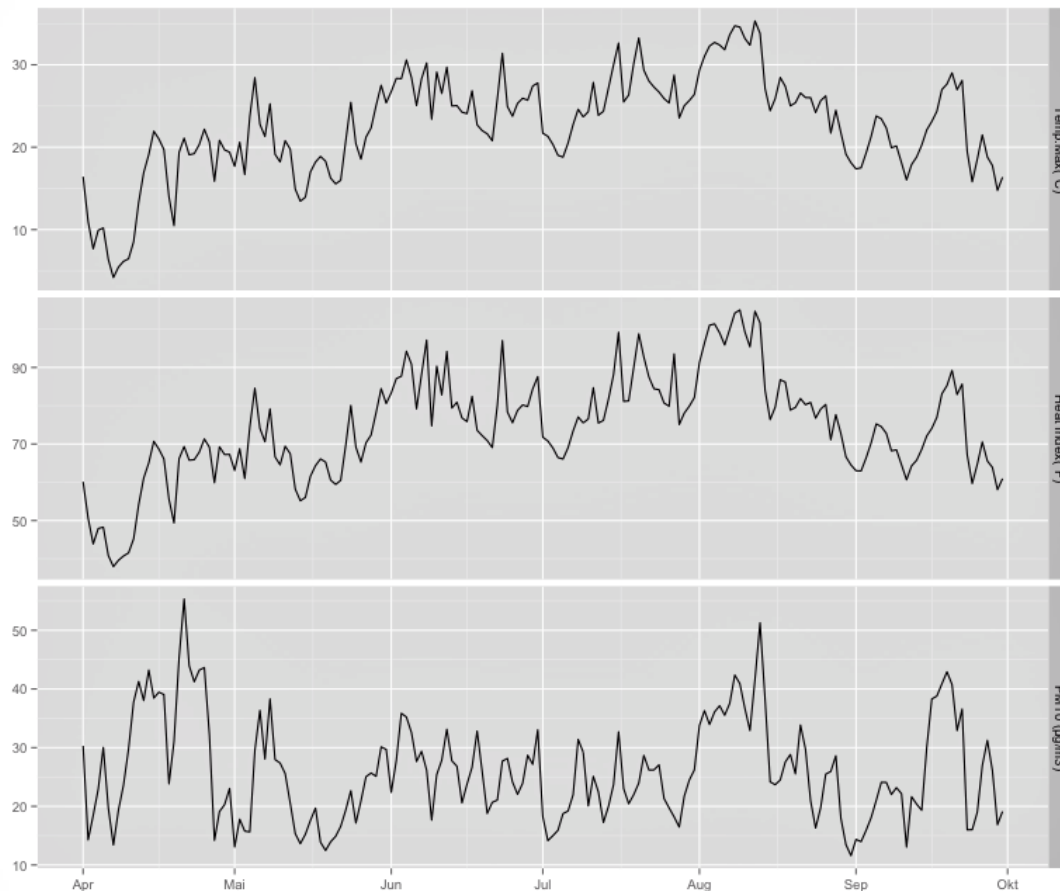


Quelle: DWD, UBA, eigene Darstellung; Beschreibung s. u.

Jeweils in der oberen Zeitreihe sind die Temperaturverläufe in °C abgebildet. Daran anschließend zeigen die mittleren Zeitreihen den Fortgang der Heat Index-Werte in °F. Beide Abbildungen geben unten die PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in µg/m<sup>3</sup> wieder.

Die Parameterausprägungen in den Zeitreihen für Deutschland und dem Kreistyp 1 verlaufen sehr ähnlich. Augenscheinlich steht die tägliche PM<sub>10</sub>-Konzentration nicht unmittelbar mit der Ausprägung der thermischen Parameter in Bezug. Allerdings, und das erscheint durchaus bemerkenswert, steigt die Konzentration während der Hitzeperiode und erreicht ihr Maximum mit dem dritten und abschließenden Extrem der Hitzewelle.

Abb. 34 Ausprägungen Expositionsparameter - Raumbezug Kreistyp 1 (01.04. - 30.09.2003)

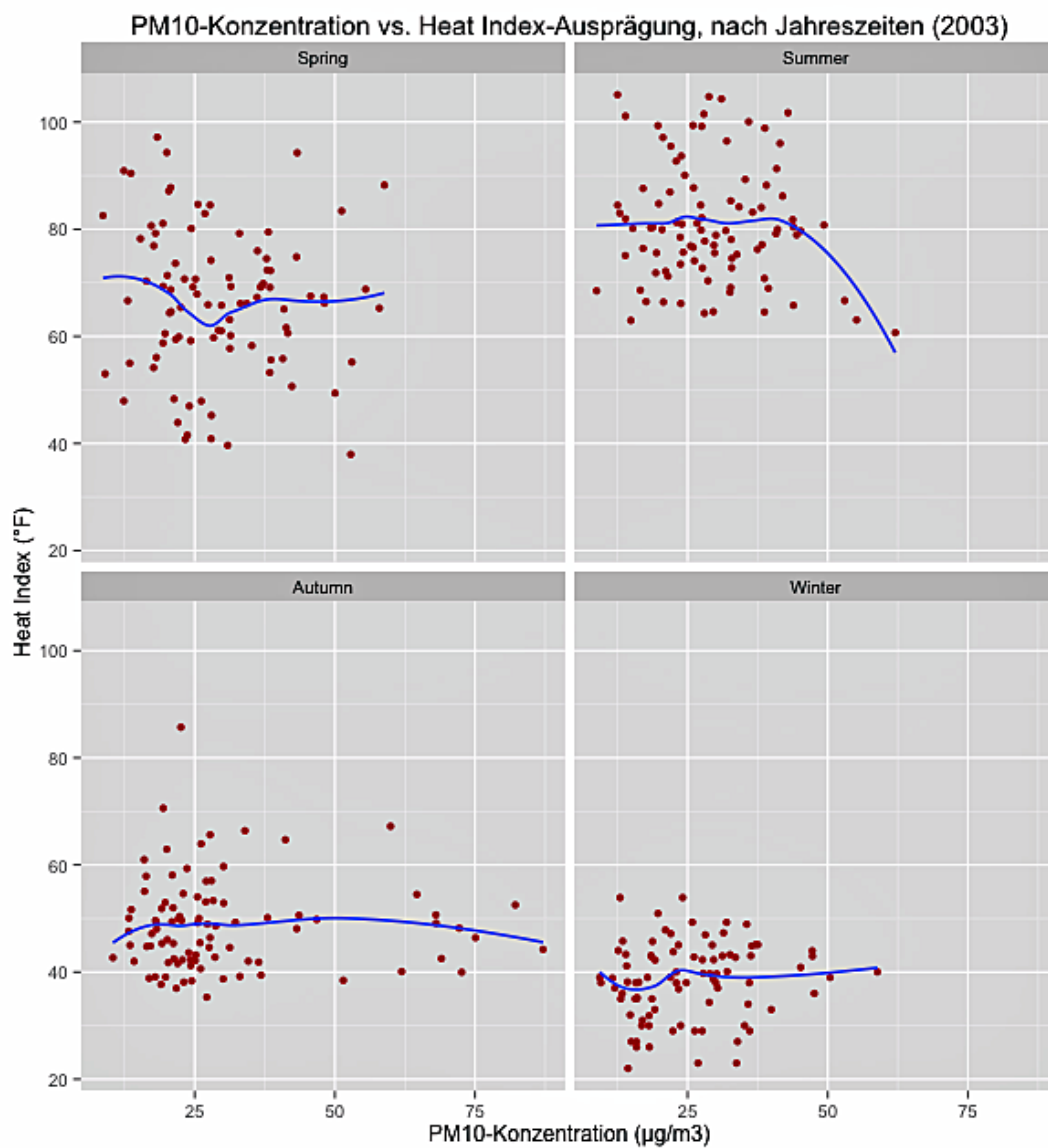


Quelle: DWD, UBA, eigene Darstellung; Beschreibung s. o.

Aus anderen Perspektiven lassen sich die Verteilungen der Heat Index- und Feinstaubwerte für das Jahr 2003 mit den nächsten Plots betrachten. Die mittleren Verteil-

lungen der Heat Index- und Feinstaubwerte zeigen nach den Jahreszeiten getrennte Abbildungen.

Abb. 35 PM<sub>10</sub>-Konzentration vs. Heat Index-Ausprägung, nach Jahreszeiten (2003)



Quelle: DWD, UBA, eigene Darstellung

Geplottet sind die Heat Index-Werte (rote Punkte) und PM<sub>10</sub>-Konzentrationen (blaue Kurve) nach Jahreszeiten für das Jahr 2003, über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Der in den oben geplotteten Zeitreihen erkennbare Anstieg der PM<sub>10</sub>-Konzentration während der Hitzeperiode (01.08. - 16.08.2003) ist hier nicht offensichtlich, was zu einer analytischen Betrachtung der beiden zusammenwirkenden Expositionen veranlasst.

### Wechselbeziehung Klimaparameter und PM<sub>10</sub>

Die zuvor für das Jahr 2003 dargestellten Verläufe der Heat Index-Ausprägungen wie auch der Feinstaubkonzentrationen ließen sich für die Jahre 2002 sowie 2004 - 2006 in ähnlicher Weise und mit vergleichbaren Erkenntnissen darstellen. Um einen tieferen Einblick zu bekommen, erscheint eher die Betrachtung der Expositionen unter dem Aspekt möglicher Korrelationen angezeigt.

Eine Überblick gebende Korrelationsmatrix für die thermischen Variablen: Maximaltemperatur (°C u. °F), Luftfeuchtigkeit, Heat Index (°C u. °F) und PM<sub>10</sub> sowie den berücksichtigten räumlichen Kontextfaktoren (s. Charakterisierung der siedlungsstrukturellen Kreistypen) über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigte zunächst keine imponierende Korrelation (Korrelationskoeffizienten → Pearsons *r* & Spearman's *ρ*). Etwas andere Bilder ergaben die Korrelationsmatrizen für beide Expositionen nach Aufgliederung des gesamten Untersuchungszeitraumes in die Quartale 1 - 4 (Koeffizient → Pearsons *r*). Zu erkennen ist in der Tabelle die Korrelation beider Variablen miteinander in den Quartalen 2 und 3, also den im Rahmen der Studie interessierenden Perioden.

Tabelle 17 Korrelationen Heat Inex-Werte & PM<sub>10</sub>-Konzentrationen nach Quartalen

	Korrelationen Heat Index nach Quartal				Korrelationen PM10-Konzentr. nach Quartal			
	Quart.1	Quart.2	Quart.3	Quart.4	Quart.1	Quart.2	Quart.3	Quart.4
Cmax	0,99	0,99	0,98	1	-0,03	0,24	0,51	-0,01
LuFe	-0,31	-0,38	-0,62	-0,24	-0,14	-0,29	-0,3	0,01
Fmax	0,99	0,99	0,98	1	-0,03	0,24	0,51	-0,01
HI_F	1	1	1	1	-0,02	0,23	0,51	0
HI_C	1	1	1	1	-0,02	0,23	0,51	0
PM10	-0,02	0,23	0,51	0	1	1	1	1
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.

Quelle: DWD, UBA, eigene Darstellung

Auszüge aus den Korrelationsmatrizen für links → Heat Index gegen PM<sub>10</sub> und Maximaltemperatur (Cmax), maximale Temperatur in Fahrenheit (Fmax), Heat Index (HI\_F), Heat Index in °C (HI\_C) sowie räumliche Faktoren (aus Platz-



gründen nicht dargestellt) wie auch rechts  $\rightarrow$   $PM_{10}$  gegen thermische Variablen und Raumfaktoren. Letztere sind ebenfalls nicht wiedergegeben. Hervorgehoben sind die Korrelationen im Quartal 3. Für das 2. Quartal sind sehr schwache Korrelationen feststellbar. Zur Anwendung kam Pearsons  $r$ .

Die hellgelb hervorgehobenen Koeffizientenwerte legen einen schwachen positiven Zusammenhang nahe.

Neben der gezeigten, für kontinuierliche Daten nutzbaren Korrelationsstatistik, erfolgten Zusammenhangsanalysen zwischen den thermischen Variablen respektive der Exposition Feinstaub und den räumlichen Faktoren Kreistyp 1 - 9 sowie den Anteilen an Erholungs- und Freifläche. Für derartige Statistiken ist nach Dormann (2013) die polyseriale Korrelationsanalyse heranzuziehen (vgl. Zöfel 2002). Mit dem sog. Korrelationskoeffizienten »*polycor::hetcor*« wurden die jeweiligen Statistiken realisiert. Ein Zusammenhang war dabei nicht festzustellen.

#### **5.1.4 Zusammenschau Klima- und Feinstaubtrends**

Aus dem Dargestellten lässt sich zusammenfassen, dass die Intensität der thermischen Exposition in den Sommermonaten der untersuchten Jahre deutlich divergiert. Die Häufigkeiten für das Auftreten potenziell gefährdender Hitzetage liegen in den Juli- und Augustmonaten der Jahre 2003 und 2006 deutlich über den Frequenzen selbiger Monate der Jahre 2002, 2004 und 2005. Der Vergleich der Häufigkeiten für das Auftreten hitzebelastender Tage zwischen den Kreistypen zeigt, dass die Expositionstageshäufigkeiten zwischen den Kreistypen variieren (Bsp.: Hitzetage ( $\geq 80$  °F) im Kreistyp 1 im Juli 2003 ca. 800 Tage im Kreistyp 9 etwa 625 Tage). Für die untersten Beobachtungseinheiten (kreisfreie Stadt, Landkreis, etc.) lässt sich zeigen, dass die südlichen und teils auch die östlichen Erhebungsgebiete vergleichsweise häufiger hohe bzw. sehr hohe Indexwerte verzeichnen. Küstennah gelegene Einheiten und ebenso die nordwestlich gelegenen Untersuchungsgebiete sind weniger stark von Hitze betroffen.

Veranschaulicht wurde daneben auch die kurzfristige Variabilität der thermischen Expositionswerte. So weichen die Heat Indexausprägungen an aufeinander folgenden Tagen teils deutlich voneinander ab. Räumlich differieren die Ausprägungen an einem Beobachtungstag zudem ebenfalls beachtlich.

---

Die für die Expositionsvariable Hitze gegebene Zusammenfassung lässt sich sinngemäß auf die Einflussgröße Feinstaub übertragen. Allerdings tritt die Exposition  $PM_{10}$  mit umfangreichen Frequenzen zu Beginn wie auch im Spätherbst der untersuchten Jahre auf. Für die interessierenden Sommermonate sind hingegen vergleichsweise wenige Expositionstage auszumachen. Die Feinstaubbelastung folgt aber dem thermischen Extrem während der Hitzeperiode 2003.

Räumlich differieren die  $PM_{10}$ -Belastungstage, wobei abnehmende Frequenzen für die dünner besiedelten Kreistypen auszumachen sind. Dies trifft so auch auf die Anzahl der Tage mit Feinstaubbelastung im Sommer 2003 zu.

Beide Expositionen korrelieren miteinander, können somit einen additiven Effekt bewirken. Zusammenhangsanalysen zwischen den thermischen Variablen respektive der Exposition Feinstaub und den räumlichen Faktoren Kreistyp 1 - 9 sowie den Kontextfaktoren zur Flächennutzung erbrachten keinen feststellbaren Zusammenhang.

#### ***Konsequenzen aus der Betrachtung beider Expositionsstränge***

- Bestehen hitzeassoziierte Gesundheitsrisiken, dann sollten diese in ihrer Ausprägung einen temporären wie auch räumlichen Trend zeigen.
- Bestehen Gesundheitsrisiken durch die Exposition Feinstaub bzw. existiert eine additive Wirkung beider Expositionen, dann sollten diese ebenfalls entsprechende Tendenzen erkennen lassen.
- Da kontextuelle Faktoren, wie etwa Kennzahlen der Flächennutzung (Anteil Waldfläche oder Anteil Siedlungs- und Verkehrsfläche, etc.), nicht mit der thermischen Variable und auch nicht der Feinstaubvariable korrelieren, indizieren etwaige Effekte dieser Kontextvariablen, ob es sich bei ihnen um Risiko- bzw. Schutzfaktoren handelt.

## 5.2 Mortalität und Morbidität im Beobachtungszeitraum

Die Deskription der Mortalitäts- und auch Morbiditätsdaten in ihrem zeitlichen Fortgang sowie ihrem räumlichen Bezug erfolgt auf der übergeordneten Ebene Bundesrepublik Deutschland und auch dem vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung definierten siedlungsstrukturellen Kreistyp.

Bei der Betrachtung der zeitlichen Variation werden zur besseren Übersichtlichkeit die Sterbehäufigkeiten sowie Hospitalisationen u. a. je Quartal gewählt. Die quartalsweise bzw. vierteljährliche Betrachtung bezieht sich entweder auf das Quartal 1 - 4, welches für die zusammengefassten Quartale des Untersuchungszeitraumes 2002 - 2006 steht, oder auf ein entsprechendes Quartal eines dann hervorgehobenen Jahres. Die zeitlichen und räumlichen Deskriptionen ergänzen Häufigkeitsdarstellungen in Histogrammform. Hierdurch werden die Wertebereiche der interessierenden Mortalität wie auch Morbidität übersichtlich beschrieben.

Das Unterkapitel 5.2.5 veranschaulicht die Integration der Mortalitätsdaten in das statistische Modell. Da das Vorgehen bei der Morbiditätsstatistik identisch ist, wird dort auf eine ebensolche Darstellung verzichtet.

Die in der Dissertation verwendeten Mortalitäts- und Morbiditätsdaten wurden von den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder zur Verfügung gestellt. Zwischen den Ämtern und dem datennutzenden Doktoranden besteht ein vertraglich geregeltes Nutzungsrecht, welches u. a. die Zitationspflicht regelt. Die Publikation der Mortalitätsdaten ist mit:

- FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Todesursachenstatistik, Erhebungsjahre 2002 - 2006, eigene Berechnungen

und die der Morbiditätsdaten mit:

- FDZ der statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Krankenhausstatistik, Erhebungsjahre 2002 - 2006, eigene Berechnungen

zu kennzeichnen. FDZ steht dabei für Forschungsdatenzentrum. FDZ werden von den Statistischen Landesämtern vorgehalten. Da vorliegende Arbeit Mortalitäts- wie auch Morbiditätsdaten ausschließlich von den genannten Ämtern nutzt, welche der Doktorand im FDZ am Standort Erfurt verarbeitete, soll die umfangreiche Zitation an dieser Stelle exemplarisch vermerkt sein. Daten sowie hervorgegangene Visualisierungen werden aus Platzgründen in den folgenden Kapiteln durch:

- FDZ, eigene Berechnungen

kenntlich gemacht.

### 5.2.1 Das Mortalitätsgeschehen im Beobachtungszeitraum

Im Untersuchungszeitraum verstarben in der Bundesrepublik Deutschland 4.165.753 Menschen, die in einer Beobachtungseinheit (kreisfreie Stadt, Landkreis, etc.) gemeldet waren. Im gleichen Zeitraum ebenfalls Verstorbene ohne Registrierung bleiben in einer raumfokussierten Studie ohne Berücksichtigung. Bei diesen Fällen handelt es sich entweder um Menschen ohne festen Wohnsitz oder fremdstaatliche Personen.

Eine große Gruppe der 4.165.753 Verstorbenen wurde mit einer im Kapitel 2.4.1 als hitzeassoziiert beschriebenen Sterbeursache diagnostiziert, 2.168.540 Fälle. Die folgende Tabelle visualisiert die von der Gesamtzahl der Verstorbenen und der Gesamtzahl der hitzeassoziierten Todesfälle auf die von Rothfus (1988) definierten Risikoniveaus entfallenden Sterbezahlen.

Tabelle 18 Mortalität nach Risikostufen

Risikostufe	Bereich	Mortalität gesamt	Mortalität assoziiert
	0 – 148 °F	4.165.753	2.168.540
Risikostufe 1	≥ 80 - ≤ 89 °F	274.182	138.366
Risikostufe 2	≥ 90 - ≤ 105 °F	167.073	84.829
Risikostufe 3	≥ 105 - ≤ 129 °F	34.363	17.431
Risikostufe 4	≤ 130 °F	166	77

Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

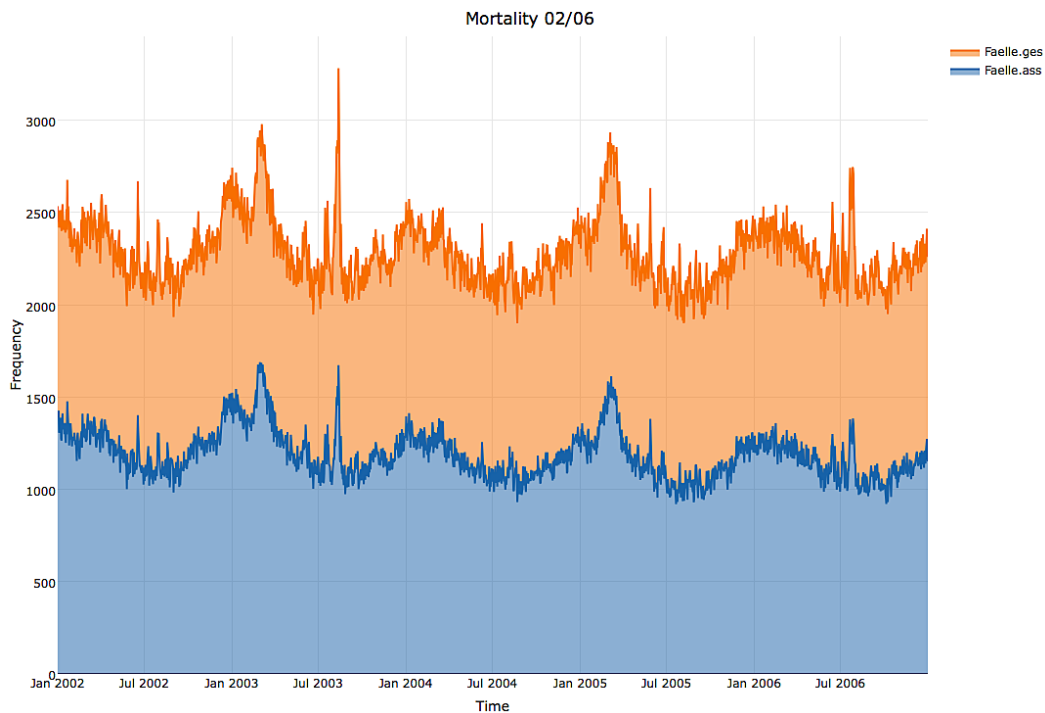
Mortalität 2002 - 2006  
gesamt und nach abgestuften Risiken. Analytisch finden die Todesfälle an

Tagen mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F Eingang. In Summe sind demgemäß  $138.366 + 84.829 + 17.431 + 77 = 240.703$  Sterbefälle interessant.

## 5.2.2 Mortalität im zeitlichen Fortgang

Einen Überblick über das Sterbegeschehen im zeitlichen Fortgang des Untersuchungszeitraumes gibt das folgende Schaubild.

Abb. 36 Mortalität im Beobachtungszeitraum



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die für die Ebene der BRD aggregierten täglichen Häufigkeiten der Todesfälle:

→ Orangefarbene Zeitreihe: Sterbefälle gesamt, mit einem Min.: 1900, Median: 2257, Mean: 2281 und Max.: 3282.

→ Blaue Zeitreihe: hitzeassoziierte Todesfälle, mit einem Min.: 920, Median: 1169, Mean: 1188 und Max.: 1689.

Bei den aggregierten Werten beider Zeitreihen imponieren die Mortalitätsgipfel in den Quartalen 1 und 4 aller Jahre im Untersuchungszeitraum. Die Quartale 2 und 3 sind - bis auf einzelne, teilweise deutlich ausgeprägte Peaks - durch die Abnahme der Mortalitätsfrequenz gekennzeichnet. Im Einklang mit der internationalen Studienlage hatte anscheinend die Hitzeperiode im August 2003 besonderen Einfluss auf das Mortalitätsgeschehen in der Bundesrepublik Deutschland. Dies trifft so auch auf die extrem heiße Periode im Jahr 2006 zu. Allerdings zeigt die bundesweite Statistik

massive Mortalitätsanstiege im 1. Quartal der Jahre 2003 und 2005, welche spekulativ Influenzaepidemien zugeordnet werden könnten (ICD10-Code: Grippetracheitis = Influenza = J11(.1)). Um hier einen Ausgangspunkt für die spätere Ergebnisdiskussion festzuhalten, zeigt nachstehende Tabelle die 35 häufigsten Todesursachen im Jahr 2003. Insgesamt wurden in diesem Jahr 937 verschiedene Sterbeursachen diagnostiziert.

Tabelle 19 Todesursachen im Jahr 2003

Diag.03ges	Freq.03ges	Diag.Quar03	Freq.Quar03	Diag.1Quar03	Freq.1Quar03	Diag.Month03	Freq.Month03	Diag.07_08.03	Freq.07_08.03
I25	92673	I25	23168	I25	27077	I25	7723	I25	7841
I21	64229	I21	16057	I50	18927	I21	5352	I21	5330
I50	59118	I50	14780	I21	17513	I50	4926	I50	4662
C34	39293	C34	9823	I64	10515	C34	3274	C34	3610
I64	37579	I64	9395	C34	9842	I64	3132	I64	3536
J44	21282	J44	5320	J44	6969	J44	1774	J18	2292
J18	20889	J18	5222	J18	6819	J18	1741	C18	1822
C18	19926	C18	4982	C18	4935	C18	1660	J44	1715
C50	17456	C50	4364	E14	4578	C50	1455	C50	1613
E14	16678	E14	4170	I11	4546	E14	1390	E14	1522
I11	15845	I11	3961	C50	4338	I11	1320	I70	1360
I70	13926	I70	3482	I70	3847	I70	1160	I11	1332
C25	12687	C25	3172	I63	3158	C25	1057	I63	1241
I63	12249	I63	3062	R99	3073	I63	1021	C25	1182
R99	12020	R99	3005	C25	3063	R99	1002	R99	1145
C16	11847	C16	2962	I67	2948	C16	987	C61	1074
C61	11510	C61	2878	C61	2946	C61	959	C16	1044
K70	10726	K70	2682	C16	2945	K70	894	I67	956
I67	9985	I67	2496	K70	2735	I67	832	K70	917
I48	8851	I48	2213	I48	2333	I48	738	I48	819
C80	8639	C80	2160	I61	2271	C80	720	C80	808
I61	8341	I61	2085	I26	2077	I61	695	C20	746
C20	7980	C20	1995	C80	2073	C20	665	A41	686
I26	7601	I26	1900	C20	1997	I26	633	I26	670
I10	6689	I10	1672	I10	1797	I10	557	I61	643
I42	6424	I42	1606	I42	1760	I42	535	G20	619
K74	6381	K74	1595	K74	1689	K74	532	I10	615
C22	6018	C22	1504	I49	1641	C22	502	I42	583
T71	5945	T71	1486	E11	1521	T71	495	C56	545
C56	5759	C56	1440	A41	1518	C56	480	T71	543
A41	5739	A41	1435	T71	1453	A41	478	N39	540
E11	5718	E11	1430	G30	1445	E11	476	C22	523
C67	5653	C67	1413	G20	1429	C67	471	E11	521
G20	5468	G20	1367	R54	1424	G20	456	G30	509
I49	5454	I49	1364	C22	1412	I49	454	C67	505

Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die Häufigkeiten der Sterbeursachen für das gesamte Bundesgebiet (li. Spalten), beschränkt auf die 35 führenden Diagnosen. Die Spalten 3 und 4 zeigen die Diagnosehäufigkeiten für ein statistisches Quartal (hellgrau). Das statistische Quartal wurde gebildet, indem die Jahreszahlen der Diagnosen durch 4 dividiert wurden. Daneben zeigt die Tabelle die Häufigkeiten für die Diagnosen im ersten Quartal 2003 (dunkelgraue Spalten mit den Namen: Diag.1Quar03 bzw. Freq.1Quar03). Um auch die Diagnosen im Zeitraum 20.07.-20.08.2003 vergleichen zu können, zeigen die hellgrauen Spalten mit den Zeilenüberschriften: Diag.Month03 bzw. Freq.Month03 die statistischen Diagnose-

---

häufigkeiten für einen Monat. Dafür wurden die Jahresfrequenzen durch 12 dividiert. Die beiden dunkelgrauen Spalten rechts beziehen sich auf die empirischen Diagnosehäufigkeiten für die Zeitspanne 20.07.- 20.08.2003.

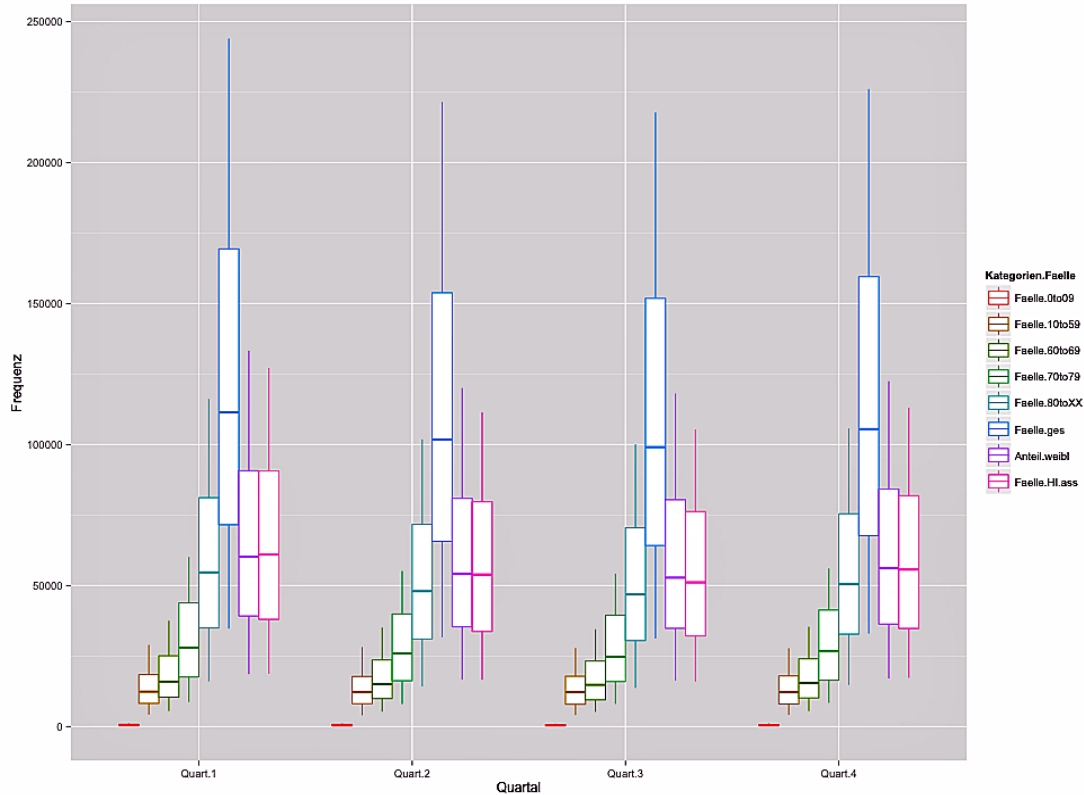
Der Vergleich der statistisch aufgeführten Daten mit den empirischen Daten zeigt überwiegende Zunahmen der einzelnen Diagnosen im 1. Quartal 2003, was dem visuellen Befund obiger Zeitreihen entspricht. Im 1. Quartal nehmen Krankheiten des Kreislaufsystems (ICD-Klassifikation: I00 - I99) und des Atemsystems (ICD-Klassifikation: J00 - J99) deutlich zu. Die Diagnose J18 bezieht sich auf Bronchopneumonien. Offensichtlich treten Bronchopneumonien aber auch im Zeitraum 20.07.- 20.08.2003 häufig auf. Auch die Krankheiten des Kreislaufsystems und der Atemwege nehmen hier vergleichsweise deutlich zu.

Bösartige Neubildungen (ICD-Klassifikation: C00 - C48) dominieren das Sterbengeschehen, bleiben jedoch relativ ausgeglichen, teils mit Zuwächsen im Zeitraum 20.07.- 20.08.2003. Daneben treten Endokrine, Ernährungs- und Stoffwechselkrankheiten (ICD-Klassifikation: E00 - E90, insbesondere Diabetes mellitus) sowie Krankheiten des Verdauungssystems (ICD-Klassifikation: K00 - K93, hier Lebererkrankungen) ausgeglichen auf. Auch die durch medizinische Interventionen verursachten Infektionen (A41) führen bemerkenswert oft zum Tod.

Aus der gemeinsamen Beschau der Zeitreihen im Schaubild oben sowie der letztbesprochenen Tabelle müsste ggf. ein Fokuswechsel bei der Modellierung des Zusammenhangs zwischen Exposition und Mortalität erfolgen. Neben den hitzeassoziierten Todesursachen nehmen auch die Frequenzen der in dieser Arbeit zunächst nicht interessierenden Diagnosen in den relevanten Untersuchungszeiträumen zu. Notwendig könnte daher die Berücksichtigung sämtlicher Todesursachen sein. Zur Fundierung möglicher Assoziationen sind immer auch Kausalitätskriterien heranzuziehen (vgl. Rothman et al. 2008; Rothman/Greenland 2005; Dreier et al. 2012). Mit Rücksicht auf die Kriterien »biologische Plausibilität« und »Kohärenz«, denen auch in internationalen Studien durchgängig zumindest implizit Beachtung geschenkt wird (vgl. Kreienbrock 2012), erfolgt keine Veränderung des interessierenden Diagnosespektrums.

Mit dem Aspekt der zeitlichen Variation wird die nach Altersklassen getrennte Mortalität dargestellt. Betrachtet werden die aggregierten Quartale für den Untersuchungszeitraum 2002 - 2006.

Abb. 37 Mortalität nach Altersklassen und Quartal



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Die Boxplots sind je Quartal (Quart.1 - Quart.4) von li. nach re. zu lesen, wobei der jeweils ausgeprägteste Boxplot (blau) im Zentrum des Quartals die Gesamtmortalität im Quartal veranschaulicht (Legende: Faelle.ges).

Links begonnen zeigt der nur als roter Strich identifizierbare Boxplot die Sterbezahls der Altersklasse 0 - 9 (Legende: Faelle0to9). Daneben zeigt die braune Box die Altersklasse 10 - 59 (Legende: Faelle10to59). Im Alter 60 - 69 Jahre verstarben Menschen, für welche der dunkelgrüne Boxplot steht (Legende: Faelle60to69). Grün gekennzeichnet ist die Altersklasse 70 - 79 (Legende: Faelle70to79). Zwischen diesem Boxplot und dem für die Gesamtmortalität steht jener für die im höheren Alter verstorbenen Menschen (Legende: Faelle80toXX). Rechts neben der Gesamtsterblichkeit zeigt die lila eingefärbte Box den Frauenanteil an der Gesamtmortalität (Legende: Anteil.weibl). Auf diese folgt der rote Boxplot für den Anteil der hitzeassoziierten Mortalität an der gesamten Sterblichkeit (Legende: Faelle.HI.ass).



Bezogen auf den gesamten Untersuchungszeitraum ist der im Schaubild: **Mortalität im Beobachtungszeitraum** bereits zu sehende Mortalitätsgipfel im 1 und 4 Quartal klar wiederzufinden. Die Variation der Sterblichkeit im Jahresverlauf lässt sich relativ ausgeglichen auch für die nach Altersklassen differenzierte Mortalität sehen. Menschen im Mindestalter von 70 Jahren und älter versterben der Gesamtmortalität folgend in den Quartalen 1 und 4 häufiger. Für das Quartal 3, indem i. d. R. Hitzeperioden auftreten, zeigen die Boxplots für die Altersklassen 70 - 79 Jahre sowie 80 Jahre und älter die vergleichsweise geringste Mortalität. Auch für die hitzeassoziierten Sterbeursachen erkennt man diesen Trend recht gut. Der Anteil weiblicher Personen an der Gesamtmortalität orientiert sich durchgängig an der gesamten Sterblichkeit.

Im Rahmen einer kleinräumig angelegten Studie interessiert natürlich auch das durchschnittliche Sterbe geschehen auf der untersten Bezugsebene, den kreisfreien Städten, freien Hansestädten, Stadtkreisen, Städteverbänden sowie Landkreisen und Kreisen. Aus datenschutzrechtlichen Gründen ist die Darstellung der entsprechenden Statistik lediglich auf der Aggregatebene aller 439 angesprochenen Einheiten möglich. Die nachstehende Tabelle zeigt somit die Mortalitätshäufigkeiten für den gesamten Beobachtungszeitraum 2002 - 2006.

Tabelle 20 Kleinräumige Mortalität

Durchschnittliche tägliche Mortalität in Deutschland 2002 – 2006						
	Min.	1 <sup>st</sup> Qu.	Median	Mean.	3 <sup>rd</sup> Qu.	Max
Todesfälle gesamt	1	2	4	6	7	141
Todesfälle hitzeassoziiert	0	1	2	3	4	72
Anteil Frauen an gesamten Todesfällen	0	1	2	3	4	85

Quelle: FDZ,  
eigene Berechnungen

Zu entnehmen ist der Tabelle, dass sich im Beobachtungszeitraum

mindestens 1 Todesfall in jeder der 439 Einheiten täglich ereignete. Median, Mittelwert und 3. Quantil zeigen, dass durchschnittlich ca. 50 % der Menschen an einer hitzeassoziierten Krankheit verstarben. Beide Kennwerte legen ebenfalls nahe, dass etwa die Hälfte der Verstorbenen Frauen waren. Die maximale Sterbezahl 141 ist einer Metropole zuzuordnen. In diesem Fall verstarben in Berlin 141 Menschen an einem Tag.

### 5.2.3 Mortalität im Kreistyp

Die Betrachtung der Mortalität auf Ebene des siedlungsstrukturellen Kreistyps berücksichtigt die aggregierten Einwohneranzahlen je Kreistyp.

Tabelle 21 Mortalität im Kreistyp - Einwohnerzahl (100.000)

Kreistyp	Anzahl je Kreistyp	Einwohner gesamt	Mortalität gesamt je 100.000 Einwohner (Heat Index $\geq$ 80 °F)	Mortalität Hitzeassoziiert je 100.000 Einwohner (Heat Index $\geq$ 80 °F)
1	41	17.846.852	5094	2560
2	45	13.148.689	4826	2498
3	36	5.948.414	4947	2605
4	20	2.646.039	4942	2597
5	31	5.288.542	5089	2624
6	91	14.457.660	4991	2618
7	74	10.632.064	5261	2834
8	63	8.188.880	5102	2708
9	38	3.920.047	5303	2778

Quelle: FDZ, INKAR 2009, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die Kreistypen, die Anzahl der Kreistypen, die aggregierten Einwohnerzahlen der zu den entsprechenden siedlungsstruktu-

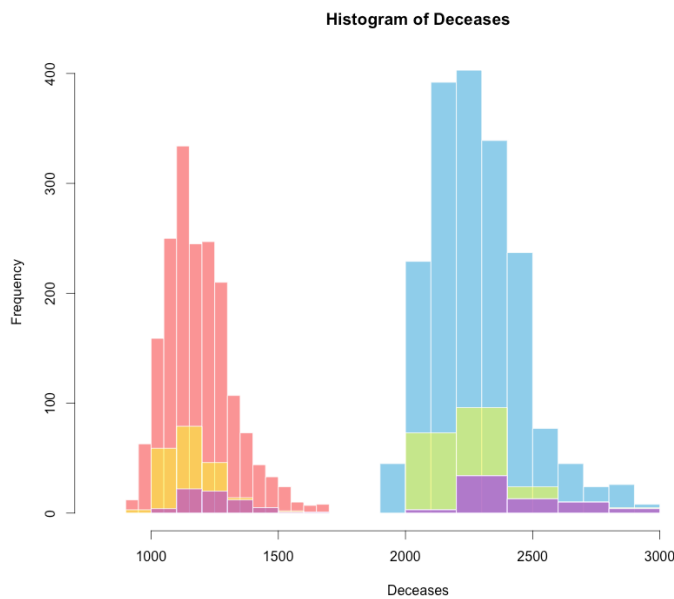
rellen Kreistypen gehörenden kreisfreien Städte, Hansestädte, Landkreise, Kreise etc., die gesamte Mortalität je 100.000 Einwohner sowie die hitzeassoziierte Mortalität bezogen auf 100.000 Einwohner.

Das auf identische Einwohnerfraktionen bezogene Mortalitätsgeschehen eröffnet eine leichte Differenzierung zwischen den Kernstädten sowie hochverdichteten Kreisen und den ländlichen Kreisen. Feststellbar ist ein höheres Sterbegeschehen in den ländlichen, sehr dünn besiedelten Kreisen (gesamte und hitzeassoziierte Mortalität).

### 5.2.4 Häufigkeitsverteilung der Mortalität

Das Häufigkeitshistogramm ist eine aufschlussreiche Methode zur Datenzusammenfassung, da es übersichtlich den Wertebereich einer Erhebungsvariablen zeigt (vgl. Timischl 2013; Dormann 2013; Toutenburg/Heumann 2008). Die Häufigkeitsverteilung der Mortalität im Untersuchungszeitraum visualisiert Abbildung 38.

Abb. 38 Häufigkeitsverteilung Mortalität



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

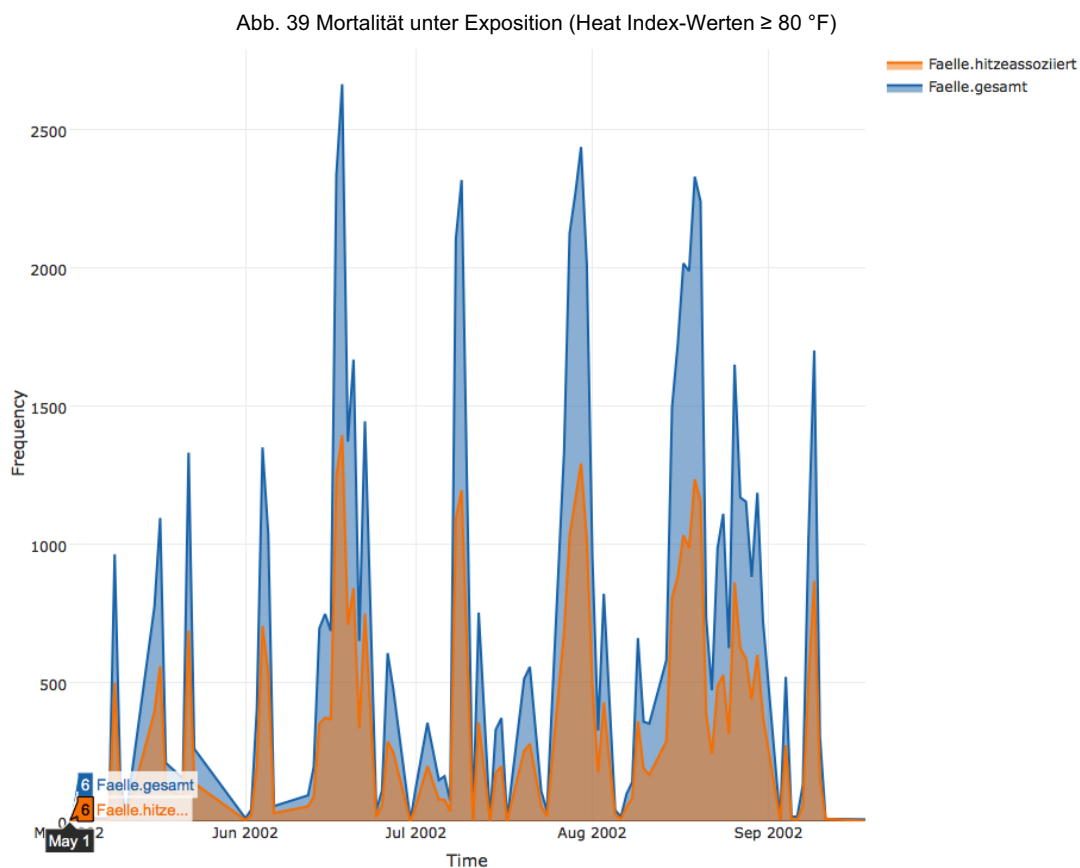
Das für den Betrachter rechtsseitig dargestellte blaue Histogramm gibt die Klassenhäufigkeiten der Gesamtmortalität wieder. Die Klassenbreite zwischen minimaler und maximaler Sterbehäufigkeit beträgt 100. Zu erkennen ist bspw., dass statistisch 2200 Todesfälle 400-mal auftraten (zweithöchste Klasse

im Histogramm). Für den gesamten Beobachtungszeitraum liegt der Median für die Gesamtsterblichkeit bei 2257 Todesfällen. Die Modalklasse zeigt die Sterbehäufigkeiten mit 2300 Fällen an. Die grün hervorgehobenen Häufigkeiten zeigen die unter der Exposition Hitze (Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F) anteilige Mortalität innerhalb der Klassen. Ebenfalls anteilmäßig hebt der lila gefärbte Bereich die Sterbefrequenzen für Tage mit Expositionswerten  $\geq 90$  °F hervor. Hier beträgt die Klassenbreite 200 Sterbefälle.

Linksseitig zeigt das rote Histogramm eine gleichgeordnete Statistik, jedoch ausschließlich für die hitzeassoziierte Mortalität. Auf 50 Todesfälle ist dabei die Klassenbreite bezogen. Mit dem gelben Histogrammbereich sind auch hier die Mortalitätsfrequenzen unter thermischer Exposition hervorgehoben (Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F), die teilweise von der lila gekennzeichneten Fläche (Tage mit Expositionswerten  $\geq 90$  °F) bedeckt wird. Für diesen Anteilsbereich überspannt eine Klasse 100 Fälle.

### 5.2.5 Mortalität im Regressionsmodell

In das Modell zur Beschreibung der hitzeassoziierten Mortalität gehen die Todesfälle mit entsprechender Diagnose unter Exposition ein. Fallzugehörig werden Altersklasse, Geschlecht, Kontextfaktoren und auch die räumliche Zuordnung modelliert. Dieses Vorgehen soll möglichst konkret dargelegt werden. Hierzu ist anzumerken, dass die nun dargestellten Zahlen in Summe dem räumlichen Sterbegeschehen entsprechen, aus Datenschutzgründen sind jedoch weitergehende Merkmale abstrahiert beschrieben. Ausgangspunkt hierfür bildet die Visualisierung der Mortalitätshäufigkeiten unter Exposition für das Beobachtungsjahr 2002 (Heat Index-Werte  $\geq 80$  °F).



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die Mortalitätsfrequenzen unter Exposition für das Jahr 2002. Die gesamte Mortalität zeigt der blaue Bereich. Die orangefarbenen Frequenzen zeigen die berücksichtigte hitzeassoziierte Mortalität. Beispielhaft ist der 01.05.2002 visualisiert.

Am 01.05.2002 verstarben bundesweit 2247 Menschen (durchschnittlich 1 bis 77 Fälle (77 = Berlin)). An diesem Tag erreichten die Außentemperaturen erstmals im Untersuchungszeitraum die 80-°F-Schwelle. 80 °F verzeichneten lediglich die kreisfreien Städte Passau und Rosenheim. Die in der Grafik hervorgehobenen 6 hitzeassoziierten Todesfälle ereigneten sich also in beiden Städten. Überwiegend verstarben hochaltrige Menschen, davon vorwiegend Männer.

**Relevante Variablen: Feinstaub, Geschlechterverteilung und Kontextfaktoren (Auszug)**

Die Stadt Passau ist dem Kreistyp 8 zugeordnet. Der Frauenanteil in Passau beläuft sich auf 53 %. Am 01.05.2002 wurde die mittlere Feinstaubkonzentration in Passau mit 29 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) gemessen. Die Werte ausgewählter räumlicher Kontextfaktoren umfassen: Einwohnerdichte mit 170 Personen/ $\text{km}^2$ , Siedlungsdichte 1889 Einwohner/ $\text{km}^2$ , Anteil Waldfläche 29,9 %, Anteil naturnahe Fläche 0,3 %, Anteil landwirtschaftliche Fläche 31,1 %, Anteil Erholungsfläche 0,9 %, etc..

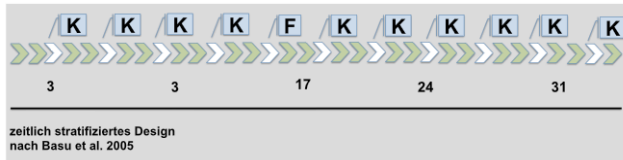
Auch Rosenheim gehört zum Kreistyp 8. Der Frauenanteil beläuft sich hier auf 51 %. Am 01.05.2002 wurde die mittlere Feinstaubkonzentration in Passau mit 24,62  $\mu\text{m}$  gemessen. Die Kontextfaktoren beinhalten bspw.: Einwohnerdichte mit 728 Personen/ $\text{km}^2$ , Siedlungsdichte 2361 Einwohner/ $\text{km}^2$ , Anteil Waldfläche 15,3 %, Anteil naturnahe Fläche 0,7 %, Anteil landwirtschaftliche Fläche 43,2 %, Anteil Erholungsfläche 1,8 %.

Der zweite Expositionstag (nicht kenntlich gemacht) folgte am 03.05.2002. Bundesweit verstarben an diesem Tag 2293 Menschen (durchschnittlich 1 - 10, 92 Menschen in Berlin). Die festgelegte Heat-Index-Schwelle wurde in den kreisfreien Städten Altötting, Deggendorf und Passau erreicht. In Summe verstarben in diesen Städten 10 Menschen.

