

Wirkungsermittlung von Stadtklimaeffekten auf Biota anhand des Bioindikators Flechte in Wiesbaden und Mainz



Projektbeteiligte

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dez. I 1 – Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
Projektbetreuung: Sonja Singer-Posern



Landeshauptstadt Mainz
Grün- und Umweltamt
Projektbetreuung: Joachim Kelker



Auftragnehmer



Fraxinus GbR
Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch
Alexander Vorbeck, Dipl.-Ing. Umweltschutz
Am Weidenborn 11, 35625 Hüttenberg
Telefon 06441-200 8198

Beteiligte:

Artem Pungin, Dipl.-Bioökologe
Dr. Horst Tremp, Dipl.-Agrarbiologe

Abschlussbericht

Projektlaufzeit: 01.06.2017 bis zum 30.06.2018

Hüttenberg, den 30.10.2018

Zusammenfassung und Abstract

Titel: Wirkungsermittlung von Stadtklimaeffekten auf Biota anhand des Bioindikators Flechte in Wiesbaden und Mainz

Städte bilden ein lokales Klima aus, das sich vom Umland unterscheidet. Die städtische Wärmeinsel geht einher mit einer erhöhten Luftschadstoffkonzentration. Ziel der Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, um die Wirkungen des Stadtklimas auf Biota nachzeichnen zu können. Das Vorhaben ist in das Projekt „KLIMPRAX Stadtklima Wiesbaden-Mainz“ eingebettet, das die temperaturbedingten Folgen des Klimawandels in urbanen Systemen untersucht.

Die vorliegende Arbeit baut auf einem Vorprojekt auf, in dem Flechtendaten aus Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg ausgewertet worden waren. Identifiziert wurden zwei ökologische Gruppen von Flechten. Der ersten Gruppe gehören die feuchtebedürftigen Strauchflechten und eine Auswahl großer Blattflechtengattungen an. Sie meiden die Stadtzentren. Die zweite Gruppe besteht aus relativ trocken- und eutrophierungstoleranten Vertretern der Gattungen *Phaeophyscia* und *Hyperphyscia*. Sie zeigen in den Stadtzentren höhere Frequenzen als im Umland.

Aktuell wurde in Wiesbaden und Mainz eine standardisierte Flechtenkartierung an insgesamt 85 Untersuchungspunkten vorgenommen und die im Vorprojekt ermittelten ökologischen Flechtengruppen in Karten dargestellt. Es ergab sich eine typische Verteilung der Flechtenvorkommen, bei der feuchtebedürftige Arten einen Schwerpunkt am Taunusrand im Norden Wiesbadens haben, die Stadtzentren von Wiesbaden und Mainz aber weitgehend meiden. Es erwies sich, dass eine Differenzierung der Faktorenkomplexe „Stadtklima“ und „Luftverunreinigungen“ im Untersuchungsgebiet nicht möglich ist.

Aus den Flechtendaten wurden Luftgüteindizes nach Vorgabe einer VDI-Richtlinie berechnet und kartografisch dargestellt. Die Ergebnisse wurden mit einer methodengleichen Arbeit aus 1995 verglichen. Die lufthygienische Situation hat sich nach der Flechtenkartierung seit damals deutlich verbessert, was durch lufthygienische Berichte des HLNUG bestätigt wird. Es wird festgestellt, dass es damit auch anspruchsvolleren Arten möglich ist, weiter in die Innenstadtbereiche von Wiesbaden und Mainz vorzudringen und zum Monitoring zur Verfügung zu stehen.

Es werden Empfehlungen für Kommunen zum Stadtklimabiomonitoring mit Flechten gegeben und der weitere Forschungsbedarf formuliert.

Abstract

Title: Determination of the effects of urban climate on biota by using lichens in Wiesbaden and Mainz

Cities form a local climate, which differs from the surrounding areas. The urban heat island is attended by an increased concentration of air pollution. The aim of this work is to develop a method to trace the effects of urban climate on biota. The scheme is embedded in the project "KLIMPRAX Stadtklima Wiesbaden-Mainz", which analysis the consequences of climate change in urban systems due to temperature.

The present work builds on a preliminary project in which lichen data from Giessen, Wetzlar and Aschaffenburg had been evaluated. Two ecological groups of lichens were identified. The first group includes shrub lichens that prefer humid habitats and a selection of large leaf lichen genera. They avoid the city centers. In contrast, the second group consists of relatively drought and eutrophication tolerant representatives of the genera *Phaeophyscia* and *Hyperphyscia*.

They show higher frequencies in the city centers than in the surrounding areas.

Currently, standardized lichen mapping has been carried out in Wiesbaden and Mainz and the ecological lichen groups identified in the preliminary project have been presented in maps. The result was a typical distribution of lichen occurrences, where species in need of moisture have a focus on the Taunus edge in the north of Wiesbaden, but largely avoid the city centers of Wiesbaden and Mainz. It turned out that a differentiation of the topics "urban climate" and "air pollution" in the study area is not possible.

Based on the lichen data, air quality indices were calculated according to the specifications of a VDI guideline and finally shown in maps. The results were compared with a methodically identical work from 1995. The actual research shows, that since then, the air quality has significantly improved, which is confirmed by HLNUG's air-hygiene reports. It is stated that even more sophisticated species are thus able to penetrate further into the inner city areas of Wiesbaden and Mainz and therefore are available for further monitoring.

Recommendations for urban climate monitoring with lichens are given to municipalities. Further needs for research are stated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	11
2	Stadtklima und Flechten	13
2.1	Was ist „Stadtklima“?.....	13
2.2	Auswirkungen des Stadtklimas auf Flechten.....	15
3	Untersuchungsgebiet	21
4	Methoden	23
4.1	Flechtenkartierung zur Bestimmung der Luftgüte.....	23
4.1.1	Messnetz.....	23
4.1.2	Trägerbäume	25
4.1.3	Erfassung der Flechten.....	26
4.1.4	Berechnung des Luftgüteindex (LGI).....	27
4.2	Stadtklimabiomonitoring	30
4.2.1	Berechnung potentiell relevanter Flechten-Indizes für das Stadtklimabiomonitoring	30
4.2.2	Erhebung von Standortparametern in der Umgebung der kartierten Flechten-Trägerbäume	34
4.2.3	Mikroklimatische Parameter der Flechtenhabitate.....	38
5	Ergebnisse	40
5.1	Kenndaten der Flechtenkartierung.....	40
5.2	Statistische Auswertung	45
5.2.1	Vorbemerkungen und erste Datenprüfung	45
5.2.2	Multivariate Analyse	49
5.3	Ergebnisse der sechstägigen Mikroklimamessungen	52
5.4	Langfristige Entwicklung der Luftgüte	58
5.4.1	Erhebungen in Wiesbaden aus den Jahren 1989 und 1994	59
5.4.2	Erhebung in Mainz aus dem Jahr 1989/90	62
5.4.3	Aktuelle Luftgütekarte	64
5.5	Verbreitungsmuster der Flechten.....	67
5.5.1	Gruppe A: Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende	67
5.5.