Das im Modell verwendete Case-Crossover-Design verlangt die Zuspiegelung von vergleichenden Expositionstagen, aus denen die zu gegenüberzustellenden Expositionswerte stammen, da im Kern mit dem gewählten Design die Chance (oder auch das Risk Ratio) bestimmt wird, unter differierenden Expositionintensitäten zu versterben bzw. zu erkranken respektive die Verschlechterung einer bestehenden Krankheit zu erfahren. Das Methodikkapitel beschreibt die relevanten Ansätze zur Spezifikation der Referenztage bzw. -perioden (vgl. Maclure 1991; vgl. auch Rothman et al. 2008; Basu et al. 2005). Nach Basu und Kollegen (2005) sollte das sog. stratifizierte Referenzdesign gewählt werden, da mit diesem Verzerrungen vermeidbar sind. Das strati-

fizierte Design spielt den Expositionstagen 10 Referenztage zu. 4 Tage werden vor und 6 Tage nach dem Expositionstag arrangiert (Abb. 40).

Abb. 40 Das stratifizierte Case-Crossover-Design



»F« kennzeichnet den Fall und »K« die Kontrollen.

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Rothman et al. 2008: 605

Im Beobachtungszeitraum sind insgesamt 240.703 Beobachtungstage (jeder Fall = 1 Beobachtungstag) zu verzeichnen. Demgemäß vergrößert sich der Expositionstagesumfang um den Faktor 10 ( $10 \times 240.703 + 240.703 = 2.647.733$  Expositionstage). Die Spanne der Heat-Indexwerte in °F umfasst somit in Gänze: Min.: 38,00, 1stQu.: 71,00, Median: 78,00, 3rdQu.: 80,01 und Max.: 148,00.

Verbindung zur Morbiditätsstatistik: Die in diesem Unterkapitel dargestellten Datenmerkmale sind auf die Morbiditätsstatistik übertragbar. Die dort einfließenden Daten besitzen eine identische Struktur.

## 5.2.6 Das Morbiditätsgeschehen im Beobachtungszeitraum

Im Untersuchungszeitraum nahmen bundesdeutsche Krankenhäuser 85.226.445 Menschen mit einer amtlichen Registrierung in Deutschland auf. Von diesen verstarben 1.949.852. Immerhin 20.935.403 der Hospitalisierten wurden wegen einer im Kapitel 2.4.1 beschriebenen Diagnose aufgenommen. Mit Bezug auf die Gesamtzahl der Hospitalisierten und die Gesamtzahl der hitzeassoziierten Krankenhausfälle entfallen in die von Rothfus (1988) definierten Risikoniveaus die in folgender Tabelle aufgeführten Anteile.

Tabelle 22 Morbidität nach Risikostufen

Risikostufe	Bereich	Morbidität gesamt	Verstorben im KH	Morbidität assoziiert
	0 – 148 °F	85.226.445	1.949.852	20.935.403
Risikostufe 1	≥ 80 - ≤ 89 °F	5.751.916	129.579	1.364.901
Risikostufe 2	≥ 90 - ≤ 105 °F	3.367.860	79.873	798.886
Risikostufe 3	≥ 105 - ≤ 129 °F	638.189	14.784	152.489
Risikostufe 4	≤ 130 °F	2.440	65	578

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

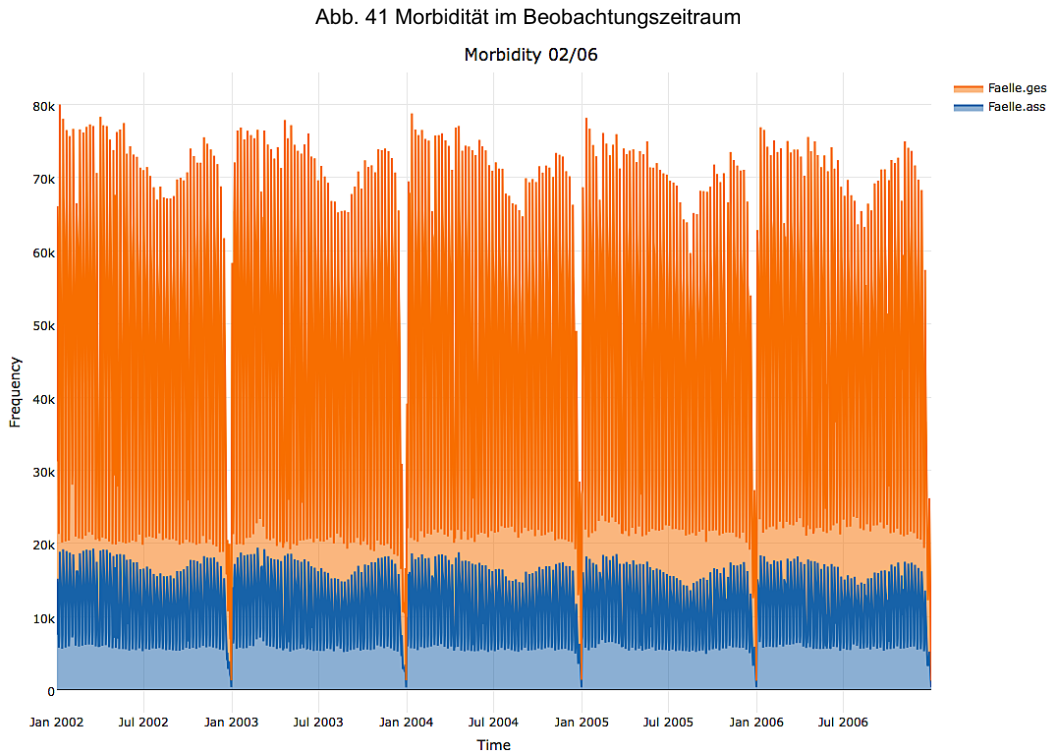
Morbidität 2002 - 2006 gesamt sowie abgestuft

nach Risikoniveaus. In die Modellierung der hitzebedingten Morbidität gehen die Krankenhausfälle an Tagen mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F ein. In Summe sind demgemäß  $1.364.901 + 798.886 + 152.489 + 578 = 2.316.854$  Hospitalisationen zur Beantwortung der Fragestellungen interessant.

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, in welcher Form die Mortalitätsdaten in das Modell eingehen und wie diesen die thermische Expositionsvariable zugespielt wird. Daran anschließend bleibt zu zeigen, dass  $2.316.854 \times 10 + 2.316.854 = 25.485.394$  Expositionstage bzw. die erhobenen Expositionswerte an diesen Tagen berücksichtigt werden (Zuspielung der Kontrolltage im Case-Crossover-Design). Damit überspannen die Ausprägungen der Heat-Index-Werte in °F den Wertebereich: Min.: 41, 1stQu.: 81, Median: 87, 3rdQu.: 94 und Max.: 148.

### 5.2.7 Morbidität im zeitlichen Fortgang

Einen ersten Eindruck über das Morbiditätsgeschehen im Fortgang des Untersuchungszeitraumes gibt Illustration 41.



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die für die Ebene der BRD aggregierten täglichen Häufigkeiten der Hospitalisationen (Einheit  $K = 1000$ ).

→ Orangefarbene Zeitreihe: Krankenhausfälle gesamt, mit einem Min.: 1223, Median: 50587, Mean: 46183 und Max.: 79993.

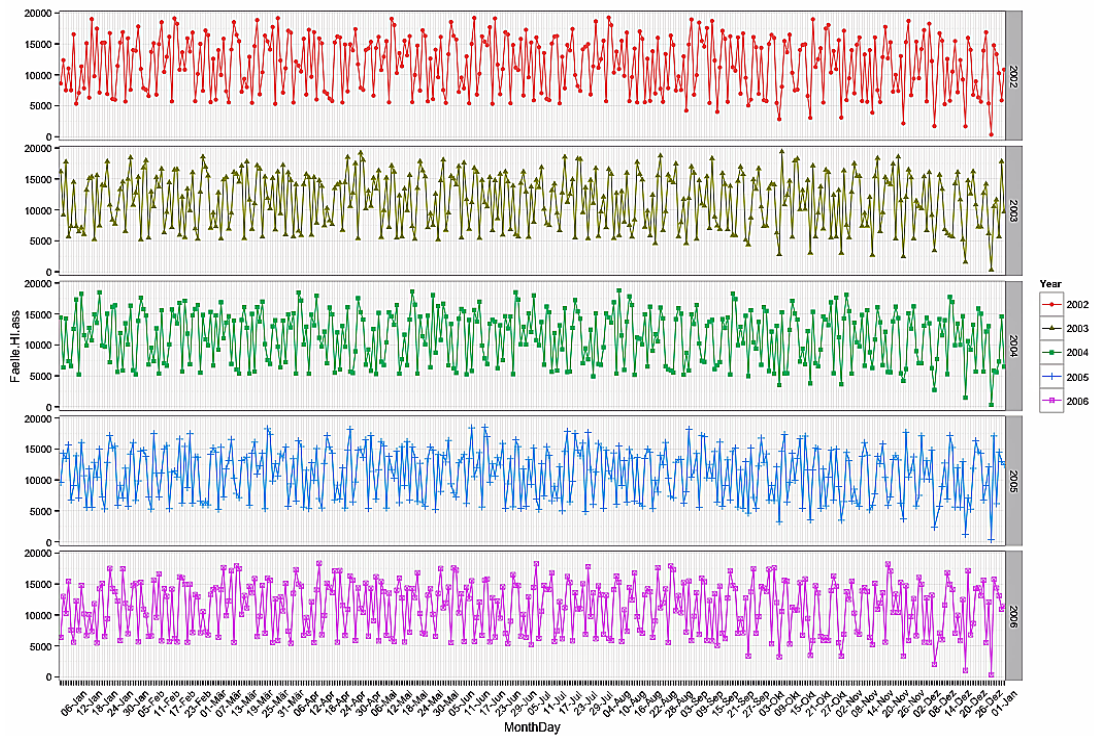
→ Blaue Zeitreihe: hitzeassoziierte Hospitalisationen, mit einem Min.: 305, Median: 12123, Mean: 11341 und Max.: 19402.

Abweichend von den zeitlichen Abfolgen des Mortalitätsgeschehens zeigen die Zeitreihen zur Gesamtmorbidität wie auch hitzeassoziierten Morbidität keinen augenscheinlichen Expositionsbezug. Zu sehen ist der deutliche Rückgang der Hospitalisationen im 3. Quartal, der wohl den Sommerferien und umfänglichen sommerlichen Urlaubszeiten geschuldet ist. Gut erkennbar sind die Reduktionen der Hospitalisationen am Ende der Jahre im Beobachtungszeitraum. Die relativ gut zusammenpassenden Kurvenverläufe lassen eher auf ein durch die Kalenderwochen bestimmtes



Hospitalisationsgeschehen schließen. Diesen Eindruck festigt Schaubild 42. Es zeigt die hitzeassoziierte Morbidität im Jahresverlauf 2002 - 2006.

Abb. 42 Hitzeassoziierte Morbidität im Beobachtungszeitraum



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die aggregierten Morbiditätsfrequenzen für die hitzeassoziierten Diagnosen, nun segmentiert nach den Beobachtungsjahren 2002 - 2006. Die an die X-Achse angefügten Daten geben den sechstägigen Fortgang im Jahresverlauf wieder.

In allen 5 Zeitreihen erscheinen die Hospitalisationshäufigkeiten in den Sommermonaten eher unauffällig gegenüber der potenziellen Exposition Hitze. Mit dem Wissen aus der Mortalitätsstatistik, die ja durchaus einen Einfluss von Hitze auf das Sterbegeschehen nahe legt, interessieren die durchschnittlichen täglichen Hospitalisationen im Zeitraum 20.7. - 20.8. aller Untersuchungsjahre. Die wesentlichen Kennzahlen für diese Zeiteinheiten dokumentiert die Tabelle auf der nachfolgenden Seite.

Tabelle 23 Hitzeassoziierte Morbidität 20.7. - 20.8.2002/6

Jahr	Min.	Median	Mean	Max.
2002	5391	12347	10952	15893
2003	5245	12016	10833	15961
2004	5264	11736	10743	15479
2005	5187	11454	10108	14963
2006	5600	11672	10306	15427

Die Tabelle zeigt die Häufigkeitsverteilung für die durchschnittliche Tagesmorbidität in der Zeitspanne 20.7. - 20.8.2002/6.

Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Auch die auf den Zeitraum 20.07. - 20.08.2002/6 reduzierte Statistik erlaubt es noch nicht, von einem potenziellen Einfluss der Exposition Hitze auf die Morbidität in Deutschland zu sprechen. Allenfalls das Morbiditätsmaximum 2003 könnte darauf hindeuten. Gegebenenfalls ist die betrachtete Periode zu lang, und kurzfristige Effekte verblassen. Möglich wäre aber auch die Variation des Morbiditätsspektrums. Daher wird es beispielhaft für das Jahr 2003 veranschaulicht. Es wäre impraktikabel an dieser Stelle die 1627 gestellten Diagnosen im Einzelnen zu betrachten. Die Beschränkung auf die 35 häufigsten Hospitalisationsgründe soll aber zumindest einen Anhaltspunkt für spätere Überlegungen bieten.

Tabelle 24 Morbidität im Jahr 2003

Diag.03ges	Freq.03ges	Diag.Quar03	Freq.Quar03	Diag.1Quar03	Freq.1Quar03	Diag.Month03	Freq.Month03	Diag.07_08.03	Freq.07_08.03
I25	351303	I25	87826	I25	97142	I25	29275	I25	29010
F10	279731	F10	69933	I50	74122	F10	23311	F10	26470
I20	263135	I20	65784	J18	71149	I20	21928	I20	20564
I50	262269	I50	65567	F10	68774	I50	21856	I50	19274
K80	212057	K80	53014	I20	66167	K80	17671	S06	19105
S06	210017	S06	52504	K40	58046	S06	17501	J35	17190
J35	203698	J35	50924	K80	56373	J35	16975	K80	16683
K40	200198	K40	50050	I83	53570	K40	16683	O80	15630
J18	197337	J18	49334	J35	53541	J18	16445	I21	15137
I21	186595	I21	46649	S82	51702	I21	15550	I63	14583
H25	176468	H25	44117	S06	50055	H25	14706	C34	14232
M17	174161	M17	43540	J44	48477	M17	14513	K40	14172
I48	173654	I48	43414	H25	47318	I48	14471	J18	14143
O80	166811	O80	41703	M17	47235	O80	13901	I48	14128
S82	163615	S82	40904	I21	46665	S82	13635	N20	14124
I63	163582	I63	40896	I48	45598	I63	13632	H25	14113
I83	161457	I83	40364	O80	45136	I83	13455	M17	14004
M23	159503	M23	39876	M23	43004	M23	13292	C50	13841
C34	157134	C34	39284	I63	42567	C34	13094	M23	13473
C50	156061	C50	39015	C50	41831	C50	13005	M51	13441
G47	155056	G47	38764	S72	41032	G47	12921	G47	13046
S72	149953	S72	37488	C34	40973	S72	12496	S72	12671
M51	147796	M51	36949	A09	40040	M51	12316	E11	12640
E11	142842	E11	35710	G47	39490	E11	11904	I70	12505
M16	142221	M16	35555	M16	39140	M16	11852	S82	12475
I70	137889	I70	34472	E11	37848	I70	11491	S52	11786
J44	137818	J44	34454	M51	37261	J44	11485	M16	11459
N20	137246	N20	34312	I10	36176	N20	11437	A09	11444
I10	135639	I10	33910	I70	35335	I10	11303	Z51	11106
A09	131850	A09	32962	N20	33176	A09	10988	K35	10388
S52	125486	S52	31372	S52	32381	S52	10457	G40	10013
Z51	124099	Z51	31025	Z51	30052	Z51	10342	I10	9776
G40	118808	G40	29702	G40	29991	G40	9901	C18	9659
K35	117803	K35	29451	D25	29676	K35	9817	M54	9561
M54	109577	M54	27394	K35	29318	M54	9131	R55	9446

---

Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die Diagnosehäufigkeiten der festgestellten Hospitalisationsgründe für das gesamte Bundesgebiet (li. Spalten). Daneben zeigen die Spalten 3 und 4 die Diagnosehäufigkeiten für ein statistisches Quartal (hellgrau). Das statistische Quartal wurde gebildet, indem die Häufigkeiten je ICD-10-Diagnose für das Jahr 2003 durch 4 dividiert wurden. Daneben zeigt die Tabelle die Frequenzen für die Diagnosen im 1. Quartal 2003 (dunkelgraue Spalten mit den Spaltennamen: Diag.1Quar03 bzw. Freq.1Quar03).

Um auch die Hospitalisationsursachen im Zeitraum 20.07.- 20.08.2003 vergleichen zu können, zeigen die hellgrauen Spalten mit den Zeilenüberschriften: Diag.Month03 bzw. Freq.Month03 die statistischen Diagnosehäufigkeiten für einen Monat. Dafür wurden die Jahresfrequenzen durch 12 dividiert. Die beiden dunkelgrauen Spalten rechts beziehen sich auf die empirischen Diagnosehäufigkeiten für die Zeitspanne 20.07.- 20.08.2003.

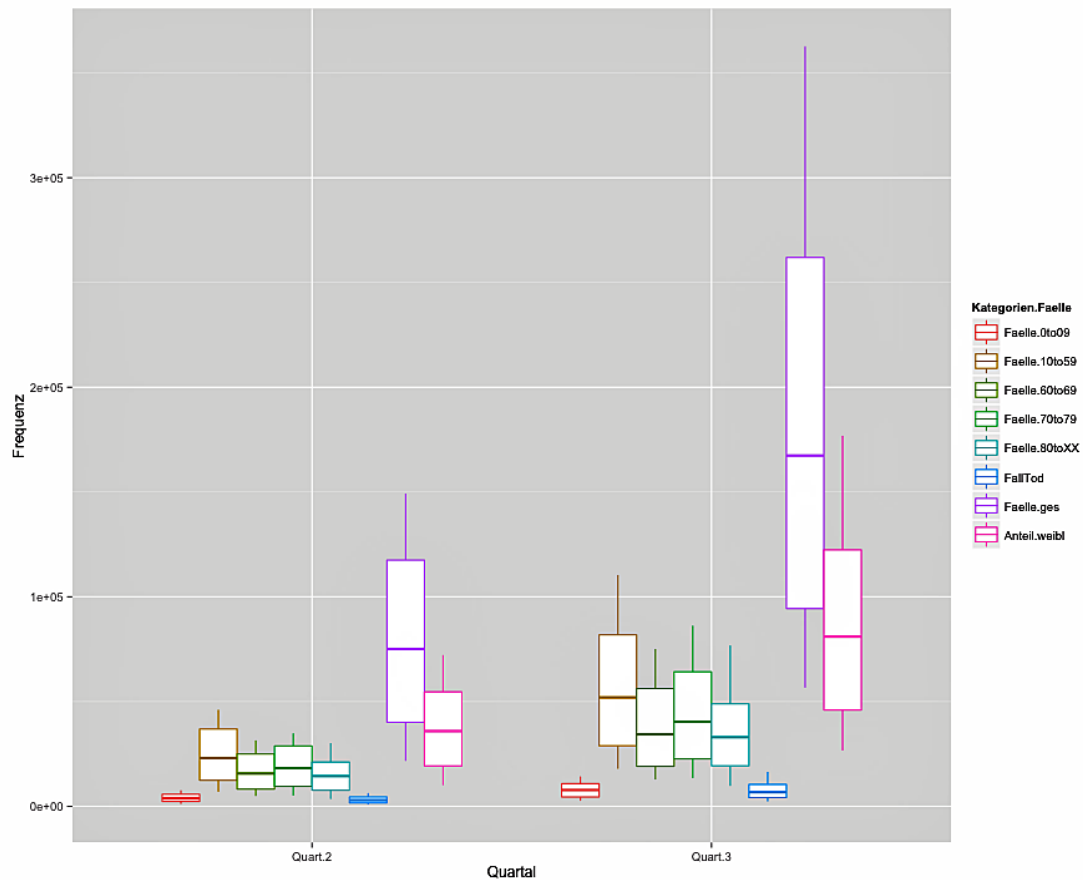
Die Zusammenstellung zeigt, dass sich die diagnostizierten Hospitalisationsursachen in den zu vergleichenden Zeiträumen teils deutlich unterscheiden. Gerade die Differenzierung zwischen statistischen und empirischen 1. Quartal unterstreicht dies. Beachtlich erscheint die Zunahme bei J18 (Pneumonie). Aber auch die Krankheiten des Kreislaufsystems (ICD-Klassifikation: I00 - I99) nehmen im 1. Quartal 2003 teils deutlich zu. Andere Erkrankungen des Atemsystems (ICD-Klassifikation: J00 - J99) steigen ebenfalls an. Im 1. Quartal 2003 nehmen beispielsweise auch Krankheiten deutlich zu (M17 oder auch H25), die mit thermischen Umgebungsbedingungen nicht in Bezug zu bringen sind.

Im Zeitraum 20.07.- 20.08.2003 gehen im Vergleich zum hier so benannten statistischen Vergleichsmonat sowohl die assoziierten Diagnosen (I20, I25) wie auch die nicht hitzeassoziierten Diagnosen (F10, K80) zurück.

Der Tabelle kann weiterhin entnommen werden, dass bösartige Neubildungen (ICD-Klassifikation: C00 - C48) neben psychischen und Verhaltensstörungen durch psychotrope Substanzen (ICD-Klassifikation: F10), Krankheiten des Verdauungssystems (ICD-Klassifikation: K00 - K93, hier Hernien und Krankheiten der Gallenblase), sehr häufig auftreten. Auch Krankheiten des Muskel-Skelett-Systems und des Bindegewebes (ICD-Klassifikation: M00 - M99) bestimmen das Morbiditätsgeschehen.

Ebenso wie bei der Deskription der Mortalität praktiziert, wird die nach Altersklassen getrennte Morbidität mit dem Gesichtspunkt der zeitlichen Variation nach den aggregierten Quartalen betrachtet (Abbildung 43). Den hohen Hospitalisationszahlen Rechnung tragend und mithin die Übersicht erhaltend, beschränkt sich die Darstellung auf Tage mit Head-Index-Werten  $\geq 80$  °F über die aggregierten 2. und 3. Quartale.

Abb. 43 Fallzahl hitzeassoziiierter Diagnosen ( $\geq 80$  °F) in den Quartalen 2 und 3



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Die Boxplots sind je Quartal von li. nach re. zu lesen, wobei der jeweils ausgeprägteste Boxplot (lila) im Zentrum des Quartals die Gesamtmorbidität veranschaulicht (Legende: Faelle.ges).

Links begonnen zeigt der rote Boxplot die Morbidität der Altersklasse 0 - 9 (Legende: Faelle0to9). Daneben veranschaulicht die braune Box die Altersklasse 10 - 59 (Legende: Faelle10to59). Im Alter 60 - 69 Jahre wurden Personen in ein Krankenhaus aufgenommen, für welche der dunkelgrüne Boxplot steht (Le-

---

gende: Faelle60to69). Grün gekennzeichnet ist die Altersklasse 70 - 79 (Legende: Faelle70to79). Neben diesem Boxplot steht jener für die im höheren Alter hospitalisierten Menschen (Legende: Faelle80toXX). Der zwischen der Altersklasse  $\geq 80$  Jahre und der Gesamtmorbidität verortete blaue Boxplot zeigt den Anteil der im Krankenhaus Verstorbenen. Rechts neben der Gesamtmorbidität zeigt die magentafarbene Box den Frauenanteil an der vollständigen Morbidität (Legende: Anteil.weibl). Skaliert ist die y-Achse nach 100.000 Beobachtungseinheiten.

Im Kontrast zu den Zeitreihen in der Abbildung 42 zeigen die nach Quartalen aggregierten Morbiditätsfrequenzen ein abweichendes Bild, welches auch der mehrfachen Überprüfung auf Korrektheit standhält. Die Aggregation veranschaulicht einen deutlichen Zuwachs der Hospitalisationen im 3. Quartal. Betroffen sind alle Altersklassen, der Frauenanteil wie auch der Verstorbenenanteil. Dabei gilt es in Erinnerung zu rufen, dass es sich um die zusammengefassten Quartale des Untersuchungszeitraumes handelt. Auch stehen ausschließlich die interessierenden Diagnosen unter Exposition ( $\geq 80$  °F) im Blick. Der Vergleich aller Hospitalisationen wie auch der hitzeassoziierten Krankenhausaufnahmen für alle Quartale und unabhängig von der Umgebungstemperatur zeigt die annähernde Übereinstimmung mit dem im Schaubild 41 visualisierten Morbiditätsgeschehen.

### 5.2.8 Morbidität im Kreistyp & unterste Beobachtungseinheiten

Die Betrachtung der Morbidität auf Ebene des siedlungsstrukturellen Kreistyps nimmt auf das Morbiditätsgeschehen pro 100.000 Einwohner Bezug.

Tabelle 25 Assoziierte Morbidität unter Exposition im Kreistyp bei mittlerer Einwohnerzahl (100.000)

Kreistyp	Anzahl je Kreistyp	Einwohner gesamt	Morbidität Hitzeassoziiert je 100.000 Einwohner (Heat Index $\geq$ 80 °F)	Gestorben im KH je 100.000 Einwohner (Heat Index $\geq$ 80 °F)
1	41	17.846.852	2869	128
2	45	13.148.689	2886	113
3	36	5.948.414	2583	104
4	20	2.646.039	2958	121
5	31	5.288.542	2543	110
6	91	14.457.660	2855	110
7	74	10.632.064	2734	109
8	63	8.188.880	2962	118
9	38	3.920.047	2470	96

Quelle: FDZ, INKAR 2009, eigene Berechnungen

Dargestellt sind die Kreistypen, die Anzahl der Kreistypen, die Einwohnerzahlen in aggregierter Form sowie die

gesamte hitzeassoziierte Morbidität je 100.000 Einwohner unter Exposition wie noch die von der assoziierten Morbidität Verstorbenen bezogen auf 100.000 Einwohner, ebenfalls unter Exposition. Das auf identische Einwohnerfraktionen bezogene Morbiditätsgeschehen zeigt, dass in den Kreistypen 3, 5 und 9 weniger Menschen in Krankenhäuser aufgenommen wurden, weniger Menschen verstarben dort. Die Kreistypen 4 und 8 führen die Häufigkeitsstatistik an.

Auf der kleinräumigen Ebene der kreisfreien Städte, freien Hansestädte, Stadtkreise, Städteverbände sowie Landkreise und Kreise (in Gänze 439 Einheiten) lässt sich das Morbiditätsgeschehen aus datenschutzrechtlichen Gründen lediglich in aggregierter Form wiedergeben. Folgende Tabelle zeigt die mittleren Hospitalisationsfrequenzen für den gesamten Beobachtungszeitraum unter Exposition 2002 - 2006 am Tag.

Tabelle 26 Kleinräumige Morbidität unter Exposition ( $\geq$  80 °F)

	Min.	1 <sup>st</sup> Qu.	Median	Mean.	3 <sup>rd</sup> Qu.	Max
Fälle gesamt	1	44	74	101	116	2774
von Morbidität verstorben	0	1	2	2	3	71
Morbidität hitzeassoziiert	0	10	17	24	28	652
Fälle 0 bis 9	0	3	5	7	9	199
Fälle 10 bis 59	0	20	33	46	53	1285
Fälle 60 bis 69	0	6	12	17	21	576
Fälle 70 bis 79	0	7	13	17	21	492
Fälle ab 80 Jahre	0	5	9	12	14	348
Anteil Frauen an allen Fällen	0	23	39	54	62	1510

Quelle, FDZ, eigene Berechnung

Die Darstellung der kleinräumigen Morbidität beschränkt sich auf Tage mit Expositionswerten  $\geq$  80 °F.

Verglichen mit der hitzeassoziierten Mortalität auf der untersten Bezugsebene zeigt die Tabelle für

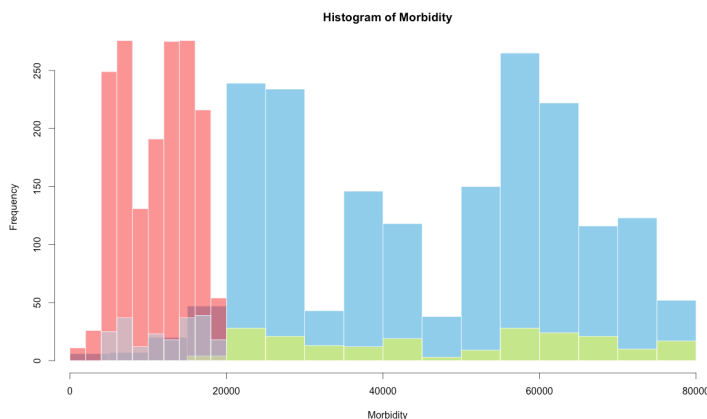
die assoziierte Morbidität ein anderes Verhältnis. Die hitzeassoziierte Mortalität liegt bei einem 50%igen Anteil, die Morbidität hat ein deutlich geringeres Niveau.

Menschen in den Altersklassen 70 - 79 und über 80 wurden vergleichsweise häufig in ein Krankenhaus aufgenommen. Im Mittel nahmen Krankenhäuser aus einer Beobachtungseinheit (bspw. kreisfreie Stadt oder Landkreis) mehr Patientinnen als Patienten auf. Unter den durchschnittlich 1510 hospitalisierten Frauen sind auch jene mit den Diagnosen: Schwangerschaft, Geburt und Wochenbett (ICD-Klassifikation: O00-O99).

### 5.2.9 Häufigkeitsverteilung Morbidität

Die Häufigkeitsverteilung der Morbidität im Beobachtungszeitraum zeigen zwei Histogramme.

Abb. 44 Häufigkeitsverteilung Morbidität



Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Das blaue Histogramm veranschaulicht die klassierte Häufigkeitsverteilung der Gesamtmorbidität. Die Klassenbreite zwischen minimaler und maximaler Hospitalisation beträgt 5.000 Fälle.

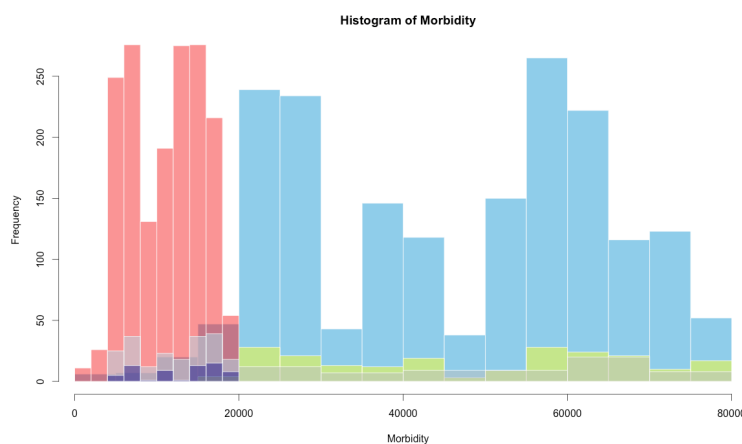
Zu erkennen ist insofern, dass an 240 statistischen Tagen<sup>1</sup> im Untersuchungszeitraum 25.000 Menschen in deutsche Krankenhäuser aufgenommen wurden (zweithöchste Klasse im Histogramm). Die Modalklasse zeigt die Krankenhausaufnahmen mit 60.000 Fällen an ca. 265 statistischen Beobachtungstagen. Zu beachten ist der hinter dem linksseitigen Histogramm liegende dunkelrote Bereich, der zur gesamten Morbidität gehört. Mit den grün hervorgehobenen Häufigkeiten wird die unter der Exposition Hitze (Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F) anteilige Morbidität innerhalb der Klassen gezeigt.

<sup>1</sup> Der Bezug auf statistische Tage soll klarstellen, dass die Häufigkeiten nicht mit den Tageshäufigkeiten im Beobachtungszeitraum identisch sind.

Linksseitig visualisiert das rote Histogramm eine ebensolche Übersicht, jedoch ausschließlich für die hitzeassoziierte Morbidität. Auf 2.000 Hospitalisationen bezieht sich die Klassenbreite. Mit dem transparenten Histogrammbereich sind auch hier die Morbiditätsfrequenzen unter thermischer Exposition hervorgehoben (Tage mit Heat Indexwerten  $\geq 80$  °F).

Da die Übersichtlichkeit verloren ginge, hebt die nun folgende Darstellung das Morbiditätsgeschehen unter sehr hoher thermischer Belastung hervor.

Abb. 45 Häufigkeitsverteilung Morbidität (hohe therm. Belastung)



Quelle: ebenda

An obige Abbildung anschließend konzentrieren sich die Histogramme nun auf die Anteile der Morbidität an Tagen mit Expositionswerten  $\geq 90$  °F. Für die Gesamtmortalität zeigt sie das grau eingelegte Histogramm. Lila dargestellt sind die Klassenhäufigkeiten für hitzeassoziierte Diagnosen.

Die Klassenhäufigkeiten im Expositionsbereich  $\geq 80$  °F wie auch  $\geq 90$  °F visualisieren die interessierende Hospitalisationshäufigkeit. An bis zu 48 statistischen Tagen sind 5.000 bis 20.000 Fälle relevant (unterer Bereich über dem roten Histogramm).



### 5.3 Darstellung der Analyseergebnisse

Die Ergebnisse aus den in den methodischen Kapiteln 4.6.2 und 4.6.3 beschriebenen Regressions- bzw. Korrelationsanalysen werden getrennt nach der gewählten Methodik dargestellt.

Regressionsanalysen wurden für die Ebenen Bundesrepublik Deutschland, siedlungsstruktureller Kreistyp 1 - 9 sowie den untersten Beobachtungseinheiten, d.h., kreisfreien Städten, Landkreisen, Kreisen, Stadtverbänden und einer Hansestadt durchgeführt. Nach dieser Ebenenstruktur werden die Analyseergebnisse dargelegt.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse sollte die Selektion der hitzeassoziierten Todesfälle nach den von Rothfusz (1988) beschriebenen Risikoniveaus im Bewusstsein bleiben.

Risikoniveaus nach Rothfusz (1988)

Category	Heat Index
Extreme Danger	130° or higher (54° or higher)
Danger	105 - 129° (41 - 54°)
Extreme Caution	90 - 105° (32 - 41°)
Caution	80 - 90° (27 - 32°)

Um die Übersicht zu erleichtern, sind die Risikoniveaus, die bereits im Kapitel 4.2.5 wiedergegeben und erklärt sind, hier verkürzt abgebildet.

In die Studie gingen die hitzeassoziierten Todesfälle an Expositionstagen mit einem Heat Index  $\geq 80$  °F ein.

Infolge der Zuspiegelung der Kontrolltage nach dem Case-crossover-Design (Kapitel 4.6.1) ergab sich die im Kapitel 5.2.5 beschriebene Wertespanne bei der Expositions-

variable Heat Index.

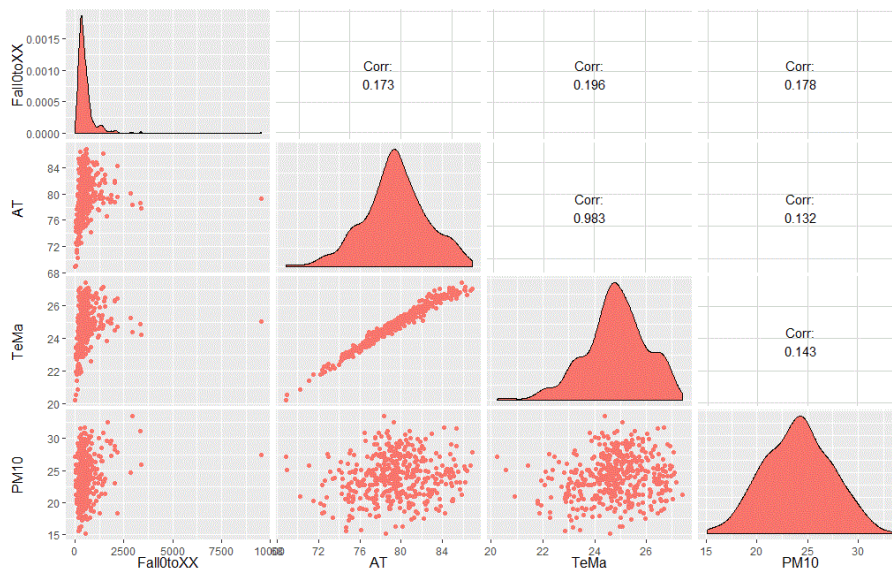
#### Terminologie

Wegen der im Antragsverfahren zur Datennutzung bei den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder verwendeten Nomenklatur kommt es im Ergebniskapitel zur synonymen Verwendung der Apparent Temperature (AT) und des Heat Index (HI), was in der internationalen Literatur durchaus üblich ist (Rothfusz 1990; Steadman 1979a/b). Mit beiden Begrifflichkeiten dargestellte Werte sind identisch. Die an die Statistischen Ämter gegebene thermische Variable wurde mit AT benannt, weshalb grafische Darstellungen mit dieser Bezeichnung auftauchen.

### 5.3.1 Ergebnisse der logistischen Regression

Dass ein modellierbarer Zusammenhang zwischen der berücksichtigten hitzeassoziierten Mortalität (Response- beziehungsweise Zielvariable) und den Expositionsvariablen Heat Index (bez. Apparent Temperature) und PM<sub>10</sub> zu finden ist, zeigt eine erste Korrelationsanalyse.

Abb. 46 Korrelation Response- und Expositionsvariablen



Korrelationsanalyse zwischen Response- und Expositionsvariablen. Die Bezeichnungen der Variablen:

- Fall0toXX → hitzeassoziierte Todesfälle, unabhängig vom Alter → Response
- AT → Apparent Temperature bzw. Heat Index
- TeMa → Maximaltemperatur

Zu sehen ist die positive Korrelation der hitzeassoziierten Mortalität mit den Expositionsvariablen. Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Zu entnehmen ist der grafischen Darstellung, dass die im Datensatz mitgeführte Maximaltemperatur am stärksten mit der hitzeassoziierten Mortalität korreliert. Auch PM<sub>10</sub> hat einen stärkeren Einfluss, verglichen mit den Werten des Heat Index.

Zur Indizierung von hitzeassoziierten Gesundheitsrisiken wurde der Heat Index gewählt, da der Indikator die thermophysiologischen Bedingungen des Menschen wie auch thermische Belastungsstufen berücksichtigt (Kapitel 4.2.5). Insofern wurde der Heat Index als leitende Expositionsvariable beibehalten.

### 5.3.1.1 Analyseergebnis Mortalität - Ebene BRD

Die Regressionsanalyse mit der gesamten hitzeassoziierten Mortalität aus dem Beobachtungszeitraum 2002 - 2006 bestätigt das Ergebnis in obiger Darstellung. Substanziell ist die Gefährdung der Gesundheit durch die Expositionen Hitze (AT = Apparent Temperature hier gleichzusetzen mit Heat Index) und Feinstaub (PM<sub>10</sub>) den folgenden Abbildungen zu entnehmen.

Abb. 47 Analyseergebnis - Ebene BRD

	Gesamtmodell - Ebene BRD			
	OR	CI	std. Error	p
(Intercept)	0.0000	0.0000 – 0.0000	0.0478	<b>.0000</b>
AT	1.1529	1.1517 – 1.1541	0.0005	<b>.0000</b>
PM10	1.2987	1.2951 – 1.3024	0.0014	<b>.0000</b>
Geschlwbl	0.9934	0.9846 – 1.0022	0.0045	.1387
Alt.Num	1.0000	0.9997 – 1.0003	0.0002	.9506
AT:PM10	0.9972	0.9971 – 0.9972	0.0000	<b>.0000</b>
Observations	2647733			
Family	binomial (logit)			

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Die noch nicht adjustierten Effekte der Expositionen Hitze wie auch Feinstaub zeigen die dargestellten Odds Ratios. Die anderen Odds Ratios sind ohne die Adjustierung interpretierbar.

Bezeichnung:

- AT = Apparent Temperature

- PM<sub>10</sub> = Feinstaub
- Geschlwbl = weiblich
- Alt. Num = Alter
- AT:PM10 = Einfluss von AT und PM<sub>10</sub>

Es erfolgten getrennte Analysen für beide Expositionsstränge (li. → AT (gleichzusetzen mit dem Heat Index); re. → PM<sub>10</sub>). Die gezeigten Odds Ratios für AT und PM<sub>10</sub> sind ebenfalls noch nicht adjustiert.

Abb. 48 Analyseergebnisse AT und PM<sub>10</sub> getrennt - Ebene BRD

	Mod. Exp. AT				Mod. Exp. PM10			
	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p
(Intercept)	0.0005	0.0005 – 0.0005	0.0197	<b>.0000</b>	0.0325	0.0317 – 0.0334	0.0139	<b>.0000</b>
AT	1.0644	1.0641 – 1.0648	0.0002	<b>.0000</b>				
wbl	0.9931	0.9844 – 1.0018	0.0045	.1203	0.9926	0.9841 – 1.0011	0.0044	.0883
Alt.Num	0.9999	0.9996 – 1.0003	0.0002	.6511	1.0000	0.9997 – 1.0004	0.0002	.8450
PM10					1.0429	1.0426 – 1.0433	0.0002	<b>.0000</b>
Observations	2647733				2647733			
Family	binomial (logit)				binomial (logit)			

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Abbildung 47 lässt sich entnehmen, dass die Expositionen Hitze und Feinstaub das Mortalitätsgeschehen gemeinsam beeinflussen. Daher ist es notwendig, die Odds Ratios zu adjustieren, um die Auswirkungen der beiden Expositionen voneinander abzugrenzen. So ist vom log Odds für die Prädiktorvariable Heat Index das mit dem getrimmten Mittelwert der Feinstaubexposition multiplizierte log Odds der kombinierten Variable Heat Index plus PM<sub>10</sub> zu subtrahieren (vgl. Kreienbrock 2012: 307; Hedderich/Sachs 2012). Dann lässt sich das adjustierte Odds Ratio darstellen. Für die Variable PM<sub>10</sub> ist dies ebenso notwendig.

Tabelle 27 Analyseergebnis - adjustierte Odds Ratios

Zunahme Exposition	Exposition Hitze (Heat Index)			Exposition Feinstaub (PM10)			Exposition Hitze & Feinstaub		
	Odds	Odds Ratio	Risiko (%)	Odds	Odds Ratio	Risiko (%)	Odds	Odds Ratio	Risiko (%)
1	0,0638	1,0658	6,6	0,0127	1,0128	1,3	0,0765	1,0795	7,9

Quelle: eigene Berechnung

Dargestellt sind die adjustierten log Odds und Odds Ratios für die Variablen Heat Index, PM<sub>10</sub> sowie Heat Index plus PM<sub>10</sub>. Jeweilig angefügt ist das entsprechende Risiko in Prozent.

Bei der Beurteilung steht zu bedenken, dass die Risiken auf Fälle anzuwenden sind, die ab einer Außentemperatur  $\geq 80$  °F auftreten. Grund hierfür ist die Selektion der hitzeassoziierten Fälle ab der Umgebungstemperatur  $\geq 80$  °F. Zudem lässt sich aus den Daten ableiten, dass der Heat Index im getrimmten Mittel von einem Tag zum Folgetag um 1,9 °F steigt. Die Konzentration PM<sub>10</sub> nimmt im getrimmten Mittel zum folgenden Tag 0,35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  zu. Da die Feinstaubexposition nach der Exposition Hitze selektiert wurde, erscheint die Interpretation der Gesundheitsgefährdung durch die Exposition PM<sub>10</sub> erst in Abhängigkeit der Heat-Index-Werte  $\geq 80$  °F in der Umgebung angezeigt.

### Zusammenfassung der Ergebnisse - Ebene BRD

- Die Gefährdung der Gesundheit durch die Exposition Hitze lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland belegen.
- Auch für die Exposition PM<sub>10</sub>, wobei das durch diese Exposition vorliegende Risiko niedriger einzuordnen ist.
- Frauen sind im Vergleich zu Männern nicht mehr oder minder signifikant gefährdet.

- Das Alter als beeinflussende Variable ist für die bundesdeutsche Ebene nicht signifikant.
- Die kombinierte Berücksichtigung von Hitze und Feinstaub zeigt das Ausmaß der Interaktion beider Expositionen.

**Zusammenfassung der Ergebnisse - Ebene BRD (getrennte Betrachtung von AT (bzw. HI) und PM<sub>10</sub> - ohne Adjustierung)**

- Die Gefährdung der Gesundheit durch die alleinige Berücksichtigung der Exposition Hitze lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland zeigen. Sie ist in diesem Modell jedoch geringer, ähnlich wie die adjustierten Odds Ratios ausgeprägt.
- Unter der getrennten Analyse ist auch die Feinstaubexposition signifikant. Im Vergleich zur isoliert berücksichtigten Exposition Hitze ist das gesundheitliche Risiko etwas geringer ausgeprägt.
- Frauen sind im Vergleich zu Männern nicht mehr oder minder signifikant gefährdet.
- Ebenfalls für beide Modelle ist das Alter als beeinflussende Variable für die Bezugsebene Bundesrepublik Deutschland nicht signifikant.

### *5.3.1.2 Ergebnisse Mortalität - Ebene Kreistyp*

Unterhalb der Beobachtungsebene Bundesrepublik Deutschland erfolgten nach dem vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung definierten siedlungsstrukturellen Kreistyp 1 - 9 getrennte Analysen (s. Folgeseite).

Die Kreistypen 1 und 5 ähneln sich hinsichtlich der vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung definierten Kriterien: Bevölkerungsdichte, Zentralität und Lagegunst. Städte, die zum Kreistyp 5 gehören, haben zumeist einen geringeren Bevölkerungsumfang. Der Kreistyp 2 ist dem Kreistyp 1 untergeordnet, der Kreistyp 6 dem Kreistyp 5, sodass sich diese prinzipiell auch ähneln.

Die Kreistypen 4, 7, 8 und 9 unterscheiden sich vom Kreistyp 1 beziehungsweise Kreistyp 5 durch ihre deutlich dünnere Besiedelung sowie ihre dezentrale Lage.

Unter diesen Kriterien, die detailliert im Kapitel 2.2 ausgeführt sind, sind die Analyseergebnisse einzuordnen.

Die Koeffizienten für die Variablen AT (gleichzusetzen mit Heat Index) und PM<sub>10</sub> sind hier nicht adjustiert.

Abb. 49 Analyseergebnisse - Ebene Kreistyp 1 - 9

	KrTyp-1				KrTyp-2				KrTyp-3				KrTyp-4				KrTyp-5			
	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p
(Intercept)	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.1060	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.1048	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.1730	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.2697	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.2065	.0000
AT	1.1667	1.1640 - 1.1695	0.0012	.0000	1.1381	1.1355 - 1.1407	0.0012	.0000	1.1462	1.1419 - 1.1505	0.0019	.0000	1.1639	1.1570 - 1.1710	0.0031	.0000	1.1562	1.1510 - 1.1615	0.0023	.0000
PM10	1.2996	1.2923 - 1.3071	0.0029	.0000	1.2585	1.2508 - 1.2663	0.0031	.0000	1.3009	1.2875 - 1.3144	0.0053	.0000	1.3413	1.3184 - 1.3648	0.0088	.0000	1.2838	1.2694 - 1.2984	0.0058	.0000
Geschlwb1	0.9854	0.9676 - 1.0035	0.0093	.1137	0.9894	0.9687 - 1.0105	0.0108	.3224	0.9906	0.9588 - 1.0234	0.0166	.5678	1.0041	0.9589 - 1.0514	0.0235	.8629	0.9959	0.9598 - 1.0334	0.0188	.8272
Alt-Num	0.9995	0.9989 - 1.0002	0.0003	.1677	1.0005	0.9997 - 1.0013	0.0004	.2598	1.0014	1.0001 - 1.0026	0.0006	.0311	0.9973	0.9957 - 0.9990	0.0009	.0019	1.0030	1.0015 - 1.0044	0.0007	.0000
AT:PM10	0.9972	0.9971 - 0.9973	0.0000	.0000	0.9975	0.9974 - 0.9976	0.0000	.0000	0.9972	0.9971 - 0.9973	0.0001	.0000	0.9968	0.9966 - 0.9970	0.0001	.0000	0.9973	0.9972 - 0.9974	0.0001	.0000
Observations	630564				458887				194139				97625				153120			
Family	binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)			

	KrTyp.6				KrTyp.7				KrTyp.8				KrTyp.9			
	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p
(Intercept)	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.1088	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.1626	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.1694	.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000	0.2693	.0000
AT	1.1539	1.1512 - 1.1567	0.0012	.0000	1.1725	1.1683 - 1.1767	0.0018	.0000	1.1646	1.1603 - 1.1689	0.0019	.0000	1.1925	1.1854 - 1.1997	0.0031	.0000
PM10	1.3378	1.3287 - 1.3469	0.0035	.0000	1.3785	1.3643 - 1.3929	0.0053	.0000	1.3497	1.3360 - 1.3636	0.0052	.0000	1.3924	1.3691 - 1.4163	0.0086	.0000
Geschlwb1	0.9979	0.9781 - 1.0181	0.0102	.8370	1.0050	0.9772 - 1.0336	0.0143	.7290	0.9966	0.9675 - 1.0265	0.0151	.8211	0.9961	0.9533 - 1.0409	0.0224	.8628
Alt-Num	1.0008	1.0000 - 1.0016	0.0004	.0403	0.9988	0.9977 - 0.9998	0.0005	.0224	1.0004	0.9993 - 1.0015	0.0006	.4827	0.9950	0.9934 - 0.9966	0.0008	.0000
AT:PM10	0.9968	0.9968 - 0.9969	0.0000	.0000	0.9965	0.9964 - 0.9966	0.0001	.0000	0.9968	0.9966 - 0.9969	0.0001	.0000	0.9963	0.9961 - 0.9965	0.0001	.0000
Observations	508882				261987				234300				108229			
Family	binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)			

Quelle: FDZ, eigene Berechnungen

Bezeichnung KrTyp → Kreistyp (1 - 9)

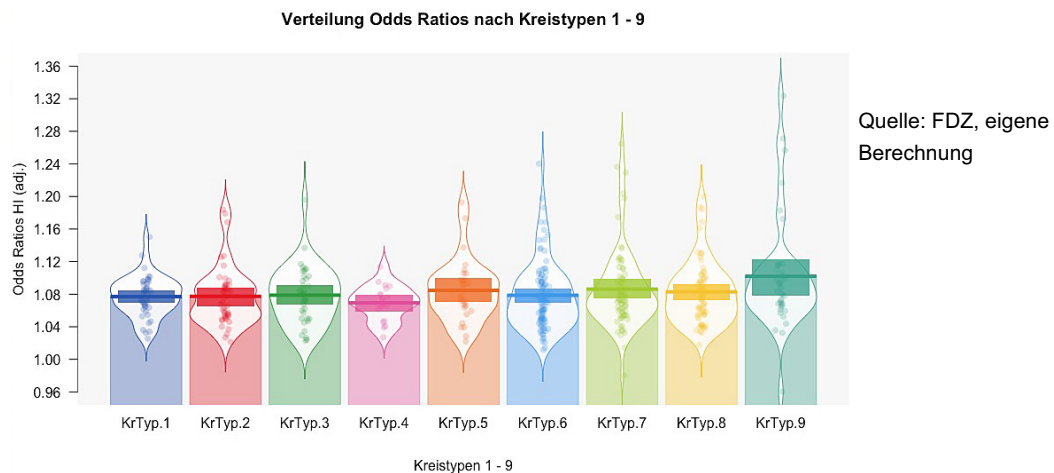
### Zusammenfassung der Ergebnisse auf Kreistypenebene

- Die Gefährdung der Gesundheit durch die Exposition Hitze nimmt ausgehend vom Kreistyp 1 zum Kreistyp 2 ab, dann für den Kreistyp 3 leicht und den Kreistyp 4 deutlicher wieder zu. Die Kreistypen 5 - 8 schwanken um das Niveau vom Kreistyp 1. Erstaunlicherweise ist der Koeffizient für den Kreistyp 9 am höchsten ausgeprägt.
- Im Vergleich zur Exposition Hitze sind die Koeffizienten für die Exposition PM<sub>10</sub> durchgängig stärker. Die Kreistypen 2 und 5 verzeichnen die niedrigsten Odds Ratios, etwas darüber liegen die Odds Ratios für die Kreistypen 1 und 3. Die Koeffizientenwerte der Kreistypen 4, 6 - 9 sind höher ausgeprägt. Der höchste Wert ist für den Kreistyp 9 festzustellen.
- Nach der Ergebnisdarstellung sind Frauen im Kontrast zu Männern in keinem Kreistyp signifikant gefährdet.
- Die Variable Alter ist bei den Kreistypen 3, 4, 5, 6, 7 und 9 signifikant, wenngleich es sich um einen eher geringen Effekt handelt. Das Alter beeinflusst demnach die Chance auf einen gesundheitlichen Endpunkt in den Kreistypen 3, 5 und 6 im wörtlichen Sinn eher negativ und 4, 7 sowie 9 sogar ganz leicht präventiv.
- Die kombinierte Variable Hitze und Feinstaub ist für alle Kreistypen signifikant.

Das Gefährdungsausmaß lässt sich nach Adjustierung einordnen. Die adjustierten Odds Ratios werden durch Boxplots visualisiert.

### Verteilung Odds Ratios nach Kreistyp - Heat Index

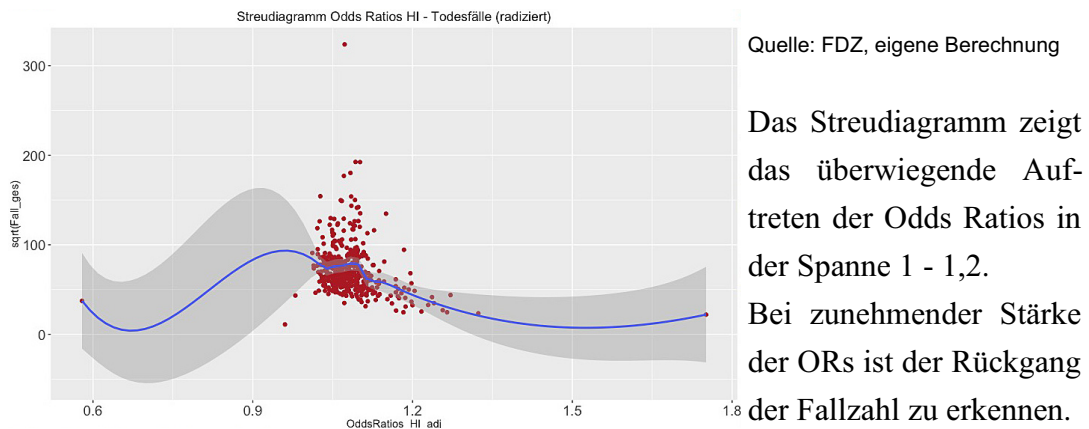
Abb. 50 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9 | Variable Heat Index





Die Boxplots zeigen eine größere Variabilität der Odds Ratios bei jenen Kreistypen mit vergleichsweise hohen Odds Ratio-Werten. Zu sehen sind Ausprägungen der Odds Ratios überwiegend im Bereich knapp unter bzw. über 1,1. Ein Streudiagramm mit allen Odds Ratios untermauert dies.

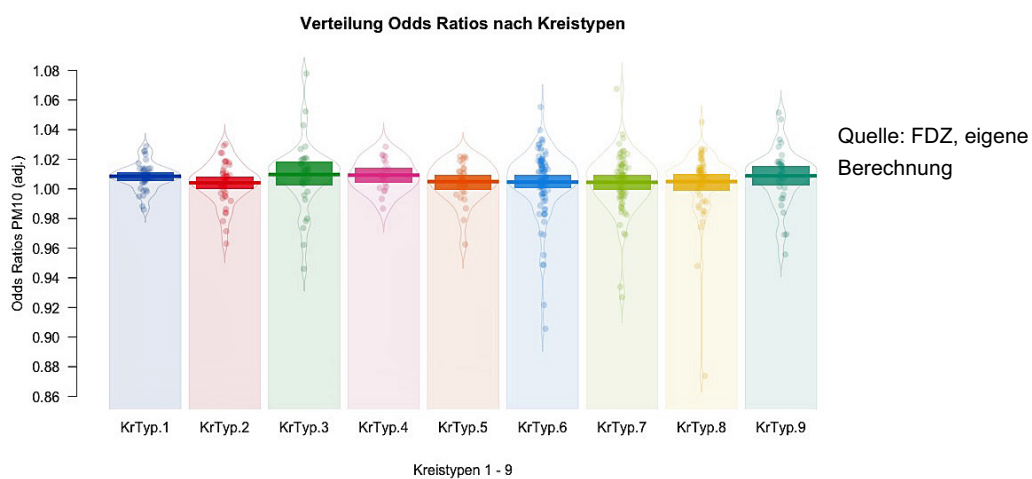
Abb. 51 Streudiagramm Odds Ratios | Variable Heat Index



### Verteilung Odds Ratios - Variablen PM<sub>10</sub> und HI:PM<sub>10</sub>

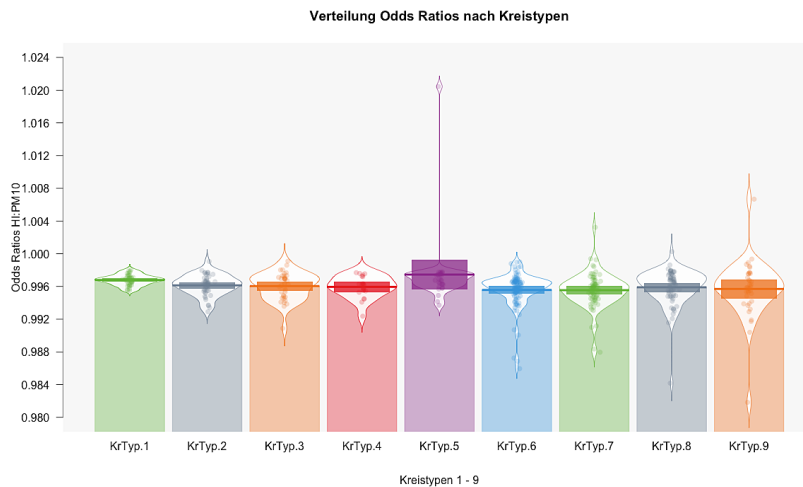
Die Verteilung der Odds Ratios für die Exposition PM<sub>10</sub> wird ebenfalls für die Kreistypen 1 - 9 mittels Boxplots visualisiert.

Abb. 52 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9 | Variable PM<sub>10</sub>



Wie oben dargestellt, variieren die Odds Ratios zwischen den Kreistypen. Besonders auffällig sind die Kreistypen 3, 4 und 9.

Abb. 53 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9 | Variablenkombination HI & PM10



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Das kombinierte Auftreten beider Variablen differenziert ebenfalls zwischen den neun Kreistypen. Allerdings mit geringerer Stärke.

Insgesamt lässt sich der kombinierte Einfluss als protektiver Effekt auffassen. Dieser ist beim Kreistyp 5 am geringsten ausgeprägt.

Interpretation des Koeffizienten: Bsp. mittleres Odds Ratio für den Kreistyp 4 →  $0,9967 - 1 * 100 = -0,33 \%$ . Um diesen Prozentsatz sinkt die Chance auf einen gesundheitlichen Endpunkt unter der Exposition Hitze, sofern die Exposition Feinstaub um eine Einheit ansteigt. Das bedeutet, dass die Zunahme von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PM<sub>10</sub> die Gesundheitsgefährdung unter der Exposition Hitze um 3 % reduziert.

Zur weiteren Konkretisierung werden die Odds Ratios mit den zugehörigen Risiken für die siedlungsstrukturellen Kreistypen tabellarisch dargestellt.

Tabelle 28 Analyseergebnisse Kreistypen 1 - 9

Analyseergebnisse für die Kreistypen 1 - 9						
	Heat Index	Risiko (%)	PM10	Risiko (%)	Heat Index plus PM10	Risiko (%)
Kreistyp 1	1,0769	7,69	1,0085	0,85	1,0858	8,58
Kreistyp 2	1,0731	7,31	1,0049	0,49	1,0796	7,96
Kreistyp 3	1,0784	7,84	1,0098	0,98	1,0897	8,97
Kreistyp 4	1,0695	6,95	1,0096	0,96	1,0793	7,93
Kreistyp 5	1,0793	7,93	1,0052	0,52	1,0875	8,75
Kreistyp 6	1,0739	7,39	1,0071	0,71	1,0796	7,96
Kreistyp 7	1,0792	7,92	1,0054	0,54	1,0853	8,53
Kreistyp 8	1,0783	7,83	1,0077	0,77	1,0841	8,41
Kreistyp 9	1,0937	9,37	1,0084	0,84	1,1061	10,61

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Die Odds Ratios für die Kreistypen 1 - 9. Sie sind auf Basis der adjustierten log Odds berechnet.

Neben den Odds Ratios für die Variablen Heat

Index, PM<sub>10</sub> sowie dem additiven Einfluss von Heat Index plus PM<sub>10</sub> sind die mit den Odds Ratios einhergehenden Risiken in Prozent abzulesen.

Wie schon bei der Besprechung der Ergebnisse in Abbildung 49 bemerkt, zeigen die Odds Ratios keinen linearen Verlauf der Werteausprägung, ausgehend von den dünner besiedelten Kreistypen (3, 4, 7 - 9) mit niedrigeren Werten hin zu den dichter besiedelten Kreistypen (1 u. 5) mit höheren Odds Ratio-Werten. Nach Adjustierung ist zumindest das Bild für den Kreistyp 5 ein anderes:

- In absteigender Reihenfolge sind die ORs für die Variable Heat Index bei den Kreistypen 9, 5, 7, 3 und 8 am höchsten.
- Ebenfalls absteigend sind die Odds Ratios für die Variable PM<sub>10</sub> bei den siedlungsstrukturellen Kreistypen 3, 4, 1, 9 und 8 am deutlichsten ausgeprägt.
- Die addierten log Odds der Variablen Heat Index und PM<sub>10</sub> geben nach Umwandlung in Odds Ratios das Risiko wieder, welches bei dem gemeinsamen Auftreten beider Expositionen erwächst. In absteigender Reihenfolge sind Menschen in den Kreistypen 9, 3, 5, 1 und 7 am stärksten gefährdet.

Daraus resultiert die Frage, weshalb das gesundheitliche Risiko in einigen dünner besiedelten Kreistypen (7 - 9) höher als in dicht bzw. sehr dicht besiedelten Kreistypen ist.

### 5.3.1.3 Ergebnisse Mortalität - unterste Beobachtungseinheiten

Die Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse für die untersten Beobachtungseinheiten: kreisfreie Stadt, Stadtkreis, Stadtverband, Landkreis und Kreis sowie Hansestadt werden zunächst durch Stabdiagramme visualisiert. Differenziert wird dabei zwischen den kreisfreien Städten, Stadtkreisen, etc., die den siedlungsstrukturellen Kreistypen 1, 2, 5 sowie 9 angehören. Damit liegt die Beschränkung auf dicht besiedelten Beobachtungseinheiten (zugehörig zu den Kreistypen 1 und 5) sowie dünner besiedelten Einheiten (zugehörig zu den Kreistypen 2 und 9). Der Kreistyp 9 fasst die am dünnsten besiedelten Kreise und Landkreise ein. Er zeigt für die Variable Heat Index das höchste adjustierte Odds Ratio.

Im Anschluss an diese Darstellungen visualisiert eine Choroplethenkarte die Verteilung der Odds Ratios für die Variable Heat Index. Einen Eindruck über das gemeinsame Auftreten von Hitze- und Feinstaubgefährdung gibt hiernach eine Heatmap.

Am Anfang der Ergebnisdarstellung stehen die berechneten Werte für die Beobachtungseinheiten des Kreistyps 1.

Abb. 54 Ausprägung OR - Beobachtungseinheiten im Kreistyp 1 | Variable HI



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Ausprägungen der ORs für die Variable Heat Index.

Visualisiert sind die kreisfreien Städte des Kreistyps 1. Die Werte der Odds Ratios umfassen 1,025 - 1,150.

Zu sehen ist, dass die Werte teils deutlich von dem in der Tabelle 28 für den Kreistyp 1 dargestellten mittleren Odds Ratio 1,077 abweichen. Die Städte Essen, Bremen und Krefeld fallen besonders ins Auge.

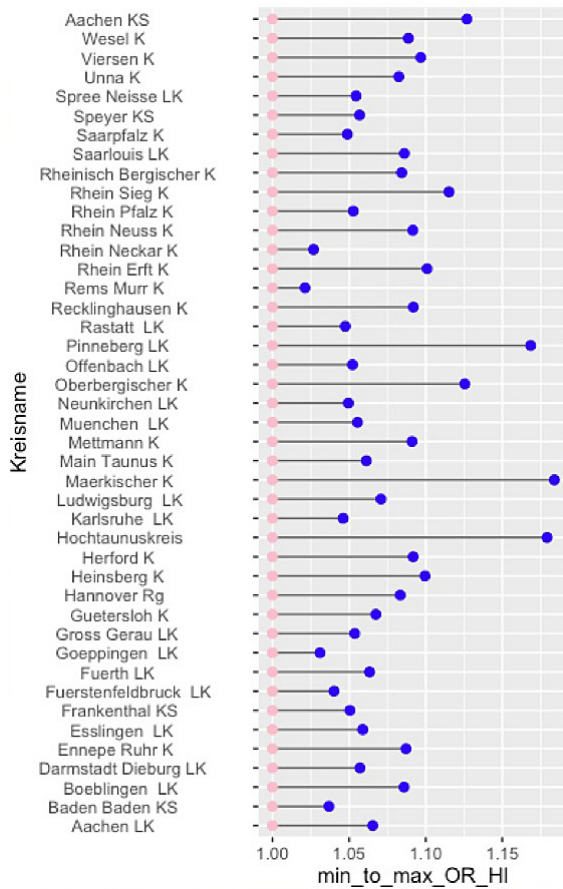


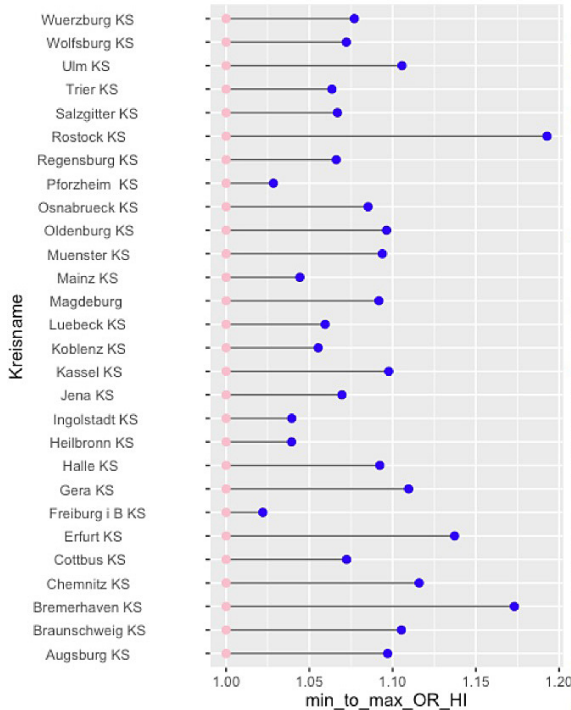
Abb. 55 Ausprägung OR - Beobachtungseinheiten im Kreistyp 2 & 5 | Variable HI

Links sind die Ausprägungen der Odds Ratios für Beobachtungseinheiten vom Kreistyp 2 zu sehen. Sie reichen von 1,021 - 1,184 (mittleres OR = 1,073).

Einige Kreise (K) bzw. Landkreise (LK) verzeichnen doch höhere Odds Ratios verglichen mit den dicht besiedelten Städten (Abb. 54).

Besonders auffällig sind: Märkischer Kreis, Hochtaunuskreis und Landkreis Pinneberg.

Quelle: FDZ, eigene Berechnung



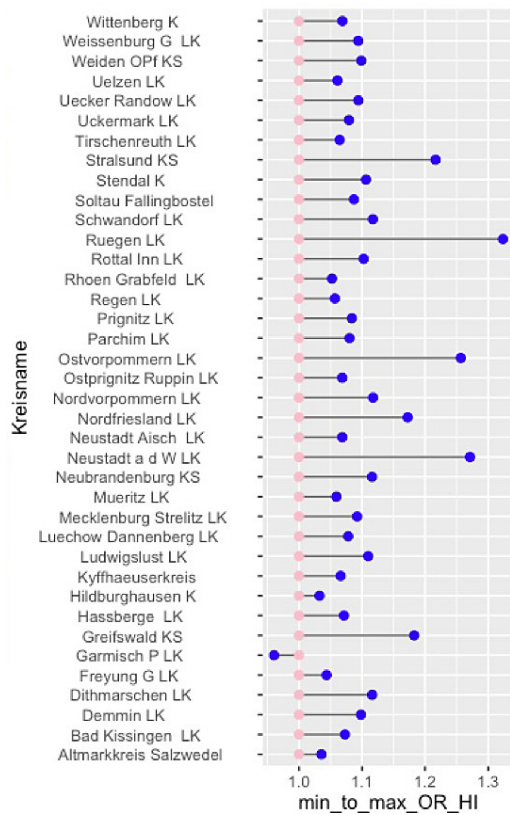
Die Darstellung zeigt die kreisfreien Städte des Kreistyps 5.

Die Odds Ratios umfassen 1,022 - 1,193 (Mittelwert = 1,079).

Die küstennahen Städte Rostock und Bremerhaven verzeichnen die höchsten Odds Ratios. Auch die Landeshauptstadt von Thüringen, Erfurt, fällt mit einem hohen Odds Ratio auf.

Anmerkung: Warum nun das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung die Stadt Aachen (Abb. oben) dem Kreistyp 2 und nicht dem Kreistyp 5 zuordnet, konnte nicht erhellt werden.

Abb. 56 Ausprägung OR - Beobachtungseinheiten im Kreistyp 9 | Variable HI



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Die Odds Ratios für die Beobachtungseinheiten des Kreistyps 9.

Er ist der Kreistyp mit den sehr dünn besiedelten Einheiten. Zu beachten ist die Skalierung der x-Achse, die hier bis zu einem OR über 1,3 reicht (Mittelwert Kreistyp 9 = 1,094). Die Odds Ratio-Werte haben die Spanne 0,960 - 1,324. Das niedrigste Odds Ratio 0,960 wurde für den Landkreis Garmischpartenkirchen berechnet. Es ist nicht signifikant.

Der Landkreis Rügen fällt mit seinem hohen Wert direkt ins Auge, auch der Landkreis Ostvorpommern sowie die kreisfreie Stadt Stralsund. Die drei Beobachtungseinheiten

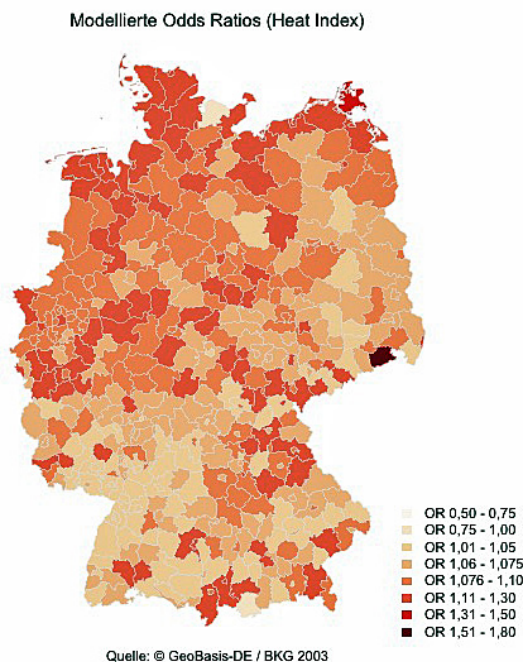
sind an der Ostsee verortet. Daneben ist das Odds Ratio für den Landkreis Neustadt an der Waldnaab in der Oberpfalz sehr deutlich ausgeprägt.

Zu konstatieren ist die deutliche Variabilität zwischen den Beobachtungseinheiten innerhalb sowie auch zwischen den siedlungsstrukturellen Kreistypen.

Wie sich diese Streubreite in der räumlichen Darstellung zeigt, verdeutlichen die nach Klassen geplotteten Odds Ratios in einer Choroplethenkarte.



Abb. 57 Odds Ratios für alle Beobachtungseinheiten



Quelle: eigene Berechnung

Die für den gesamten Zeitraum 2002 - 2006 berechneten ORs für die Prädiktorvariable Heat Index.

Die steigende Farbstärke zeigt die zunehmende Gefährdung.

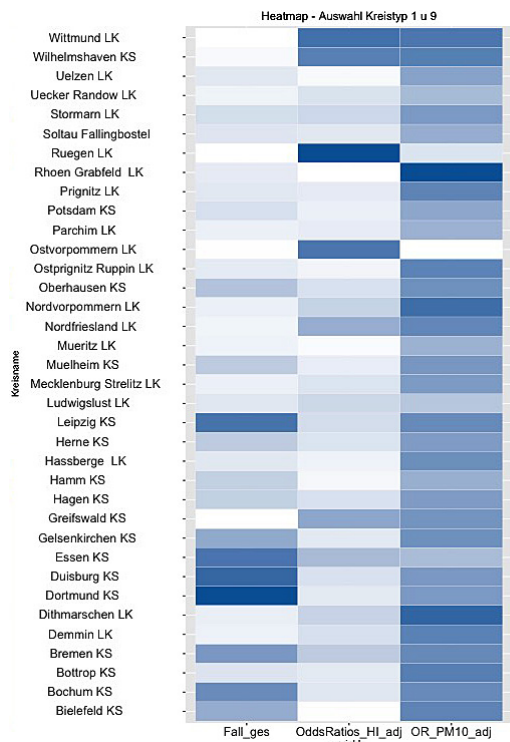
Mit Verweis auf die im Kapitel 5.1.1 dargestellte Spanne der Heat Indexwerte im räumlichen Kontext zeigt sich, dass die Intensität der Hitzegefährdung nicht unmittelbar der Ausprägung der thermischen Exposition folgt. Nach Abbildung 24 im Kapitel 5.1.1 war festzustellen,

dass in den küstennahen Beobachtungsgebieten vergleichsweise weniger Tage mit Hitzebelastung auftreten. Die Odds Ratios sind eben dort eher stärker ausgeprägt. Daneben fallen mehrere Cluster mit hohen Werten auf.

Einen Eindruck über das gemeinsame Auftreten von Hitze- und Feinstaubgefährdung gibt eine sog. Heatmap. Die Heatmap stellt eine zweidimensionale Matrix dar, deren Zellen in Abhängigkeit des Zellwertes eingefärbt sind (vgl. Wollenschläger 2015). Zur Darstellung wurden die Variablen:

- hitzeassoziierte Todesfälle gesamt (Fall\_ges),
- Odds Ratios Heat Index (OddsRatios\_HI\_adj) und
- Odds Ratios PM<sub>10</sub> (OR\_PM10\_adj) auf den Bereich 0 bis 1 skaliert, damit eine durchgängige Vergleichbarkeit möglich wird (vgl. Wickham 2016).

Abb. 58 Heatmap - Auswahl Kreistyp 1 & 9



Heatmap für eine Auswahl aus den zum Kreistyp 1 und 9 gehörenden Beobachtungseinheiten. Die zum Kreistyp 1 gehörenden kreisfreien Städte sind mit „KS“ hinter dem Namen gekennzeichnet. Ebenso lassen sich die Landkreise aus dem Kreistyp 9 mit der beigefügten Abkürzung „LK“ identifizieren.

Die Variablen sind oben aufgezählt. Die Variablenwerte wurden auf den Wertebereich 0 - 1 skaliert.

Die Heatmap zeigt ein heterogenes Bild: Zahlreiche oder eher wenige Todesfälle können mit niedrigen oder eben hohen

Odds Ratio-Werten bei den Variablen Heat Index und PM<sub>10</sub> zusammen auftreten. Rein deskriptiv lässt sich sagen, dass viele Todesfälle einer Raumeinheit mit niedrigeren ORs für die Variable Heat Index und einem höheren für die Variable PM<sub>10</sub> in Zusammenhang gebracht werden können. Dagegen scheinen höhere Odds Ratios bei der Variable Heat Index und nicht sehr große bei der Variablen PM<sub>10</sub> weniger Todesfälle zu bedingen.

Der Rückschluss auf einen eindimensionalen Zusammenhang zwischen der Gesundheitsgefährdung durch die Exposition Hitze in Verbindung mit der Exposition Feinstaub erscheint nicht direkt möglich. Ein kontrollierender Blick auf zwei Landkreise mit hohen Odds Ratios (adjustiert) bei der Variable Heat Index untermauert dies. Gewählt wurden zwei räumlich sehr weit voneinander entfernte, dünn besiedelte Landkreise. Einer davon Ostvorpommern, an der Ostsee gelegen und Tuttlingen, im Süden Baden-Württembergs verortet:

- Die Durchschnittswerte zum Vergleich: Heat Index = Median: 88,00, Mean: 89,68, 3rd Qu.: 94,00 sowie Max.: 148,00 °F und PM<sub>10</sub> = Median: 27,22, Mean: 28,82, 3rd Qu.: 34,16 und Max.: 187,00 µg/m<sup>3</sup>.



- Die Expositionen für den Landkreis Ostvorpommern sind unterdurchschnittlich: Heat Index = Median: 84,00, Mean: 84,66, 3rd Qu.: 86,00 und Max.: 93,00 °F; PM<sub>10</sub> = Median: 27,90, Mean: 28,43, 3rd Qu.: 32,24 und Max.: 45,92 µg/m<sup>3</sup>. Ostvorpommern ist charakterisiert durch eine geringe Mortalität: Todesfälle 726, davon 418 weiblich, ein hohes Odds Ratio für die Variable Heat Index 1,256 und ein geringes für die Variable PM<sub>10</sub> 0,955.
- Die Expositionen für den Landkreis Tuttlingen sind eher durchschnittlich: Heat Index = Median: 84,00, Mean: 85,55, 3rd Qu.: 87,25 sowie Max.: 104,00 °F und PM<sub>10</sub> = Median: 24,00, Mean: 24,30, 3rd Qu.: 29,00 und Max.: 45,00 µg/m<sup>3</sup>. In Tuttlingen ereigneten sich im Beobachtungszeitraum 1540 hitzeassoziierte Todesfälle, davon 891 weiblich. Das Odds Ratio für die Prädiktorvariable Heat Index wurde für Tuttlingen mit 1,153 und für die Variable PM<sub>10</sub> mit 0,923 berechnet.

### **Variable Alter**

Für die Variable Alter ergab die Auswertung für 92 von 439 Beobachtungseinheiten ein signifikantes Ergebnis. Die Odds Ratio-Werte umfassen: Min.: 0,9781, 1st Qu.: 0,9900, Median: 0,9940, Mean: 0,9996, 3rd Qu.: 1,0100 und Max.: 1,0270.

66 der 92 Einheiten verzeichnen eine Risikoreduktion. Demgemäß erhöht höheres Alter in 26 Beobachtungseinheiten das Risiko.

### **Zusammenfassung der Ergebnisse - unterste Beobachtungseinheiten**

Zwischen den Gebietskörperschaften divergiert das hitzeassoziierte Gesundheitsrisiko. Die Odds Ratios für die Variable Heat Index sind für 437 der 439 Beobachtungseinheiten signifikant. Die Spannbreite der adjustierten ORs umfasst 0,5794 - 1,7511, der Mittelwert ist 1,0826. Die adjustierten Odds Ratios für die Variable PM<sub>10</sub> überspannen den Wertebereich 0,0351 - 1,0778, der Mittelwert liegt bei 1,0014. Signifikant sind die Odds Ratios für die Variable PM<sub>10</sub> bei 425 der 439 Beobachtungseinheiten.

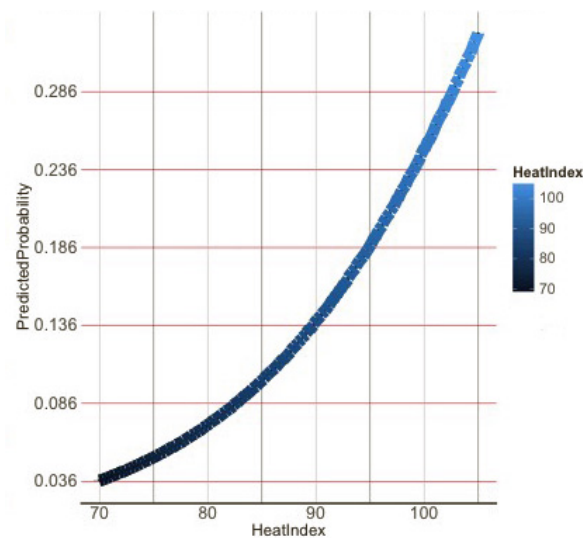
Auf dieser Bezugsebene ergab die Auswertung für die Variable Alter die Odds Ratios 0,9781 - 1,0270, Mittelwert = 0,9993. Die Variable Geschlecht zeigte für diesen Raumbezug keine Signifikanz.

Die für die untersten Beobachtungseinheiten 1- 439 gewonnen Ergebnisse sind am Ende der Arbeit tabellarisch angefügt. Lediglich für die kreisfreie Stadt Kiel und den Landkreis Garmischpartenkirchen sind die Koeffizienten nicht signifikant.

### 5.3.2 Vorhersage mit dem Regressionsmodell

Ein logistisches Regressionsmodell eignet sich vornehmlich zur Vorhersage der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, da es die Eigenschaften einer Zielgröße durch den funktionalen Einfluss der Prädiktorvariablen beschreibt.

Abb. 59 Vorhergesagte Erfolgswahrscheinlichkeiten unter Exposition



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Dargestellt sind die mit dem Regressionsmodell vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten auf die Verschlechterung von hitzeassoziierten Krankheitsvorstadien oder hitzeassoziiierter Krankheit unter Exposition (x-Achse: Heat Index).

Die Prognosen wurden ermittelt, indem die berechneten Koeffizienten in eine weitere Model-

lierung mit ausgewählten Expositionswerten eingingen (Hedderich/Sachs 2012; vgl. auch Dormann 2012; Wollschläger 2013). Berücksichtigt wurden die Heat Index-Werte 70 - 105 °F, die durchschnittliche PM<sub>10</sub>-Konzentration 24,71 µg/m<sup>3</sup> und das mittlere Alter der Fälle mit 77 Jahren.

Die Darstellung zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit auf die Verschlechterung von Krankheitsvorstadien oder hitzeassoziiierter Krankheit im Bereich 70 - 80 °F (22 - 27 °C) durchaus moderat, im Bereich 80 - 90 °F (27 - 32 °C) stärker und oberhalb dieses Wertes deutlich (90 - 105 °F = 32 - 41 °C) ansteigt.

Auf das Konfidenzintervall musste verzichtet werden, da es sehr schmal ist und in der Grafik nicht zum Vorschein träte. Die Bewertung der Modellgüte zeigt, dass das Regressionsmodell zur Risikoprognose geeignet ist (s. Diskussion).

Insofern lassen sich die mit dem Auftreten der zu erwartenden Expositionszunahmen verbundenen Risiken ableiten.

Sehr wahrscheinlich ist nach vorliegenden Daten für die Sommermonate 2002 - 2006 ein Anstieg der Heat Index-Werte von 2 °F täglich. Damit kann die Risikovariabilität

- ausgehend von den für die jeweiligen Umgebungstemperaturen modellierten Gefährdungsniveaus - abgeleitet werden. Für den Temperaturbereich 89 - 105 °F (32 - 41 °C) ist die wahrscheinliche Variabilität farblich hervorgehoben:

Heat index	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Predicted probabilities	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32

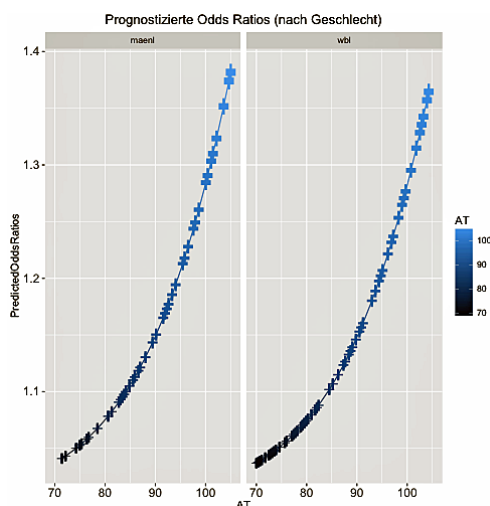
Dargestellt sind die prognostizierten Risiken für den Heat Index-Bereich 89 - 105 °F (32 - 41 °C). Farblich abgestuft sind Risikozunahmen und auch Risikoabnahmen nach wahrscheinlicher Umgebungstemperaturentwicklung, d. h., 2 °F Temperaturvariabilität.

Für Personen mit einer hitzeassoziierten Krankheit lässt sich damit das Risiko unter Exposition plus das zu erwartende Risiko bei weiterer Temperatursteigerung respektive Temperaturabnahme bestimmen.

Diese Darstellung des Gefährdungsausmaßes ist der Tatsache geschuldet, dass die Exposition Hitze kontinuierlich und nicht ad hoc auftritt. Nicht notwendig ist die Definition einer sog. Null-Exposition, wie sie oft in ökologischen Studien fiktiv gesetzt wird (Kreienbrock et al. 2012: 304).

Die Prognosen lassen sich getrennt nach Geschlechtern darstellen.

Abb. 60 Vorhergesagte Erfolgswahrscheinlichkeiten nach Geschlecht



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Da die Prädiktorvariable Geschlecht in den zuvor besprochenen Modellen nicht signifikant ist, werden an dieser Stelle lediglich die vorhergesagten Odds Ratios unter der Exposition Hitze (AT) getrennt nach Geschlecht ergänzend gezeigt (li. = männlich; re. = weiblich).

Im Bereich 1 - 1,1 Odds Ratio steigt die Kurve für das Geschlecht Mann steiler an, darüber hinaus ist ein ganz identischer Kurvenverlauf abzulesen.

---

## 5.4 Geostatistische Modellierung der Kontextfaktoren

Die Residuenanalyse (Kapitel 6.4) zeigt, dass die Störterme teilweise autokorrelieren. Für das weitere Vorgehen stellte sich daher die Frage, welches geostatistische Verfahren autokorrelierte Residuen berücksichtigt und somit konstante Schätzer hervorbringt. Hierfür erschien das sog. *Spatial eigenvector mapping*, welches von Herrn Prof. Dr. Lautenbach bei der *5<sup>th</sup> International Summer School 2013: Climate change and spatial epidemiology* im September 2013 an der Universität Bielefeld vorgestellt wurde, als Mittel der Wahl<sup>1</sup>.

### **Spatial eigenvector mapping**

Das Spatial eigenvector mapping integriert die räumliche Konfiguration der Störterme, indem es die autokorrelierte Struktur in zusätzlichen Kovariaten zusammenfasst.

Charakterisierung Spatial eigenvector mapping:

- Es basiert auf der Zerlegung der Eigenfunktionen in der räumlichen Nachbarschaftsmatrix (vgl. Kapitel 5.3: Räumliche Bezüge im Modell).
- Die Eigenvektoren aus einer solchen Matrix repräsentieren die einzelnen wechselseitigen Relationen aus der Moran's I Statistik (vgl. Kapitel 5.3: Globale und lokale Moran-Statistik).
- Ausschließlich Eigenvektoren mit positiven Werten werden berücksichtigt (vgl. Dormann et al. 2007; Bivand et al. 2013).

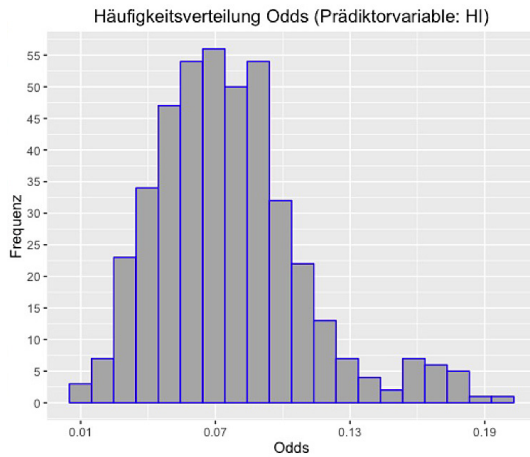
### **LM und Spatial eigenvector mapping**

Die Eigenvektoren werden in ein lineares Modell (LM) integriert (vgl. Riffith 2006). Ein solches Modell verinnerlicht die Gleichung des einfachen linearen Regressionsmodells (vgl. [4.6.2: 1]). Es nutzt im Allgemeinen die Normalverteilung und im Speziellen die Lognormalverteilung. Dass überhaupt eine der beiden Verteilungen in Betracht kommen kann, zeigt die Häufigkeitsverteilung der log Odds für die Prädiktorvariable Heat Index im Histogramm auf der folgenden Seite. Wie gut beide Verteilungen die Daten fitten, zeigt die daran folgende Darstellung.

---

<sup>1</sup> Das nachfolgende Vorgehen ist den bei der Summer School ausgehändigten Materialien entlehnt (Folien und Skripte von Herrn Prof. Dr. Lautenbach und Herrn Dr. Grübner).

Abb. 61 Häufigkeitsverteilung log Odds im Histogramm | Variable Heat Index

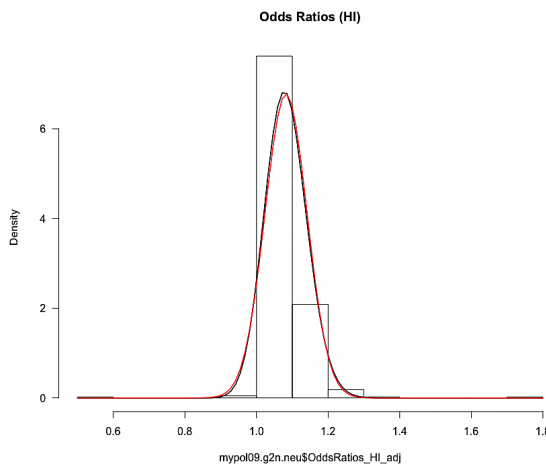


Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Häufigkeitsverteilung der nach Klassen eingeteilten log Odds. Zu erkennen ist die etwas links steile Verteilung.

Die Modalklasse (höchster Bin) gibt einen 0,07 log Odds an. Das entspricht dem Odds Ratio 1,0725.

Abb. 62 Dichteverteilung Odds Ratios | Variable Heat Index



Quelle: eigene Berechnung

Wie obige Abbildung bereits vermuten lässt, bildet die Normalverteilung die Streuung der Odds Ratios durchaus passend ab. In der Grafik visualisiert sie die rot eingelegte Kurve (AIC: -1242). Die Lognormalverteilung fittet wenig besser. Sie wird durch die schwarze Kurve visualisiert (AIC: -1249). Der minimale Unterschied bei

Akaike's information criterion veranlasst nicht zur Verwendung der Lognormalverteilung. Auch andere Verteilungen brachten keinen wesentlich besseren Fit (vgl. Wollschläger 2012: 207; Hedderich/Sachs 2012: 732; Groß 2010; R Core Team 2013).

Da die Normalverteilung die Verteilung der Response gut beschreibt, wurde sie zur Modellierung herangezogen. Modelliert wurde der Zusammenhang zwischen dem Odds Ratio für die Prädiktorvariable Heat Index und den nachfolgend aufgeführten Kontextfaktoren.

Tabelle 29 Berücksichtigte Kontextfaktoren

Bezeichnung Variable	Variablenlabel
Ein_ge	Einwohner ges.
Ein_ue_85	Einwohner ü.b. 85 Jahre
SiedDI	Siedlungsdichte
FrauAnt	Anteil Frauen
LebEr_F	Lebenserwartung Frauen
RestEr60F	Restlebenserwartung ü.b. 60jähriger Frauen
PflegBe_tsd	Pflegebedürftige je 10.000 Einwohner
PflegBe_amb	Anteil der Pflegebedürftigen in ambulanter Pflege
EmpPflGe	Anteil der Empfänger von Pflegegeld an den Pflegebedürftigen
AllgArzt_tsd	Allgemeinarzte je 100.000 Einwohner
DurRentBeM	Durchschnittlicher Rentenzahlbetrag Männer
BeschQu	Beschäftigtenquote
QuBesc_hoF	Quote weibliche hoch qualifizierte Beschäftigte
AntBescF	Anteil weibliche Beschäftigte
AeBesc	Ältere Beschäftigte
Selbs	Selbständige
QuMin	Quote Minijobs
QuTIZ	Quote Teilzeitbesch.
ArbLo	Arbeitslosigkeit
AntArb_ae	Anteil Arbeitslose ältere
AntArb_j	Anteil Arbeitslose jüngere
SchulAb_HoS	Schulabgänger mit Hochschulreife
SchulAb_o	Schulabgänger ohne Hauptschulabschluss
StudFH	Studierende an FH
SchuldQu	Quote Schuldner
BIP	BIP
AntWald	Anteil Waldfläche
AntNatFlae	Anteil naturnahe Fläche
AntLandW	Anteil Landwirtschaftsfläche
AntErhol	Anteil Erholungsfläche
Erho_Ein	Erholungsfläche je EW
AntWas	Anteil Wasserfläche
EntwWald	Entwicklung Waldfläche

Quelle: BBSR, eigene Darstellung

Die Tabelle zeigt die in der Modellierung berücksichtigten Kontextfaktoren.

Linke Spalte → Bezeichnung der Variable in den Daten. Rechte Spalte → Variablenlabel in den INKAR.

Blau unterlegt sind die nicht mit anderen Variablen korrelierten Kontextfaktoren (Kapitel 4.5.1).

Grau unterlegt sind die mittels Hauptkomponentenanalyse aus den hoch korrelierten Variablen selektierten Kontextfaktoren (Kapitel 4.5.2).

### Modellbildung

Die Modellbildung folgt gemeinhin zwei Strategien: Die Vorwärts- bzw. Rückwärtsselektion. Es wird also entweder vom Nullmodell oder vom umfanglichsten Modell ausgegangen und dann sukzessive Variablen aufgenommen - respektive ausgeschlossen (Sheather 2009: 237).

#### Im vorliegenden Fall:

- Wurde das Gesamtmodell mit allen möglichen Variablen gefahren (Gelman/Hill 2006: 69).

- Erfolgte die Modellierung nach kontextuellen Dimensionen der Faktoren (Kapitel 4.5.1, Tabelle 13) (Gelman/Hill 2006: 69):

- Bevölkerungsstruktur
- Medizinische und soziale Versorgung
- Beschäftigung und Einkommen
- Einkommen
- Bildung
- Flächennutzung

- Wurden naheliegende Kombinationen aus eben diesen Dimensionen probiert:

- bspw.: soziale Versorgung = Pflegebedarf + Einkommen = Empfänger von Pflegegeld; oder Einkommen und Bildung, etc.

- Wurden aus den aus diesen Kombinationen hervorgegangenen 14 Modellen alle signifikanten Variablen selektiert und mit ihnen weitere Kombinationen modelliert (12 weitere Modelle).
- Das Modell mit dem besten Fit wurde nach Akaikes Informationskriterium (AIC) ausgewählt (Dormann 2012: 285; Sheather 2009: 227 ff; Hedderich/Sachs 2012: 708 ff).

### 5.4.1 Ergebnisse der linearen Regression

Das Analyseergebnis für das Gesamtmodell, d. h., das Modell mit allen in Tab. 29 aufgeführten Kontextfaktoren.

Abb. 63 Analyseergebnis Kontextfaktoren | Gesamtmodell

Analyseergebnis gesamtes Modell				
	<i>B</i>	<i>CI</i>	<i>std. Error</i>	<i>p</i>
(Intercept)	1.52875	0.40422 – 2.65328	0.57205	<b>.00783</b>
Ein_ge	0.00000	-0.00000 – 0.00000	0.00000	.70780
Ein_ue_85	-0.01482	-0.04377 – 0.01412	0.01472	.31474
SiedDi	-0.00001	-0.00003 – 0.00000	0.00001	.05466
FrauAnt	0.00027	-0.01471 – 0.01525	0.00762	.97169
LebEr_F	-0.00759	-0.02048 – 0.00531	0.00656	.24829
RestEr60F	0.01230	-0.00798 – 0.03259	0.01032	.23393
PflegBe_tsd	0.00009	-0.00010 – 0.00028	0.00010	.35403
PflegBe_amb	-0.00106	-0.00278 – 0.00066	0.00088	.22716
EmpPflGe	-0.00219	-0.00353 – -0.00085	0.00068	<b>.00143</b>
AllgArzt_tsd	0.00003	-0.00098 – 0.00105	0.00052	.95028
DurRentBeM	-0.00002	-0.00015 – 0.00011	0.00006	.73520
BeschQu	-0.00002	-0.00253 – 0.00248	0.00127	.98620
QuBesc_hoF	0.00494	-0.00109 – 0.01097	0.00307	.10819
AntBescF	-0.00023	-0.00243 – 0.00196	0.00112	.83383
AeBesc	-0.00053	-0.00772 – 0.00665	0.00366	.88445
Selbs	0.00277	-0.00184 – 0.00738	0.00234	.23761
QuMin	0.00023	-0.00022 – 0.00068	0.00023	.30777
QuTlZ	-0.00953	-0.01614 – -0.00291	0.00336	<b>.00487</b>
ArbLo	0.00369	0.00030 – 0.00708	0.00173	<b>.03298</b>
AntArb_ae	0.00080	-0.00389 – 0.00549	0.00238	.73685
AntArb_j	0.00042	-0.00440 – 0.00524	0.00245	.86469
SchulAb_HoS	-0.00010	-0.00143 – 0.00124	0.00068	.88628
SchulAb_o	-0.00123	-0.00512 – 0.00266	0.00198	.53451
StudFH	0.00003	-0.00052 – 0.00058	0.00028	.91412
SchuldQu	0.00218	-0.00241 – 0.00677	0.00233	.35052
BIP	0.00013	-0.00128 – 0.00154	0.00072	.85371
WaldEinw	-0.00001	-0.00001 – 0.00000	0.00000	.06802
ErholEinw	-0.00004	-0.00032 – 0.00023	0.00014	.74609
AntNatFlae	-0.00039	-0.00322 – 0.00245	0.00144	.78944
AntLandW	-0.00002	-0.00070 – 0.00066	0.00035	.94973
AntErhol	0.00438	-0.00068 – 0.00944	0.00257	.08972
AntWas	-0.00000	-0.00003 – 0.00002	0.00001	.76409
fitted(lag.me0)	0.20081	0.06940 – 0.33223	0.06685	<b>.00283</b>
Observations	441			
R <sup>2</sup> / adj. R <sup>2</sup>	.150 / .081			

Quelle: eigene Berechnung

Ergebnis der Regressionsanalyse. Das Odds Ratio für die Variable Heat Index bildet die Responsevariable.

Dargestellt sind die berechneten Koeffizienten für die Kontextfaktoren mit den zugehörigen Konfidenzintervallen (95 % Niveau).

Im gesamten Modell ist der Intercept signifikant.

Signifikanz zeigen die Variablen:

- Empfänger von Pflegegeld

- Quote Teilzeitbeschäftigte

- Arbeitslosigkeit

Besprochen werden die Effekte der signifikanten Kontextfaktoren bei der Darstellung des Modells mit dem besten AIC auf den folgenden Seiten.



Abb. 64 Analyseergebnis Kontextfaktoren | finales Modell

Analyseergebnis finales Modell				
	B	CI	std. Error	p
(Intercept)	1.15540	1.09789 – 1.21290	0.02926	.00000
SiedDi	-0.00001	-0.00002 – -0.00000	0.00000	.03845
EmpPfiGe	-0.00135	-0.00224 – -0.00047	0.00045	.00282
QuTIZ	-0.00567	-0.00865 – -0.00269	0.00152	.00021
ArbLo	0.00255	0.00083 – 0.00427	0.00087	.00375
SchuldQu	0.00298	0.00017 – 0.00580	0.00143	.03792
ErholEinw	0.00007	-0.00015 – 0.00030	0.00011	.53026
WaldEinw	-0.00001	-0.00001 – -0.00000	0.00000	.00195
fitted(lag.me18)vec5	0.21561	0.09633 – 0.33490	0.06069	.00042
fitted(lag.me18)vec3	-0.16411	-0.28786 – -0.04036	0.06296	.00946
fitted(lag.me18)vec95	0.22289	0.11514 – 0.33065	0.05482	.00006
Observations		441		
R <sup>2</sup> / adj. R <sup>2</sup>		.160 / .141		

Quelle: eigene Berechnung

Das finale Modell mit dem besten AIC = -1299 (Modell oben = -1248).

Die signifikanten Kontextfaktoren:

- *Siedlungsdichte* (s. u.)

- *Empfänger von Pflegegeld* → Anteil der Empfänger von Pflegegeld an den Pflegebedürftigen insgesamt in %

- *Quote Teilzeitbeschäftigte* → SV Beschäftigte (Teilzeit) je 100 Ein-

wohner im erwerbsfähigen Alter

- *Arbeitslosigkeit* → Anteil der Arbeitslosen an den Einwohnern im erwerbsfähigen Alter in %

- *Schuldnerquote* → Private Schuldner je 100 Einwohner 18 Jahre und älter

- *Waldfläche je Einwohner* → Waldfläche je Einwohner in m<sup>2</sup>

#### 5.4.1.1 Welchen Einfluss üben die signifikanten Variablen aus?

Bei den Kontextfaktoren handelt es sich um Prozentzahlen und eine Beziehungszahl. Da es möglich war, die Modelle mit der Normalverteilung zu fitten, können die Regressionskoeffizienten als der sich verändernde mittlere Wert der Odds Ratios für die Variable Heat Index interpretiert werden, welcher sich bei der Veränderung des Kontextfaktors um eine Einheit ergibt (Hedderich/Sachs 2012: 116; Groß 2012: 191 ff). Die Veränderung des Odds Ratios lässt dann die Berechnung der Risikodifferenz in Prozent zu.

Tabelle 30 Effekte der signifikanten Kontextfaktoren

Kontextfaktoren	Koeffizient	Risiko- änderung (%) - 1 Ein.	Risiko- änderung (%) - 3 Ein.	Risiko- änderung (%) - 5 Ein.
SiedDi	-8,82E-06	-0,0008816	-0,0026448	-0,0044080
EmpPflGe	-0,001352	-0,1352000	-0,4056000	-0,6760000
QuTZ	-0,00567	-0,5670000	-1,7010000	-2,8350000
ArbLo	0,002549	0,2549000	0,7647000	1,2745000
SchuldQu	0,002982	0,2982000	0,8946000	1,4910000
WaldEinw	-6,30E-06	-0,0006302	-0,0018906	-0,0031510
		Risiko- änderung (%) - 500 Ein.	Risiko- änderung (%) - 1500 Ein.	Risiko- änderung (%) - 2000 Ein.
SiedDi	-8,82E-06	-0,4408	-1,3224	-1,7632
WaldEinw	-6,30E-06	-0,3151	-0,9453	-1,2604

Quelle: eigene Berechnung

Die Tabelle zeigt die im finalen Modell signifikanten Kontextfaktoren sowie deren berechneten Koeffizienten. Unter Verwendung dieser waren die Risikoveränderungen in Abhängigkeit der Zunahmen bei den Einheiten der Kontextfaktoren zu berechnen. Gewählt wurden 1, 3, 5,

500, 1500 und 2000 Einheiten. Diese Abstufung zeigt auch die Effekte bei der Erhöhung der Kontextfaktoren Siedlungsdichte und Waldfläche.

### Schlussfolgerungen:

- Mit einer Erhöhung der Siedlungsdichte um 500 Personen (s. u.) wäre eine 0,4%ige Risikoreduktion verbunden.
- Nimmt der Anteil der Empfänger von Pflegegeld an den Pflegebedürftigen 3 % zu, reduziert sich das hitzeassoziierte Risiko 0,4 %.
- Erhöht sich die Quote der Personen in Teilzeitbeschäftigung um 3 je 100 Einwohner im erwerbsfähigen Alter (= 3 %), nimmt das Risiko immerhin 1,7 % ab.
- Steigt der Anteil der Arbeitslosen an den Einwohnern im erwerbsfähigen Alter 3 %, bewirkt dies eine 0,8%ige Risikosteigerung.
- Bei Anstieg der privaten Schuldnerquote von 3 % erhöht sich das hitzeassoziierte Mortalitätsrisiko 0,9 %.
- Steigt die Waldfläche je Einwohner von 1 auf 1500 m<sup>2</sup>, nimmt das Risiko 0,9 % ab.

### Aussagekraft der Beziehungszahlen (Bsp. Siedlungsdichte)

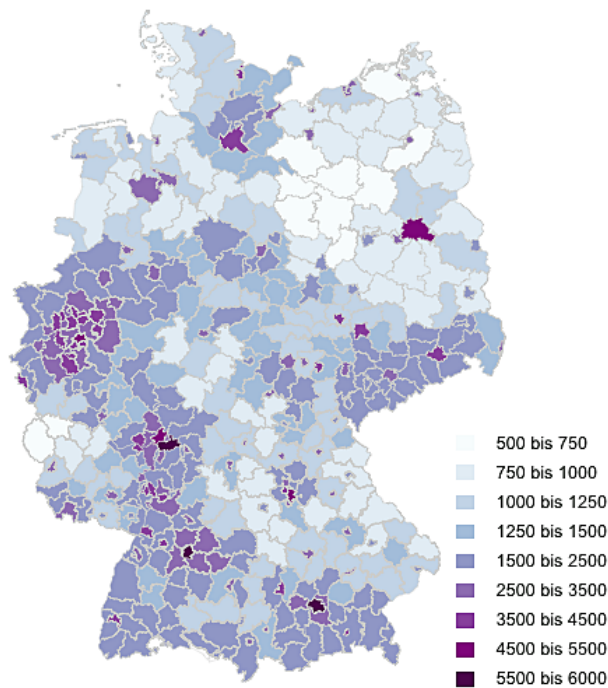
Die Variable Siedlungsdichte integriert die Siedlungs- und Verkehrsfläche = Gebäude- und Freifläche + Betriebsfläche + Verkehrsfläche + Erholungsfläche + Friedhöfe. Der Besatz der Siedlungsfläche- und Verkehrsfläche mit Einwohnern ergibt die *Siedlungsdichte* (BBSR 2012<sup>1</sup>).

<sup>1</sup> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Übersicht über die Indikatoren; Quelle: [https://www.dza.de/fileadmin/dza/pdf/fdz/Uebersicht\\_verfuegbarer\\_INKAR\\_2011\\_Indikatoren.pdf](https://www.dza.de/fileadmin/dza/pdf/fdz/Uebersicht_verfuegbarer_INKAR_2011_Indikatoren.pdf); letzter Abruf 19.06.2016

Der Koeffizient  $-0,00001$  in diesem Modell sagt aus, dass sich die Zielvariable Odds Ratio um genau diese Größe verändert, wenn die Siedlungsdichte um eine Einheit zunimmt (Benoit 2011). Eine Einheit repräsentiert hier ein(en)/e Einwohner/in. Steigt die Siedlungsdichte um 500 Einwohner je besiedelbaren  $\text{km}^2$ , dann reduziert sich das Risiko um 0,4 %. Die Spanne der besiedelten Quadratkilometer reicht von unter 750 bis über 5500 Menschen. Ein Blick auf die Siedlungsdichten der Beobachtungseinheiten erscheint ratsam.

Abb. 65 Siedlungsdichte in den Untersuchungsgebieten

Siedlungsdichte in den Untersuchungsgebieten



Quelle: © GeoBasis-DE / BKG 2003

Quelle: BBSR, eigene Darstellung

Die Choroplethenkarte zeigt die nach Klassen dargestellte Einwohnerzahl je  $\text{km}^2$  Siedlungsfläche.

Die in der Karte (Abb. 57) für die küstennahen Gebiete der Nord- und Ostsee sowie einige südöstlich und auch südwestlich gelegenen Einheiten geplotteten hohen Odds Ratios könnten dem Augenschein nach mit einer geringeren Siedlungsdichte in Beziehung gebracht werden.

Eine überprüfende logistische Regressionsanalyse (s. 4.6.2), bei der die Mortalitätsdaten nach Siedlungsdichteklassen eingeteilt wurden, ergab:

- Die Gefährdung der Gesundheit durch die Exposition Hitze nimmt von der Siedlungsdichteklasse 0-800 Einwohner je  $\text{km}^2$  ( $\text{EW}/\text{km}^2$ ) bis 1000 -1200  $\text{EW}/\text{km}^2$  dezent ab, bleibt bis 2000  $\text{EW}/\text{km}^2$  konstant, nimmt für die Klasse 2000 - 3000 nochmals ab, und steigt bis über 4000  $\text{EW}/\text{km}^2$  wieder auf das Niveau von ca. 1200 Einwohnern je  $\text{km}^2$  an. Der höchste Wert ist für die Klasse 0-800 Einwohner je  $\text{km}^2$  festzustellen (Grundlage Odds Ratios ohne Adjustierung).
- Im Vergleich zur Exposition Hitze sind die Koeffizienten für die Exposition  $\text{PM}_{10}$  auch hier durchgängig stärker ausgeprägt. Die Koeffizientenwerte sinken ausge-

---

hend von der Klasse 0-800 EW/km<sup>2</sup> bis 1000 - 1200 EW/km<sup>2</sup>, bleiben bis 1400 EW/km<sup>2</sup> relativ konstant und gehen dann nochmals leicht zurück. Die Klasse 2000 - 3000 Einwohner je km<sup>2</sup> zeigt den niedrigsten Koeffizienten (Grundlage Odds Ratios ohne Adjustierung).

- Frauen sind im Kontrast zu Männern in keiner Klasse signifikant mehr bzw. weniger gefährdet.
- Die Prädiktorvariable Alter hat ausgenommen der höchsten Siedlungsdichteklasse (über 4000 EW/km<sup>2</sup>) einen signifikanten Einfluss. Das zunehmende Alter beeinflusst die Chance auf einen gesundheitlichen Endpunkt unter 1200 EW/km<sup>2</sup> im wörtlichen Sinne negativ.
- Die kombinierte Variable Hitze und Feinstaub ist für alle Klassen signifikant.

Modellabhängig waren auch die Kontextfaktoren: *Einwohner gesamt, Anteil der Einwohner über 85 Jahre, Frauenanteil, Beschäftigung Frauen, Beschäftigung älterer Menschen, Selbständige, Arbeitslose, Anteil Arbeitslose jugendliche und ältere, Schulabgänger mit Hochschulabschluss, Schulabgänger ohne Hauptschulabschluss* signifikant.

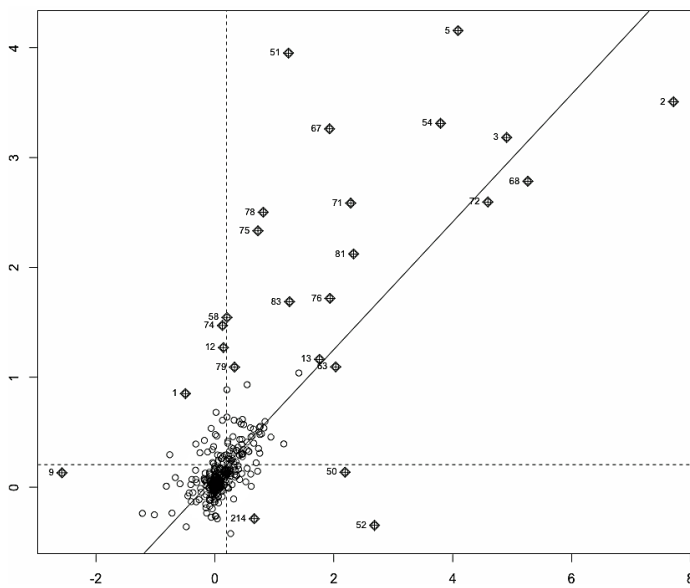
### 5.4.1.2 Local Indicators of Spatial Association

Mittels Local Indicators of Spatial Association (LISA) ist es möglich, lokale Autokorrelationen zu identifizieren. Ebenfalls können Ausreißer erkannt werden. Beides geschieht durch die Darstellung in einem sog. Moran-Scatterplot. Für die LISA wird der Local Moran's I berechnet (Grübner et al. 2011b; Pfeiffer et al. 2008; Anselin 1995).

HL	HH
LL	LH

Sofern die beobachteten Werte über die vier Felder des Scatterplots (s. li.) relativ konsistent angeordnet auftreten, lässt sich von stabilen Daten sprechen. Erscheinen Konzentrationen in den Feldern HH (high high) bzw. LL (low low), so liegen Autokorrelationen mit hohen oder entsprechend niedrigen Ausprägungen vor. Bei Belegung der Felder HL (high low) und LH (low high) kann es sich um Ausreißer handeln, bei welchen hohe oder niedrige Moran-Werte von entgegengesetzten Ausprägungen umgeben sind (Pfeiffer et al. 2008). Im Kontext von hitzeassoziierten Gesundheitsrisiken interessiert in erster Linie die Ausprägung HH.

Abb. 66 Moran-Scatterplot



Quelle: eigene Berechnung

Der Scatterplot zeigt im Bereich der sich kreuzenden Linien einen recht großen Teil nicht korrelierender Daten.

Die Anzahl der korrelierenden Einheiten nach Verortung:

- LL → 1
- HL → 3
- LH → 3

- HH → 16

Die Eigenschaften der korrelierenden Beobachtungseinheiten werden tabellarisch zusammengefasst, da sich die Frage stellt, was die sog. Hot Spots charakterisiert.

Tabelle 31 Moran's I - Ausreißer

Kreisname	KrTyp	Mor`I	signif. Mor`I	OR HI	OR PM10	signif. PM10	OR Alt	signif. Alt	OR HI.PM10	signif. HI.PM10
Aurich LK	KrT.6	HH	ja	1,1686	1,0007	ja	0,9882	nein	0,9980	ja
Ruegen LK	KrT.9	HH	ja	1,3235	0,9691	nein	0,9911	nein	0,9960	nein
Flensburg KS	KrT.8	HH	ja	1,1999	1,0109	nein	0,9970	nein	0,9969	nein
Nordfriesland LK	KrT.9	HL	ja	1,1723	1,0159	nein	1,0030	nein	0,9977	nein
Nordvorpommern LK	KrT.9	LH	ja	1,1174	1,0285	nein	0,9920	nein	0,9989	nein
Schleswig Flensburg LK	KrT.3	LH	ja	1,1317	1,0056	nein	0,9930	nein	1,0003	nein
Uckermark LK	KrT.6	HH	nein	1,0793	1,0096	ja	0,9787	ja	0,9959	ja
Hamburg	KrT.1	HH	nein	1,0929	1,0114	ja	1,0053	ja	0,9970	ja
Herzogtum Lauenburg LK	KrT.4	HH	nein	1,0728	1,0135	ja	1,0061	nein	0,9962	ja
Stormarn LK	KrT.9	HH	nein	1,1111	1,006	ja	1,0059	nein	0,9956	ja
Pinneberg LK	KrT.2	HH	nein	1,1685	0,9714	ja	0,9994	nein	0,9934	ja
Schwerin KS	KrT.8	HH	nein	1,1298	0,9885	ja	0,9991	nein	0,9942	ja
Uecker Randow LK	KrT.9	HH	nein	1,0941	0,9889	ja	0,9920	nein	0,9929	ja
Mecklenburg Strelitz LK	KrT.9	HH	nein	1,0923	1,0053	ja	0,9922	nein	0,9957	ja
Lueneburg LK	KrT.8	HH	nein	1,0803	1,0008	ja	0,9977	nein	0,9979	ja
Neubrandenburg KS	KrT.9	HH	nein	1,116	1,0146	ja	0,9781	ja	0,9958	ja
Kiel KS	KrT.5	HH	nein	0,5794	0,0351	ja	1,0117	nein	1,0204	ja
Prignitz LK	KrT.9	HH	nein	1,0838	1,0168	ja	0,9964	nein	0,9987	ja
Ostholstein LK	KrT.7	HH	nein	1,2038	1,0675	nein	0,9993	nein	0,9994	nein
Parochim LK	KrT.9	HL	nein	1,0801	0,9934	ja	0,9815	ja	0,9919	ja
Ludwigslust LK	KrT.9	HL	nein	1,1098	0,984	ja	0,9904	ja	0,9917	ja
Loebau Zittau LK	KrT.8	LH	nein	1,0388	1,0051	ja	1,0045	nein	0,9945	ja
Dithmarschen LK	KrT.9	LL	nein	1,1161	1,0334	ja	1,0033	nein	0,9983	ja

Quelle: eigene Berechnung

Die Tabelle zeigt neben den Beobachtungseinheiten den Kreistyp, den Wert für die LISA (Bez. Mor` I) und daneben, ob Moran`s I signifikant ist. Aufgeführt sind auch die Odds Ratios für die Variable Heat Index (OR HI). Diese sind alle signifikant. Daneben die ORs für die Variable PM<sub>10</sub> (OR PM10), mit zugehöriger Aussage zur Signifikanz (signif. PM10). Ebenso sind die Variablen Alter (OR Alt u. signif. Alt) sowie die Kombinationsvariable Heat Index plus PM<sub>10</sub> (OR HI.PM10 u. signif. HI.PM10) dargestellt.

Ausgeschlossen wurde die Variable Geschlecht, da hier keine Signifikanz vorlag.

Aus der Tabelle geht hervor:

- Beinahe ausnahmslos autokorrelieren küstennahe Beobachtungseinheiten mit ihren benachbarten Einheiten.
- Ausgenommen Hamburg sind vorwiegend dünn besiedelte Einheiten betroffen.
- 6 Beobachtungseinheiten sind signifikant, von denen sind: 3 Einheiten = HH, 2 Einheiten LH und 1 Beobachtungseinheit HL ausgeprägt.
- Bei den signifikanten Einheiten sind die Variablen Feinstaub und Alter nicht signifikant (Ausnahme Aurich, Signifikanz bei PM<sub>10</sub>).

### Schlussfolgerung

Ausreißer sind ländliche, dünn besiedelte Regionen, zumeist in Küstennähe. Bei den betroffenen Einheiten ist die Gesundheit der Bevölkerung durch die Exposition Hitze deutlich und durch die Exposition Feinstaub eher gering gefährdet.



## **5.5 Ergebnisse der Regressionsanalysen - Morbidität**

Die Ergebnisse aus den Zusammenhangsanalysen zwischen der berücksichtigten hitzeassoziierten Morbidität und den Prädiktorvariablen Heat Index, PM<sub>10</sub>, Geschlecht sowie Alter werden abweichend zum bisherigen Vorgehen präsentiert.

Grund hierfür ist der immense Umfang der hitzeassoziierten Morbiditätsdaten (2.316.854 Fälle). Analysen auf den Ebenen Bundesrepublik Deutschland und siedlungsstruktureller Kreistyp waren mit der am Statistischen Landesamt des Freistaates Thüringen in Erfurt vorliegenden Hardware für den gesamten Beobachtungszeitraum 2002 - 2006 nicht möglich. Sehr wahrscheinlich hätte die freie Programmiersprache R (R Development Core Team 2008) die Datenmenge auch auf einer leistungsstärkeren Plattform nicht bewältigen können. Um das Problem in den Griff zu bekommen wurden:

- Eine Zufallsstichprobe mit der noch zu verarbeitenden Datengröße gezogen und das Ergebnis stellvertretend für das der Ebene BRD dargestellt.
- Nach den Jahren 2002 - 2006 getrennte Analysen durchgeführt.
- Die Analysen getrennt nach den Jahren 2002 - 2006, sowie differenziert nach Altersklassen realisiert.
- Analysen auf der Ebene der 439 kreisfreien Städte, Landkreise, Kreise, Stadtkreise, Stadtverbände und einer Hansestadt durchgeführt.
- Die für die 439 Beobachtungseinheiten berechneten Ergebnisse auf der Ebene siedlungsstruktureller Kreistyp aggregiert und übersichtshalber dargelegt.

Die Ergebnispräsentation folgt diesem Vorgehen. Die Ausführung beschränkt sich auf einen Auszug der Modellergebnisse, da sich die nach Jahren getrennten Analyseergebnisse sehr ähneln.

### **5.5.1 Analyseergebnis Morbidität - Ebene BRD**

Aus dem gesamten Datensatz wurde eine Stichprobe der Größe 200.000 gezogen und mit dem logistischen Regressionsmodell analysiert. Die Variablenkombination ist hier, sowie im Folgenden, mit jener im Kapitel 5.3 identisch.

Die nach den Beobachtungsjahren 2002 - 2006 getrennten Analysen finden an dieser Stelle ebenfalls Raum. Dargestellt ist das Ergebnis für das Beobachtungsjahr 2003.

Abb. 67 Analyseergebnis - Ebene BRD

	Mod.Hospit				Mod.Hospit.Tod				Quelle: FDZ eigene Berechnung
	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	
(Intercept)	0.0007	0.0006 – 0.0008	0.0612	.0000	0.0014	0.0012 – 0.0017	0.0855	.0000	
AT	1.0558	1.0543 – 1.0572	0.0007	.0000	0.9986	0.9968 – 1.0005	0.0010	.1484	
PM10	1.1144	1.1103 – 1.1185	0.0019	.0000	0.9958	0.9907 – 1.0009	0.0026	.1080	
Geschl	1.0012	0.9920 – 1.0106	0.0047	.7935	0.9149	0.9024 – 0.9275	0.0070	.0000	
Alt	1.0000	0.9998 – 1.0002	0.0001	.9357	1.0531	1.0526 – 1.0537	0.0003	.0000	
AT:PM10	0.9988	0.9988 – 0.9989	0.0000	.0000	1.0001	1.0000 – 1.0001	0.0000	.0823	
Observations	2199995				2199995				
Family	binomial (logit)				binomial (logit)				

Die Ergebnisse für die BRD - und unten für die Ebene BRD, Jahr 2003:

- Modell li. → hitzeassoziierte Morbidität (Bez.: Mod.Hospit.)

- Modell re. → unter Hitze im Krankenhaus verstorben (Bez.: Mod.Hospit.Tod)

Variablen:

AT → Apparent Temperature bzw. Heat Index

PM10 → Feinstaub

Geschl → wbl. Geschlecht

Alt → Alter

AT:PM10 → AT plus PM<sub>10</sub>

Die Odds Ratios für die Variablen AT und PM<sub>10</sub> sind in beiden Darstellungen noch nicht adjustiert.

Abb. 68 Analyseergebnis 2003 - Ebene BRD

	Mod. Hospit.				Mod. Hospit_Tod				Quelle: FDZ eigene Berechnung
	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p	
(Intercept)	0.0009	0.0008 – 0.0010	0.0327	.0000	0.0419	0.0385 – 0.0456	0.0433	.0000	
AT	1.0529	1.0522 – 1.0537	0.0004	.0000	0.9990	0.9981 – 1.0000	0.0005	.0448	
PM10	1.1106	1.1086 – 1.1127	0.0009	.0000	0.9965	0.9941 – 0.9990	0.0013	.0052	
Geschlwbl	0.9983	0.9932 – 1.0034	0.0026	.5098	1.2218	1.2130 – 1.2308	0.0037	.0000	
AT:PM10	0.9989	0.9989 – 0.9989	0.0000	.0000	1.0000	1.0000 – 1.0001	0.0000	.0028	
Observations	7196365				7196365				
Family	binomial (logit)				binomial (logit)				



Zu entnehmen ist beiden Veranschaulichungen, dass die Exposition Hitze durchaus das Hospitalisationsgeschehen beeinflusst. Ebenfalls die Exposition Feinstaub. Beide Odds Ratios sind verglichen mit der hitzeassoziierten Mortalität weniger stark ausgeprägt. Nach Adjustierung lässt sich das Gefährdungsniveau absehen. Adjustiert wurden die Odds Ratios für die Modelle, welche die hospitalisierten Diagnosen (Bez.: Mod.Hospit.) und nicht die in Krankenhäusern verstorbenen Diagnosen berücksichtigen.

Odds Ratios adjustiert:

- Heat Index → Ebene BRD gesamt (Zufallsstichprobe 200.000 Fälle) = 1,0209 und Ebene BRD Beobachtungsjahr 2003 = 1,0517
- PM<sub>10</sub> → Ebene BRD gesamt (Zufallsstichprobe 200.000 Fälle) = 1,0018 und Ebene BRD Beobachtungsjahr 2003 = 0,9984

Die Variablen Geschlecht weiblich und Alter sind bei den Modellen, die einzig die hitzeassoziierten Hospitalisationen berücksichtigen, nicht signifikant. Für das Mortalitätsgeschehen im Krankenhaus sind sie signifikant, bei diesen sind aber die Variablen Heat Index und PM<sub>10</sub> wiederum nicht bedeutend.

Um Redundanz zu vermeiden, wird auf die Darstellung der Ergebnisse für die Jahre 2002, 2004, 2005 und 2006 verzichtet. Sie fallen ganz ähnlich aus.

Dafür erfolgt die Darstellung der Analyse für das Jahr 2003 unter Betonung der Altersklassen auf der folgenden Seite.

	Mod03F0to9				Mod03F5to59				Mod03F6to69				Mod03F7to79				Mod03F8toXX			
	OR	CI	std. Error	P	OR	CI	std. Error	P	OR	CI	std. Error	P	OR	CI	std. Error	P	OR	CI	std. Error	P
(Intercept)	0.0507	0.0468 – 0.0549	0.0407	.0000	0.5030	0.4849 – 0.5218	0.0187	.0000	0.3573	0.3428 – 0.3725	0.0212	.0000	0.3175	0.3052 – 0.3303	0.0201	.0000	0.1289	0.1234 – 0.1347	0.0225	.0000
AT	1.0006	0.9997 – 1.0015	0.0005	.1861	1.0006	1.0001 – 1.0010	0.0002	.0093	0.9990	0.9986 – 0.9995	0.0002	.0001	1.0000	0.9996 – 1.0005	0.0002	.8436	1.0000	0.9995 – 1.0005	0.0003	.8998
PM10	1.0032	1.0008 – 1.0055	0.0012	.0077	1.0015	1.0004 – 1.0025	0.0005	.0073	0.9979	0.9967 – 0.9991	0.0006	.0007	1.0000	0.9988 – 1.0011	0.0006	.9624	0.9993	0.9980 – 1.0006	0.0007	.2737
Geschlwb	0.8243	0.8186 – 0.8301	0.0035	.0000	0.7085	0.7063 – 0.7108	0.0016	.0000	0.6089	0.6066 – 0.6111	0.0019	.0000	1.0230	1.0195 – 1.0264	0.0017	.0000	2.9068	2.8953 – 2.9184	0.0020	.0000
AT:PM10	1.0000	0.9999 – 1.0000	0.0000	.0170	1.0000	1.0000 – 1.0000	0.0000	.0107	1.0000	1.0000 – 1.0000	0.0000	.0003	1.0000	1.0000 – 1.0000	0.0000	.7556	1.0000	1.0000 – 1.0000	0.0000	.3478
Observations	7196351				7196351				7196351				7196351				7196351			
Family	binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)				binomial (logit)			

Abb. 69 Analyseergebnis nach Altersklassen (2003)

Das Analyseergebnis nach Altersklassen:

- 0 - 9 Jahre (Bez.: Mod03F0to9)
- 10 - 59 Jahre (Bez.: Mod03F5to9)
- 60 - 69 Jahre (Bez.: Mod03F6to69)
- 70 - 79 Jahre (Bez.: Mod03F7to79)
- über 80 Jahre (Bez.: Mod03F8toXX)

für das Beobachtungsjahr 2003.

Nach dieser Gliederung waren signifikante Ergebnisse festzustellen. Die Koeffizienten zeigten jedoch wenig nennenswerte Effekte. Beispielsweise wurde das Odds Ratio für die Prädiktorvariable Heat Index der Altersklasse 10 - 59 Jahre mit 1,0006 (CI: 1,0001 - 1,0010) berechnet. Das Odds Ratio für die Variable PM<sub>10</sub> ist hier 1,0015 (CI: 1,0004 - 1,0025). Für die Altersklasse 60 - 69 Jahre war ein gegensätzliches Analyseergebnis festzustellen. Das Odds Ratio für die Variable Heat Index 0,9990 (CI: 0,9986 - 0,9995), das für die Variable PM<sub>10</sub> 0,9979 (CI: 0,9967 - 0,9991). Bemerkenswert zeigt sich der Effekt für die Variable Geschlecht weiblich. Für die Altersklasse 10 - 59 Jahre ist das OR hier mit 0,7085 (CI: 0,7063 - 0,7109) und der Altersklasse 60 - 69 Jahre mit 0,6089 (CI: 0,6066 - 0,6111) berechnet worden.

Erstaunlicherweise waren die Koeffizienten für die Variablen Heat Index und PM<sub>10</sub> für die Altersklassen 70 - 79 Jahre und über 80 Jahre nicht signifikant.

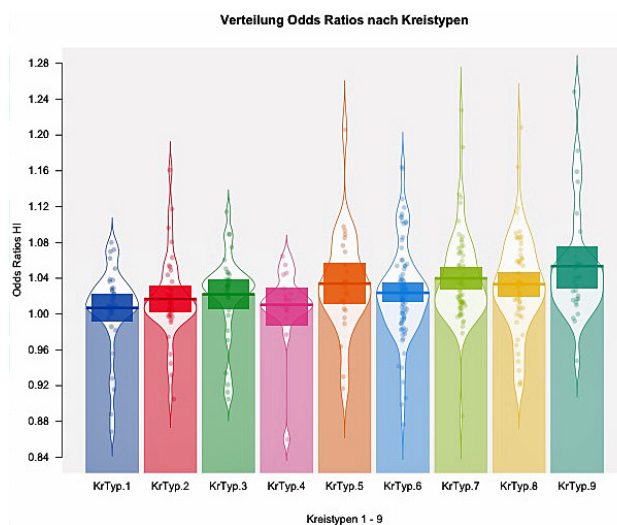
Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Da die Ergebnisse für die Jahre 2002 sowie 2004 - 2006 ähnlich ausfielen, wurde auf eine weitere Ergebnispräsentation verzichtet.

### 5.5.2 Ergebnisse Morbidität - Ebene Kreistyp

Da den 439 kreisfreien Städten, Landkreisen, Kreisen, etc. das Attribut siedlungsstruktureller Kreistyp beigeordnet ist, können die Verteilungen der adjustierten Odds Ratios für die Variablen Heat Index und  $PM_{10}$  übersichtlich auch auf dieser räumlichen Ebene abgebildet werden.

Abb. 70 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9 | Variable Heat Index



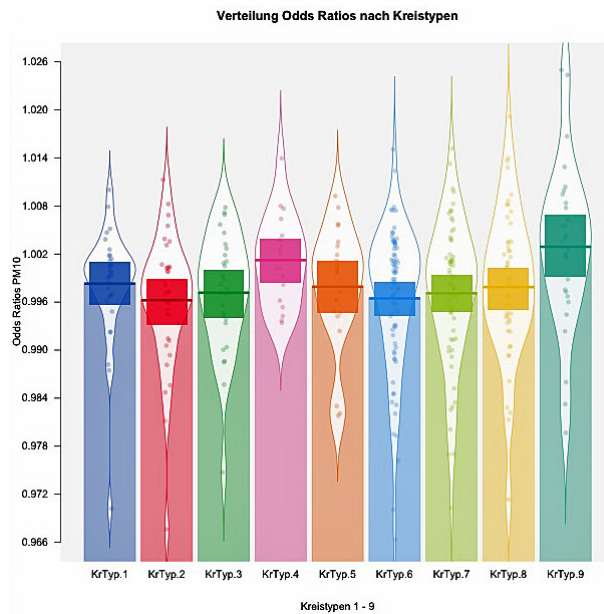
Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Dargestellt sind die Odds Ratios für die Variable Heat Index mit Blick auf die Kreistypen 1 - 9.

Zu sehen ist die Variabilität der Odds Ratios, wie sie schon für die hitzeassoziierte Mortalität festzustellen war (Abb. 50 im Kapitel 5.3.1.2).

Auch die Steigerung vom Kreistyp 1 hin zu den vergleichsweise dünner besiedelten Kreistypen. Verglichen mit dem Ergebnis bei den Mortalitätsdaten, sind die Odds Ratios niedriger ausgeprägt. Abweichend zu den Ergebnissen der Mortalitätsanalyse verzeichnet der Kreistyp 5, zu dem auch dichter besiedelte kreisfreie Städte gehören, höhere Odds Ratios. Markant tritt wieder der Kreistyp 9 mit seinen hohen Werten und seiner deutlichen Varianz hervor. Diese ist noch größer. Zur Darstellung wurden die Odds Ratios auf 1,60 begrenzt.

Abb. 71 Ausprägungen Odds Ratios nach Kreistyp 1 - 9 | Variable PM<sub>10</sub>



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Adjustierte ORs für die Variable PM<sub>10</sub>. Der Koeffizient war für 378 der 439 Einheiten signifikant.

Zu sehen ist wieder eine deutliche Variabilität zwischen den Kreistypen. Die Abbildung 52 im Kapitel 5.3.1.2 zeigt ein ähnliches Bild für die Analyse der Mortalitätsdaten.

Die Odds Ratios für die Morbidität sind aber durchwegs niedriger ausgeprägt. Trotzdem ist festzustellen,

dass ein Effekt der Exposition PM<sub>10</sub> auf das Morbiditätsgeschehen für die Kreistypen 4 und 9 vorliegt.

### 5.5.3 Ergebnisse Morbidität - unterste Beobachtungseinheiten

Die Analyse auf der untersten Beobachtungsebene, den 439 kreisfreien Städten, Landkreisen, Kreisen, Stadtkreisen, Stadtverbänden und einer Hansestadt ergab für 399 der 439 Einheiten für den Koeffizienten der Variable Heat Index ein signifikantes Ergebnis. In die Ergebnispräsentation gehen die Werte dieser 399 Beobachtungseinheiten ein. Für die Bundeshauptstadt und den Landkreis Ostvorpommern werden die Analyseergebnisse exemplarisch gezeigt.

Abb. 72 Analyseergebnis - Hauptstadt Berlin & Landkreis Ostvorpommern

	Berlin				OstVor			
	OR	CI	std. Error	p	OR	CI	std. Error	p
(Intercept)	0.0005	0.0002 – 0.0009	0.3233	.0000	0.0000	0.0000 – 0.0000	2.0099	.0000
AT	1.0992	1.0912 – 1.1073	0.0037	.0000	1.3236	1.2598 – 1.3901	0.0251	.0000
PM10	1.3313	1.3075 – 1.3555	0.0092	.0000	1.1842	1.0371 – 1.3469	0.0668	.0114
Geschlwbl	1.0393	1.0125 – 1.0668	0.0133	.0038	0.9999	0.8562 – 1.1671	0.0790	.9991
Alt	1.0031	1.0025 – 1.0037	0.0003	.0000	1.0004	0.9970 – 1.0038	0.0018	.8368
AT:PM10	0.9969	0.9967 – 0.9971	0.0001	.0000	0.9979	0.9963 – 0.9996	0.0008	.0125
Observations	129740				27777			
Family	binomial (logit)				binomial (logit)			

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Die Odds Ratios für die Variablen AT (hier gleichzusetzen mit dem Heat Index) und PM<sub>10</sub> sind noch nicht adjustiert. Die Variablen Alter (Alt) und Geschlecht (Geschl) sowie die Kombinationsvariable Heat Index plus PM<sub>10</sub> (AT:PM10).

### Die Odds Ratios adjustiert:

Heat Index → Berlin = 1,0078

Heat Index → Ostvorpommern = 1,2481

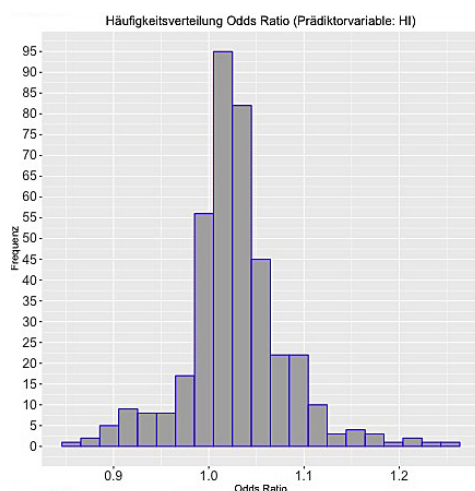
PM<sub>10</sub> → Berlin = 1,0108

PM<sub>10</sub> → Ostvorpommern = 0,9828

Es lässt sich sehen, dass unter den Expositionen Hitze und Feinstaub das Risiko auf die Verschlechterung einer hitzeassoziierten Krankheit auf der untersten Beobachtungsebene zunimmt. Das hitzeassoziierte Risiko ist im Landkreis Ostvorpommern deutlich höher. Ostvorpommern wurde gewählt, da der Landkreis schon bei der Analyse der Mortalität einen Ausreißer darstellt. Unter der Exposition Feinstaub ist das Hospitalisationsrisiko in der Hauptstadt deutlich höher. Nur in Berlin sind die Variablen Geschlecht weiblich und Alter signifikant. Frauen und ältere Menschen haben ein höheres Risiko unter Hitze ein Krankenhaus aufsuchen zu müssen. Der Koeffizient für die kombinierte Variable aus Heat Index und PM<sub>10</sub> ist bei beiden Einheiten signifikant.

Zur Einschätzung des gesamten Gefährdungsausmaßes wird die Häufigkeitsverteilung der Odds Ratios für die Prädiktorvariable Heat Index in einem Histogramm veranschaulicht.

Abb. 73 Häufigkeitsverteilung Odds Ratios im Histogramm | Variable Heat Index



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

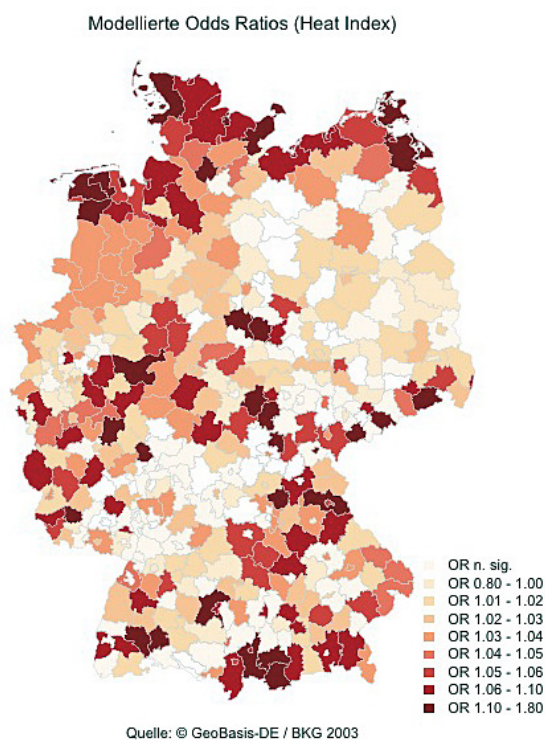
Dem Histogramm lässt sich entnehmen, dass die Odds Ratios überwiegend im Bereich 1 - 1,1 ausgeprägt sind. Eine hitzeassoziierte Morbiditätsgefährdung lässt sich ableiten.

Nicht im Histogramm berücksichtigt sind die beiden Landkreise Garmischpartenkirchen und Sächsische Schweiz. Beide verzeichnen bei

der Variable Heat Index ein Odds Ratio über 1,800. Mit deutlichem Abstand ereigneten sich in beiden Landkreisen die wenigsten hitzeassoziierten Hospitalisationen (Garmischpartenkirchen = 236, Sächsische Schweiz = 325).

Die Ausprägungen der Odds Ratios der 399 Beobachtungseinheiten mit signifikanten Koeffizienten bei der Prädiktorvariable Heat Index veranschaulicht das nächste Schaubild.

Abb. 74 Odds Ratios für ausgewählte Beobachtungseinheiten



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Gezeigt werden die adjustierten Odds Ratios für die Variable Heat Index.

Die Zunahme der Farbintensität gibt die steigende Gefährdung wieder. Weiß sind jene Raumeinheiten dargestellt, deren Koeffizienten nicht signifikant waren.

Augenscheinlich ähnelt die Verteilung der hohen und niedrigen Werte dem in Abbildung 57 für die Mortalität gezeigten Auftreten. Bei dieser Darstellung sind die Häufungen hoher Odds Ratios im Bereich der Nord- und Ostsee ebenfalls markant. Auch die schon beschriebenen Cluster im Südosten Sachsens,

dem mitteldeutschen Raum, im Westen Nordrhein-Westfalens, Süden und Nordosten Bayerns sowie Südwesten Baden-Württembergs sind wiederzufinden.

Unter den 399 Einheiten sind:

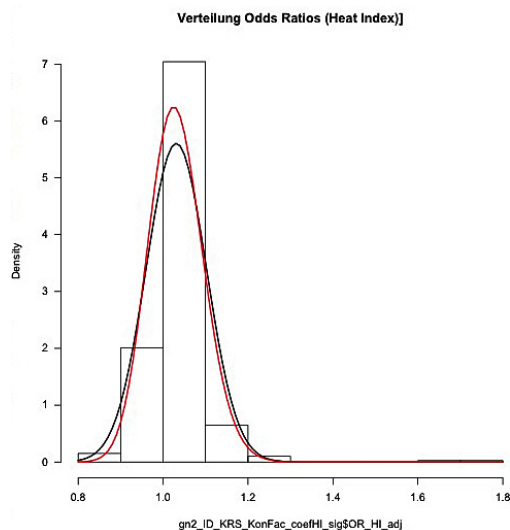
- 21, deren Koeffizienten für die Variable  $PM_{10}$  nicht signifikant sind,
- 16 ohne Signifikanz bei der Kombinationsvariablen Heat Index und  $PM_{10}$ ,
- 279, deren Koeffizienten für die Variable Geschlecht weiblich nicht signifikant sind und
- 149 ohne signifikanten Koeffizienten bei der Variable Alter.

### 5.5.4 Ergebnisse der log-level Regression

Im Folgenden wird das Augenmerk auf den Einfluss der in den Kapiteln 4.5 und 5.4 besprochenen Kontextfaktoren gelegt. Wegen der fehlenden flächigen Signifikanz bei den Odds Ratios der Prädiktorvariable Heat Index kommt das im Kapitel 5.4.1 genutzte lineare Regressionsmodell mit integrierten Eigenvektoren nicht in Betracht. Eine gute Alternative ist ein gemischtes lineares Regressionsmodell. Ein solches Modell enthält sowohl Fixed Effects als auch Random Effects. Die Randomvariable (der Random Effect) wird durch die 399 Beobachtungseinheiten gebildet. Ähnlich wie die Eigenvektoren nimmt die Randomvariable Variabilität aus dem Regressionsmodell. Damit die entfernte Variabilität möglichst hoch ausfällt, wurde eine kombinierte Randomvariable gebildet. Bei dieser sind die Beobachtungseinheiten in den siedlungsstrukturellen Kreistypen genestet. Anwendung fand die Funktion *lme* aus dem Package *nlme* (R Development Core Team 2008; Pinheiro et al. 2016).

Wie im Kapitel 5.4 ausgeführt, wurden verschiedene Verteilungen an die Zielvariable Odds Ratios der Prädiktorvariable Heat Index gefittet (vgl. Dormann 2012: 67 ff).

Abb. 75 Verteilung Odds Ratios | Variable Heat Index



Quelle: eigene Berechnung

An die Odds Ratios der Prädiktorvariable Heat Index gefittete Lognormalverteilung (rot) und normale Verteilung (schwarz). Die Lognormalverteilung hat den besten AIC<sup>1</sup> -1058.

Der AIC der Normalverteilung ist größer -973. Zur Modellierung wurde die Lognormalverteilung genutzt.

Nach dem im Kapitel 5.4 beschriebenen Vorgehen wurden 19 Modelle gebildet und das Modell mit dem besten AIC ausgewählt. Das Modell mit allen im Kapitel 5.4, Tabelle 29 beschriebenen Kontextvariablen hat einen AIC von -642.

<sup>1</sup> Akaikes Informationskriterium (Dormann 2012: 285; Sheather 2009: 227 ff; Hedderich/Sachs 2012: 708 ff)



Abb. 76 Analyseergebnis | finales Modell

Finales Regressionsmodell	
Dependent variable:	
log(OddsRatios_HI)	
Ein_ue_85	0.032*** (0.014, 0.051)
QuTIZ	-0.006*** (-0.009, -0.003)
AntNatFlae	0.007*** (0.004, 0.009)
Constant	-0.011 (-0.043, 0.021)
Observations	399
Log Likelihood	544.487
Akaike Inf. Crit.	-1,076.974
Bayesian Inf. Crit.	-1,053.100
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Modellierung des Zusammenhangs ausgewählter Kontextfaktoren (vgl. Kapitel 4.5) auf die Odds Ratios der Prädiktorvariable Heat Index. Dargestellt sind die Koeffizienten mit zugehörigen 95 % Konfidenzintervallen (in Klammern).

Die Kontextfaktoren:

- *Einwohner 85 Jahre und älter* → Anteil der Einwohner 85 Jahre und älter an den Einwohnern in %
- *Quote Teilzeitbeschäftigte* → SV Beschäftigte (Teilzeit) je 100 Einwohner im erwerbsfähigen

Alter

- *Anteil naturnähere Fläche* → Anteil naturnähere Fläche an der Fläche in %

Der Anteil naturnähere Fläche umfasst: Abbauland + Moor + Heide + Unland (Felsen, Dünen).

### Welchen Einfluss üben die signifikanten Variablen aus?

Die dargestellten Koeffizienten stehen in Bezug mit den log-transformierten Odds Ratios der Prädiktorvariable Heat Index. Nach Gelman & Hill (2006: 59 f) interpretiert man die Koeffizienten bei einem Anstieg von x um eine Einheit, indem der Koeffizient von der log-transformierten Responsevariablen subtrahiert beziehungsweise addiert wird. Ist es das Ziel, die Koeffizienten direkt mit der Zielvariablen in Bezug zu bringen, d. h. im vorliegenden Fall mit den Odds Ratios, dann multipliziert man die exponenzierten Koeffizienten mit den Odds Ratios der Zielvariablen Heat Index. Die Berechnung zeigt:

- Bei der Erhöhung des Anteils der Einwohner 85 Jahre und älter an den Einwohnern um 1 % steigt das Risiko auf eine Hospitalisation 1 %. Im Zeitraum 2002 - 2006 lebten in den 399 Beobachtungseinheiten Min.: 25980, 1st Qu.: 101700, Median: 135800, Mean: 193800, 3rd Qu.: 219500 und Max.: 3394000 Menschen. Der Anteil über 85-Jähriger an diesen Zahlen beträgt 2 %. Bezogen auf den Mittelwert 193800 sind dies 3894 hochaltrige Menschen. Eine Zunahme über 85-Jähriger von 1 % entspricht im Mittel 39 Menschen.



- 
- Die Steigerung der Teilzeitbeschäftigtenquote von 1 % bewirkt die 0,55%ige Abnahme des Hospitalisationsrisikos (3 % Zunahme bewirkt Reduktion von 1,65 %).
  - Mit dem Anstieg des Anteils naturnähere Fläche von 3 % verbindet sich eine 0,92%ige Steigerung des Risikos. Hierzu ist anzumerken, dass der Anteil naturnähere Fläche an der Gesamtfläche im Durchschnitt 1,5 % beträgt.

### **Zusammenfassung der Ergebnisse**

- Die Gefährdung der Gesundheit durch die Exposition Hitze lässt sich für die Ebene Bundesrepublik Deutschland auch bei den hitzeassoziierten Morbiditätsdaten belegen (Risikozunahme 2 - 11 %).
- Auf die Feinstaubexposition trifft dies ebenso zu. Die Koeffizienten der Exposition PM<sub>10</sub> sind in dicht besiedelten Beobachtungseinheiten deutlich höher ausgeprägt.
- Frauen sind im Kontrast zu Männern bei der hitzeassoziierten Morbidität teilweise deutlich weniger gefährdet. Das betrifft die Altersklassen 10 - 59 Jahre und 60 - 69 Jahre. Bei den im Krankenhaus verstorbenen Fällen ist dies ebenfalls zu beobachten. Jedoch übt die Exposition Hitze keinen Einfluss auf das hospitalisierte Mortalitätsgeschehen aus.
- Die Prädiktorvariable Alter ist für die nach Beobachtungsjahren getrennten Analysen signifikant. Beispielsweise zeigt der Koeffizient für die Altersklasse 10 - 59 Jahre im Beobachtungsjahr 2003 im wörtlichen Sinn ein negatives, für die Altersklasse 60 - 69 Jahre ein gegensätzliches Analyseergebnis.
- Die kombinierte Variable Hitze und Feinstaub ist ganz überwiegend signifikant.
- Mit den Kontextfaktoren *Einwohner 85 Jahre und älter* und *Anteil naturnähere Fläche* waren zwei risikoverstärkende Variablen, mit dem Faktor *Quote Teilzeitbeschäftigte* ein protektiver Kontextfaktor zu identifizieren.

## 6. Diskussion

Eingangs der Diskussion erfolgt eine knappe Synthese der Studienergebnisse. Die Diskussion der gewonnenen Ergebnisse orientiert sich im Anschluss daran am Fortgang der Forschungsarbeit, respektive an den im Forschungsprozess schrittweise realisierten Methoden wie auch gewonnenen Teilergebnissen. Der Forschungsprozess ist zu untergliedern in:

- Theoretische Fundierung der Studienelemente
- Datenmanagement
- Datenauswertung
- Fundierung der Studienergebnisse
- Ableitung von Perspektiven für die weitere Arbeit

Die Studienarbeit ist überblickend grafisch dargestellt. Von links nach rechts wie auch von oben nach unten gelesen, zeichnet die Abbildung die Realisierung vorliegender Studie nach. Die Datenauswertung erfolgte am gastwissenschaftlichen Arbeitsplatz (GWAP) im Forschungsdatenzentrum (FDZ) am Statistischen Landesamt des Freistaates Thüringen in Erfurt.

Abb. 77 Der Forschungsprozess im Überblick



Quelle: eigene Darstellung

Darstellung der Forschungsarbeit:

- theoretische Fundierung der Studienelemente; theoretische Rahmung
- Datenakquise; Datenmanagement (extern und am gastwissenschaftlichen Arbeitsplatz (GAWP) am Forschungsdatenzentrum (FDZ) in Erfurt)
- Datenauswertung (extern und am GAWP)
- Ergebnisdarstellung & theoretische Fundierung der gewonnenen Ergebnisse

Sämtliche Expositionsdaten wurden nach ihrer Nutzbarmachung an die Statistischen Ämter des Bundes und der Länder gegeben. Dort wurden die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten für die Datenanalyse zugespielt. Daher wird in der Darstellung zwischen externer und interner Datenverarbeitung differenziert. Die Ergebnisse der Arbeit am GAWP wurden seitens des Statistischen Landesamtes auf die Gewährleistung des Datenschutzes geprüft und dann freigegeben.

## 6.1 Synthese der Studienergebnisse

Die Synthese der Studienergebnisse fasst die relevanten Ergebnisse für die Ebenen Bundesrepublik Deutschland und siedlungsstruktureller Kreistyp sowie die untersten Beobachtungseinheiten kreisfreie Stadt, Landkreis, Kreis, Stadtkreis, Stadtverband und die Hansestadt zusammen. Differenziert wird dabei nach den Zielvariablen Mortalität- und Morbidität.

### Ergebnisse im Überblick

In den Kapiteln 5.3 und 5.5 konnte die Gefährdung der Gesundheit durch die Exposition Hitze und die Exposition Feinstaub für die Ebenen Bundesrepublik Deutschland, siedlungsstruktureller Kreistyp und den überwiegenden Anteil der 439 kreisfreien Städte, Landkreise, Kreise, Stadtverbände sowie einer Hansestadt belegt werden (437 Mortalität sowie 399 Morbidität).

### Ebene Bundesrepublik Deutschland | Mortalität

Das Analyseergebnis belegt für die Bundesrepublik Deutschland das gesundheitliche Risiko durch die Exposition Hitze (OR 1,1529; CI 1,1517 - 1,1541; OR **adjustiert 1,0658**). Ein signifikanter Nachweis gelang auch für die Exposition Feinstaub (OR 1,2987; CI 1,2951 - 1,3024; OR **adjustiert 1,0128**).

Die Kombinationsvariable Heat Index plus PM<sub>10</sub> war für alle berücksichtigten Ebenen signifikant (Ebene BRD: OR 0,9972; CI 0,9971 - 0,9972).

---

Das Risiko bei getrennter Berücksichtigung beider Expositionen konnte ebenfalls belegt werden. Es ist etwas geringer ausgeprägt:

- Heat Index → OR 1,0644; 95 % CI 1,0641 - 1,0648
- PM<sub>10</sub> → OR 1,0429; 95 % CI 1,0426 - 1,0433

Frauen sind im Vergleich zu Männern nicht mehr oder minder signifikant gefährdet. Dieses Analyseergebnis zeigt sich durchgängig für die betrachteten Ebenen.

Im Zuge der Modellierung wurde u. a. die Prädiktorvariable Heat Index durch die tägliche Maximaltemperatur ersetzt. Hier war die Variable Geschlecht weiblich für manche siedlungsstrukturellen Kreistypen signifikant. Gründe dafür wurden nicht erforscht.

Das Alter als beeinflussende Variable ist für die bundesdeutsche Ebene nicht signifikant.

Mit dem logistischen Regressionsmodell wurde die Mortalitätswahrscheinlichkeit für Personen, die an einer hitzeassoziierten und/oder hitzebedingten Krankheit leiden, prognostiziert: Die Wahrscheinlichkeit, unter der Exposition Hitze zu versterben, steigt im Bereich 70 - 80 °F (22 - 29 °C) moderat: 3 → 7 % und im Bereich 80 - 90 °F (29 - 32 °C) stärker: 7 → 14 %. Oberhalb dieses Wertes an (90 - 110 °F = 32 - 43 °C) deutlich: 14 → 32 %.

### **Ebene Bundesrepublik Deutschland | Morbidität**

Die aus dem gesamten Datensatz analysierte Zufallsstichprobe belegt das hitzeassoziierte Hospitalisationsrisiko (OR 1,0558; CI 1,0543 - 1,0572; **adjustiert 1,0209**). Auch die Exposition Feinstaub (PM<sub>10</sub>) hat einen signifikanten Einfluss (OR 1,1144; CI 1,1103 - 1,185; **adjustiert 1,0018**).

Ein ähnliches Bild zeigen die nach den Jahren 2002 - 2006 getrennten Analysen. Beispiel 2003: das Hospitalisationsrisiko unter Hitze (OR 1,0529; CI 1,0522 - 1,1537; **adjustiert 1,0517**) sowie Feinstaub (OR 1,1106; CI 1,1086 - 1,1127; **adjustiert 0,9984**) und der Kombinationsvariablen Hitze u. Feinstaub (OR 0,9989; CI 0,9989 - 0,9989).

Frauen sind im Vergleich zu Männern nicht mehr oder minder signifikant gefährdet.

Für die Variable Alter war ein ambivalentes Bild festzustellen. So wurde für das Beobachtungsjahr 2003 das Odds Ratio für die Prädiktorvariable Heat Index für die Altersklasse 10 - 59 Jahre mit 1,0006 (CI: 1,0001 - 1,0010; **Adjustierung** nicht notwendig, da Effekt der Kombinationsvariablen aus Heat Index und PM<sub>10</sub> nicht wirksam vorhanden) berechnet. Das Odds Ratio für die Variable PM<sub>10</sub> ist hier 1,0015 (CI: 1,0004 - 1,0025; **Adjustierung** nicht notwendig). Für die Altersklasse 60 - 69 Jahre war ein gegensätzliches Analyseergebnis festzustellen. Das Odds Ratio für die Variable Heat Index 0,9990 (CI: 0,9986 - 0,9995; **Adjustierung** nicht notwendig), das für die Variable PM<sub>10</sub> 0,9979 (CI: 0,9967 - 0,9991; **Adjustierung** nicht notwendig). Die Variablen Heat Index und PM<sub>10</sub> waren für die Altersklassen 70 - 79 Jahre und über 80 Jahre nicht signifikant.

### **Ebene siedlungsstruktureller Kreistyp | Mortalität**

Die Gefährdung der Gesundheit durch die Expositionen Hitze (Heat Index → HI) und Feinstaub (PM<sub>10</sub>) nimmt von dicht bewohnten zentral gelegenen siedlungsstrukturellen Kreistypen (Kreistyp 1 - HI: OR 1,1667; CI 1,1640 - 1,1695; OR **adjustiert 1,0769**, PM<sub>10</sub>: OR 1,2996; CI 1,2923 - 1,3071; OR **adjustiert 1,0085** und Kreistyp 5 - HI: OR 1,1562; CI 1,1510 - 1,1615; OR **adjustiert 1,0793**, PM<sub>10</sub>: OR 1,2838; CI 1,2694 - 1,2984; OR **adjustiert 1,0052**) hin zu Kreistypen mit geringerer Bevölkerungsdichte und dezentraler Lage tendenziell zu (Kreistyp 8 - HI: OR 1,1646; CI 1,1603 - 1,1686 OR **adjustiert 1,0792**, PM<sub>10</sub>: OR 1,3497; CI 1,3360 - 1,3636; OR **adjustiert 1,0770** und Kreistyp 9 - HI: OR 1,1925; CI 1,854 - 1,1997; OR **adjustiert 1,0937**, PM<sub>10</sub>: OR 1,3924; CI 1,3691 - 1,4163; OR **adjustiert 1,0084**).

Das Alter als beeinflussende Variable zeigt sich für manche Kreistypen signifikant, jedoch mit geringem Effekt. Eine Analyse, bei der die Mortalitätsdaten nicht nach Kreistypen, sondern nach Siedlungsdichteklassen eingeteilt wurden, zeigte, der Altersanstieg die Chance auf einen gesundheitlichen Endpunkt unter der Siedlungsdichte 1200 Einwohner/km<sup>2</sup> ungünstig und oberhalb dieser Klasse leicht präventiv beeinflusst.

**Die hitzeassoziierte Morbidität wurde für die Ebene siedlungsstruktureller Kreistyp nicht analysiert.**

## Unterste Beobachtungseinheiten

### Datengrundlage Mortalität & Morbidität

Für die unterste Beobachtungsebene, die kreisfreien Städte, Landkreise, Kreise, Stadtkreise, Stadtverbände sowie die Hansestadt waren räumliche Risikounterschiede für die Odds Ratios der Variablen Heat Index, PM<sub>10</sub> und Alter festzustellen. Die relevanten Kennzahlen veranschaulichen nachstehende Tabellen.

Tabelle 32 Mittlere Odds Ratios der Variablen Heat Index, PM<sub>10</sub> und Alter | Mortalität

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
Odds Ratios Heat Index	0.579	1.055	1.075	1.083	1.098	1.751
Odds Ratios PM <sub>10</sub>	0.035	0.999	1.008	1.001	1.016	1.078
Odds Ratios HI:PM <sub>10</sub>	0.982	0.995	0.996	0.996	0.997	1.020
Odds Ratios Alter	0.978	0.996	1.000	1.000	1.005	1.044

Quelle: eigene Berechnung

Die Tabelle zeigt die große Streubreite der

Odds Ratios für die Variablen: Heat Index (adjustiert), PM<sub>10</sub> (adjustiert), Heat Index plus PM<sub>10</sub> sowie Alter unter den untersten Beobachtungseinheiten (analysierte Daten: Mortalität).

Tabelle 33 Mittlere Odds Ratios der Variablen Heat Index, PM<sub>10</sub>, Geschlecht wbl. und Alter | Morbidität

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
Odds Ratios Heat Index	0.8601	0.9985	1.0198	1.0275	1.0482	1.7691
Odds Ratios PM <sub>10</sub>	0.7069	0.9900	0.9978	0.9838	1.0024	1.0250
Odds Ratios HI:PM <sub>10</sub>	0.9900	0.9978	0.9988	0.9985	0.9995	1.0020
Odds Ratios Alter	0.9896	0.9976	0.9999	0.9997	1.0020	1.0100

Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Dargestellt sind die Ausprägungen der Odds Ratios für

die Variablen: Heat Index (adjustiert), PM<sub>10</sub> (adjustiert), Variable Heat Index plus PM<sub>10</sub> und Alter (analysierte Daten: Morbidität).

### Datengrundlage Mortalität

Es zeigen sich Cluster mit hohen Risiken im Bereich der Nord- und Ostsee sowie im Südosten Sachsens, Nordosten und Süden von Bayern, im Zentrum wie auch im Westen Nordrhein-Westfalens und im Süden Baden-Württembergs. Einige Beobachtungseinheiten aus diesen Regionen autokorrelieren bei der Ausprägung des Gefährdungsniveaus (Odds Ratios Prädiktorvariable Heat Index) wie auch der nicht erklär-

ten Varianz (Residuen im Regressionsmodell) mit ihren benachbarten Raumeinheiten. Beinahe ausnahmslos autokorrelieren küstennahe Beobachtungseinheiten mit ihren Nachbareinheiten. Abgesehen von der Hansestadt Hamburg sind vorwiegend dünn besiedelte Beobachtungseinheiten betroffen. Bei den Einheiten mit signifikantem Autokorrelationskoeffizienten sind die Odds Ratios für die Variablen  $PM_{10}$ , Alter sowie Geschlecht nicht signifikant (1 Ausnahme).

Die Erforschung möglicher Ursachen für die große Variabilität zeigte, dass bei jenen Raumeinheiten, die als Ausreißer bezeichnet werden können, keine überdurchschnittlichen Werte bei den Expositionen Hitze und Feinstaub festzustellen waren.

Die Zusammenschau von Hitze- sowie Feinstaubgefährdung und Mortalität für alle kreisfreien Städte, Landkreise, Kreise, etc. zeigt ein sehr heterogenes Bild: Zahlreiche oder eher wenige Todesfälle können mit niedrigen oder eben hohen Odds Ratio-Werten bei den Variablen Heat Index und  $PM_{10}$  zusammen auftreten.

Rein deskriptiv lässt sich sagen, dass viele Todesfälle einer Raumeinheit mit niedrigeren ORs für die Variable Heat Index und einem höheren für die Variable  $PM_{10}$  in Zusammenhang gebracht werden können. Dagegen scheinen höhere Odds Ratios bei der Variable Heat Index und nicht sehr große bei der Variablen  $PM_{10}$  eher wenige Todesfälle zu bedingen.

### **Datengrundlage Mortalität & Morbidität**

Mit Bezug auf die untersten Beobachtungseinheiten (kreisfreie Stadt, Landkreis, etc.) ist den Kapiteln 5.4.1 und 5.5.4 zu entnehmen, dass Zunahmen bei den Kontextfaktoren: *Siedlungsdichte*, *Empfänger von Pflegegeld*, *Quote Teilzeitbeschäftigte* und *Waldfläche je Einwohner* das gesundheitliche Risiko unter der Exposition Hitze reduzieren:

- Mit einer Erhöhung der *Siedlungsdichte* um 500 Personen ist eine 0,4%ige Risikoreduktion verbunden (Mortalität).
- Nimmt der Anteil der *Empfänger von Pflegegeld an den Pflegebedürftigen* 3 % zu, reduziert sich das hitzeassoziierte Risiko 0,4 % (Mortalität).
- Der Kontextfaktor *Quote Teilzeitbeschäftigte* reduziert mit einer 3%igen Steigerung das Risiko 1,7 % (Mortalität) beziehungsweise 1,65 % (Morbidität).
- Es konnte auch gezeigt werden, dass der Kontextfaktor *Waldfläche je Einwohner* das gesundheitliche Risiko beeinflusst. Die Analyse ergab eine Reduzierung des Risikos von 0,9 % bei Zunahme der Waldfläche von 1 auf 1500 m<sup>2</sup> je Einwohner/in (Mortalität).

Die Kapitel 5.4.1 und 5.5.4 verdeutlichen auch, dass die Kontextfaktoren *Einwohner 85 Jahre und älter*, *Arbeitslosigkeit*, *Schuldnerquote* wie auch *Anteil naturnähere Fläche* das Risiko verstärken:

- Infolge einer Erhöhung des Anteils der Einwohner 85 Jahre und älter an den Einwohnern um 1 % erhöht sich das Risiko 1 % (Morbidität).
- Steigt der Anteil der Arbeitslosen an den Einwohnern im erwerbsfähigen Alter 3 %, bewirkt dies eine 0,8%ige Risikozunahme (Mortalität).
- Mit einem Anstieg der privaten Schuldnerquote von 3 % erhöht sich das hitzeassoziierte Mortalitätsrisiko 0,9 % (Mortalität).
- Nimmt der Anteil naturnähere Fläche 3 % zu, ist damit eine 0,9%ige Steigerung des Risikos verbunden (Morbidität).

Für die Variable Alter ergab die Auswertung:

- Bei den Mortalitätsdaten für 92 von 439 Beobachtungseinheiten ein signifikantes Ergebnis. Die Odds Ratio-Werte entsprechen der Risikoveränderung von: Min.: -2,19 %, 1st Qu.: -0,99 %, Median: -0,60 %, Mean: -0,04 %, 3rd Qu.: 1,04 % und Max.: 2,70 %. 66 der 92 Einheiten verzeichnen eine Risikoreduktion. Demgemäß erhöht höheres Alter in 26 Beobachtungseinheiten das Risiko.

- Hinsichtlich der Morbiditätsdaten war für 149 Beobachtungseinheiten ein signifikantes Ergebnis festzustellen. Die sich mit den Odds Ratio ergebende Änderung des Risikos umfasst die Spanne: Min.: -1,04 %, 1st Qu.: -0,24 %, Median: -0,02 %, Mean: -0,04 %, 3rd Qu.: 0,20 % und Max.: 1,00 %.

## 6.2 Theoretische Fundierung der Studienelemente

**Rückblick:** Ausgehend von den forschungsleitenden Hypothesen, war zunächst die Zielpopulation zu definieren. Dann fundiert zu definieren, welche leitende Exposition (mittlere Tagestemperatur, Maximaltemperatur oder besser ein thermischer Index) heranzuziehen ist, mithilfe derer die Studienpopulation in welcher räumlichen Auflösung ausgewählt werden kann. Mit dem Heat Index fiel die Wahl auf einen international anerkannten Indikator, dessen Aussagekraft substantiiert wurde. Hierfür gingen u. a. thermophysiologische Voraussetzungen des Menschen in die Diskussion ein. Die hieraus abgeleiteten Erkenntnisse begründen die Anwendung der Heat Index-Skala und ermöglichen darauf aufbauend die Klassifizierung von Expositionsperioden, respektive Expositionstagen.

Die Betrachtung thermophysiologischer Grundlagen in Verbindung mit Erkenntnissen aus der internationalen Studienlage ließ die Definition eines Diagnosespekt-



rums zu, welches als hitzeassoziiert anerkannt werden darf. Beide Spezifikationen ermöglichten die Extraktion der Studienpopulation aus dem gesamten Datensatz, der jegliche Todesursachen und Hospitalisationsgründe für den Zeitraum 2002 - 2006 beinhaltet.

Neben der Spezifikation der leitenden Exposition erfolgte die Bestimmung der ergänzenden Exposition, hier Feinstaub, ebenfalls theoretisch fundiert.

Begründet wurde auch der Zusammenhang zwischen gesundheitlichen Risiken und soziostrukturellen, sozioökonomischen Kontextfaktoren wie auch Kontextfaktoren zu Bildung und Raumnutzung. Damit abgebildet werden kann, ob dieser Bezug auch in Verbindung mit Gesundheitsrisiken unter der Exposition Hitze zu finden ist, erfolgte die Selektion zahlreicher Vertreter dieser Faktoren aus den Indikatoren und Karten zur Stadt und Raumplanung (INKAR).

Mit dem vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung erarbeiteten siedlungsstrukturellen Kreistyp wurde ein Analyseraster zur Daten- und Ergebnisbeschreibung gefunden.

#### Datenquellen:

- Die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten wurden von den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder bereitgestellt.
- Klimadaten stellte der Deutsche Wetterdienst zur Verfügung.
- Feinstaubdaten (PM<sub>10</sub>) gab das Umweltbundesamt ab.
- Die Kontextfaktoren bietet das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Form einer Indikatorenatterie (INKAR) an.

Die Expositionsstränge: *Thermische Belastung*, *Feinstaubbelastung* und *Kontextfaktoren* waren getrennt aufzuarbeiten und anschließend zeitlich wie auch räumlich zusammenzuführen.

**Diskussion:** Ein wesentlicher Aspekt der theoretischen Fundierung der Studienelemente liegt in der Indikatorenwahl. Zahlreiche Indizes sind international etabliert und somit potenziell nutzbar (Epstein/Moran 2006; Brake/Bates 2002). Daher soll die Verwendung des Heat Index unter Berücksichtigung prominenter Alternativen kritisch betrachtet werden.

Indizes, die den Komplexitätsgrad des Heat Index weiter ausbauen, berücksichtigen entweder zusätzliche oder von Steadman (1984) mediat integrierte Variablen. Propagiert wird von Entwicklerseite, dass alle ausschlaggebenden meteorologischen Elemente wie physiologischen Faktoren des Wärmehaushalts integriert seien (Eis et al.

---

2010; DWD 2007; Koppe et al. 2003). Berücksichtigt sind mit einzelnen Korrekturen: Temperatur der Luft, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit, kurz- und langwellige Strahlungsbilanzen wie auch Bedeckungsgrad. Bei den physiologischen Parametern gehen die metabolische Rate, Körpermerkmale (Größe, Gewicht) und die Bekleidung ein. Zunächst lässt sich, abgesehen von der metabolischen Rate, keine deutliche Erweiterung erkennen (vgl. Kapitel 4.2.5: **Der Heat Index**). Allerdings weisen prominente Vertreter: Predicted Mean Vote (PMV), Gefühlte Temperatur (GT), Physiologisch-äquivalente Temperatur (PET) Wärmehaushaltsmodellen (Energie-Bilanz-Modelle) eine übergeordnete Bedeutung zu. Subjektive Behaglichkeit steht dabei in Relation zu einer ausgeglichenen Energiebilanz bei angenehm empfundenen Umgebungsbedingungen (Fanger 1973). Demgemäß lässt sich der Belastungsgrad am Behaglichkeitsniveau ablesen (Koppe et al. 2003). Fanger (1973) prägte in diesem Zusammenhang die Begriffe Komfort beziehungsweise Diskomfort. Er legt dem Gleichungssystem des Predicted Mean Vote die Erkenntnis zugrunde, dass sowohl die mittlere Hauttemperatur als auch die Schweißbildung mit der Wärmeproduktion unter Komfortbedingungen in linearem Bezug stehen. Eingegangen in die Wärmebilanzgleichung ergibt sich die Behaglichkeitsgleichung des PMV (DWD 2007; Koppe 2005; Fanger 2002 & 1973).

Das vom Deutschen Wetterdienst entwickelte Klima-Michel-Modell (KMM) greift Fanger's PMV auf und nutzt ihn in modifizierter Form. Mit dem Klima-Michel-Modell erarbeitet der DWD aktuell regionalisiert die thermische Belastung, gibt bei zugehöriger Voraussetzung seit 2005 Warnungen vor Hitze nach der Gefühlten Temperatur (Koppe 2009; DWD 2007). Zuletzt präferierte der DWD einen »universell« verwendbaren Index, den Universal Thermal Climate index (UTCI). Konzeptuell ist der UTCI dem PMV entlehnt. Er soll, anders als sein Vorgänger, für das komplette Feld der Human-Biometeorologie nutzbar sein (Jendritzky et al. 2012; Blazejczyk et al. 2012; Burkart/ Endlicher 2011; Jendritzky et al. 2009; DWD 2007).

Da die Physiologisch-äquivalente Temperatur (PET) ebenfalls auf ein Wärmehaushaltsmodell (Münchener Energiebilanzmodell) zurückgreift, ist der Indikator fernerhin anzusprechen. Anders als Fanger's Behaglichkeitsgleichung, welche den Predicted Mean Vote durch das Verhältnis zwischen Aktivität und Energieumsatz integral ausprägt, gehen in die PET physiologische Daten: Temperatur der Haut und Sekretionsrate als tatsächlich erhobene Parameter ein. Die eingehenden meteorologischen

Größen sind mit denen des KMM vergleichbar (Katzschner/Jahn 2013; Nastos/Matzarakis 2012; Burkart/Endlicher 2011; DWD 2007). Jendritzky und Kollegen (1990) schreiben der Physiologisch-äquivalenten Temperatur zu, nicht für den Durchschnittsmenschen, vielmehr für das Individuum konzipiert worden zu sein. Der Indikator würde sich daher vorzugsweise für Studien mit medizinischen Belangen eignen (vgl. VDI 1998). Demgemäß hätte dieser Indikator die erste Wahl zur Realisierung vorliegender Studie sein müssen. In diesem Zusammenhang wurde am Beginn des Kapitels 4.2 das Kriterium zur Indikatorwahl verdeutlicht. Er sollte klimabedingte Belastung kennzeichnen, den Wärmehaushalt dabei berücksichtigen und praktikabel auf das Bundesgebiet projizierbar sein. Praktikabel meint hier zum einen tatsächlich umsetzbar im Sinne von »Können«. Zum anderen steht Praktikabel aber auch für ein begrenztes Budget beim Dateneinkauf. Das »Können« ist mit der Realisierung vorliegender Dissertation nun durchaus zu bejahen. An der Budgetlimitierung änderte sich nichts. Der folgende Abschnitt zeigt aber, dass mit dem Heat Index eine sehr brauchbare Alternative gewählt wurde.

#### Wärmehaushalt - thermische Belastung und Heat Index

Obschon das hier gewählte Vorgehen die Aufnahme eines auf den Wärmehaushalt bezogenen Indikators vernachlässigt, darf anerkannt werden, dass der Heat Index die mit belastenden und beeinträchtigenden Umgebungseinflüssen verbundenen Gefahren adäquat abbilden kann. Denn Steadman hebt sich mit seinem Modell insofern ab, als dass er die thermophysiological Prozesse auf der Haut beziehungsweise die durch die Hauteigenschaften vermittelten Vorgänge (Hautwiderstand und temperaturabhängige Widerstandsveränderung) bei differierenden meteorologischen Elementen, durchschnittlichem Aktivitätsniveau und entsprechender Bekleidungswahl mit mehr oder minder behaglichen Umgebungen in Relation bringt. Dabei integriert Steadman die Abhängigkeit der Körperkerntemperatur sowie des Dampfdrucks im Körperinneren von der Umgebungstemperatur (Steadman 1979a/b & 1984).

Bei der Verwendung des Heat Index ist anzumerken, dass die ihm zugrundeliegende Apparent Temperature auf Erkenntnissen beruht, welche in den USA mit den dort vorzufindenden geographisch-klimatischen Bedingungen gewonnen wurden. Die Übertragung auf Deutschland könnte zu verzerrten Ergebnissen führen. Allerdings greift Steadman bei den physiologischen Parametern Hautwiderstand und temperaturbedingte Widerstandsänderung auf Fanger's Studienergebnisse zurück, die für

---

die oben genannten Indizes ebenfalls als Basis dienen. Daneben orientiert sich Steadman ebenso wie Fanger bei seinen Bezügen am ASHRAE-Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (Steadman 1984; ANSI/ASHRAE 2014; vgl. Schiavon et al. 2014).

Die Kovariable Feinstaub wurde bei der Studienplanung eher ergänzend aufgenommen, da manche Autoren bedeutsame Interaktionseffekte ausmachten (Pinheiro et al. 2015; Shaposhnikov et al. 2014; Basu 2009; Hertel et al. 2009). Die berechneten Odds Ratios für die Variable  $PM_{10}$  fallen ganz überwiegend auf beachtlichem Niveau signifikant aus. Das sollte dazu veranlassen, die Exposition Feinstaub in Folgearbeiten als prioritäre Exposition aufzugreifen. Damit verbunden wäre ein anderer Zeitbezug, denn die Feinstaubbelastung zeigte sich eher in den kühleren Monaten und weniger in den Sommermonaten problematisch (vgl. Kapitel 5.1.2).

Der siedlungsstrukturelle Kreistyp wurde als Bezugsebene gewählt, da ursprünglich die Statistischen Ämter des Bundes und der Länder lediglich bereit waren die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten ausschließlich auf dieser Ebene zur Nutzung freizugeben. Daher wurde das gesamte Vorgehen auf diesen Raumbezug ausgerichtet.

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) »ist eine Ressortforschungseinrichtung im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Es berät die Bundesregierung bei Aufgaben der Stadt- und Raumentwicklung sowie des Wohnungs-, Immobilien- und Bauwesens.«<sup>1</sup> Vor diesem Hintergrund erschien es anfangs auch naheliegend, dass der durch das BBSR definierte siedlungsstrukturelle Kreistyp zur Aggregation, Visualisierung und Analyse der Daten geeignet ist (vgl. Kapitel 2.2).

Der siedlungsstrukturelle Kreistyp eignet sich durchaus zur Datenvisualisierung. Die Zuordnung einzelner kreisfreier Städte, Landkreise, Kreise, etc. zu den 9 Kreistypen des Analyserasters ist teilweise nur schwerlich nachvollziehbar, weshalb tatsächliche statistische Analysen wohl eher andere Konzeptualisierungen heranziehen sollten. Diese Erkenntnis stellt sich erst bei der dritten oder vierten Betrachtung der Klassifikation durch das BBSR ein. Ganz nachvollziehbar sind: Berlin, Frankfurt am Main, Hamburg, Dortmund oder Dresden als kreisfreie Städte klassifiziert, die zum Kreistyp 1 gehören (allesamt sehr dicht besiedelte Städte). Auch geht schnell ein, dass

---

<sup>1</sup> Entnommen von der Website des BBSR:

[http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/bbsr\\_node.html](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/bbsr_node.html), abgerufen am 05.11.2016

---

etwa die Landkreise Hassberge, Bad Kissingen oder auch Neustadt an der Waldnaab dem Kreistyp 9 zugeordnet sind. Zum Kreistyp 9 gehören die dünn besiedelten Landkreise und Kreise in Deutschland. Weshalb nun aber die Stadt Aachen (nicht die Stadtregion Aachen) dem Kreistyp 2 und nicht dem Kreistyp 1 zugeordnet wurde, konnte nicht erhellt werden. Auch nicht, weshalb die kreisfreie Stadt Bamberg und der Landkreis Bamberg gemeinsam dem Kreistyp 6 zugeordnet wurden. Beide Regionen unterschieden sich bei dem Kriterium Siedlungsdichte deutlich. Da entsteht die Frage, ob der Landkreis Bamberg so günstig an seinem Zentrum liegt, oder was nun eigentlich der Grund für diese Vereinheitlichung ist. Gleiches lässt sich für die kreisfreie Stadt Rosenheim und den Landkreis Rosenheim fragen. Beide gehören zum Kreistyp 8.

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung differenziert bei seiner Klassifikation nach Siedlungsdichte sowie »Zentralität« und »Lagegunst«. Auffinden ließ sich keine Publikation, die erklärt warum nun welche kreisfreie Stadt, welcher Landkreis, Kreis, Stadtverband, etc. zu welchem Kreistyp zugeordnet wurde. Diese Unsicherheit muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Selbstkritisch ist festzustellen, dass die Nutzung des Analyserasters nur vor dem Hintergrund der eigentlichen Datenfreigabe der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder auf dieser Bezugsebene gerechtfertigt werden kann.

Nachdem die beantragten und durch alle Statistischen Landesämter bewilligten und bearbeiteten Daten am gastwissenschaftlichen Arbeitsplatz in Erfurt in Augenschein genommen werden konnten, wurde klar, dass die Datenhalter die Daten mit der Variable Kreisschlüssel zur Nutzung freigaben.

---

### 6.3 Datenmanagement

**Rückblick:** Sowohl die Klimadaten als auch die Feinstaubdaten wiesen zahlreiche fehlende Werte auf. Zudem decken die Messstationen vom Deutschen Wetterdienst und vom Umweltbundesamt das Untersuchungsgebiet nur lückenhaft ab. Notwendig wurde daher die geostatistische Interpolation der Expositionsdaten. Interpoliert wurde mit den Zielen: die nicht vorhandenen Werte zu ersetzen und die Optimierung der räumlichen Zuordnung der Expositionswerte zu den Beobachtungsgebieten (kreisfreie Stadt, Landkreis, etc.) herbeizuführen.

Die Statistischen Ämter des Bundes und der Länder stellten die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten auf der Ebene kreisfreier Städte, Landkreise, Hansestädte, Stadtverbände, etc. zur Verfügung. Für diese Bezugsebene berechnet auch das BBSR seine Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung (INKAR). Allerdings erfolgten im Beobachtungszeitraum 2002 - 2006 Gebietsreformen, weshalb die INKAR-Daten, die das BBSR für die 2012 gültigen Raumbezüge vorlegte, auf die vor den Reformen maßgeblichen Gebietsdefinitionen umgerechnet werden mussten. Zudem ergab eine Analyse auf Kollinearität, dass zahlreiche Kontextfaktoren deutlich miteinander korrelieren, weshalb Maßnahmen zur Beseitigung der Kollinearität getroffen werden mussten.

**Diskussion:** Ein wesentlicher Punkt des Datenmanagements bezieht sich auf die Interpolation der fehlenden Expositionsdaten. Daher ist zu schauen, welche Vorzüge Kriging bei der Ersetzung bietet. Die diversen Krigingmethoden verfolgen zwei wesentliche Ziele:

1. Verbreiterung der Expositionsdatengrundlage und daraus folgend eine stabilere Basis für Interpretationen.
2. Optimierung der räumlichen Verortung der Expositionen auf die durch die kreisfreien Städte, Landkreise, Kreise, Hansestädte und Stadtverbände, etc. bestimmten Beobachtungseinheiten (vgl. Bollman/Koch 2001).

Beide Aspekte sind für die Fundierung der Erkenntnisse zentral. Kritisch zu betrachten ist mithin die Erwartungstreue der berechneten Expositionswerte.

Nach Bollman und Koch (2001) ist der Krige-Schätzer ein sog. *best linear unbiased estimator*:

**best** → Ein Schätzer, welcher frei von systematischen Fehlern (bias) ist. Fehlerfrei, oder bei der Arbeit mit empirischen Raumdaten wohl treffender fehlerarm bedeutet, dass die Fehlervarianz abgebildet durch den erwarteten quadrierten Fehler:

$$E[(Z^*(X_0) - \mu_0)^2] \text{ minimal ist.}$$

**Linear** → steht für die gewichtete Linearschätzung mittels:

$$Zx(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad ; \text{ gewichtet durch: } \quad \sum \lambda_i = 1$$

und mit  $Z^*$ , dem Schätzwert am Punkt  $x_0$ ; sowie  $Z(X_i)$ , dem Stichprobenwert am Punkt  $x_i$ .

**unbiased** → Erwartungstreue lässt sich für die mittleren Fehler anerkennen, in Form von:

$$E[Z^*(x_0) - \mu_0] = 0 \quad (\text{vgl. Bollman/Koch 2001}).$$

Nach der Expertise von Bollman und Koch (2001) berechnet die hier verwendete Methode im Prinzip die besten unverzerrtesten Expositionswerte. Die Stimmigkeit der interpolierten Daten wurde mittels Kreuzvalidierung nach Armstrong (1998) sowie Bivand und Kollegen (2013) eruiert (Kapitel 4.4.3). Es konnte gezeigt werden, dass die aus der Interpolation hervorgegangenen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte den nichtbeprobten kreisfreien Städten, Landkreisen, Stadtregionen, etc. problemlos zugewiesen werden können. Anzuerkennen ist daneben auch, dass das Interpolationsergebnis für die Exposition  $PM_{10}$  Konzentrationsspitzen bei den tatsächlichen Werten nicht durchgängig bestätigt. Die interpolierten Werte folgen jedoch recht gut dem Gesamttrend und Überschätzungen bleiben aus. Würde  $PM_{10}$  als alleinige Expositionsvariable in Betracht kommen, wirkte sich dies auf die Studie in Form einer Unterschätzung der Expositionsintensität aus. Zumindest für jene Beobachtungseinheiten ohne Messstation und an Expositionstagen mit fehlenden Werten.

Ein Grund für die Abweichung der interpolierten  $PM_{10}$ -Konzentrationen von den tatsächlich gemessenen Werten scheint die kleinräumige Feinstaubvariabilität zu sein. Sie geht aus einzelnen kleinräumigen Konzentrationsvergleichen hervor. Liegen die Messstationen mit kontinuierlicher Feinstaubmessung weit von dem Beobachtungs-

---

gebiet entfernt, für das die Werte interpoliert werden sollen, werden Feinstaubwerte errechnet, die leicht unter den tatsächlichen Messwerten liegen.

Die Entscheidung mittels Kriging die fehlenden Expositionsdaten zu vervollständigen bringt zwei Unwägbarkeiten mit sich. Zum einen ist die Erstanwendung der Methode mit einem sehr hohen zeitlichen Lernprozess verbunden. Dafür lässt sich bei erfolgreicher Anwendung von einem adäquaten Resultat ausgehen, denn die verwendeten R-Prozeduren lassen keine Fehler bei der Benutzung zu.

Zum anderen besteht ein wesentlicher Nachteil darin, das die Bearbeitung einer derart großen Datenmenge mit einem hohen Rechenaufwand und somit mit einer langen Rechendauer verbunden ist. Die Interpolation fehlender Werte für 1 Klimatelement über den Zeitraum von 5 Monaten benötigte ca. 3 Tage.

Retrospektive Studien berücksichtigen die Neugliederung des Raumbezuges im Untersuchungszeitraum. Bei der vorliegenden Arbeit betrifft dies die Kreisgebietsreformen in Sachsen-Anhalt 2007 wie noch in Sachsen 2008. D. h., die vorliegenden Daten der Kontextfaktoren passen nicht durchgängig zu den letztlich berücksichtigten 439 Beobachtungseinheiten. Die rückwirkende Zuordnung nutzt kleinräumige Mittelwerte, was zu Verzerrungen führen kann.

Ein weiteres statistisches Problem bestand in der hohen Kollinearität der Kontextfaktoren. Selektiert wurden alle nicht korrelierten Faktoren. Mit den übrigen erfolgte eine Hauptkomponentenanalyse (PCA). Auf Basis dieser wurden die hoch korrelierten Variablen aus der Analyse ausgeschlossen, indem lediglich die am stärksten auf die jeweilige Hauptkomponente ladende Variable zur statistischen Analyse ausgewählt wurden. Damit gehen möglicherweise relevante Erkenntnisse verloren. Nach Dormann (2013a & 2013b) würden aber hoch korrelierende Variablen deutlich unsichere Schätzer hervorbringen (vgl. Timischl 2013; Wollenschläger 2014).

Das Analyseergebnis der verbliebenen Kontextfaktoren kann auf die je Hauptkomponente entfernten Faktoren übertragen werden. Dies wurde vernachlässigt, da es sich bei den in die PCA eingegangenen Kontextfaktoren um eine Auswahl handelt, welche nach Betrachtung eines Cluster-Diagramms getroffen wurde. Der zweidimensionale Clusterplot kann wiederum andere Korrelationen verschleiern (Dormann 2013a). Daher erschien es angezeigt, den möglichen Informationsverlust in Kauf zu nehmen.



## 6.4 Datenauswertung

**Rückblick:** Am gastwissenschaftlichen Arbeitsplatz (GWAP) am Statistischen Landesamt des Freistaates Thüringen in Erfurt wurden, jeweilig getrennt für die einzelnen Jahre des Beobachtungszeitraumes 2002 - 2006 und ohne Kontextfaktoren:

- Die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten nach Diagnosen gefiltert. Selektiert wurden jene ICD-10-Diagnosen, die in der internationalen Literatur als hitzeassoziiert beschrieben sind (vgl. Kapitel 2.4.1 & 4.2.5 und Anhang: Hitzeassoziierte ICD-10-Diagnosen).
- Reduziert wurde der Datensatz weiter, indem nur Fälle selektiert wurden, die an Beobachtungstagen mit potenzieller Hitzebelastung auftraten (vgl. Kapitel 5.1.1).
- Getrennt davon wurden die Kontextfaktoren durch eine Hauptkomponentenanalyse dezimiert.

Die dezimierten Mortalitäts- und Morbiditätsdaten wurden in einer Datei zusammengeführt. Da die Studie das Case-crossover-Design verwendet, erfolgte die Zuspiegung von 10 Vergleichstagen mit 10 Vergleichsexpositionen zu jedem selektiertem Fall. D. h., jeder Fall taucht im Datensatz nun 11 x auf. Dies vergrößerte den Datensatz zwar erneut, was aber der Programmiersprache R keine Probleme bereitet. Den nun fast fertigen Daten wurden noch selektierte Raumindikatoren und die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse zugespielt. Die Tabelle unten visualisiert beispielhaft eine im Statistischen Landesamt angelegte Datentabelle.

Tabelle 34 Visualisierung der in das Modell eingegangenen Daten

Datum	Fall	HI (Heat Index)	PM10	Geschl.	Alter	Kreisname	Kreis-schlüssel	Kreistyp	Frauenanteil	Siedlungs-dichte	....
02.05.02	1	80 °F	29 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....
30.04.02	0	70 °F	20 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....
27.04.02	0	72 °F	31 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....
24.04.02	0	74 °F	27 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....
05.05.02	0	74 °F	29 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....
08.05.02	0	82 °F	33 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....
Insges. 10 Vergleichstage	0	86 °F	36 µm	wbl	Fall60to69	Rosenheim	22	8	53%	1889 Einw./km²	....

Beispieltabelle der Eingangsdaten. Ein Fall wird 11 x berücksichtigt (1 x am Falltag + 10 Vergleichstage mit Vergleichsexpositionen). Eigene Darstellung.

Verschiedene Ansätze der logistischen Regression wurden verwendet, da die Daten durch subjektive Verknüpfungen (ICD-10 diagnostizierte Todesursache bzw. Hospitalisationsursache, Geschlecht, Alter) und räumliche Zusammenhänge (Expositionsvariablen: Hitze und Feinstaub sowie Kontextfaktoren) charakterisiert sind (sog. hierarchische Datenstruktur). Es kamen generalisierte lineare Modelle (GLM), generali-

sierte lineare Modelle mit Stratifizierungsmöglichkeit (adaptiertes CoxPH-Modell) sowie generalisierte gemischte lineare Modelle (GLMM) zur Anwendung.

Letztlich führte der intensive Austausch mit Herrn Prof. Dr. Lautenbach von der Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, zur Realisierung eines GLM-Ansatzes, mit welchem separate Analysen für die untersten Beobachtungseinheiten: kreisfreie Stadt, Landkreis, Kreis, Stadtverband, etc. durchgeführt werden konnten. Auch die Einbindung der räumlichen Kontextfaktoren in ein separates Regressionsmodell konnte infolge des Dialoges mit Herrn Prof. Dr. Lautenbach möglich werden.

**Diskussion:** Mit einem kritischen Blick auf die Datenauswertung lässt sich zunächst fragen, inwieweit Regressionsanalysen zur Erfassung der Expositionen Hitze und Feinstaub als Risikofaktoren geeignet sind. Im Allgemeinen versteht die Epidemiologie unter einem Risikofaktor »[...] das kalkulierbare Risiko einer Person mit einem bestimmten Charakteristikum (zum Beispiel Zigarettenrauchen, erhöhter Blutdruck) in einem definierten Zeitraum von einer bestimmten Krankheit befallen zu werden. Besteht zwischen dem Risiko und dem Risiko einer Person ohne Charakteristikum ein statistisch signifikanter Unterschied, so bezeichnet man das Charakteristikum als Risikofaktor.« (Pflanz 1973: 13; vgl. Kreienbrock et al. 2012)

Unterscheidet sich sonach das unter Hitzeexposition (→ das wesentliche Charakteristikum der Untersuchung) festgestellte Gesundheitsrisiko von jenem Risiko mit vergleichsweise geringerer Hitzebelastung signifikant, so lässt sich die Exposition Hitze als Risikofaktor einstufen und die Gefährdungsstärke dieses Risikofaktors berechnen. Wie mit Rückgriff auf Kreienbrock und Kollegen (2012) schon gezeigt wurde, können logistische Regressionsmodelle die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses unter Exposition (Charakteristikum) adäquat abbilden (vgl. Peng/Dominici 2008). Modelliert wird das Effektmaß Odds Ratio. Es besticht durch seinen engen Bezug zum Relativen Risiko (Kreienbrock et al. 2012; Rothman et al. 2008; Hilgers et al. 2007). Beide Eigenschaften lassen durchaus den Schluss zu, dass die Analysemethode geeignet ist, adäquate Ergebnisse zu erzeugen.

Für die jeweiligen Regressionsmethoden existieren Testverfahren (bspw.: Devianzanalyse, Residuenanalyse, ROC-Kurve,  $R^2$ ), die Aussagen über die Modellgüte, d. h., die Aussagekraft des Regressionsmodells erlauben. Getrennt nach den Zielvariablen Mortalität und Morbidität werden die Güten der Modelle nachfolgend dargestellt.

## Güte des logistischen Regressionsmodells | Mortalität

### Modellwahl - Varianz/Devianzanalyse

Das logistische Regressionsmodell kann, bedingt durch die hierarchische Datenstruktur, die Variablen: Heat Index = Apparent Temperature (AT), PM<sub>10</sub>, Kombination von AT:PM<sub>10</sub>, Geschlecht und Alter aufnehmen. Die Varianz-/Devianzanalyse ist das allgemein gebräuchliche Werkzeug, welches zur Variablenselektion herangezogen wird (Dormann 2012; Wollschläger 2015; Chambers/Hastie 1992).

Im Rahmen der Devianzanalyse werden die Modelle mit möglichen Kombinationen der Prädiktorvariablen verglichen.

Abb. 78 Modellwahl mittels Devianzanalyse | Mortalität

```
anova(mod_fit_one, mod_fit_2b, mod_fit_2c, mod_fit_two, test = "Chisq")
Analysis of Deviance Table

Model 1: Fall0toXX.Num ~ AT + PM10
Model 2: Fall0toXX.Num ~ AT + PM10 + Geschl
Model 3: Fall0toXX.Num ~ AT + PM10 + Geschl + Alt.Num
Model 4: Fall0toXX.Num ~ AT + PM10 + Geschl + Alt.Num + AT:PM10
  Resid. Df Resid. Dev Df Deviance Pr(>Chi)
1      2647730      1459205
2      2647729      1459202  1         4  0.04989 *
3      2647728      1459201  1         0  0.69100
4      2647727      1424200  1    35001 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

⇒ Modell 4 kommt zur Anwendung.
```

Dargestellt sind die mit den nutzbaren Variablen möglichen Modelle. Variablen:

- Fall0toXX.Num → hitzeassoziierte Mortalität
- AT → Apparent Temperature
- PM<sub>10</sub> → Feinstaub
- Geschl → Geschlecht
- Alt.Num → Alter
- AT:PM<sub>10</sub> → Kombination AT und PM<sub>10</sub>

### Pseudobestimmtheitsmaß

Ein Bestimmtheitsmaß ist für das logistische Regressionsmodell nicht anwendbar. Alternativ lässt sich die Güte des Modells durch die Analyse der Devianz mit der Maximum-Likelihood-Schätzung beurteilen. Berechnet werden sog. Pseudobestimmtheitsmaße  $R^2$ . Die Bestimmtheitsmaße nach McFadden, Cox und Shell sowie Nagelkerke werden für GLM herangezogen. Da das Bestimmtheitsmaß nach McFadden nicht auf die Berücksichtigung der Fallzahlen in den Untersuchungsgruppen

angewiesen ist (im Case-crossover-Design fungieren die Fälle als ihre eigenen Kontrollen), eignet es sich zur Beurteilung.

Anzumerken ist, dass die Werte der genannten Maße nicht nach Größe, sondern primär nach dem Größenunterschied beurteilt werden. Getestet wird die Trennkraft der Prädiktorvariablen. Werte im Bereich 0,2 und 0,4 deuten auf einen besseren Fit hin (Hedderich/Sachs 2012; Zeileis/Hothorn 2002; Long/Scott 1997).

```
Pseudo R^2
pR2(mod_fit_one)
McFadden
9.545351e-02
pR2(mod_fit_two)
McFadden
1.171530e-01
```

Der Determinationskoeffizient ist für das zweite Modell (mod\_fit\_two = genutztes Modell) höher, der Fit im Vergleich zum Nullmodell (mod\_fit\_one) also besser. Allerdings liegt er noch unter 0,2.

### Hosmer-Lemeshow-Test

Zur Bewertung der Modellgüte vergleicht der Hosmer-Lemeshow-Test die vorhergesagten mit den beobachteten Ereignisraten. Geprüft wird die Nullhypothese: Zwischen vorhergesagten und beobachteten Wert besteht keine Differenz. Pearson's Chi-Quadrat-Test kommt dabei zur Anwendung. Kleine Chi-Quadrat-Werte mit großen p-Values stehen für einen besseren und höhere Chi-Quadrat-Werte mit kleineren p-Values für einen schlechteren Fit (Jackman 2015; Lemeshow/Hosmer 1982; Hosmer et al. 1997).

```
Hosmer-Lemeshow
HLgof.test(fit = fitted(mod_fit_one2), obs = training2$Fall10toXX.Num)
Hosmer-Lemeshow C statistic
data: fitted(mod_fit_one2) and training2$Fall10toXX.Num3
X-squared = 1712.075, df = 8, p-value < 2.2e-16
Hosmer-Lemeshow H statistic
data: fitted(mod_fit_one2) and training2$Fall10toXX.Num
X-squared = 2065.221, df = 8, p-value < 2.2e-16
HLgof.test(fit = fitted(mod_fit_two2), obs = training2$Fall10toXX.Num)
Hosmer-Lemeshow C statistic
data: fitted(mod_fit_two2) and training2$Fall10toXX.Num
X-squared = 1186.209, df = 8, p-value < 2.2e-16
Hosmer-Lemeshow H statistic
data: fitted(mod_fit_two2) and training2$Fall10toXX.Num
X-squared = 1460.794, df = 8, p-value < 2.2e-16
```

Das letztlich genutzte Modell (mod\_fit\_two) zeigt auch im Hosmer-Lemeshow-Test einen besseren Fit (→ deutlich kleinere Chi-Quadrat-Werte).

## Relevanz der Variablen

```

Wichtigkeit der Variablen
mod_fit <- train(Fall0toXX.Num ~ AT + PM10 + Geschl +
Alt.Num + AT:PM10, data=training2, method="glm", family="binomial")
Modell = Altersklasse = numerisch
varImp(mod_fit)
glm variable importance

      Overall
AT      100.000
PM10    52.548
AT:PM10 51.756
Alt.Num  3.224
Geschlwb1 0.000

Modell = Altersklasse = klassiert
varImp(mod_fit.Alt.Kla)
glm variable importance

      Overall
AT      100.000
PM10    52.444
AT:PM10 51.649
Alt.KlaFall180toxx 2.472
Alt.KlaFall110to59 2.216
Alt.KlaFall160to69 2.038
Alt.KlaFall170to79 1.833
Geschlwb1 0.000

```

Die Variablenrelevanz im Regressionsmodell lässt sich prüfen.

Die Absolutwerte der Parameter aus der t-Statistik werden hierfür genutzt (Kuhn et al. 2016).

Zu sehen ist, dass es relativ unerheblich ist, ob die Variable Alter als numerische oder klassierte Variable ein-

geht. Obwohl die Variable  $PM_{10}$  durchgängig einen bedeutenden Einfluss zeigt, nimmt sie bei diesem Test deutlich hinter der Prädiktorvariablen Hitze (AT) den zweiten Rang ein.

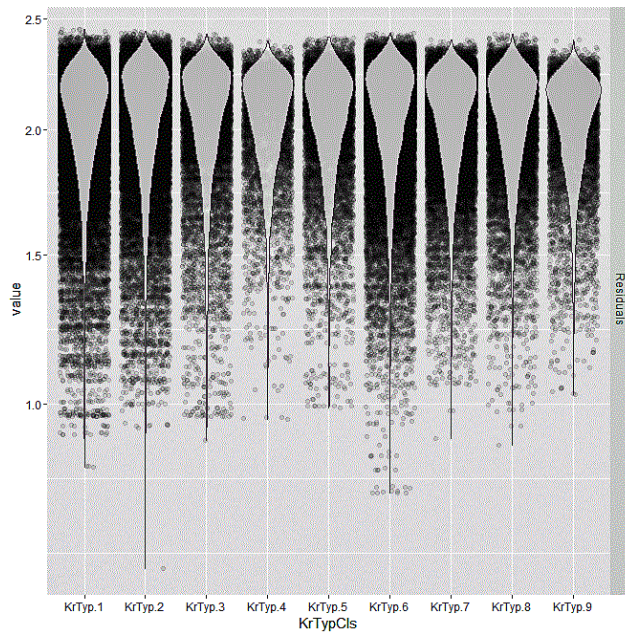
## Residuenanalyse

Ein wesentlicher Bestandteil der Modellvalidierung ist die Residuenanalyse. Unter Residuenanalyse versteht die Geostatistik ein Verfahren, welches die Residuen eines Regressionsmodells auf ausgeglichene Streuung untersucht. Geostatistisch stehen zwei Aspekte im Blick: a) Unabhängigkeit der Residuen → Voraussetzung für eine Regressionsanalyse und b) räumliche Verteilung der Residuen → Hinweise auf fehlende Variablen, die das Modell ggf. optimieren könnten (Fischer/Wang 2011). Die klassische Analyse der Residuen, die etwa für normal verteilte Responses zur Anwendung kommt, ist für Bernoulli-verteilte-Daten dabei nicht nutzbar (Dormann 2012: 158 f).

Analysiert werden in generalisierten linearen Modellen (GLM) mit binomialverteilten Daten die Devianz-Residuen. Die Devianz kommt der Summe der Abweichungsquadrate gleich. Im Rahmen der Modelldiagnostik gibt die Devianz auch einen wichtigen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Güte von Schätzungen (vgl. Dormann 2012; Wollschläger 2015).

Die Mittelwerte der Devianz-Residuen wurden zur Inspektion auf der Ebene der siedlungsstrukturellen Kreistypen 1 - 9 geplottet.

Abb. 79 Devianz-Residuen des GLM - Ebene Kreistyp



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Die Boxplots für die Mittelwerte der auf die Ebene der siedlungsstrukturellen Kreistypen aggregierten 8 sind unregelmäßig ausgeprägt. Auf den ersten Blick könnte man daraus schlussfolgern, dass die Residuen heteroskedastisch sind.

Nun steht aber zu bedenken, dass die Kreistypen vom BBSR nach den Kriterien »Einwohnerdichte« sowie »Lagegunst« und

»Zentralität« kategorisiert wurden. Es ähneln sich nach diesen Kriterien die Kreistypen: 1 & 5; 2 & 7; 3 & 8 sowie 4 & 9. Zumindest die zu diesen Ebenen gehörenden Residuen erscheinen als Voraussetzung zur Modellierung mit einem generalisierten linearen Modell vertretbar.

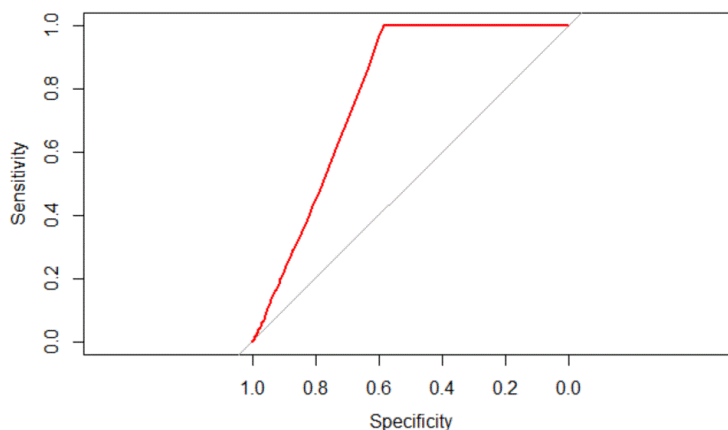
Auch erschien relevant, ob die räumlich auf die kreisfreien Städte, Landkreise, Stadtverbände und die Hansestadt aufgelösten Mittelwerte der Deviance-Residuen miteinander autokorrelieren. Die Zusammenballung von hohen und/oder niedrigen Werten spräche dafür, dass weitere Kovariate in das Modell aufgenommen werden müssten. Eine Alternative wäre hier auch die Korrektur der Regressionsschätzer für die Autokorrelation. In einer Choroplethenkarte, für die untersten Beobachtungseinheiten aufgelöst (kreisfreie Städte, Landkreise, etc.), sind die Residuen gebietsweise autokorreliert. Insbesondere bei jenen Raumeinheiten, bei denen auch sehr hohe Odds Ratios zu konstatieren sind. Nach Rücksprache mit dem Statistischen Landesamt in Erfurt darf die Grafik nicht publiziert werden. Sie liegt aber Herrn Prof. Dr. Lautenbach von der Universität Bonn vor.



## ROC-Kurve

Die gewählte Analysestrategie lässt sich auch mit der sog. Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (ROC-Kurve) evaluieren. Im ROC-Verfahren werden über den Wertebereich der eingehenden Variablen die zugehörigen Sensitivitäten und Spezifitäten berechnet. Die ROC-Kurve visualisiert dann den Zusammenhang zwischen Modelleffizienz und Fehlerraten (Hedderich/Sachs 2012; Robin et al. 2011 Sing et al. 2005).

Abb. 80 ROC-Kurve | Mortalität



Sensitivität und Spezifität des genutzten GLM. Die ROC-Kurve ist rot eingelegt.

Die maximale Sensitivität des Modells geht mit einem 30%igen falsch-negativ Anteil einher.

D. h., mit dem Modell würden für ca. 30 % der

an einer hitzeassoziierten Krankheit verstorbenen Menschen fälschlicherweise ein zusätzlicher Einfluss durch die Exposition Hitze unterstellt. Nichtsdestoweniger besitzt das Regressionsmodell eine noch akzeptable Aussagekraft. Abgeschätzt wird nämlich, ob und wie weit die ROC-Kurve von der eingezeichneten Diagonalen entfernt ist. Je näher die Kurve an der Diagonalen verortet ist, desto weniger Aussagekraft besitzt das Modell. Beurteilt wird ausschließlich der Bereich über der Diagonalen. Für ihn lässt sich die Area Under Curve (AUC) berechnen. Werte oberhalb 0,8 sprechen für ein gutes Modell.

```
ROC Curve
plot(f1, col="red")
Call:
roc.formula(formula =
Fall10toXX.Num ~ AT, data = training2)
Data: AT in 480010 controls
(Fall10toXX.Num 0) < 48001
cases (Fall10toXX.Num 1).
Area under the curve: 0.7852
AUC
AUC <- performance(pred, measure = "auc")
AUC <- auc@y.values[[1]]
AUC = 0.8739725
```

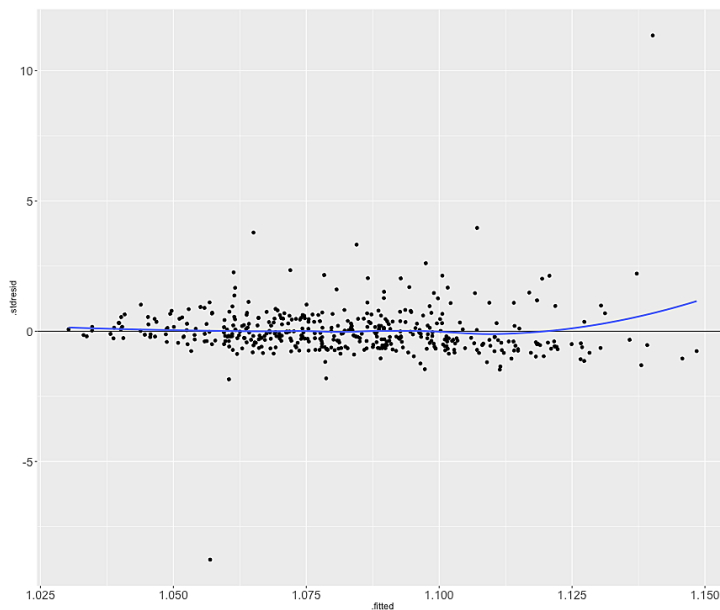
Zwei AUC-Werte lassen sich berechnen: 1. ein variablenspezifischer (hier für die Variable Hitze (AT)) und 2. ein modellspezifischer (Modellperformance): 1. Allein für die Exposition Hitze erfüllt das Modell die gewünschten Anforderungen noch nicht ganz: AUC → 0,7852. 2. Die gesamte Aussagekraft des Modells ist aber durchaus zufriedenstellend: AUC → 0,8739.

## Güte des linearen Regressionsmodells | Mortalität

### Residuenanalyse

Im linearen Modell mit und ohne Intercept sollten die Residuen stochastisch unabhängig voneinander sein. Dass dies für das finale Modell augenscheinlich zutrifft, zeigt ein Streudiagramm (vgl. Dormann 2012; Hedderich/Sachs 2012).

Abb. 81 Streudiagramm Residuen lineares Modell



Quelle: eigene Darstellung

Die Residuen zeigen keine Muster, der Modellierung stünde in dieser Hinsicht nichts entgegen (vgl. Hedderich/Sachs 2012).

Bei einer Studie mit Raumbezug ist allerdings auch nach möglicher Autokorrelation zu schauen (vgl. Kapitel 4.6.3). Mit dem *Moran's I*

*test for spatial autocorrelation* (vgl. Bivand/Piras 2015) lässt sich dies überprüfen.

Das Nachbarschaftskriterium wurde mit dem sog. »*Dame-Fall*« definiert (vgl. Kapitel 4.6.3, Abb. 20).

### Moran's I test

<b>Moran I statistic</b>		<b>Monte-Carlo simulation of Moran I</b>	
standard deviate = 4.3616,		data: myshape\$lm.resid	
p-value = 6.457e-06		weights: myshape.lw	
alternative hypothesis: greater		number of simulations + 1: 10001	
sample estimates:		statistic = 0.12653, observed rank = 10001,	
Moran I statistic	Expectation	p-value = 9.999e-05	
0.1265266273	-0.0022831050	alternative hypothesis: greater	
Variance			
0.0008721975			

Moran's I ist signifikant, d. h., die Residuen autokorrelieren miteinander (li.).

Als Kontrolle bestätigt der *Permutation test for Moran's I* das signifikante Ergebnis

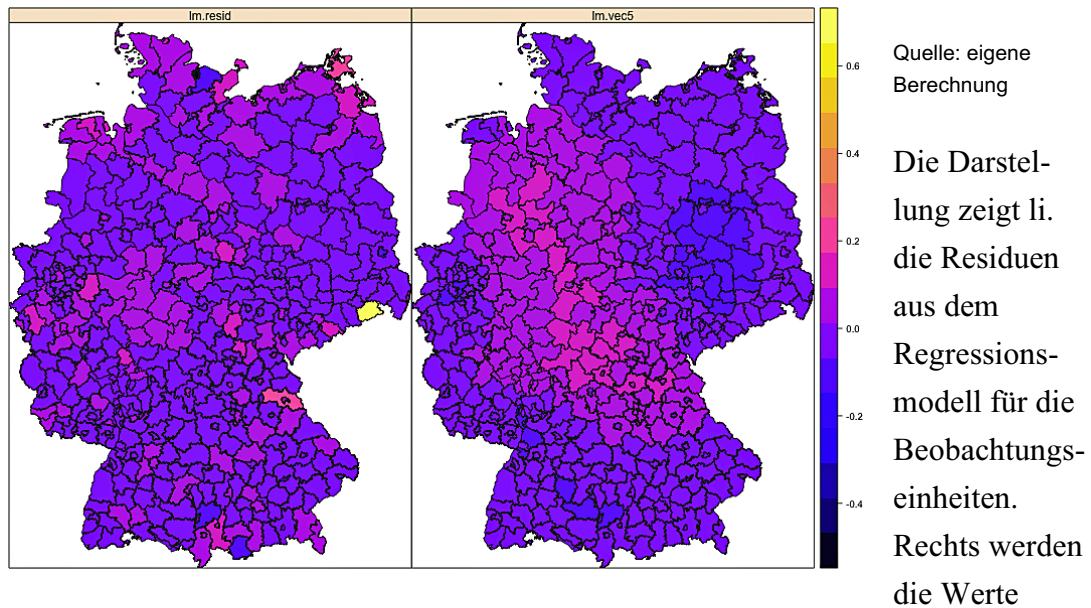
(re. Output).



Die Eigenvektoren aus dem *Spatial eigenvector mapping* gehen in das Modell ein (Arbeitsmaterialien Herr Prof. Dr. Lautenbach).

Für das finale Modell sind es 3 Vektoren. Die Koeffizienten der Eigenvektoren sind signifikant. Sie nehmen Variabilität aus dem Modell, wie dies der nachfolgende Plot verdeutlicht.

Abb. 82 Residuen- & Eigenvektorplot



eines der 3 Eigenvektoren gezeigt.

### Relevante Modellkennzahlen

Das wesentliche Kriterium, das bei der Beurteilung der Güte linearer Modelle herangezogen wird, ist das multiple Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (multiple R-squared). Es gilt:  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Maximaler und bester Wert ist 1, minimaler und somit ungünstigster Wert ist 0. Nachteil von  $R^2$  ist, dass mit zunehmender Variablenanzahl auch sein Wert ansteigt. Daher wird auch das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (adjusted R-squared) angegeben (Groß 2010; Hedderich/Sachs 2012).

- Multiple R-squared ( $R^2$ ): 0.1603 ( $R^2$  Modell ohne Eigenvektoren: 0.1361)
- Adjusted R-squared ( $R^2$ ): 0.1408 ( $R^2$  Modell ohne Eigenvektoren: 0.066)

Nach dem adjusted R-squared hat das Modell die Erklärungskraft von 14 %. Das ist nicht optimal, aber fürwahr auch nicht ungünstig. Ein großer Teil der Varianz muss noch unklar bleiben.

Der Residual standard error ist ein Maß für die Abweichung zwischen den empirischen und prognostizierten Werten (Wollschläger 2012).

- Residual standard error: 0.05462 (Modell ohne Eigenvektoren; 0.05695)

Der Standardfehler ist passabel. Er sagt aus, dass prognostizierte Werte zu 95 % korrekt vorhergesagt und mit 5%iger Wahrscheinlichkeit überschätzt werden.

Berechnung: Intercept =  $1.155e+00 = 100 \%$ ;  $0.05462 = ?$ ;  $0.05462 * 100 / 1.155e+00 = 4.729004 \%$  (vgl. Rego 2015).

### **Modellierungsprozess**

Der gewählte Modellierungsprozess führt nicht zwingenderweise zum besten Modell. Durch den Ausschluss nicht signifikanter Kontextfaktoren kann es zu einer Überbewertung des Effektes der noch im Modell behaltenen Prädiktoren kommen. Daneben können die ausgeschlossenen Kontextfaktoren durchaus hohe Erklärungskraft haben, sie kommt neben den signifikanteren Variablen jedoch nicht so zum Tragen (Hedderich/Sachs 2012).

### Güte des logistischen Regressionsmodells | Morbidität

So wie oben für die Zielvariable Mortalität dargestellt, wurde auch bei dieser Modellierung mittels Devianzanalyse untersucht, welche Variablenkombination am besten fittet.

Abb. 83 Modellwahl mittels Devianzanalyse | Morbidität

```
anova(mod_fit_one, mod_fit_two, mod_fit_three, mod_fit_four, test = "chisq")
Analysis of Deviance Table

Model 1: Fall0toXX ~ AT
Model 2: Fall0toXX ~ AT + PM10 + Geschlwb1 + Alt + AT:PM10
Model 3: Fall0toXX ~ AT + PM10 + Geschlwb1 + Alt + AT:PM10 + KrTyp
Model 4: Fall0toXX ~ AT + PM10 + Geschlwb1 + Alt + AT:PM10 + KrTyp + Tag
  Resid. Df Resid. Dev Df Deviance Pr(>Chi)
1      7196349      4368143
2      7196345      4354232  4    13911 < 2.2e-16 ***
3      7196337      4238426  8    115806 < 2.2e-16 ***
4      7196331      4238120  6         306 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Quelle:  
FDZ, eigene  
Berechnung

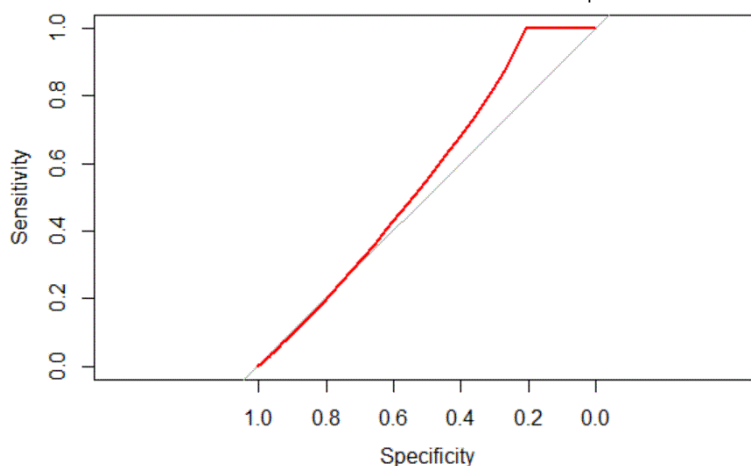
Am besten fittet das Modell 4 mit den Variablen: AT (gleichzusetzen mit Heat Index), PM<sub>10</sub>, Geschlecht weiblich, Alter, AT plus PM<sub>10</sub>, Kreistyp und Hospitalisationstag. Das Pseudobestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> nach McFadden zeigt für das genutzte Modell (mod\_fit\_four) einen passablen Wert (0,32014). Deutlich ungenügender ist das R<sup>2</sup>

```
pR2(mod_fit_one)
McFadden
3.738239e-03

pR2(mod_fit_four)
McFadden
32.013995e-02
```

mit 0,00374 für das Modell (mod\_fit\_one), welches lediglich Hitze als Exposition heranzieht. Notwendig erscheint auch hier die Betrachtung der Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (ROC-Kurve).

Abb. 84 ROC-Kurve | Morbidität



Quelle: FDZ, eigene  
Berechnung

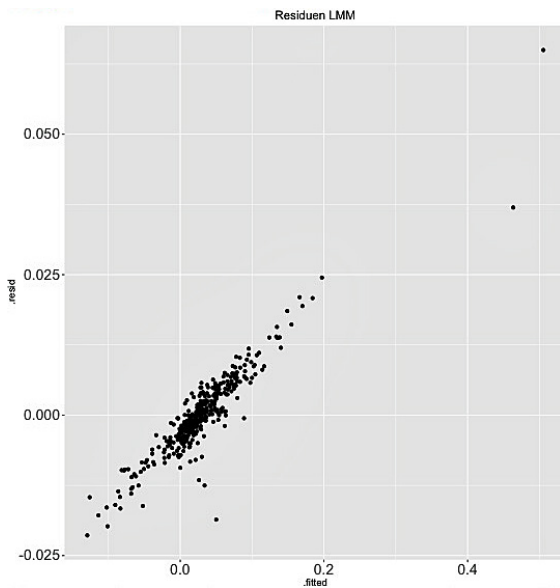
Die Sensitivität und Spezifität des genutzten GLM ist mangelhaft, der AUC für die Variable 0.5594 auch. Somit eignet sich das Modell für Prognosen nicht. Es ist lediglich

zur Beschreibung des hitzeassoziierten Morbiditätsgeschehens nutzbar.

### Güte des linearen gemischten Regressionsmodells | Morbidität

Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen den Expositionen Hitze sowie Feinstaub und den Morbiditätsdaten birgt einen beachtenswerten Variabilitätsanteil. Diese Unsicherheit wird in die Modellierung des Einflusses der Kontextvariablen auf die Ausprägung der Prädiktorvariablen Heat Index hineingetragen. Die Verteilung der Residuen für das der Abbildung 76 zugrunde liegende Modell zeigt einige Ausreißer.

Abb. 85 Residuen für das lineare gemischte Modell



Quelle: FDZ, eigene Berechnung

Die Residuen des Modells gegen die gefitten Werte zeigen keine ausgeglichene, aber eine durchaus akzeptable Streuung. Die Nutzung von 8 alternativen Verteilungen im Modell verbesserte das Bild nicht (s. R Core Team 2013).

Ein Bestimmtheitsmaß oder ein Pseudo-bestimmtheitsmaß gibt es für Modelle, die mit der Funktion *lme* erstellt wurden, nicht. Das beste Modell wird mittels Devianzanalyse selektiert (vgl.

Wollschläger 2012: 207; Hedderich/Sachs 2012: 732; Groß 2010).

```
> anova(g.lm.log, g.lm18.log)
      Model df      AIC      BIC
g.lm.log   1 37 -642.0048 -497.7086
g.lm18.log  2  6 -1076.9737 -1053.1004
      logLik Test L.Ratio p-value
g.lm.log   358.0024
g.lm18.log 544.4868 1 vs 2 372.9689 <.0001
```

Mit dem Grundmodell (sämtliche Kontextfaktoren) und den 18 Modellmöglichkeiten wäre eine Tabelle mit 19 Modellen abzubilden. Aus Platzgründen werden lediglich Grundmodell (Bezeichnung: g.lm.log) und

das nach dem besten AIC ausgewählte Modell gezeigt (Bezeichnung: g.lm18.2.log). Entnommen werden kann, dass der Fit des letztlich genutzten Modells deutlich besser ausfällt. Der P-Wert gibt an, dass das genutzte Modell im Vergleich mit dem Grundmodell nicht abgelehnt werden kann (Groß 2010: 230). Betrachtete man die Tabelle mit allen Modellen, dann ginge hervor, wie mittels Devianzanalyse die relevantesten Variablen selektiert werden können.

## 6.5 Fundierung der Studienergebnisse

**Rückblick:** Das im Rahmen der Dissertation genutzte Case-crossover-Design wurde gewählt, da zahlreiche Autoren mit diesem vergleichbare Fragestellungen bearbeiteten. Dies genügt jedoch noch nicht, um dessen Verwendung in vorliegender Dissertation zu begründen. Dementsprechend werden grundlegende Aspekte der Epidemiologie herangezogen und die in dieser Arbeit verwendeten Konzepte konsolidiert. Dazu gehört auch die Betrachtung der mit der Methode gewonnenen Ergebnisse vor Kausalitätskriterien und die Verortung der Ergebnisse im Modell der allgemeinen Ätiologie.

**Diskussion:** Der im Rahmen der Dissertation angelegte Forschungsansatz lässt sich als retrospektive Beobachtungsstudie beschreiben (auch als retrospektive Registerstudie s. u.), im Rahmen derer Sekundärdaten in ihrem problembezogenen relativen Bezug zusammengeführt werden. Die vorliegende Studienanlage verinnerlicht die grundlegenden Annahmen der Epidemiologie insofern, als dass mit Hilfe eines abgewandelten Inzidenzkonzeptes die Wahrscheinlichkeit auf einen gesundheitlichen Endpunkt unter Exposition abgebildet wird (vgl. Kreienbrock et al. 2012). Mit dem Odds Ratio wird ein relatives Vergleichsmaß genutzt, das die Chancensteigerung auf einen gesundheitlichen Endpunkt unter Exposition widerspiegelt. Genauer gesagt erfolgt die Beantwortung der Frage, ob sich die Chancen (Odds) für einen Fall unter zunehmender Exposition erhöhen.

Es erfolgt die Kodierung eines existenten Falls unter Exposition respektive das Ausbleiben dieses Ereignisses mit 1 und 0. Die Kodierung der Fälle unterliegt biologischen und medizinischen Plausibilitäten. Auch die Expositionsdefinitionen wurden fundiert aus der einschlägigen Literatur abgeleitet.

Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen den Expositionen und den gesundheitlichen Endpunkten erfolgt durch ein logistisches Regressionsmodell.

Zusammengeführt werden die genannten Spezifika im Case-crossover-Design, da das Design den fehlenden personenbezogenen Informationen zum Ausmaß des direkten Einflusses der Exposition am ehesten Rechnung trägt (vgl. Kreienbrock et al. 2012; Rothman et al. 2008; Peng/Dominici 2008).

### **6.5.1 Case-crossover-Design - Charakterisierung & Kritik**

Das gewählte Case-crossover-Design ist dem Studientyp der Fall-Kontroll-Studie entlehnt, daher erfolgt hier ein Querverweis auf diesen Beobachtungsstudientyp. Methodische Verknüpfungen bestehen ebenfalls zum ökologischen Studiendesign. Auch diese werden nachfolgend in Kürze aufgezeigt.

Dem Case-crossover-Design ebenso wie der Fall-Kontroll-Studie ist eigen, dass beide die gesundheitlichen Effekte auf der Individualebene betrachten und u. a. Risikofaktoren für diese Effekte retrospektiv erforschen. Als Fälle können alle Personen einer Zielpopulation ausgewählt werden, die innerhalb einer definierten Periode die interessierende Krankheit zeigen. In einer Fall-Kontroll-Studie sind alle Individuen aus der betrachteten Population als Kontrollen rekrutierbar, die prinzipiell auch Fälle hätten sein können. Sind Fälle und Kontrollen hinsichtlich relevanter Risikofaktoren identisch und ist die Exposition zwischen beiden Gruppen unterschiedlich ausgeprägt, so lässt sich dies als Indiz für eine ätiologische Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Exposition und Krankheit werten (Klemperer 2012; vgl. Ackermann 2010; Rothman et al. 2008 und Hilgers et al. 2007).

Sind Fälle wie auch Kontrollen einem geographisch klar abgegrenzten Raum (bspw. Stadt oder Landkreis) zuzuordnen, so handelt es sich um eine populationsbezogene Fall-Kontroll-Studie. Bei Einschluss der gesamten Fälle einer Population lässt sich ferner von einer Registerstudie sprechen. Sofern jedoch aus pragmatischen Gründen nach definierten Charakteristika Fälle identifiziert werden und diesen eine Population zugeschrieben wird, ist die Bezeichnung auswahlbezogene Fall-Kontroll-Studie zutreffend (Kreienbrock et al. 2012).

Ökologisches Studiendesign ja/nein?

Da Vorhandensein und Intensitäten der Expositionen Hitze und Feinstaub nicht direkt an den Fällen erhoben werden können, lässt sich die Studie dem Kontext der ökologischen Studiendesigns zuordnen. Der Begriff ökologisch sollte dabei nicht in die Irre führen. Er bezieht sich bei diesen Arbeiten auf den Lebensraum, in dem die betrachtete Population beheimatet ist. Eine wesentliche Gemeinsamkeit besteht sonach darin, dass die Exposition auf der Beobachtungsebene kreisfreie Stadt, Landkreis, Stadtverband, Hansestadt, etc. erhoben wird (vgl. Kreienbrock et al. 2012; Dreier et al. 2012; Rothman et al. 2008). Die Besonderheit der vorliegenden Studie besteht nun darin, dass im Gegensatz zu den meisten ökologischen Studien hier

subjektive und nicht aggregierte Mortalitäts- und Morbiditätsdaten genutzt werden können.

Rothman und Kollegen (2008) heben hervor, dass die Erkenntnisse ökologischer Studien bedeutsam sind, da sie regionalisierte Gesundheitsrisiken aufzeigen, die auf dieser Ebene auch in die politische Diskussion einzubringen sind. Kleinräumig etablierte Präventionsmaßnahmen zur Risikoreduktion lassen sich mit einem ökologischen Studiendesign sodann auf ihre Wirksamkeit überprüfen.

### **Thematisch relevante Studien**

Zur Untersuchung thermischer Effekte auf den menschlichen Organismus, etwa durch extreme Ereignisse, wie Hitzeperioden oder auch Kältewellen, wurden in der Vergangenheit Periodenstudien, Zeitreihenanalysen und Crossover-Studien vorgelegt. Periodenvergleiche legten etwa Jackson und Kollegen (2010), Rey und Kollegen (2007) sowie Fouillet und Kollegen (2006) wie auch Koppe (2005) vor.

Zeitreihen zur Analyse klimatischer Einflüsse auf den menschlichen Organismus nutzten bspw. Hutter und Kollegen (2007), Armstrong und Kollegen (2006) wie noch Basu und Kollegen (2002).

Nach 2005 stieg die Zahl der Case-crossover-Studien. So zum Beispiel durch: Bedada und Kollegen (2012), de'Donato und Kollegen (2008), Stafoggia und Kollegen (2008), Stafoggia und Kollegen (2006), Forastiere (2005), Basu und Samet (2005) sowie Kyobutungi und Kollegen (2005) und bereits Levy und Kollegen (2001).

### **Die Methodik im kritischen Blick**

Zur Erforschung der Verteilung von Gesundheit und Krankheit empfehlen Khan und Zanuzsana (2011: 69) als »Goldstandard« Beobachtungsstudien, sog. Kohortenstudien (vgl. weiterhin Kreienbrock et al. 2012). Das Autorenteam konstatiert daneben aber auch, dass gegenstandsangemessene Alternativen durchaus zu verwenden sind (vgl. auch Xun et al. 2009; Peng/Dominici 2008).

Das gewählte Case-crossover-Design repräsentiert eine solche, da eine Beobachtungsstudie zur Beantwortung der Forschungsfragen quasi unmöglich wäre. Das gewählte Studiendesign ist - wie in der Epidemiologie allgemein üblich - auf potenziell verfälschende beziehungsweise verzerrende Einflüsse zu überprüfen: Insbesondere muss eruiert werden, ob das Case-crossover-Design ein adäquater Ansatz zur

---

Bearbeitung der herangezogenen Sekundärdaten darstellt. Auch die im Design verwendeten Analysewerkzeuge müssen einer kritischen Betrachtung standhalten.

### **Sekundärdatenanalyse mit dem Case-crossover-Design**

Empirische Studienergebnisse können durch fehlerhaftes Vorgehen bei der Erhebung und auch der Analyse der Daten verfälscht sein. Die epidemiologische Forschung unterscheidet in diesem Zusammenhang zwei wesentliche Fehlerarten: 1. den Zufallsfehler und 2. den systematischen Fehler.

1. Zufällige Fehler resultieren aus der in epidemiologischen Studien zumeist notwendigen Beschränkung auf ein Teilkollektiv aus allen potenziellen Studienteilnehmern. Im vorliegenden Fall bleibt das Morbiditätsgeschehen unter Hitzeexposition unberücksichtigt, welches im Sektor der ambulanten Versorgung auftritt. Dabei handelt es sich genau genommen nicht um einen Zufallseffekt, da die Daten nicht taggenau erhoben werden und somit auch nicht nutzbar sind. Daher wird diese Einschränkung im Weiteren als Information Bias (s. u.) behandelt.

2. Systematische Fehler sind sog. Bias, die insbesondere in Kohorten-Studien oder Fall-Kontroll-Studien auftreten können. Kreienbrock und Kollegen (2012) unterscheiden drei Typen von Bias (vgl. auch Dreier et al. 2012):

- 2.1. Information Bias,
- 2.2. Selection Bias und
- 2.3. Confounding Bias

2.1. Ein Information Bias kann vorliegen, wenn die Art der Informationsgewinnung nicht regelhaft ist oder aber die Datenerhebung Lücken aufweist. Eine Verzerrung durch fehlerhafte Information entsteht in vorliegender Studie womöglich dadurch, dass mit dem notwendigerweise auszublendenden Morbiditätsgeschehen im ambulanten Sektor relevante Fälle in der Studienpopulation fehlen. Für den Bereich der ambulanten Versorgung ergab ein Gespräch mit der Kassenärztlichen Vereinigung (KV) Hessen, dass prinzipiell eine bestimmte Menge ICD-10-Diagnosen regionalisiert ausgehändigt werden könnte. Die ICD-10 Diagnosen sind aber nicht taggenau darstellbar, da die KV nach Quartalen abrechnet. Zu berücksichtigen sei zudem, dass gerade Hausärzte zur Abrechnung zahlreiche Pauschalen heranziehen.

Schwerwiegende Erkrankungen führen aber nach Einschätzung von Kreienbrock und Kollegen (2012: 71) sehr häufig zu einer Hospitalisation. Damit verbunden ist dann eine weitgehend vollständige Erfassung der Hospitalisationsgründe, bei Abdeckung



aller Altersklassen. Bei der Todesursachenstatistik handelt es sich ohnehin um eine Totalerhebung.

Besonders ungünstig könnte sich die Zuordnung der Exposition zu den Fällen auswirken: Kreienbrock und Kollegen (2012: 79) empfehlen: *»Immer dann, wenn die epidemiologische Nutzung von Sekundärdaten auch der Ursachenforschung dienen soll, ist die Frage zu stellen, inwieweit solche Ursachen miterfasst worden sind.«* (Kreienbrock et al. 2012: 79) Bei der hier zu bearbeitenden Problemstellung liegt die subjektive Erfassung der Expositionshäufigkeiten wie auch der zu diesen Häufigkeiten gehörenden Intensitäten nicht vor. Genau genommen wäre eine Nutzung der Sekundärdaten daher nicht möglich, weil die Interpretation der Studienergebnisse auf einem sog. ökologischen Fehlschluss beruhen könnte (vgl. Sundmacher et al. 2014; Kreienbrock et al. 2012; Dreier et al. 2012; Khan/Zanuzdana 2011; Sugumaran et al. 2009).

Ob letztlich eine Datennutzung in Betracht gezogen werden sollte, lässt sich durch die Auseinandersetzung mit den drei wesentlichen Nachteilen von Sekundärdaten ableiten, die von Kreienbrock und Kollegen (2012: 66) zusammengefasst sind:

- a) Fehlende Nennerinformation, d. h., die Population unter Risiko ist nicht vollständig bekannt.
- b) Fehlendes Wissen über Risikofaktoren, wie bspw. Tabakkonsum.
- c) Unzureichende Standardisierung der Diagnosestellung: D. h., dass bei der Todesursachenstatistik die bescheinigten Todesursachen nicht vollständig sind oder auch mit Fehlern kodiert wurden. Obwohl die Diagnosestellung prinzipiell standardisiert ist, treten falsche Diagnosen oder auch fehlerhafte Kausalketten auf. Dabei sind Kausalketten bei näherer Betrachtung nicht unbedingt falsch aber eben unpräzise.

Lücken beinhalten möglicherweise auch die Krankenhausberichte, auf deren Basis die Krankenhausstatistik erstellt wird.

Daneben passen die von Forschern verwendeten Begrifflichkeiten nicht zwangsläufig zu den Begriffsbestimmungen und -abgrenzungen der datenerhebenden Institutionen (Kreienbrock et al. 2012; Dreier et al. 2012).

Insbesondere die Betrachtung von a) und b) lässt die Nutzbarkeit des Case-crossover-Design erkennen:

- a) Dadurch, dass im Case-crossover-Design eigentlich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Exposition am Tag des gesundheitlichen Endpunktes

---

modelliert wird, ergibt sich die Population unter Risiko faktisch. Es werden alle unter einer definierten Exposition aufgetretenen Fälle gewählt, diesen dann die Vergleichsexpositionen an Kontrolltagen zugespielt.

b) Im Case-crossover-Design fungieren Fälle als ihre eigenen Kontrollen. Risikofaktoren, wie etwa Geschlecht und Alter sowie gefährdende Lebensstile werden schon durch das Design aufgefangen (s. u. → Confounding).

Abweichende Diagnosestellungen sind in epidemiologischen Studien wohl nie auszuschließen, auch im vorliegenden Fall nicht. Allerdings lässt sich ableiten:

c) Die ggf. zu beschreibende Kausalkette könnte allenfalls unpräzise sein, da eine begrenzte Diagnoseanzahl nach der internationalen Studienlage und thermophysilogischer Plausibilität ausgewählt wurde. Für diese Fälle liegen sowohl für Mortalität als auch Morbidität große Fallzahlen vor. Auf unzureichende Standardisierung lässt sich also kontrollieren, indem aus den umfangreichen Datensätzen Zufallsstichproben gezogen werden. Anhand der Modellergebnisse von diesen Samples ist es dann möglich, die eigentlichen Analyseergebnisse zu validieren.

Eine wesentliche Stärke dieser Studie liegt in der Nutzung von subjektiven Mortalitäts- und Morbiditätsdaten. Ob nun etwa unter der Exposition Hitze die Diagnose Hitzeerschöpfung oder eine Diagnose aus dem Kreis der Herz-Kreislauf-Erkrankungen gestellt wurde, ist zweitrangig, da alle assoziierten Mortalitäts- und Morbiditätsdiagnosen eingehen. Sollte jedoch für einen Fall eine entlegene Diagnose gestellt worden sein, die nicht als hitzeassoziiert beschrieben ist, obwohl die tatsächlich zu stellende Diagnose es wäre, dann bleibt ein solcher Fall in vorliegender Studie unberücksichtigt.

Zahlreiche ökologische Relationen greifen - auch ohne subjektiven Bezug - auf aggregierte Mortalitäts- und Morbiditätsdaten zurück, um Kausalitätsbeziehungen zwischen den gesundheitlichen Endpunkten sowie Umweltfaktoren zu finden (Kreienbrock et al. 2012; vgl. Dreier et al. 2012). Gründe hierfür sind:

- Speziell für die Mortalität lässt sich sagen, dass sie als alleiniger epidemiologischer Endpunkt anzusehen ist, der ohne Zweifel festgestellt werden kann.
- Sofern Risiken für Todesursachen respektive Krankheiten gesucht werden, die nicht durch bedeutende Kofaktoren (bspw. Rauchen) verursacht werden können, sind Rückschlüsse durchaus möglich.

2.2. Ein Selection Bias, der aus der nicht randomisierten Auswahl an Fällen und Kontrollen resultiert, ist immer dann zu befürchten, wenn Fälle wie auch Kontrollen schwer zu einer Studienteilnahme zu bewegen sind. Bekannt ist in diesem Zusammenhang, dass sich Raucherinnen und Raucher in ihrer Bereitschaft zur Studienteilnahme eher zögerlich zeigen. Ein derart gelagerter Selection Bias tritt im Case-Crossover-Studien nicht auf, da die Fälle gleichsam ihre Kontrollen bilden. Dafür diskutieren Basu und Ostro (2002) die Möglichkeit für das Auftreten des sog. Neyman Bias im Case-Crossover-Ansatz. Der Neyman Bias oder auch Inzidenz-Prävalenz Bias tritt in Beobachtungsstudien dann auf, wenn anstatt von inzidenten Fällen in einem definierten Zeitraum schon existierende Fälle in die Betrachtung eingehen. Ist dies der Fall, dann steht der Risikofaktor ggf. mit der Krankheitsdauer bzw. mit der Krankheitsprognose in Verbindung. Im Kontext hitzeassoziierter Gesundheitsrisiken gehen zwangsläufig bestehende Grunderkrankungen in eine effektsensitive Analyse ein, da die Exposition Hitze ggf. zur fatalen Verschlechterung der Krankheiten beiträgt. Da in vorliegender Studie die Hitzeexposition und die Feinstaubexposition kurzfristige Einflussfaktoren repräsentieren, sollte dieses Problem nicht auftreten.

Mehrere Autoren diskutieren die Gefahr eines Selection Bias, sofern sich im Case-crossover-Design die Fallperiode mit Kontrollperioden überlagert. Oder auch dann, wenn Kontrollperioden eingehen, die einen deutlichen Kontrast zur Fallperiode aufweisen. Das käme vor, wenn etwa vergleichende Perioden aus den Herbst- oder Wintermonaten eingehen (Bateson/Schwartz 2001; Lumley/Levy 2000). Dass das stratifizierte Case-crossover-Design beidem vorbeugt, wurde im Kapitel 5.1 mit Rückgriff auf Basu und Samet (2005) gezeigt.

2.3. Ein Vergleich der Krankheitsinzidenz zwischen Gruppen mit unterschiedlichen Expositionen birgt immer auch die Gefahr eine (mit)wirkende Variable zu vernachlässigen, die systematisch zwischen den Studiengruppen variiert (Confounding Bias). Ein angenommener Effekt könnte teilweise auch durch sie erklärt sein. Ist dieses Merkmal sowohl mit der Exposition als auch mit dem Outcome assoziiert, spricht die Epidemiologie von einem Confounder (Kreienbrock et al. 2012; Ackermann 2010; Schumacher/Schulgen-Kristiansen 2008).

Wie angesprochen, fungieren im Case-crossover-Design die Fälle als ihre eigenen Kontrollen. Dadurch sind potentiell beeinflussende Confounder, beispielsweise

---

risikobehaftete Lebensstile, welche die Nutzung präventiver Maßnahmen u. U. einschränken, durch die Anlage der Studie kontrollierbar.

### **Betrachtung der Ergebnisse vor Kausalitätskriterien**

Die eingangs des Kapitels dargestellten Ergebnisse sind zunächst als Assoziationen aufzufassen. Erst die Fundierung der berechneten Zusammenhänge vor sog. Kausalitätskriterien (vgl. Kapitel 2.5) stützt ihre Evidenz (vgl. Rothman et al. 2008; Rothman/Greenland 2005).

Kreienbrock und Kollegen (2012: 59 f) erkennen Kausalität zwischen einem Risikofaktor und einem gesundheitlichen Endpunkt an, sofern folgende Kriterien erfüllt sind:

- Die Exposition geht der Erkrankung zeitlich voraus (hier bez. als **Zeitbezug**).
- Eine Veränderung in der Exposition geht mit einer Veränderung in der Krankheitshäufigkeit einher (hier bez. als **Effekt**).
- Die Assoziation von Risikofaktor und Krankheit ist nicht die Folge einer Assoziation dieser Faktoren mit einem dritten Faktor (allgemein bez. als **Confounding**).

### **Zeitbezug**

Mit Bezug auf die in Kapitel 2.5 dargestellte Abb. 2: **Retrospektive Forschung i. d. Epidemiologie** (Hilgers et al. 2007) ist die Auseinandersetzung mit dem zeitlichen Bezug auf die *Induktionszeit*, *Latenzzeit* und *Ausbruch* zu beziehen.

Bei der Analyse gesundheitlicher Risiken wird ganz überwiegend auf hitzeassoziierte Krankheiten zurückgegriffen (vgl. Kapitel 1.3.2). Die *Induktionszeit*, d. h., der Beginn ätiologischer Prozesse und/oder die Fortsetzung pathologischer Prozesse kann insofern berücksichtigt werden, als das Vorhandensein einer derartigen Pathologie durch Medizinerinnen oder Mediziner diagnostiziert wurde (vgl. Kapitel 2.4.1: **Biomedizinische Indikatoren**).

In der Studie handhabbarer sind *Latenzzeit* und *Ausbruch*: Die *Latenzzeit* wird fallbezogen berücksichtigt, indem das Case-crossover-Design jedem Fall 10 Vergleichstage zuspielt, 6 davon vor den Falltag. Da im statistischen Modell im Kern die Chance berechnet wird, ob die Veränderung der Exposition zur Chancensteigerung respektive Chancenreduktion auf den gesundheitlichen Endpunkt beiträgt, liegt die Berücksichtigung des zeitlichen Fortgangs der Exposition de facto vor. Der von Hilgers et al. (2007: 237) so bezeichnete *Ausbruch* wird hier naheliegenderweise als

Sterbetag → Falltag beziehungsweise Tag der Hospitalisation → Falltag angenommen.

### **Effekt**

In den Kapiteln 5.3 - 5.5 wurde die Relevanz der gesundheitlichen Gefährdung durch die Exposition Hitze und der Exposition Feinstaub belegt. Das Kapitel 5.3.2 dokumentiert die Gesundheitsrisiken nach Zunahme der Exposition. Das Regressionsmodell wurde in seiner Aussagekraft belegt (s. o.).

### **Confounding**

Am Beginn dieses Abschnittes erfolgte bereits die kritische Auseinandersetzung mit möglichem Confounding im Case-crossover-Design (**Sekundärdatenanalyse mit dem Case-crossover-Design**). Dort konnte gezeigt werden, dass das Case-crossover-Design Risikofaktoren, wie etwa Geschlecht und Alter sowie gefährdende Lebensstile, schon durch das Design weitgehend auffängt. An dieser Stelle wird dies noch mit einer wesentlichen Besonderheit der hier durchgeführten Studie bekräftigt. Anders als in den meisten ökologischen Studien werden sozusagen »(pseudo)-individualisierte« Daten genutzt. Fälle also, die unter Exposition (taggenau, nicht bezogen auf einen Monat oder ein Jahr) auftraten und nach Alter, Geschlecht und gestellter Diagnose differenzierbar sind.

Eine weitere Besonderheit ist, dass die Studie auf sehr große Datensätze zurückgreift. Die epidemiologische Beschäftigung mit spezifischen Risikofaktoren benötigt Daten über möglichst identische Bevölkerungsgruppen in vergleichbaren Raumeinheiten und über größere Zeiträume.

*»Es gilt generell, d.h. für jede ätiologische Fragestellung, also für jede Frage nach den Ursachen einer Erkrankung, dass sowohl der vermutete Risikofaktor als auch die interessierende Krankheit an einer größeren Personengruppe erfasst werden muss.« (Kreienbrock et al. 2012: 3)*

Da dies zutrifft, erscheinen die gegebenen Aussagen über die gesundheitlichen Risiken unter den Expositionen Hitze und Feinstaub durchaus tragbar. Denn der umfangreiche Datensatz bietet die Möglichkeit, eine große Anzahl an Stichproben zu ziehen und die zugrunde liegenden Hypothesen wiederholt zu prüfen. So wurde dies für die

---

hitzeassoziierte Morbidität auch realisiert. Die Ergebnisse fielen ganz überwiegend identisch aus.

*Nach der Betrachtung der berechneten Assoziationen vor den Kausalitätskriterien erscheint es durchaus möglich, in den Ergebnissen schlüssige Zusammenhänge zu sehen.*

### **6.5.2 Vergleich mit europäischen Studienergebnissen**

Bittner (2014) bemerkte in seiner Übersichtsarbeit die Unvereinbarkeit der in Deutschland thematisch relevanten Studienergebnisse. Ein Grund sieht der Autor in differierenden Hitzewellendefinitionen. Dieses Problem verdeutlichte schon Koppe (2004). In vorliegender Dissertation konnte und sollte es nicht um eine definitorische Fassung dessen gehen, was eine Hitzewelle ausmacht. Hilfreich erschien vielmehr die Nutzung der von Rothfus (1988) am National Weather Service der Vereinigten Staaten von Amerika genutzten thermophysiologischen Risikoniveaus. Den Risikostufen entsprechend gingen alle hitzeassoziierten Fälle unter der Exposition Heat Index  $\geq 80$  °F (27 °C) ein.

Sucht man die Vergleichbarkeit zu den in Deutschland und Europa publizierten Studien herzustellen, liegt es nahe, alle Tage mit Heat Index-Werten  $\geq 90$  °F ( $\geq 32,22$  °C) als eine Hitzeperiode aufzufassen und die im Case-crossover-Design zugespielten Vergleichstage mit den Vergleichsexpositionswerten als Kontrollperiode zu verstehen. Der mittlere Wert sämtlicher Tage mit Heat Index-Werten  $\geq 90$  °F ist 97,78 °F (36,66 °C), der Median 96,00 °F (35,55 °C). Mit 90 °F nutzt die hier implizit verwendete Hitzeperiode einen Cutpoint im Wertebereich der relevanten deutschen Studien. So definieren zum Beispiel: Hertel und Kollegen (2009) eine Hitzeperiode mit der maximalen Tagestemperatur 32 °C an 3 aufeinanderfolgenden Tagen. Heudorf und Meyer (2005) untersuchten die Hitzeperiode 3.8. - 12.8.2003 und übernahmen die Tageshöchstwerte von 35 °C und Tagesmitteltemperaturen von ca. 30 °C. Bittner und Kollegen (2013) fassen unter Hitzeperioden Tage mit Maximaltemperatur über 30 °C und einer täglichen Minimaltemperatur über 20 °C.

Vergleichbare europäische Arbeiten verstehen unter einer Hitzewelle Maximaltemperaturen  $> 35$  °C und Tagestiefsttemperaturen  $> 20$  °C, so Grizea und Kollegen (2005) für die Schweiz. Simón und Kollegen fassen die Exposition enger, indem sie Hitzetage für Spanien mit mittleren Temperaturen von mindestens 33 °C definieren. Eine weitere Alternative nutzen Johnson und Kollegen (2005) für ihre Studie in Eng-

land. Hitzetage sind hier solche, die mindestens 8 °C über einem 30igjährigen Mittel liegen.

Da die für Deutschland publizierten Studien nicht auf das Odds Ratio als Effektmaß zurückgreifen, ist es notwendig, die in den Studien angegebene prozentuale Exzessmortalität zur Einordnung der hier gewonnen Ergebnisse heranzuziehen. Das Odds Ratio kann problemlos in die prozentuale Risikoerhöhung umgerechnet werden.

Zur Prüfung auf Anschlussfähigkeit im deutschen und auch europäischen Kontext erscheint das prognostizierte mittlere Risiko von 22 % aus dem Temperaturbereich 90 - 105 °F angemessen (s. Kapitel 5.3.2, Abb. 59: **Vorhergesagte Erfolgswahrscheinlichkeiten unter Exposition**). Zum Vergleich zeigt folgende Tabelle die Ergebnisse aus europäischen Studien.

Tabelle 35 Exzessmortalität in Deutschland & Europa 2003

Authors	Region	Heatwave	Case definition	Excess mortality	Subpopulations sig.
Gabriel/Endlicher 2011	Brandenburg and Berlin	2006	Overall mortality	17%	no
Bittner et al. 2013	Freiburg and Rostock	2003	Overall mortality	33% (sig.) u. 26% (nicht sig.)	no
Hertel et al. 2009	Essen	2003	selected ICD-10 diagnoses	27%	no
Heudorf/Meyer 2005	Frankfurt am Main	2003	Overall mortality	97%	yes, high age class
Jendritzky/Koppe 2004	Baden-Wuerttemberg	2003	Overall mortality	20%	yes, high age class
Garssen et al. 2005	Netherlands	2003	Overall mortality	3-5%	yes
Hutter et al. 2007	Austria	2003	Overall mortality	13%	yes, high age class
Grizea et al. 2005	Switzerland	2003	Overall mortality	7%	no
Simón et al. 2005	Spain	2003	Overall mortality	8-17%	yes, high age class
Michelozzi et al. 2005	Italy	2003	Overall mortality	17-48%	yes, high age class
Johnson et al. 2005	England	2003	Overall mortality	16%	yes, high age class

Quelle: eigene Darstellung

Die Tabelle zeigt die für Deutschland und ausgewählte europäische Nachbarn festgestellte hitzeassoziierte Exzessmortalität (2 Spalte von li.). Dargestellt sind: Raumbezug, Jahr der untersuchten Hitzewelle, Falldefinition und ob Subpopulationen betrachtet wurden.

Die Annäherung über das oben dargestellte Vorgehen zeigt, dass das in dieser Studie berechnete zusätzliche Mortalitätsrisiko unter der Exposition Hitze, ergänzt durch die

---

Exposition Feinstaub, durchaus zu den bisher vorliegenden Erkenntnissen für Deutschland passt. Es liegt teilweise über dem Niveau von Studien aus benachbarten Ländern, wobei die bei diesen Arbeiten genutzten Hitzewellendefinitionen teils deutlich vom hier gewählten Vorgehen abweichen.

Bei stringenter Betrachtung kann das Analyseergebnis lediglich mit dem von Hertel und Kollegen (2009) verglichen werden, da in dieser Studie ebenfalls ICD-10 Diagnosen selektiert wurden (I00 - I99; J19 - J99).

Bereits im Kapitel 1.2 werden zahlreiche europäische Studienergebnisse referiert. Dort veranschaulicht Tabelle 1 mit dem Titel: **Hitzeassoziierte Mortalität 2003 in Europa** die festgestellte Übersterblichkeit zwischen 5 - 78 % während der Hitzeperiode 2003. Die großen Unterschiede sind dort auch mit der räumlichen Differenzierung der Studienregionen sowie den betrachteten Populationen zu erklären.

### 6.5.3 Erkenntnisse im allgemeinen Ätiologiemodell

Die Erforschung von hitzeassoziierten Gesundheitsrisiken folgt hier dem von Badura und von dem Knesebeck (2012: 195) skizzierten »*naturwissenschaftlich-somatischen Kausalpfad*«. Der analytische Zugang zur Entstehung respektive Verschlechterung einer hitzeassoziierten Krankheit wird demgemäß in einem professionellen Bezugssystem über Gesundheit und Krankheit gesucht (Kapitel 2.3 & 2.4). Im professionellen Bezugssystem werden unphysiologische von physiologischen Regelungs- und Funktionszuständen abgegrenzt, indem der durch das Medizinsystem definierte Zustand krank nach ICD-10-Kodierung übernommen wird (Klemperer 2012; Schwartz et al. 2012).

Zudem wurde im Kapitel 2.4.2 ausgeführt, dass soziale Bezüge, die regionale Erwerbsstruktur, Arbeitslosigkeit und Höhe der Einkommen auf spezifische Mortalitätsrisiken Einfluss nehmen (Schwartz et al. 2012; Starfield 2007; Wilkinson/Pickett 2006).

Die gewonnen Erkenntnisse werden unter diesen Aspekten im **Grundmodell der allgemeinen Ätiologie** (Kapitel 2.5) erhellt.

**Ebene 1:** Die natürliche Umwelt beeinflusst die Lebensbedingungen. Ebenso nimmt die soziale Umwelt auf die Lebensbedingungen Einfluss:

- Die räumliche Verortung ist durchaus wichtig. Insbesondere Menschen aus küstennahen aber auch einzelnen westlichen, südöstlichen, mitteldeutschen und südlichen Raumeinheiten tragen höhere Gesundheitsrisiken.



- Menschen, die in Beobachtungseinheiten mit geringer Siedlungsdichte leben, haben ein höheres Gesundheitsrisiko.
- Beobachtungseinheiten mit einem hohen Anteil an Einwohnern über 85 Jahre stehen für ein größeres Risiko.
- Leben Menschen mit einer hitzeassoziierten Krankheit in räumlichen Einheiten mit einem hohen Anteil Arbeitsloser, steigt ihr gesundheitliches Risiko unter Exposition.
- Das Risiko nimmt insbesondere auch dann zu, wenn viele Menschen mit privaten Schulden in einer Beobachtungseinheit leben.
- Ein hoher Anteil naturnähere Fläche trägt zu einer kleinräumigen Zunahme des Risikos bei.
- Empfangen Pflegebedürftige aus einer Raumeinheit gemeinsam mit anderen Pflegebedürftigen Pflegegeld, dann reduziert sich das Risiko für sie.
- Menschen, die in Raumeinheiten mit einer hohen Quote Teilzeitbeschäftigte leben, sind weniger gefährdet.
- Das Risiko ist für Menschen in Beobachtungseinheiten geringer, sofern die Waldfläche je Einwohner sehr hoch ist.

Ebene 2: Umwelt- und Lebensbedingungen nehmen Einfluss auf die Suszeptibilität. Die Expositionen Hitze und Feinstaub entfalten in Abhängigkeit der zuvor genannten Konstellationen ihr gesundheitliches Risikopotenzial:

- *Kleinräumige Arbeitsbedingungen:* Teilzeitbeschäftigte haben die Möglichkeit sich um ihre zu pflegenden beziehungsweise hilfsbedürftigen Angehörigen oder Bekannten zu kümmern. Oder: In Teilzeit tätige Pflegekräfte versorgen pflegebedürftige Menschen. Hingegen scheint hohe Arbeitslosigkeit nicht für sozial unterstützendes bzw. schützendes Potenzial zu sprechen. Oder, Menschen, die in Beobachtungseinheiten mit einem hohen Arbeitslosenanteil leben, sind selbst finanziell schlechtergestellt und können somit geeignete Präventionsmaßnahmen nicht ergreifen.
- *Versorgungspflegebedürftiger Menschen:* Pflegebedürftige Menschen erhalten Pflegegeld, wenn sie von nahestehenden Personen gepflegt werden. Insofern lässt sich von regelmäßigen Sozialkontakten ausgehen. Und/oder: Das Pflegegeld ermöglicht Pflegebedürftigen, eigenschützende Maßnahmen zu ergreifen, seien diese nun bewusst oder unbewusst auf die Exposition Hitze abgestimmt.
- Überblickend sprechen die beiden zuvor genannten Aspekte für die *Relevanz sozialer Unterstützung*, die vordringlich aus dem privaten Umfeld und nachgeordnet aus dem professionellen Pflegekontext stammen kann.
- Der Kontextfaktor Anteil Waldfläche je Einwohner/in beeinflusst die Ausprägung der Exposition Hitze. Leicht lässt sich ableiten, dass Waldflächen den *klimatischen Komfort* an heißen Tagen verbessern, da sie das Aufheizen von anliegenden Sied-

---

lungsflächen reduzieren. Wälder dienen als Luftaustauschregionen (Luftleitbahnen), aus denen im Sommer kühle Luft in naheliegende Städte bzw. Gemeinden einströmt.

- Der eher protektive Einfluss zunehmender Siedlungsdichte ist nicht so einfach abzuleiten. Ein Grund könnte sein, dass mit zunehmender Einwohnerzahl auch das *soziale Unterstützungspotenzial* zunimmt.
- Das höhere Risiko in Beobachtungseinheiten mit geringer Siedlungsdichte scheint durch das dort *höhere Alter* bei den Fällen begründet zu sein. So verstärkt höheres Alter das gesundheitliche Risiko beispielsweise in den dünn besiedelten Landkreisen: Berchtesgadener Land, Tuttlingen, Baden Baden oder auch Hochtaunuskreis, in dicht besiedelten Städten wie Frankfurt am Main, Berlin, Hamburg und auch Bielefeld nicht.
- Auch der ungünstige wirkende Faktor Anteil naturnähere Fläche lässt letztlich die Frage offen, wie das mit ihm verbundene Risiko erklärt werden könnte. Wesentliche Anteile dieser Flächenbeschreibung entfallen auf Abbauland, Moor, Heide und Unland. Es kann vermutet werden, dass die Bearbeitung des Abbaulandes *ungünstige lufthygienische Konstellationen* verursacht.

Nach dem von Eis (2012: 95) vorgelegten Grundmodell der allgemeinen Ätiologie resultieren nach dieser Charakterisierung unter den Expositionen Hitze und Feinstaub gesundheitliche Risiken, die dazu beitragen, dass Krankheitsvorstadien oder Krankheit ungünstig beeinflusst werden. Die Risikozunahme variiert in Abhängigkeit der Temperatursteigerung von aufeinanderfolgenden Tagen mit Heat Index-Werten  $\geq 80$  °F, abzüglich/zuzüglich der mit den genannten Kontextfaktoren verbundenen Risikodifferenzen.

Zur Interpretation der Erkenntnisse nach dem Grundmodell der allgemeinen Ätiologie ist es wichtig zu wissen, dass der Begründungszusammenhang nicht notwendigerweise ein kausalanalytischer sein muss (Hurrelmann 2006a: 86; vgl. Pflanz 1973). Das ist insofern relevant, als Teilfaktoren möglicher kausaler Zusammenhänge unberücksichtigt bleiben müssen. So kann bspw. das subjektive Gesundheitsverhalten mit dem gewählten Studiendesign nicht expliziert werden.

## 6.6 Perspektiven für die weitere Arbeit

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse ist es möglich, Perspektiven für die weitere theoretische und methodische Arbeit sowie die Praxis zu entwickeln.

### Perspektiven für die weitere methodische Arbeit

Aus den Abschnitten zur Modelldiagnostik geht hervor, dass noch zu erklärende Variabilität in den Regressionsmodellen vorliegt. Um die Variabilität zu reduzieren und dadurch den Erkenntnisgewinn möglicherweise zu erhöhen, wurden für Folgearbeiten Adaptationen eruiert:

- Die Berücksichtigung weiterer Umweltfaktoren, wie etwa PM<sub>25</sub> oder Ozon, erscheint naheliegend, da schon das Modell mit den Expositionen Heat Index und PM<sub>10</sub> einen besseren Fit hat als jenes mit der alleinigen Berücksichtigung der Exposition Heat Index.
- Die Möglichkeit auf Ebene der 439 kreisfreien Städte, Landkreise, etc. zu forschen und dann die Ergebnisse einander gegenüberzustellen, bietet einige Ansätze zur Weiterarbeit. So macht es sicher Sinn, weiter nach möglichen Ursachen für die unterschiedlichen Risikoniveaus unter den Raumeinheiten zu forschen. Etwa indem die Charakteristika (subjektive Faktoren: Alter u. Geschlecht sowie Vorerkrankung; Kontextfaktoren: Bildung, Arbeit u. Einkommen) der Einheiten mit niedrigen, durchschnittlichen und hohen Odds Ratios tiefer elaboriert werden.
- Bei der Studienplanung war angedacht, Postleitzahlregionen als unterste Beobachtungseinheiten zu wählen. Nach Herrn Dr. Janisch, dem Leiter der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, sei dies flächendeckend für Deutschland unmöglich, da dem Antrag auf Datennutzung hierfür nicht alle Leiter der Statistischen Landesämter zustimmen würden. Einige Leiter seien aber hierzu bereit. Die Verkleinerung der Beobachtungseinheiten birgt noch Potenzial zur kleinräumigen Risikodifferenzierung. So könnte man ein Bundesland wählen und auf Ebene seiner Postleitzahlregionen forschen.
- Bei der Berücksichtigung anderer und oder kleinerer Beobachtungseinheiten könnte man in Betracht ziehen, Kontextfaktoren zu nutzen, die mit dem Mikrozensus im Jahr 2011 erhoben wurden. Ggf. entsteht dadurch ein differenzierteres Bild für den Einfluss der Faktoren: Bildung, Arbeit und Einkommen auf das hitzeassoziierte Mortalitäts- und Morbiditätsgeschehen.
- Ohnehin erscheint es sehr interessant, inwieweit die mit dem Mikrozensus erhobenen Kontextfaktoren auch ohne die Expositionen Hitze und Feinstaub mit den gesundheitlichen Endpunkten Mortalität und Morbidität in Bezug stehen. Im Sinne grundlegender Forschung würde sich anbieten die Analyse und Kartierung des von Schwartz et al. (2012: 58) auf Basis internationaler Studien postulierten Zusam-

---

menhangs »zwischen sozioökonomischen Bedingungen bzw. zwischen konjunkturell-wirtschaftlicher Lage und Gesundheit« für Deutschland an (vgl. Kapitel 2.4.2).

- Zahlreiche thermophysiologische Indizes finden in einschlägigen Studien Anwendung. Das sollte doch dazu veranlassen, einen Vergleich der Sensitivität ausgewählter Indikatoren für die Bezugsebene Bundesrepublik Deutschland vorzunehmen (vgl. Burkart et al. 2011). Die Nutzung einer Vollerhebung, wie sie hier bei den Mortalitätsdaten vorliegt, bietet für den Vergleich wohl die beste Grundlage.

### **Perspektive für die weitere methodische Arbeit**

- Zu gewählten Modellen gibt es beinahe immer Alternativen. Für die vorliegende Problemstellung ist das generalisierte additive Modell (GAM) eine solche. Im GAM erfolgt die Aufteilung der Kovariablen in zwei Gruppen. Eine Gruppe bilden jene Variablen, die über einen linearen Prädiktor eingehen. Eine weitere Gruppe nimmt auf die Zielvariable über eine komplexere Funktion Einfluss (vgl. Burkart et al. 2011; Peng 2008). Generalisierte additive Modelle verarbeiten Zeitreihen mit geglätteten Prädiktorverläufen. Nach Peng (2008) lässt sich das in der Dissertation verwendete Case-crossover-Design als Spezialfall einer Zeitreihenanalyse auffassen. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mittels GLM und GAM leistet gewiss einen wertvollen Beitrag zur Fortentwicklung der Methodik ökologischer Studien.

### **Perspektiven für die Praxis**

Nach dem »entscheidungsorientierten« Konzept der Lebensbereiche sind »kleine« oder auch »große Alternativen« zum Schutz der Gesundheit in den sozio-ökonomischen Handlungsfeldern zu suchen (Fehr 2005: 89; Kapitel 2.2). Da bei den Handlungsfeldern zwischen primären und sekundären Handlungsfeldern unterschieden wird, werden Perspektiven für die Praxis auch nach dieser Differenzierung abgeleitet.

Sekundäre Lebensbereiche (Rohstoffgewinnung, Energieversorgung, Abfallentsorgung, etc.)

Bei der Formulierung gesundheitspolitischer Ziele geht es bei diesen Lebensbereichen darum, dem Klimawandel durch die Etablierung wirksamer Maßnahmen zu begegnen. Notwendig sind Alternativen zur Reduzierung des anthropogen bedingten Klimawandelbeitrags (Krämer et al. 2013; Gerlinger 2013; Krämer et al. 2011; Beaglehole/Bonita 2008; Frumkin et al. 2008; Haines et al. 2006).

Für den Lebensbereich Energieversorgung sieht Fehr (2005) im kompletten Umstieg auf erneuerbare Energien eine große Alternative. Hier ist Deutschland in den letzten

Jahren schon einen großen Schritt gegangen. Allerdings hat das Bestreben den Energieverbrauch durch einen möglichst hohen Anteil aus erneuerbaren Energien zu decken nur wenig mit dem Klimaschutz und somit auch nur wenig mit dem klimatischen Gesundheitsschutz zu tun.

Als kleine Alternative macht Fehr (2005) die Nutzung von Katalysatoren aus. Dass die Emission von Luftschadstoffen ein sehr relevanter Ansatzpunkt ist, belegen die Odds Ratios für die Variable  $PM_{10}$ . Klar ist, Maßnahmen zur Luftreinhaltung müssen sowohl städtische als auch ländliche Regionen treffen. Menschen, die in dünn besiedelten Regionen leben, tragen teilweise ein hohes gesundheitliches Risiko unter der Exposition  $PM_{10}$ .

#### Primäre Lebensbereiche (Ernährung, Wohnen, Arbeit, etc.)

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse wird der Versuch unternommen, kleine Alternativen für die Lebensbereiche Wohnen und Arbeit abzuleiten.

Eine zentrale Präventionsstrategie sollte die Erhaltung sowie Stärkung der Selbsthilfekompetenz älterer und hochaltriger Menschen sein, die entweder noch nicht oder bereits Pflegegeld empfangen. Um den Verbleib Pflegebedürftiger im häuslichen Umfeld zu gewährleisten, existieren bereits zahlreiche Alternativen. Diese zielen zumeist auf die Anpassung des Wohnumfelds an die vorliegende Pflegesituation ab (bspw. Pflegebett, Rampe für Rollstuhl, etc.). Derartige Maßnahmen werden durch die Pflegekassen finanziert. Eine weitere hilfreiche Alternative könnte die Finanzierung eines Lieferservice durch die Pflegekassen sein. Ein Lieferservice könnte Pflegebedürftige mit notwendigen Waren versorgen, wobei Angehörige<sup>1</sup> und Bekannte, die überwiegend Heimpflege übernehmen, entlastet würden. Ein derartiges Unterstützungsangebot könnte in die von Gerlinger (2009: 342 f) angesprochenen alternativen Pflegebudgets integriert werden.

Im Lebensbereich Wohnen könnte eine kleine Alternative die Verwendung geeigneter Baumaterialien mit einem hohen Rückstrahlvermögen darstellen, da dadurch das Aufheizen der Außenwände von Gebäuden begrenzt und somit die thermische Belastung im Inneren reduziert werden würde (Henninger 2011; vgl. Gerlinger 2013). Gerade private Immobilien auf dem Land kämen für diese Alternative in Betracht.

---

<sup>1</sup> Immerhin werden bis zu 90 % der pflegebedürftigen und chronisch kranken Menschen von ihren Angehörigen versorgt (Schwartz et al. 2012: 349).

---

Auch wenn das gesundheitliche Risiko unter der Exposition Hitze in dicht besiedelten Beobachtungseinheiten im Vergleich zu ländlichen Raumeinheiten etwas niedriger ausfällt, so konnte das Risiko hier doch auf einem beachtenswerten Niveau belegt werden. Neben baulichen Schutzmaßnahmen könnte daher die adäquate Beschattung innerstädtischer Gebäude mit hochwachsenden Laubbäumen den Kühlbedarf von Gebäuden zusätzlich verringern (Endlicher 2012). Planerisch ginge es bei größeren Alternativen darum, die Aufteilung bzw. Verinselung freier (grüner)<sup>1</sup> Stadträume abzuwenden und dabei möglichst durch einen strukturellen Schutz zu sichern (Hilligardt 1998). Fehr (2009) spricht in diesem Zusammenhang von einer Fachplanung für den Gesundheitsschutz, die innerstädtische Wärmeinseln vermeidet und insgesamt das städtische Klima verbessert. Verhältnispräventive Maßnahmen obliegen demnach der Stadt- und Landschaftsplanung (Entsiegelung) sowie Architektur und Bauplanung (Dämmung an privaten und öffentlichen Bauten) (Katzschner/Jahn 2013; Endlicher 2012; Henninger 2011).

Eine Alternative im Lebensbereich Arbeit abzuleiten fällt etwas schwerer, denn die Dissertation beschäftigt sich nicht mit Arbeitslosigkeit und Teilzeitbeschäftigung. Es soll aber ein Blick auf die Teilzeitbeschäftigung gelegt werden, die nach dem allgemeinen Ätiologiemodell als salutogener Kontextfaktor abgeleitet werden kann. Sofern Teilzeitbeschäftigung, wie sie etwa in der Pflege häufig vorkommt (Simon 2010; Gerlinger 2009), von Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern nicht angestrebt, vielmehr mangels Alternativen in Kauf genommen wird, könnte eine gesetzlich geregelte Aufstockung des Verdienstes als Ausgleich zur Vollbeschäftigung eine kleine Alternative im Lebensbereich Arbeit sein. Gerade der Pflegeberuf könnte so attraktiver und die Versorgung auf dem Land sicherer werden. Die Ausgleichszahlung darf nicht stigmatisieren, d. h., insbesondere nicht im Lichte der Hartz-IV-Aufstockung erscheinen (vgl. Sambor 2010). Damit würde ein Attraktivitätsplus sicher konterkariert.

### **Abgrenzung von anderen Praxisperspektiven**

Zur Prävention klimabedingter Gesundheitsrisiken werden immer wieder die Akteure der Gesundheitsversorgung genannt (O'Neill 2009; Bittner 2014). In Deutschland

---

<sup>1</sup> Brei und Hornberg (2009) nehmen in ihrer Publikation »Die Bedeutung von Stadtgrün aus gesundheitswissenschaftlicher Sicht« u. a. auch auf die für das Klima förderlichen Effekte innerstädtischen Grüns Bezug. Claßen und Kollegen (2013) untermauern dies mit ihrer Expertise.

wird darüber diskutiert, ob Pflegekräfte eigens hierfür geschult werden sollten. Für das Personal von Alten- und Pflegeheimen ist dies durchaus anzuerkennen, allerdings dort auch schon etabliert. Somit stellt sich die Frage, welche Akteure das nun wo genau sein könnten. Es ist durchaus davon auszugehen, dass Medizinerinnen und Mediziner der Primärversorgung Krankheiten aufgrund von Hitze adäquat diagnostizieren und behandeln. Gleiches ist für die typischen Krankheiten (Herz-Kreislauf-Erkrankungen; Atemwegserkrankungen, Krankheiten des Urogenitalsystems) anzuerkennen, die durch die Exposition Hitze in ihrer Ausprägung getriggert werden. Darüber hinaus steht zu erwarten, dass Hausärztinnen und Hausärzte ihren Patienten vor und während Hitzetagen raten entsprechende Schutzmaßnahmen (ausreichende Flüssigkeitszufuhr, Aufsuchen kühler Umgebungen, etc.) zu ergreifen. Auch ambulant tätige Pflegekräfte gehen bereits mit den wesentlichen Präventionsratschlägen auf ihre Klienten zu. Daher übernimmt die Dissertation ganz bewusst das von Fehr (2005) vorgeschlagene Konzept der Lebensbereiche mit seinem »entscheidungsorientierten« Ansatz. Nachhaltige Präventionsmaßnahmen scheinen im Sinne »kleiner« und »großer Alternativen« im Kontext von Stadt- und Landentwicklung, Stadtplanung und Stadt- wie auch Sanierung auf dem Land unter gesundheitsförderlichen Gesichtspunkten umsetzbar. Das entspricht in Gänze der Charta für Umwelt und Gesundheit, die den Anspruch jedes Menschen auf eine Umwelt mit bestmöglichen Voraussetzungen für Gesundheit und Wohlbefinden artikuliert (WHO 1989).

#### Weshalb ist es notwendig, gesundheitsschützende Politiken im Sinne kleiner Alternativen durchzusetzen?

Wie die Expertisen von Fleßa und Greiner (2013) sowie Gerlinger (2013) zeigen, sind sozial-adaptive Innovationen unter ganz spezifischen Bedingungen realisierbar. Diese scheinen jedoch für notwendige Anpassungsmaßnahmen an klimawandelbedingte Gesundheitsrisiken nur in Einzelpunkten gegeben. Am ehesten sind technische Innovationen durchsetzbar, da derartige Neuerungen traditionell gute Etablierungschancen besitzen. Bauliche Innovationen sollten demgemäß gut umsetzbar sein. Maßnahmen der Stadt- und Raumplanung werden sich nur eingeschränkt als technische Innovation darstellen lassen. Die Begründung der Notwendigkeit zur Entsiegelung ergibt sich aber aus der in der Stadt- und Raumplanung überaus relevanten Kategorie »Schutzgut Mensch« (Katzschner/Jahn 2013: 208). Mit vorliegenden Ergebnissen erscheint es durchaus möglich, die Sicherung klimarelevanter Flächen

(Luftleitbahnen, Frischluftentstehungsflächen) zu begründen (vgl. Katzschner/Jahn 2013; Endlicher 2012).

Auch die mit der ambulanten Pflege verbundenen Aspekte Selbsthilfekompetenz und angemessene Vergütung pflegerischer Arbeit, insbesondere auch der Teilzeitbeschäftigung, müssten mit pflegeeigenen Begründungszusammenhängen - Schlagwort: ambulant vor stationär - als kleine Alternativen versehen werden (vgl. Simon 2010; Gerlinger 2009), da klimabedingte Gesundheitsrisiken im pflegerischen Kontext nur eingeschränkt zur Prävention veranlassen.



## 7. Schlussfolgerung

Nach der Expertise des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC oder auch Weltklimarat) beeinträchtigen Klimawandel und vermehrte Klimavariabilität in zunehmendem Maß die Lebensbedingungen des Menschen. Für Europa konstatiert der Weltklimarat unmittelbare Gesundheitsrisiken aufgrund vermehrt auftretender Hitzeextreme (IPCC 2007; IPCC 2013). Hitzebedingte Gesundheitsfolgen sind für die europäische Region bereits belegt (Zebisch et al. 2005; Nogueira et al. 2005; Garssen et al. 2005; Michelozzi et al. 2007; Hutter et al. 2007). Mit Blick auf Deutschland liegen Studien vor, die das hitzeassoziierte Risiko auf den Ebenen Bundesland (2 Länder) sowie kreisfreie Stadt (5 Städte) belegen. Für einen Kreis war eine hitzeassoziierte Gefährdung nicht feststellbar (Bittner 2014; Gabriel/Endlicher 2011; Hertel et al. 2009; Heudorf/Meyer 2005). Ganz überwiegend gemein ist den Arbeiten, dass sie nicht für die Exposition Feinstaub adjustieren (Hertel et al. 2009; Bittner 2014). Die gesundheitlichen Folgen durch die fortwährende oder auch kurzfristige Exposition Feinstaub sind ebenfalls bereits belegt (vgl. Pinheiro et al. 2014; Shaposhnikov et al. 2014; Ahmadnezhad et al. 2013; Kan et al. 2012; Jahn et al. 2011).

Angenommen wurde vor diesem Hintergrund, dass Hitzeextreme das Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko in Deutschland, und somit auch auf untergeordneten räumlichen Einheiten, in unterschiedlichem Ausmaß erhöhen. In diesem Zusammenhang erschien die Beeinflussung des Risikos durch kleinräumige Charakteristika (sozio-ökonomische, alters- und siedlungsstrukturelle, Flächennutzung, etc.) naheliegend. Ebenfalls angenommen wurde, dass die Belastung der Luft mit der Feinstaubfraktion  $PM_{10}$  auf kleinräumiger Bezugsebene das hitzeassoziierte Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko moderiert. Aus diesen Annahmen ergab sich wiederum die Hypothese, dass die Stadt- und Raumplanung ggf. gesundheitsschützende Maßnahmen in ihre Konzeptionen integrieren sollte.

Daneben führten die Erkenntnisse aus den einschlägigen Studien zu der Vermutung, dass ältere Menschen in besonderem Maße gefährdet sind.

Ziel der Studie war es daher, das gesundheitliche Risiko unter den Expositionen Hitze und Feinstaub nach subjektiven (Vorerkrankung, Alter und Geschlecht) und auch kontextuellen (Bildung, Einkommen, Wohnen, Wohnumfeld) Vulnerabilitäts-

faktoren auf groß-, mittel- und kleinräumiger Bezugsebene herauszuarbeiten. Berücksichtigt wurden die Ebenen Bundesrepublik Deutschland, siedlungsstruktureller Kreistyp und Gebietskörperschaft. Zu den Gebietskörperschaften gehören 439 kreisfreie Städte, Landkreise, Kreise, Stadtkreise, Stadtverbände und eine Hansestadt in Deutschland.

Zu diesem Zweck wurden vom Deutschen Wetterdienst abgegebene Klimadaten und vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellte Feinstaubdaten (PM<sub>10</sub>) geostatistisch für die Studie nutzbar gemacht. Ebenfalls aufbereitet wurden Indikatoren zur Stadt- und Raumplanung, welche das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung vorhält. Mortalitäts- und Morbiditätsdaten gaben die Statistischen Ämter des Bundes und der Länder auf Ebene der Gebietskörperschaften taggenau für den Zeitraum 2002 - 2006 zur Nutzung frei.

Zur Erforschung der Auswirkung der Expositionen auf das Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko kam das Case-crossover-Design zur Anwendung. Drei statistische Analyseverfahren wurden genutzt: 1. Logit-Modell, 2. geostatistisches Regressionsmodell und 3. gemischtes lineares Regressionsmodell.

Das Analyseergebnis belegt für die Bundesrepublik Deutschland und untergeordnete Raumeinheiten das gesundheitliche Risiko durch die Expositionen Hitze und Feinstaub. Beide Expositionen sind in Kombination oder auch bei alleinigem Auftreten als Risikofaktoren anzuerkennen. Treten hohe Umgebungstemperaturen gemeinsam mit hohen PM<sub>10</sub>-Konzentrationen auf, dann ist ein additives Risiko zu konstatieren.

Das Mortalitätsrisiko liegt über dem Morbiditätsrisiko.

Zwischen den Gebietskörperschaften divergiert das Gesundheitsrisiko. Für ländliche, sehr dünn besiedelte Regionen waren teilweise hohe Risiken unter Hitzeexposition festzustellen. Dicht wie auch sehr dicht besiedelte Beobachtungseinheiten verzeichnen beachtenswerte Hitzerrisiken. Hier ist das gesundheitliche Risiko durch die Feinstaubexposition bei den am dichtesten besiedelten Einheiten zumeist höher einzuordnen. Es konnte allerdings auch festgestellt werden, dass die Belastung durch Feinstaub in ländlichen Regionen zu notablen Gesundheitsrisiken führt.

Die Kontextfaktoren Empfänger von Pflegegeld, Quote Teilzeitbeschäftigte, Waldfläche je Einwohner und Siedlungsdichte gehen als protektive Faktoren aus der Analyse hervor. Menschen mit einer hitzeassoziierten Krankheit, die in Beobachtungsein-

heiten mit hohen Anteilen dieser Faktoren leben, sind sonach unter der Exposition Hitze weniger gefährdet. Risikoverstärkend wirken die Kontextfaktoren Arbeitslosigkeit und Schuldnerquote. Für Menschen, bei denen eine hitzeassoziierte Krankheit diagnostiziert wurde, und die in Gebietskörperschaften mit hohen Anteilen beider Faktoren leben, womöglich selbst auch ökonomisch vulnerabel sind, bedeutet dies eine höhere gesundheitliche Gefährdung unter Hitzeexposition.

Das Geschlecht beeinflusst das hitzeassoziierte Gesundheitsrisiko in Deutschland nicht. Zunehmendes Alter hat in Gebieten mit geringer Siedlungsdichte einen risikoverstärkenden Einfluss. Gründe hierfür können das hohe Durchschnittsalter und nicht ausreichende soziale Unterstützung im ländlichen Raum sein.

Es steht zu bedenken, dass die berechneten Risiken auf Menschen mit hitzeassoziierten Krankheiten bei Außentemperaturen  $\geq 80$  °F ( $\geq 27$  °C) zu übertragen sind.

Da die Feinstaubexposition nach dem Auftreten der Exposition Hitze selektiert wurde, erscheint die Interpretation der Gesundheitsgefährdung durch die Exposition PM<sub>10</sub> erst in Abhängigkeit der Heat-Index-Werte  $\geq 80$  °F in der Umgebung angezeigt. Hinsichtlich der geostatistischen Modellierung fehlender PM<sub>10</sub>-Werte ist von einer Unterschätzung der tatsächlichen Konzentrationshöhe auszugehen, da die Erhebung der Feinstaubkonzentration in der Fläche kleinräumige Konzentrationsvariabilitäten nicht durchgängig abbildet. Dieses Problem kann das geostatistische Modell nur ansatzweise lösen.

Da im Untersuchungszeitraum Gebietsreformen erfolgten, wurden den vormals existierenden Beobachtungseinheiten kleinräumige Mittelwerte bei den Kontextfaktoren zugewiesen, was ggf. zu Verzerrungen geführt hat.

Eine wesentliche mittelbar präventive Maßnahme ist in der Sicherung häuslicher Pflege zu sehen. Menschen, die von nahestehenden Personen gepflegt werden, tragen ein reduziertes Risiko. Nach vorliegenden Daten übernehmen wohl Teilzeitbeschäftigte oft pflegerische Aufgaben, denn Teilzeitbeschäftigung ist ein relevanter protektiver Kontextfaktor. Daraus lässt sich die gesellschaftliche Aufgabe ableiten, derartige Beschäftigungsformen auf dem Land attraktiv auszugestalten. Die Relevanz sozialer Unterstützung ist gerade vor dem Hintergrund des demografischen Wandels unbestritten.

Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe besteht zweifellos auch in der Bekämpfung der Arbeitslosigkeit, da Arbeitslose wohl nicht den ökonomischen Spielraum haben,

um gesundheitsschützende Maßnahmen zu ergreifen. Dieser ist aber gerade dann wichtig, wenn es um den Schutz vor schwerlich fassbaren Gesundheitsrisiken geht.

Eine direkte Schutzmaßnahme ist in der Berücksichtigung thermischer Risiken bei der Planung von Neubauten und Modernisierung zu sehen (Verwendung hitzeabweisender Dämmstoffe). Im Besonderen auch in ländlichen Regionen sollte dies beachtet werden, da adäquate Dämmung die thermische Belastung in Gebäuden reduziert und somit Abweichungen vom thermischen Komfort verringert. Auch diese Präventionsmaßnahme könnte gesellschaftlich forciert werden, indem etwa zielgerichtete Förderstrukturen den Anreiz zur klimaorientierten Sanierung erhöhen.

Eine weitere schützende Maßnahme liegt in der Erhaltung und Extensivierung von Waldflächen, weil sie u. a. Siedlungen und Städte mit kühlender Frischluft versorgen.

Übergeordnetes Anliegen aller gesellschaftlichen Akteure muss es sein, die anthropogene Klimamodifikation, also die lufthygienische Veränderung durch Abwärme und Schadstoffemission, deutlich zu begrenzen, damit gesundheitliche Risiken ausgeschlossen beziehungsweise minimiert werden.

Ein wesentliches Anliegen der Public Health-Forschung ist es, die gesundheitliche Situation der Bevölkerung respektive von Bevölkerungsgruppen zu beurteilen, wobei vornehmlich epidemiologische Studien erkenntnisgebend sind (*Assessment*). Mit dem Blick auf gesundheitliche Risiken unter den Expositionen Hitze und Feinstaub konnte dies mit vorliegender Dissertation für die Bundesrepublik Deutschland und untergeordneten Raumeinheiten realisiert werden. Präventionsmaßnahmen im Sinne kleiner Alternativen waren abzuleiten. Weitere Forschung erscheint notwendig, um alternative Handlungsoptionen zu identifizieren. Zielgerichtete Forschung orientiert sich dabei an der im Kapitel 1.1 **Regionale Risiken des Klimawandels** dargestellten Konzeptualisierung: **Klimawandelbedingte bzw. klimavariabilitätsbedingte Risiken** (Abbildung 1).

## **Anhangsverzeichnis**

Die in den Kapiteln benannten Anhänge sind ohne fortlaufende Nummerierung auf die beigelegte CD gebrannt.

Anhänge nach Kapitelbezug:

- Hauptdimensionen der ökologischen Perspektive
- Datensatzbeschreibung Todesursachenstatistik
- Datensatzbeschreibung Krankenhausstatistik
- Erhebungsbogen Krankenhausstatistik
- Allgemeine Klimaauskunft DWD
- Hauptamtliches Stationsmessnetz des DWD
- Anzahl Messtage je Messstation
- National Weather Service Heat Index Chart
- Hitze und Feinstaubexposition Tuttlingen und Ostvorpommern

Zusätzlich angefügt sind:

- Hitzeassoziierte ICD-10-Diagnosen
- Verfahrensbeschreibung und Erhebungsmerkmale

**CD mit Anhängen**

---

## Literatur

Ackermann H (2010) Grundlagen der medizinischen Biometrie. 6. Aufl., Hochheim, Darmstadt: epsilon-Verlag

Aden H (2012) Umweltpolitik. Wiesbaden: Springer Fachmedien

Ahmadnezhad E, Holakouie Naieni K, Ardalan A, Mahmoodi M, Yunesian M, Naddafi K, Mesdaghinia A R (2013) Excess mortality during heat waves, Tehran Iran: An ecological time-series study. *Journal of research in health sciences*, 13(1), 24-31

Aldstadt J (2010) Spatial Clustering. In: Fischer M M, Getis A (2010) *Handbook of applied spatial analysis: software tools, methods and applications*. Heidelberg: Springer

Altgeld T, Kickbusch I (2012) Gesundheitsförderung und Prävention. In: Schwartz F W, Walter U, Siegrist J, Kolip P, Leidl R, Dierks M L, Busse R, Schneider N (Hrsg.) (2012) *Public Health. Gesundheit und Gesundheitswesen*. 3. Aufl., München: Urban & Fischer

Alvin T, Burrows T (1900) *Hot Waves : conditions which produce them, and their effect on agriculture*. Washington, D.C. : U.S. Dept. of Agriculture

Anderson GB, Bell ML, Peng RD (2013) Methods to calculate the Heat Index as an exposure metric in environmental health research. *Environ Health Perspect* 121:1111–1119; <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1206273>, letzter Aufruf 08.11.2014

Anselin L (1988) *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Springer-Science + Business Media, B.V., ISBN 978-90-481-8311-1

Anselin L (1995) Local indicators of spatial association - LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115

ANSI/ASHRAE (2014) Standard 55-2013. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. [www.almasesepahan.com/.../ASHRAE\\_Thermal\\_Co](http://www.almasesepahan.com/.../ASHRAE_Thermal_Co), letzter Aufruf 09.11.2014

Armstrong M (1998) *Basic Linear Geostatistics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

Auchincloss AH, Gebreab SY, Mair C, Diez Roux AV (2012) A Review of Spatial Methods in Epidemiology, 2000–2010. *Annu Rev Public Health* 33:107–122. doi: 10.1146/annurev-publhealth-031811-124655

---

Badura B, von dem Knesebeck O (2012) Soziologische Grundlagen der Gesundheitswissenschaften. In: Hurrelmann K, Razum O (2012) Handbuch Gesundheitswissenschaften. Weinheim: Beltz Juventa

Bambrick HJ, Capon AG, Barnett GB, Matthew R, Burton B, Burton A (2011) Climate Change and Health in the Urban Environment: Adaptation Opportunities in Australian Cities. *Asia-Pacific Journal of Public Health* 23:67S–79S. doi: 10.1177/1010539510391774

Baltes M M, Maas I, Wilms H-U, Borchelt M (2010) Alltagskompetenz im Alter: Theoretische Überlegungen und empirische Befunde. In: Lindenberger U, Smith J, Mayer K-U, Baltes P B (2010) *Die Berliner Altersstudie*. 3. Aufl. Berlin: Akademie Verlag

Bahrenberg H G, Giese E, Mevenkamp N, Nipper J (2008) *Statistische Methoden in der Geographie*. Band 2: Multivariate Statistik. Stuttgart: Bornträger Verlagsbuchhandlung

Banerjee S, Carlin B P, Gelfand A E (2014) *Hierarchical modeling and analysis for spatial data*. Second Edition, Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC Press

Basara J B, Basara H G, Illston B G, Crawford K C (2010) The impact of the urban heat island during an intense heat wave in Oklahoma City. *Advances in Meteorology*, 2010

Basu R, Samet M J (2002) Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence. *Epidemiologic Reviews* 24:190–202. doi: 10.1093/epirev/mxf007

Basu R, Dominici F, Samet J M (2005) Temperature and mortality among the elderly in the Uni-tes States: a comparison of epidemiologic methods. *Epidemiology Jan*; 16(1): 58-66

Basu R (2009) High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*, 8:40 doi:10.1186/1476-069X-8-40

Basu R, Ostro BD (2008) A multicounty analysis identifying the populations vulnerable to mortality associated with high ambient temperature in California. *American Journal of Epidemiology* 168:632–637. doi: 10.1093/Aje/Kwn170

Bateson TF, Schwartz J (2001) Selection bias and confounding in case-crossover analyses of environmental time-series data. *Epidemiology*. 2001 Nov;12(6):654-61

Beaglehole R, Bonita R (2008) Global public health: a scorecard. *The Lancet*, 372(9654)



- 
- Beale L, Abellan JJ, Hodgson S, Jarup L (2008) Methodologic Issues and Approaches to Spatial Epidemiology. Environmental health perspectives. doi: 10.1289/ehp.10816
- Bedada G, Smith CJ, Tyrrell PJ, et al. (2012) Shortterm effects of ambient particulates and gaseous pollutants on the incidence of transient ischaemic attack and minor stroke: a case-crossover study. Environmental Health 11:77. doi: 10.1289/ehp.00108419
- Bell M L, Samet J M, Dominici F (2004) Time-series studies of particulate matter. Annu. Rev. Public Health, 25, 247-280
- Bell ML, O'Neill MS, Ranjit N, et al. (2008) Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. International Journal of Epidemiology 37:796–804
- Benesch T (2013) Schlüsselkonzepte zur Statistik. Die wichtigsten Methoden, Verteilungen und Tests anschaulich erklärt. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, DOI 10.1007/978-3-8274-2772-4, ISBN 978-3-8274-2772-4 (eBook)
- Benesch T (2013) Schlüsselkonzepte zur Statistik. die wichtigsten Methoden, Verteilungen, Tests, anschaulich erklärt. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum
- Benoit K (2011) Linear regression models with logarithmic transformations. London: London School of Economics, letzter Abruf 15.07.2016
- Bittner MI, Nübling M, Stössel U (2013) Heat-Related Mortality in Freiburg and Rostock in 2003 and 2005 – Methodology and Results. Gesundheitswesen 2013; IN PRESS
- Bivand R S, Pebesma E J, Gomez-Rubio C (2008) Applied Spatial Data Analysis with R. Berlin, New York: Springer
- Bivand R S, Pebesma E J, Gómez-Rubio V, Pebesma E J (2013) Applied spatial data analysis with R. UseR! Series, 2nd ed, New York: Springer, ISBN: 978-1-4614-7617-7
- Bivand R, Piras G (2015) Comparing Implementations of Estimation Methods for Spatial Econometrics. Journal of Statistical Software, 63(18), 1-36. URL <http://www.jstatsoft.org/v63/i18/>

- 
- Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G et al. 2012 Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International journal of biometeorology* 56:515–535. doi: 10.1007/s00484-011-0453-2, letzter Aufruf 08.11.2014
- Boldo E, Medina S, Le Tertre A, Hurley F, Mücke H G, Ballester, Aguilera I (2006) Aphis: Health impact assessment of long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> in 23 European cities. *European journal of epidemiology*, 21(6), 449-458
- Bollman J, Koch W G (2001) *Lexikon der Kartographie und Geomatik*, in zwei Bänden. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag; <http://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/kriging/2983>, letzter Aufruf 09.03.2015
- Bolte G, Kohlhuber M (2009) Soziale Ungleichheit bei umweltbezogener Gesundheit: Erklärungsansätze aus umweltepidemiologischer Perspektive In: Richter M, Hurrelmann K (Hrsg.) (2009) *Gesundheitliche Ungleichheit. Grundlagen, Probleme, Perspektiven*. Springer, ISBN: 978-3-531-91643-9 (Online)
- Bouchama A (2004) The 2003 European heat wave. *Intensive Care Med* 30:1–3. doi: 10.1007/s00134-003-2062-y
- Bittner M -I (2014) Auswirkungen von Hitzewellen auf die Mortalität in Deutschland; *Gesundheitswesen* 2014; 76(08/09): 508-512; DOI: 10.1055/s-0033-1355404
- Bouchama A, Dehbi M, Mohamed G, Matthies F, Shoukri M, Menne B (2007) ‚Prognostic factors in heat wave related deaths: a meta-analysis‘, *Arch Intern Med.* 167: 2170-6
- Brake R, Bates G (2002) A valid method for comparing rational and empirical heat stress indices. *Annals of occupational hygiene*, 46(2), 165-174
- Brei B, Hornberg C (2009) Die Bedeutung von Stadtgrün aus gesundheitswissenschaftlicher Sicht. *Public Health Forum* 17 Heft 62 (2009)
- Buckley J, Richardson D (2012) Seasonal modification of the association between temperature and adult emergency department visits for asthma: a case-crossover study. *Environmental Health* 11:1–6. doi: 10.1186/1476-069X-11-55
- Bundesgesetzblatt (BGBl.) (1998) Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (DWD-Gesetz). [http://www.dwd.de/\(...\)](http://www.dwd.de/(...)), letzter Abruf 19.10.2014

- Bundesministerium für Gesundheit (BMG) (2005) AKTIONSPROGRAMM UMWELT UND GESUNDHEIT. Projekte - Aktivitäten - Ergebnisse. APUG-Bericht 1999-2005. [http://www.apug.de/archiv/pdf/APUG-Bericht-1999-2005 .pdf](http://www.apug.de/archiv/pdf/APUG-Bericht-1999-2005.pdf), letzter Abruf 21.05.2014
- Bundeskabinett (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. <http://www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel/>, letzter Abruf 10.06.2014
- Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2003) Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug. Abschlussbericht. [https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO\(...\)](https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO(...)), letzter Abruf 06.03.2015
- Burkart K, Endlicher W (2011) Human Bioclimate and Thermal Stress in the Megacity of Dhaka, Bangladesh: Application and Evaluation of Thermophysiological Indices. In: Krämer A, Khan M M H, Jahn H J (2011) Public health in megacities and urban areas: a conceptual framework. In Health in Megacities and Urban Areas (pp. 3-20), Physica-Verlag HD
- Buscail C, Upegui E, Viel J F (2012) Mapping heatwave health risk at the community level for public health action. *International journal of health geographics*, 11(1), 38
- Chambers J M, Hastie T J (1992) *Statistical Models in S*, Wadsworth & Brooks/Cole, letzter Abruf 15.07.2016
- Claßen T, Heiler A, Brei B, Hornberg C (2013) Gesundheitsrisiko Klimawandel: eine lösbare Aufgabe für Regionen und Kommunen?! In: Jahn JH, Krämer A, Wörmann T (Hrsg.) (2013) *Klimawandel und Gesundheit*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum
- Classen M, Diehl V, Kochsiek K (1998) *Innere Medizin*. 4., neu bearb. Aufl. München/Wien/Baltimore: Urban & Schwarzenberg
- Cochrane T, Davey R C, Gidlow C, Smith G R, Fairburn J, Armitage C J, Speight S (2009) Small area and individual level predictors of physical activity in urban communities: a multi-level study in Stoke on Trent, England. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(2), 654-677
- Conti S, Meli P, Minelli G, Solimini R, Toccaceli V, Vichi M, Beltrano C, Perini L (2005) Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environ Res* 98 (3): 390 – 399
- de'Donato FK, Stafoggia M, Rognoni M, Poncino S, Caranci N, Bisanti L, Demaria M, Forastiere F, Michelozzi P, Pelosini R, Perucci CA (2008) Airport and city-centre temperatu-

---

res in the evaluation of the association between heat and mortality. *Int J Biometeorol* 52 (4): 301 – 310

Dombois D, Braun-Fahrländer C (2004) Gesundheitliche Auswirkungen der Klimaänderungen mit Relevanz für die Schweiz. Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel, Abteilung Umwelt und Gesundheit, [www.bafu.admin.ch/klimaanpassung/11504/index.html?lang=fr...ý](http://www.bafu.admin.ch/klimaanpassung/11504/index.html?lang=fr...ý), abgerufen am 18.11.2013

Dormann F C, McPherson J, Araújo M, Bivand R, Bolliger J, Carl G, ... & Kühn I (2007) Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography*, 30(5), 609-628

Dormann C F (2013a) *Parametrische Statistik. Statistik und ihre Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

Dormann C F, Elith J, Bacher S, Buchmann C M, Carl G, Carré G, García Marquéz, J R, Gruber B, Lafourcade B, Leitão P J, Münkemüller T, McClean C, Osborne P E, Reineking B, Schröder B, Skidmore A K, Zurell D, Lautenbach S (2013b) Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46

Downs S H, Schindler C, Liu L J S, Keidel D, Bayer-Oglesby L, Brutsche M H, Probst-Hensch N M (2007) Reduced exposure to PM10 and attenuated age-related decline in lung function. *New England Journal of Medicine*, 357(23), 2338-2347

Dreier M, Kramer S, Stark K (2012) Epidemiologische Methoden zu Gewinnung verlässlicher Daten. In: Schwartz F W, Walter U, Siegrist J, Kolip P, Leidl R, Dierks M L, Busse R, Schneider N (Hrsg.) (2012) *Public Health. Gesundheit und Gesundheitswesen*. 3. Aufl., München: Urban & Fischer

Duhme H, Weiland S K, Keil U (1998) Epidemiological analyses of the relationship between environmental pollution and asthma. *Toxicology Letters*, 102, 307-316

DWD (2007) *Biometeorologie des Menschen*. *promet, meteorologische fortbildung*, Jahrgang 33,3/4 [www.dwd.de/bvbw/generator/.../PB/.../promet\\_33\\_3-4.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/.../PB/.../promet_33_3-4.pdf), letzter Aufruf 28.10.2014

Engelmann F, Halkow A (2008) Der Setting-Ansatz in der Gesundheitsförderung: Genealogie, Konzeption, Praxis, Evidenzbasierung (No. SP I 2008-302). Veröffentlichungsreihe der Forschungsgruppe Public Health, Schwerpunkt Bildung, Arbeit und Lebenschancen, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB)

- Eis D (2012) Welchen Einfluss hat die Umwelt? In: Schwartz F W, Walter U, Siegrist J, Kolip P, Leidl R, Dierks M L, Busse R, Schneider N (Hrsg.) (2012) Public Health. Gesundheit und Gesundheitswesen. 3. Aufl., München: Urban & Fischer
- Eis D, Helm D, Laußmann D, Stark K (2010) Klimawandel und Gesundheit – Ein Sachstandsbericht. Berlin: Robert Koch-Institut
- Elvers H-D (2005) Umweltgerechtigkeit (Environmental Justice): Integratives Paradigma der Gesundheits- und Sozialwissenschaften?, UFZ-Diskussionspapiere, No. 14/2005
- Elvers H-D (2011) Umweltgerechtigkeit. In: Groß M (Hrsg.) Handbuch Umweltsoziologie. VS Verlag für Sozialwissenschaften, pp 464–484
- Epstein Y, Moran D S (2006) Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial health*, 44(3), 388-398
- Eikmann T, Herr C (2006) Die Bedeutung der Umweltexposition für die Abschätzung (umwelt-)medizinisch relevanter Gesundheitsrisiken. Landsberg: Verlagsgruppe Hüthig, *Umweltmed. Forsch Prax.* 11 (3) 129 – 130
- Endlicher W (2012) Einführung in die Stadtökologie. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer
- Fanger P O, Toftum J 2002 Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34(6), 533-536
- Fanger P O 1973 Assessment of man's thermal comfort in practice. *British journal of industrial medicine*, 30(4), 313-324
- Fehr R, Kobusch A-B, Wichmann H-E (1993) Umwelt und Gesundheit. In: Gesundheitswissenschaften: Handbuch für Lehre, Forschung und Praxis. Hurrelmann K (Ed); Weinheim [u.a.]: Beltz: 295–314
- Fehr R, Neus H, Heudorf U (Hrsg.) (2005) Gesundheit und Umwelt. Ökologische Prävention und Gesundheitsförderung. Bern: Verlag Hans Huber
- Fehr R (2009) Naturbezüge in der ökologischen Gesundheitsförderung. *Natur und Gesundheit. Public Health Forum* 17 Heft 62
- Fehr R, Hornberg C, Wichmann H-E (2012) Umwelt und Gesundheit. In: Hurrelmann K, Razum O (2012) Handbuch Gesundheitswissenschaften. Weinheim: Beltz Juventa

- 
- Fischer M M, Wang J (2011) *Spatial data analysis: models, methods and techniques*. Springer Science & Business Media
- Fischer P H, Marra M, Ameling C B, Hoek G, Beelen R, de Hoogh K., Houthuijs D (2014) *Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS)*. *Environ Health Perspect*
- Filleul L, Cassadou S, Médina S, et al. (2006) *The Relation Between Temperature, Ozone, and Mortality in Nine French Cities During the Heat Wave of 2003*. *Environmental health perspectives*. doi: 10.1289/ehp.8328
- Fleßa S, Greiner W (2013) *Grundlagen der Gesundheitsökonomie*. Berlin, Heidelberg: Springer Lehrbuch, DOI 10.1007/978-3-642-30919-9\_6
- Flynn A, McGreevy C, Mulkerrin EC (2005) *Why do older patients die in a heatwave?* *QJM* 98:227–229. doi: 10.1093/qjmed/hci025
- Foken T (2006) *Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden*. 2. Aufl., Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag
- Fortin M J, Dale M R T (Eds.) (2005) *Spatial analysis: a guide for ecologists*. Cambridge: University Press
- Forastiere F, Stafoggia M, Picciotto S, et al. (2005) *A Case-Crossover Analysis of Out-of-Hospital Coronary Deaths and Air Pollution in Rome, Italy*. *Am J Respir Crit Care Med* 172:1549–1555. doi: 10.1164/rccm.200412-1726OC
- Fotheringham S A, Brunsdon C, Charlton M (2000) *Quantitative geography: Perspectives on spatial data analysis*. London: Sage
- Fouillet A, Rey G, Laurent F, Pavillon G, Bellec S, Guihenneuc-Jouyaux C, Clavel J, Jouglan E, Hémon D (2006) *Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France*. *Int Arch Occup Environ Health* 80 (1): 16 – 24
- Fritz C E, Schuurman N, Robertson C, Lear S (2013) *A scoping review of spatial cluster analysis techniques for point-event data.*, *Geospatial Health* 7 (2) , 183--198
- Frumkin H, Hess J, Lubet G, Malilay J, McGeehin M (2008). *Climate change: the public health response*. *American Journal of Public Health*, 98(3), 435
- Gabriel KM, Endlicher WR (2011) *Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany*. *Environ Pollut* 2011; 159: 2044-2050

- Garssen J, Harmsen C, de Beer J (2005) ,The effect of the summer 2003 heat wave on mortality in the Netherlands', *Euro Surveill.* 10: 165-8
- Gelman A, Hill J (2006) *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models.* Cambridge University Press
- Gerlinger T, Röber M (2009) *Die Pflegeversicherung.* Verlag Hans Huber: Bern, Göttingen, Toronto, Seattle
- Gerlinger T (2013) *Klimawandel und Gesundheitssystem: Über die Schwierigkeiten der Anpassung an neue Herausforderungen.* In: Jahn HJ, Krämer A, Wörmann T (eds) *Springer-Lehrbuch.* Springer Berlin Heidelberg, pp 1–21
- Getis A, Aldstadt J (2010) *Constructing the spatial weights matrix using a local statistic.* *Perspectives on Spatial Data Analysis.* Berlin, Heidelberg: Springer, 147-163
- Glazer JL (2005) *Management of heatstroke and heat exhaustion.* *American Family Physician* 71:2133–2140
- Global Humanitarian Forum (2009) *Human impact report on climate change: the anatomy of a silent crisis.* Geneva: Global Humanitarian Forum
- Goggins WB, Chan EYY, Ng E, Ren C, Chen L (2012) *Effect Modification of the Association between Short-term Meteorological Factors and Mortality by Urban Heat Islands in Hong Kong.* *PLoS ONE* 7:e38551. doi: 10.1371/journal.pone.0038551.t003
- Golden J S, et al. (2008) *A biometeorology study of climate and heat-related morbidity in Phoenix from 2001 to 2006.* *International journal of biometeorology* 52.6 (2008): 471-480
- Gordis L (2001): *Epidemiologie.* Deutsche Erstausgabe. Marburg: VERLAG im KILIAN
- Göckenjan G (1991) *Stichwort Gesundheit.* In: Deppe HU, Friedrich H, Müller R (Hrsg.) (1991) *Öffentliche Gesundheit - Public Health.* Frankfurt, New York: Campus-Verlag
- Göbwald A, Lange M, Kamtsiuris P, Kurth BM (2012) *DEGS: German Health Interview and Examination Survey for Adults.* *Bundesgesundheitsbl* 55:775–780. doi: 10.1007/s00103-012-1498-z
- Göbwald A, Schienkiewitz A, Nowossadeck E, Busch MA (2013) *Prevalence of myocardial infarction and coronary heart disease in adults aged 40–79 years in Germany.* *Bundesgesundheitsbl* 56:650–655. doi: 10.1007/s00103-013-1666-9

---

Greven S, Dominici F, Zeger S L (2009) A spatio-temporal approach for estimating chronic effects of air pollution. Johns Hopkins University, Dept. of Biostatistics Working Papers. Working Paper 190

Gräler B, Gerharz L, Pebesma E (2011) Spatio-temporal analysis and interpolation of PM10 measurements in Europe. ETC/ACM Technical Paper, 10

Groneberg D A, Morfeld P, Kraus T, Köhler D, Krug N, Magnussen H, Witt C (2009) Gesundheitliche Effekte der Feinstaubbelastung – aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand. *Pneumologie*, 63(07), 363-368

Groß J, (2010) *Grundlegende Statistik mit R. Eine anwendungsorientierte Einführung in die Verwendung der Statistik Software R*. Wiesbaden: Springer Fachmedien

Grübner O, Khan M M H, Hostert P (2011a) Spatial Epidemiological Applications in Public Health Research: Examples from the Megacity of Dhaka. In Krämer A, Khan M M H, Kraas F (Eds.) *Health in Megacities and Urban Areas* (pp. 243-261). Heidelberg, New York: Physica-Verlag HD, Springer

Grübner O, Khan M M H, Lautenbach S, Müller D, Krämer A, Lakes T, Hostert P (2011b) A spatial epidemiological analysis of self-rated mental health in the slums of Dhaka. *International Journal of Health Geographics*, 10:36

Handl A (2010) *Multivariate Analysemethoden, Statistik und ihre Anwendungen*, 2 Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

Haines A, Kovats RS, Campbell-Lendrum D, Corvalan C (2006) Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. *Public Health* 120:585–596. doi: 10.1016/j.puhe.2006.01.002

Haining R P (2010) The Nature of Georeferenced Data. In: Fischer M M, Getis A (2010) *Handbook of applied spatial analysis: software tools, methods and applications*. Heidelberg: Springer

Hajat S, Kovats RS, Lachowycz K (2007) 'Heat-related and cold-related deaths in England and Wales: who is at risk?', *Occup Environ Med.* 64: 93-100

Hajat S, Armstrong B, Baccini M, Biggeri A, Biondi L, Russo A, Paldy A, Menne B, Kosatsky T (2006) Impact of high temperatures on mortality: is there an added heat wave effect? *Epidemiology* 17 (6): 632 – 638



- Hansen AL, Bi P, Ryan P, et al. (2008) The effect of heat waves on hospital admissions for renal disease in a temperate city of Australia. *Int J Epidemiol* 37:1359–1365. doi: 10.1093/ije/dyn165
- Hansen A, Bi P, Nitschke M, Pisaniello D, Newbury J, Kitson A (2011) Perceptions of Heat-Susceptibility in Older Persons: Barriers to Adaptation. *IJERPH* 8:4714–4728. doi: 10.3390/ijerph8124714
- Hedderich J, Sachs L (2012) *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. 14. Aufl., Heidelberg: Springer
- Hellwig RT, Nöske I, Brasche S, Gebhardt Hj, Levchuk I, Bischof W (2012) *Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen*. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. ISBN: 978-3-88261-142-7
- Heinrich J, Grote V, Peters A, Wichmann H E (2005) Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Langzeiteffekte. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 17(4), 230-230
- Hellmeier W, Stausberg J, Hoffmann B (2007): »Materialien Umwelt und Gesundheit Nr. 67«. Untersuchungen in NRW zu den Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die kurzzeitige Mortalität. Landesinstitut für de öffentlichen Gesundheitsdienst NRW, Bielefeld/Münster: Abteilung Umweltmedizin, Umwelthygiene
- Henninger S (Hrsg.) (2011) *Stadtökologie*. Paderborn: Verlag Ferdinand Schöningh
- Henningsen S (2009) Spatial Analysis. In: Sönke A, Klapper D, Konrad U, Wolf J (eds): *Methodik der empirischen Forschung*, 3rd ed., Wiesbaden: Gabler, p 569
- Hertel S, Le Tertre A, Jöckel KH et al. (2009) Quantification of the heat wave effect on cause-specific mortality in Essen, Germany. *Eur J Epidemiol* 2009; 24: 407-414
- Hilgers R-D, Bauer P, Schieber V (2007) *Einführung in die medizinische Statistik. Statistik und ihre Anwendungen*. 2. Aufl, Berlin Heidelberg: Springer Verlag
- Hilligardt J (1998) Planungsprinzipien für eine nachhaltige Siedlungsentwicklung in Verdichtungsräumen. *Raumforschung Raumordnung* 56:9–19. doi: 10.1007/BF03 183857
- Hupfer P, Chmielewski F M, Pethe H, Kuttler W (2006) *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Vieweg+Teubner Verlag

---

Hornberg C, Pauli A (2011) Stellenwert und Aufgabenfelder von „Umwelt und Gesundheit“ in Public Health. In: Schott T, Hornberg C (Hrsg.) (2011) Die Gesellschaft und ihre Gesundheit. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien, DOI 10.1007/978-3-531-92790-9\_10

Hosmer D W, Hosmer T, le Cessie S, Lemeshow S (1997) A comparison of goodness-of-fit tests for the logistic regression model. *Statistics in Medicine*, 16, 965-980

Hurrelmann K (2006a) Gesundheitssoziologie. Eine Einführung in sozialwissenschaftliche Theorien von Krankheitsprävention und Gesundheitsförderung. 6. Aufl., Weinheim: Juventa Verlag

Hurrelmann K (2006b) Einführung in die Sozialisationstheorie. Weinheim, Basel: Beltz Verlag, 9. Aufl., ISBN 978-3-407-25440-5

Hurrelmann K, Laaser U, Razum O (2012) Entwicklung und Perspektiven der Gesundheitswissenschaften in Deutschland. In: Hurrelmann K, Razum O (Hrsg.): Handbuch Gesundheitswissenschaften. 5. völlig überarbeitete Auflage. Weinheim: Beltz Juventa, ISBN 978-3-7799-0790-9

Hupfer P, Chmielewski F M, Pethe H, Kuttler W (2006) Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Vieweg+Teubner Verlag

Huth R, Kyselý J, Pokorná L (2000) A GCM Simulation of Heat Waves, Dry Spells, and Their Relationships to Circulation. *Climatic Change* July 2000, Volume 46, Issue 1-2, pp 29-60

Hutter HP, Moshammer H, Wallner P, Leitner B, Kundi M (2007) ‚Heatwaves in Vienna: effects on mortality‘, *Wien Klin Wochenschr.* 119: 223-7

Institute of Medicine, Committee for the Study of the Future of Public Health, Division of Health Care Services (1988)

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht. <http://www.de-ipcc.de/de/200.php>, abgerufen am Dienstag, 12. November 2013

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. [www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/.../ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/.../ar4_syr.pdf), abgerufen am 06.12.2013

Ishigami A, Hajat S, Kovats RS, Bisanti L, Rognoni M, Russo A, Paldy A (2008) An ecological time-series study of heat-related mortality in three European cities. *Environmental Health* 7:5. doi: 10.1186/1476-069X-7-5

Jackson J, Yost M, Karr C, Fitzpatrick C, Lamb B, Chung S, Chen J, Avise J, Rosenblatt R, Fenske R (2010) Public health impacts of climate change in Washington State: projected mortality risks due to heat events and air pollution. *Clim Change*: 102 (1 – 2) 159 – 186, 2010. doi: 10.1007/s10584- 010-9852-3

Jacobeit J (2007) Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem. In: Endlicher W, Gerstengarbe F-W (2007) *Der Klimawandel. - Einblicke, Rückblicke, Ausblicke - Potsdam: PIK*, [https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/.../broschuere\\_cms\\_100.pdf](https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/.../broschuere_cms_100.pdf), letzter Aufruf 26.10.2014

Jahn JH, Krämer A, Wörmann T (Hrsg.) (2013) *Klimawandel und Gesundheit. Internationale, nationale und regionale Herausforderungen und Antworten. Springer Lehrbuch*, Springer Verlag: Berlin, Heidelberg

Jahn HJ, Schneider A, Breitner S, Eißner R, Wendisch M, Krämer A (2011). Particulate matter pollution in the megacities of the Pearl River Delta, China—A systematic literature review and health risk assessment. *International journal of hygiene and environmental health*, 214(4), 281-295

Jaakkola JJK (2003) Case-crossover design in air pollution epidemiology. *European Respiratory Journal* 21:81s–85s

Jendritzky G, Menz G, Schmidt-Kessen W, Schrmer H (1990) Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung* 114

Jendritzky G, de Dear R, Havenith G (2012) UTCI—Why another thermal index?. *International journal of biometeorology*, 56(3), 421-428

Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Weihs P, Batchvarova E, DeDear R (2009) Der Thermische Klimaindex UTCI. In: DWD (2009) *Klimastatusbericht 2009*. [www.dwd.de](http://www.dwd.de), letzter Aufruf 29.10.2014

Jendritzky G, Fiala D, Havenith G, Koppe C, Laschewski G, Staiger H, Tinz B (2007) Thermische Umweltbedingungen. *Promet*, 33(3-4), pp. 83 - 94

- 
- Johnson H, Kovats RS, McGregor GR (2005) ,The impact of the 2003 heatwave on mortality and hospital admissions in England.‘, Health Stat Q. 25
- Jörß W, Handke V, Lambrecht U, Dünnebeil F (2007) Emissionen und Maßnahmenanalyse Feinstaub 2000-2020. Dessau: Umweltbundesamt. UBA-Texte, 38(07)
- Kan H, Chen R, Tong S (2012) Ambient air pollution, climate change, and population health in China. *Environment international*, 42, 10-19
- Kalkstein L S, Valimont K M (1986) An evaluation of summer discomfort in the United State using a relative climatological index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(7), 842-848
- Kaiser R, Rubin CH, Henderson AK, Wolfe MI, Kieszak S, Parrott CL, Adcock M (2001) 'Heat-related death and mental illness during the 1999 Cincinnati heat wave', *Am J Forensic Med Pathol.* **22**: 303-307
- Kappas M (2009) *Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert – Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften.* Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- Kappas M (2012) *Geographische Informationssysteme. 2. Aufl.,* Braunschweig: Westermann Schulbuch Verlag
- Katzschner A, Jahn HJ (2013) *Regionalplanung unter Berücksichtigung des Klimawandels und dessen Gesundheitsfolgen: Der Klimaplanatlas Nordhessen.* In: Jahn HJ, Krämer A, Wörmann T (eds) Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch
- Khan M M, Zanuzdana A (2011) *Urban Health Research: Study Designs and Potential Challenges.* In: Krämer A, Khan M M H, Kraas F (Eds.) *Health in Megacities and Urban Areas* (pp. 243-261). Heidelberg, New York: Physica-Verlag HD, Springer
- Klemperer D (2012) *Sozialmedizin - Public Health. Lehrbuch für Gesundheits und Sozialberufe.* Verlag Hans Huber
- Klose R (2007) *Hitzeschaden.* In: Van Aken et. al. (2007) *Intensivmedizin.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, ISBN 3-13-114872-1
- Knol AB, Briggs DJ, Lebet E (2010) *Assessment of complex environmental health problems: Framing the structures and structuring the frameworks.* *Science of the Total Environment* 408.14, 2785-2794

- Koch A (2009) Regionale Verteilung der Beschäftigung in Deutschland: Panel- und Zähl-datenmodelle (1. Aufl.). Frankfurt am Main: Lang
- Koppe C, Jendritzky G (2004) Gesundheitliche Auswirkungen der Hitzewelle im August 2003. Sozialministerium Baden-Württemberg. [www.thueringen.de/.../gesundheitl\\_auswirkungen\\_hitze2003\\_bwb.pdf](http://www.thueringen.de/.../gesundheitl_auswirkungen_hitze2003_bwb.pdf), abgerufen am 01.12.2013
- Koppe C, Becker P (2007) Vergleich der Hitzewellen 2003 und 2006. In: Matzarakis A, Mayer A Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e. V.. Eigenverlag des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. ISSN 1435-618X
- Koppe C (2009) Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes. In: Klimawandel und Gesundheit. UMID-Themenhaft. Bundesamt für Strahlenschutz, Bundesinstitut für Risikobewertung, Robert Koch-Institut, Umweltbundesamt. ISSN 1862-4189
- Koppe C, Jendritzky G, Pfaff G (2003) Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. Klimastatusbericht 2003. Offenbach: Deutscher Wetterdienst
- Koppe C. (2005) Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse, Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Kosfeld R, Eckey H-F, Türck M (2007) LISA (Local Indicators of Spatial Association. WiSt, Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt, 36 Jahrgang, Heft 3, März 2007
- Kovats RS, Hajat S (2008) 'Heat stress and public health: a critical review', Annual review of public health. 29: 41-55
- Kovats RS, Kristie LE (2006) Heatwaves and public health in Europe. European journal of public health 16:592–599. doi: 10.1093/eurpub/ckl049
- Krämer A, Wörmann T, Jahn HJ (2013) Klimawandel und Gesundheit: Grundlagen und Herausforderungen für den Public Health-Sektor. In: Jahn HJ, Krämer A, Wörmann T (eds) Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch
- Krämer A, Khan M H, Kraas F (2011) Health in megacities and urban areas. Berlin, Heidelberg: Physica-Verlag

- 
- Kreienbrock L, Pigeot I, Ahrens W (2012) Einführung in Epidemiologische Methoden. Berlin Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, DOI 10.1007/978-3-8274-2334-4\_1
- Kroll LE, Lampert T (2012) Regionalisierung von Gesundheitsindikatoren. Bundesgesundheitsbl 55:129–140. doi: 10.1007/s00103-011-1403-1
- Kuchcik M (2006) Defining heat waves – Different approaches. Geogr Polonica 79 (2): 47 – 63
- Kuhn M, et al. (2016) caret: Classification and Regression Training. <https://cran.r-project.org/web/packages/caret/caret.pdf>, letzter Abruf 15.07.2016
- Kyobutungi C, Grau A, Stieglbauer G, Becher H (2005) Absolute temperature, temperature changes and stroke risk: a case-crossover study. Eur J Epidemiol 20 (8): 693 – 698
- Kyselý J, Huth R (2004) Heat-related mortality in the Czech Republic examined through synoptic and ‘traditional’ approaches. Clim. Res. 25, 265-274
- Lemeshow S, Hosmer D W (1982) A review of goodness of fit statistics for use in the development of logistic regression models. American Journal of Epidemiology, 115(1), 92-106
- Lennon J J (2000) Red-shifts and red herrings in geographical ecology. Ecography 23:101–113. doi: 10.1111/j.1600-0587.2000.tb00265.x
- Leone M, D’Ippoliti D, De Sario M, et al. (2013) A time series study on the effects of heat on mortality and evaluation of heterogeneity into European and Eastern-Southern Mediterranean cities: results of EU CIRCE project. Environmental Health 12:55. doi: 10.1186/1476-069X-12-55
- Levy D, Lumley T, Sheppard L, et al. (2001) Referent Selection in Case-Crossover Analyses of Acute Health Effects of Air Pollution. Epidemiology (Cambridge, Mass 12:186–192. doi: 10.1097/00001648-200103000-00010
- Li W, Land T, Zhang Z, Keithly L, Kelsey J L (2009) Small-area estimation and prioritizing communities for tobacco control efforts in Massachusetts. American journal of public health, 99(3), 470
- Lim Y-R, Bae H-J, Lim Y-H, Yu S, Kim G-B, Cho Y-S ( 2014) Spatial analysis of PM10 and cardiovascular mortality in the Seoul metropolitan area. Environmental Health and Toxicology; 29:e2014005. doi:10.5620/eht.2014.29.e2014005

- Lippke S, Renneberg B (2006) Konzepte von Gesundheit und Krankheit. In: Renneberg B, Hammelstein P (eds) Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch
- Long J, Scott (1997) Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables. Sage. pp104-106
- Longley I D, Inglis D W F, Gallagher M W, et al. (2005) Using NO<sub>x</sub> and CO monitoring data to indicate fine aerosol number concentrations and emission factors in three UK conurbations. *Atmospheric Environment* 39:5157–5169. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.05.017
- Longley, P A, Goodchild M F, Maguire D J, Rhind D W (2005) Geographical Information Systems and Science. 2nd Edition. Chichester: John Wiley & Sons
- Loughnan M, Nicholls N, Tapper N J “Mapping Heat Health Risks in Urban Areas,” *International Journal of Population Research*, vol. 2012, Article ID 518687, 12 pages, 2012. doi:10.1155/2012/518687
- Lumley T, Levy D (2000) Bias in the case – crossover design: implications for studies of air pollution. *Environmetrics* 11:689–704. doi:10.1002/1099-095X(200011/12)11:6<689::AID-ENV439>3.0.CO;2-N
- Marmot M (2005) Social determinants of health inequalities. *The Lancet*, 365(9464), 1099-1104
- Marktl M (1993) Physiologische Grundlagen der Bioklimatologie und Medizinmeteorologie. In: Maschalek A, Stacher A (1993) Mensch und Umwelt. Ausgewählte Beiträge aus dem von der Wiener Akademie für Ganzheitsmedizin und dem Institut für angewandte Ökologie und Umweltmedizin der wissenschaftlichen Landesakademie für Niederösterreich veranstalteten Postgraduate Lehrgang über Ganzheitsmedizin. Wiener Internationale Akademie für Ganzheitsmedizin. Schriftenreihe Band 11, Wien: Facultas
- Mathies F, Graham B, Marin NC, Hales S (2008) HEAT-HEALTH ACTION PLANS. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen
- Matzarakis A (2013) Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft*, 73(3), 115-118, VDI-Verlag
- McGregor GM, Pelling M, Wolf T, Gosling S (2007) The social impacts of heat waves. Bristol: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD, p. 40

- 
- McMichael AJ, Wilkinson P, Kovats RS, et al. (2008) International study of temperature, heat and urban mortality: the “ISOTHURM” project. *Int J Epidemiol* 37:1121–1131. doi: 10.1093/ije/dyn086
- Maclure M (1991): The Case-Crossover Design: A Method for Studying Transient Effects on the Risk of Acute Events. *Am. J. Epidemiol.* 133 (2): 144-153
- Maud M T, Huynen E, Martens P, Schram D, Weijenberg M P and Anton Kunst A E (2001) The Impact of Heat Waves and Cold Spells on Mortality Rates in the Dutch Population *Environmental Health Perspectives* Vol. 109, No. 5 (May, 2001), pp. 463-470
- Medina-Ramón M, Zanobetti A, Cavanagh DP, Schwartz J (2006) Extreme Temperatures and Mortality: Assessing Effect Modification by Personal Characteristics and Specific Cause of Death in a Multi-City Case-Only Analysis. *Environmental health perspectives* 114:1331–1336. doi: 10.1289/ehp.9074
- Menezes R, Garcia-Soidán P, Febrero-Bande M (2005) A comparison of approaches for valid variogram achievement. *Computational statistics*, 20(4), 623-642
- Mielck A, Bloomfield K (Hrsg.) (2001) *Sozial-Epidemiologie. Eine Einführung in die Grundlagen, Ergebnisse und Umsetzungsmöglichkeiten.* Weinheim und München: Juvenat Verlag
- Michelozzi P, Kirchmayer U, De Sario M, et al. (2007) Evaluation of the impact of an intervention programme on summer mortality in Rome. *Epidemiology (Cambridge, Mass)* 18:S129–S129
- Michelozzi P, de Donato F, Bisanti L, et al. (2005) The impact of the summer 2003 heat waves on mortality in four Italian cities. *Euro Surveillace: bulletin europeen sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin* 10:161–165
- Michelozzi P, Accetta G, De Sario M, et al. (2009) High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. *Am J Respir Crit Care Med* 179:383–389
- Mücke H G, Becker P (2008) *Klimawandel und Gesundheit: Informationen zu gesundheitlichen Auswirkungen sommerlicher Hitze und Hitzewellen und Tipps zum vorbeugenden Gesundheitsschutz.* Umweltbundesamt
- Nastos P T, Matzarakis A (2012) The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(3-4), 591-599



- 
- Naughton MP, Henderson A, Mirabelli MC, et al. (2002) Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago. *American journal of preventive medicine* 22:221–227
- Nogueira PJ, Falcao JM, Contreiras MT, Paixao E, Brandao J, Batista I (2005) ,Mortality in Portugal associated with the heat wave of August 2003: early estimation of effect, using a rapid method‘, *Euro Surveill.* 10: 150-3
- O’Neill MS, Carter R, Kish JK et al. (2009) Preventing heat-related morbidity and mortality: new approaches in a changing climate. *Maturitas* 2009; 64: 98-103
- Oxford Textbook of public health 2000 (Oxford Medical Publications)
- Paradis E (2009) Moran’s Autocorrelation Coefficient in Comparative Methods. [cran.at.r-project.org/web/packages/ape/.../MoranI.p\(...\)](http://cran.at.r-project.org/web/packages/ape/.../MoranI.p(...)), zuletzt abgerufen 13.03.2014
- Peng R D, Dominici F (2008) *Statistical Methods for Environmental Epidemiology with R. A Case Study in Air Pollution and Health.* Springer Science + Business Media
- Pebesma E, Gräler B (2014) Spatio-temporal geostatistics using gstat. Institute for Geoinformatics University of Münster (ifgi), [cran.r-project.org/package=gstat](http://cran.r-project.org/package=gstat), letzter Aufruf 06.02.2015
- Pebesma E (2012) spacetime: Spatio-Temporal Data in R. *Journal of Statistical Software*, 51(7), 1-30. URL <http://www.jstatsoft.org/v51/i07/>
- Pebesma E J (2004) Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30: 683-691
- Pfafferott J, Becker P (2008) Erweiterung des Hitzewarnsystems um die Vorhersage der Wärmebelastung in Innenräumen. *Bauphysik* 30:237–243. doi: 10.1002/bapi. 200810031
- Pfeiffer D U, Robinson T P, Stevenson M, Stevens K B, Rogers D J, Clements A C A (2008) *Spatial Analysis in Epidemiology.* New York: Oxford University Press
- Pflanz, M (1973) *Allgemeine Epidemiologie. Aufgaben - Technik - Methoden.* Stuttgart: Thieme
- Pinheiro S D L L D, Saldiva P H N, Schwartz J, Zanobetti A (2014) Isolated and synergistic effects of PM10 and average temperature on cardiovascular and respiratory mortality. *Revista de saude publica*, 48(6), 881-888
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D and R Core Team (2016) nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-128, <http://CRAN.R-project.org/packa->

---

ge=nlme

Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, Calle E E, Krewski D, Ito K, Thurston G D (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132-1141

Pott R, Hüppe J (2007) *Spezielle Geobotanik: Pflanze-Klima-Boden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

Püllen R, Heudorf U (2005) ‚Bedeutung und Prävention Hitze-assoziiierter Erkrankungen‘, *Hessisches Ärzteblatt*. 6: 379-380

R Core Team (2013) *R A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

Rainham DGC, Smoyer-Tomic KE (2003) The role of air pollution in the relationship between a heat stress index and human mortality in Toronto. *Environ Res* 93 (1): 9 – 19

Rego, F (2015) Quick Guide: Interpreting Simple Linear Model Output in R. Quelle: [https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/119859\\_a290e183f...](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/119859_a290e183f...), letzter Abruf 11.08.2016

Rey G, Jougl E, Fouillet A, Pavillon G, Bessemoulin P, Frayssinet P, Clavel J, Hemon D (2007) The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003. *Int Arch Occup Environ Health* 80 (7): 615 – 626

Riffith D A A G (2006) Spatial Modelling in Ecology: The Flexibility of Eigenfunction Spatial Analysis. *Ecology* 87:2603–2613

Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, Sanchez J-C, Müller M (2011) pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC Bioinformatics*, 12, p. 77. doi:10.1186/1471-2105-12-77 <<http://www.biomedcentral.com/1471-2105/12/77/>>, letzter Abruf 16.07.2016

Rocklöv J, Forsberg B (2008) The effect of temperature on mortality in Stockholm 1998—2003: A study of lag structures and heatwave effects. *Scandinavian Journal of Public Health* 36:516–523

Rothman K J, Greenland S, Lash T L (2008) *Modern Epidemiology*. Third Edition. Philadel-

phia: Wolters Kluwer Lippincott Williams und Wilkins

Rothman K J, Greenland S (2005) Causation and Causal Inference in Epidemiology. *American Journal of Public Health*: July 2005, Vol. 95, No. S1, pp. S144-S150. doi: 10.2105/AJPH.2004.059204

Rothfusz L P (1998) Heat Index Information & Chart. Information provided by the National Weather Service Office in Tulsa. <http://ehs.okstate.edu/heatindx.htm>, letzter Abruf 12.11.2014

Rothfusz L P, and NWS Southern Region Headquarters (1990) The Heat Index equation (or, more than you ever wanted to know about Heat Index). Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology, 90-23

Rüdiger A (2013) Stadtklimalatse: Ein Entscheidungsunterstützungsinstrument für Kommunen. In: Jahn J H, Krämer A, Wörmann T (2013) Klimawandel und Gesundheit. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

Sambor K (2010) Die Europäische Bürgerinitiative Grundeinkommen. In: Blaschke R, Otto A, Schepers N (Hrsg.) (2010) Grundeinkommen. Von der Idee zu einer europäischen politischen Bewegung Hamburg: VSA Verlag

Schiavon S, Hoyt T, Piccioli A (2014) Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE Standard 55. In *Building Simulation* (Vol. 7, No. 4, pp. 321-334). Tsinghua University Press

Schmidt-Semisch H, Paul B (2010) Risiko Gesundheit. Eine Einführung. In: Paul B, Schmidt-Semisch H (eds) Risiko Gesundheit. VS Verlag für Sozialwissenschaften, pp 7–21

Schmidt R F, Lang F, Thews G (Hrsg.) (2007) Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie. 30. Aufl., Heidelberg/New York: Springer

Schneekloth U, Wahl H W (Hrsg.) (2008) Selbständigkeit und Hilfebedarf bei älteren Menschen in Privathaushalten. Pflegearrangements, Demenz, Versorgungsangebote. 2. Aufl., Stuttgart: Kohlhammer

Schoen C (2005) A new empirical model of the temperature-humidity index. *Journal of applied meteorology*, 44(9), 1413-1420

Schott T, Hornberg C (Hrsg.) (2011) Die Gesellschaft und ihre Gesundheit. 20 Jahre Public

---

Health in Deutschland: Bilanz und Ausblick einer Wissenschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien

Schumacher M, Schulgen-Kristiansen G (2008) Methodik klinischer Studien. Methodische Grundlagen der Planung, Durchführung und Auswertung. Reihe: Statistik und ihre Anwendungen 3., überarb. Aufl. Springerlink: ISBN 978-3-540-85136-3

Schwartz F W, Schlaud M, Siegrist J, von Troschke J (2012) Wer ist gesund? Wer ist krank? Wie gesund bzw. krank sind Bevölkerungen? In: Schwartz F W, Walter U, Siegrist J, Kolip P, Leidl R, Dierks M L, Busse R, Schneider N (Hrsg.) (2012) Public Health. Gesundheit und Gesundheitswesen. 3. Aufl., München: Urban & Fischer

Semenza JC, McCullough JE, Flanders WD, et al. (1999) Excess hospital admissions during the July 1995 heat wave in Chicago. *American journal of preventive medicine* 16:269–277

Semenza JC, Wilson DJ, Parra J, et al. (2008) Public perception and behavior change in relationship to hot weather and air pollution. *Environ Res* 107:401–411. doi: 10.1016/j.envres.2008.03.005

Shahmohamadi P, Che-Ani A I, Etessam I, Maulud K N A, Tawil N M (2011) Healthy environment: The need to mitigate urban heat island effects on human health. *Procedia Engineering*, 20, 61-70

Shaposhnikov D, Revich B, Bellander T, Bedada G B, Bottai M, Kharkova T, Pershagen G (2014) Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 25(3), 359

Sheather S (2009) A modern Approach to Regression with R. Springer Science & Business Media

Sing T, Sander O, Beerenwinkel N, Lengauer T (2005) “ROCR: visualizing classifier performance in R.” *Bioinformatics*, 21(20), pp. 7881. <http://rocr.bioinf.mpi-sb.mpg.de>, letzter Abruf 15.07.2016

Simon F, Lopez-Abente G, Ballester E and Martinez F (2005) ,Mortality in Spain during the heat waves of summer 2003‘, *Euro Surveill.* 10: 156-61

Simon Jackman (2015) pscl: Classes and Methods for R Developed in the Political Science Computational Laboratory, Stanford University. Department of Political Science, Stanford University. Stanford, California. R package version 1.4.9. URL <http://pscl.stanford.edu/>, letz-

ter Abruf 15.07.2016

- Simon M (2010) Das Gesundheitssystem in Deutschland. Bern: Verlag Hans Huber
- Smoyer-Tomic KE, Rainham DG (2001) Beating the heat: development and evaluation of a Canadian hot weather health-response plan. *Environmental Health Perspectives*; 109, 1241 – 1248
- Smoyer K E, Rainham D G, Hewko J N (2000) Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980–1996. *International Journal of Biometeorology*, 44(4), 190-197
- Spellmann F R, Bieber R M (2012) *Environment Health and Science Desk Reference*. Toronto, Plymouth: The Scarecrow Press
- Sundmacher L, Götz N, Vogt V (2014) Statistische Methoden der kleinräumigen Versorgungsforschung. *Bundesgesundheitsbl* 57:174–179. doi: 10.1007/ s00103-013-1887-y
- Stafoggia M, Forastiere F, Agostini D, Caranci N, de' Donato F, Demaria M, Michelozzi P, Migliorino R, Rognoni M, Russo A, Perucci CA (2008) Factors affecting in-hospital heat-related mortality: a multi-city case-crossover analysis. *J Epidemiol Community Health* 62 (3): 209 – 215
- Stafoggia M, Forastiere F, Agostini D, Biggeri A, Bisanti L, Cadum E, Caranci N, de' Donato F, De Lisi S, De Maria M. ( 2006) Vulnerability to heat-related mortality: a multicity, population-based, case- crossover analysis. *Epidemiology* 17: 315 – 323
- Starfield B (2007) Pathways of influence on equity in health. *Social Science & Medicine*, 64(7), 1355-1362
- Steadman RG (1984) A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate & Applied Meteorology*; 23, 1674 – 1687
- Steadman R G (1984) A universal scale of Apparent Temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1674-1687
- Steadman R G (1979a) The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Appl. Meteor.*, 18, 861-873
- Steadman R G (1979b) The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology*, 18(7), 861-873
- The World Bank (2012) *Der 4° Bericht. Warum eine vier Grad wärmere Welt verhindert wer-*

---

den muss. [http://www.bmz.de/de/zentrales\\_downloadarchiv/Themen\\_und\\_schwerpunkte/klimaschutz/130523\\_4-grad-bericht-deutsche-zusammenfassung.pdf](http://www.bmz.de/de/zentrales_downloadarchiv/Themen_und_schwerpunkte/klimaschutz/130523_4-grad-bericht-deutsche-zusammenfassung.pdf), abgerufen am 18.11.2013

Thews G, Mutschler E, Vaupel P, Schaible H-G (2007) Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen. 6. Aufl., ISBN 978-3-8047-2342-9

Thieme F (2008) Alter(n) in der alternden Gesellschaft. Eine soziologische Einführung in die Wissenschaft vom Alter(n). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften

Timischl W (2013) Angewandte Statistik: Eine Einführung für Biologen und Mediziner. 3. Aufl., Wien: Springer-Verlag

Tobler W R (1970) A Computer Movie Simulation of Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 2, 234-240

Toutenburg H, Heumann C (2008) deskriptive Statistik. Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit R und SPSS. 6. Aufl., Heidelberg, Berlin: Springer Verlag

Umweltbundesamt (UBA) (2009) Feinstaubbelastung in Deutschland. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3565.pdf>, letzter Abruf 11.03.2015

VDI (1998) Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.- (= VDI-Richtlinie 3787, 2)

Vandentorren S, Bretin P, Zeghnoun A, et al. (2006) August 2003 heat wave in France: risk factors for death of elderly people living at home. *European journal of public health* 16:583–591

Venables W N, Ripley B D (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0

von Wichert P (2004) Gefährdung durch atmosphärische Hitzewellen. Mitteilungen aus der AWMF 1. Doc35, Hamburg: AWMF, <http://www.egms.de/static/de/journals/awmf/2004-1/awmf000035.shtml>, letzter Aufruf 25.10.2014

Watts JD, Kalkstein LS (2004) The Development of a Warm-Weather Relative Stress Index for Environmental Applications. *J Appl Meteorol* 43: 503 – 513

WHO – World Health Organisation (1978) Primary Health Care - Report of the International Conference on Primary Health Care Alma-Ata, USSR, 6-12 September 1978. <http://whqlib->

[doc.who.int/publications/9241800011.pdf](http://doc.who.int/publications/9241800011.pdf), letzter Abruf 21.05.2014

WHO – World Health Organisation (1986) Ottawa-Charta zur Gesundheitsförderung. WHO Regional Office for Europe, [www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/.../Ottawa\\_Charter\\_G.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/.../Ottawa_Charter_G.pdf), letzter Abruf 23.05.2014

WHO – World Health Organisation (1989) Europäische Charta zu Umwelt und Gesundheit. Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa, [www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/.../ICP\\_RUD\\_113\\_ger.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/.../ICP_RUD_113_ger.pdf), letzter Abruf 21.05.2014

WHO – World Health Organisation (1998) Das Rahmenkonzept „Gesundheit für alle“ für die Europäische Region der WHO. Aktualisierung 2005. Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0010/98389/E87861G.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0010/98389/E87861G.pdf), letzter Abruf 21.05.2014

WHO – World Health Organisation (1999) Erklärung Dritte Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit. Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa, <http://www.euro.who.int/de/media-centre/events/events/2010/03/fifth-ministerial-conference-on-environment-and-health/past-conferences/third-ministerial-conference-on-environment-and-health,-london,-united-kingdom,-1999/declaration.-third-ministerial-conference-on-environment-and-health>, letzter Abruf 23.05.2014

WHO – World Health Organisation (2004) Aktionsplan zur Verbesserung von Umwelt und Gesundheit der Kinder in der Europäischen Region. WHO Regional Office for Europe, <http://www.euro.who.int/de/publications/policy-documents/childrens-environment-and-health-action-plan-for-europe>, letzter Abruf 23.05.2014

WHO – World Health Organisation (2005) CONSTITUTION OF THE WORLD HEALTH ORGANIZATION. <http://www.who.int/governance/eb/constitution/en/>, letzter Abruf 01.06.2014

WHO – World Health Organisation (2010a) Schutz der Gesundheit der Kinder in einer sich verändernden Umwelt. Bericht über die Fünfte Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit. WHO Regional Office for Europe, [www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0003/127821/e94331G.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/127821/e94331G.pdf), letzter Abruf 21.05.2014

WHO – World Health Organisation (2010b) Schutz der Gesundheit in einer durch den Klimawandel bedrohten Umwelt: Handlungsrahmen für die Europäische Region. Beitrag der Sonderarbeitsgruppe Klimawandel und Gesundheit. WHO Regional Office for Europe, [www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf.../Parma\\_EH\\_Conf\\_gdoc06\\_rev1.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf.../Parma_EH_Conf_gdoc06_rev1.pdf), letzter Abruf

21.05.2014

Wichert von P (2004) Gefährdung durch atmosphärische Hitzewellen. Mitteilungen aus der AWMF 2004;1:Doc35

Wichmann J, Andersen Z, Ketzel M, Ellermann T, Loft S (2011) Apparent Temperature and Cause-Specific Emergency Hospital Admissions in Greater Copenhagen, Denmark. PLoS ONE 6(7): e22904. doi:10.1371/journal.pone.0022904

Wickham H (2016) scales: Scale Functions for Visualization. Graphical scales map data to aesthetics, and provide methods for automatically determining breaks and labels for axes and legends. <https://cran.r-project.org/web/packages/scales/index.html>  
letzter Abruf 16.07.2016

Wilkinson R G, Pickett K E (2006) Income inequality and population health: a review and explanation of the evidence. Social science & medicine, 62(7), 1768-1784

Wollschläger D (2015) Grundlagen der Datenanalyse mit R: eine anwendungsorientierte Einführung. 4. über. Aufl., Heidelberg: Springer-Verlag

Wollschläger D (2014) Grundlagen der Datenanalyse mit R: Eine anwendungsorientierte Einführung. 3. über. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

Wollschläger D (2012) Grundlagen der Datenanalyse mit R: Eine anwendungsorientierte Einführung. 2. über. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

Wollschläger D (2013) R kompakt. Der schnelle Einstieg in die Datenanalyse. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

World Health Organization (1989) [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0003/114087/ICP\\_RUD\\_113\\_ger.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0003/114087/ICP_RUD_113_ger.pdf), abgerufen am Dienstag, 12. November 2013

World Health Organization (2005) Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit: Wie können neue Gefahren jetzt bewältigt werden?, Kopenhagen, Wien

World Health Organization (2009) GLOBAL HEALTH RISKS. Mortality and burden of disease attributable to selected major risks. WHO-Press, ISBN 978 92 4 156387

Xu L Y, Yin H, Xie X D (2014) Health Risk Assessment of Inhalable Particulate Matter in Beijing Based on the Thermal Environment. International journal of environmental research



and public health, 11(12), 12368-12388

Xun Wie W, Khan A E, Michael E, Vineis P (2009) Climate change epidemiology: methodological challenges. *Int J Public Health* (2010) 55:85–96 DOI 10.1007/s00038-009-0091-1

Zhang X, Holt J B, Lu H, Wheaton A G, Ford E S, Greenlund K J, Croft J B (2014) Multilevel regression and poststratification for small-area estimation of population health outcomes: a case study of chronic obstructive pulmonary disease prevalence using the Behavioral Risk Factor Surveillance System. *American journal of epidemiology*, 179(8), 1025-1033

Zebisch M, Grothmann T, Schöter D, Hasse C, Fritsch U und Cramer W (2005) ,Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, im Auftrag des Umweltbundesamtes, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimawandel-in-deutschland>, abgerufen am 18.11.2013

Zeileis A, Hothorn T (2002) Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News* 2(3), 7-10. URL <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>, letzter Abruf 15.07.2016

Zöfel P (2002) Statistik verstehen. Ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung. München: Addison-Wesley Verlag

Zürcher C, Frank T (1998) Randbedingungen (Klima). In: Zürcher C (ed) Bau und Energie. Vieweg+Teubner Verlag, pp 1–19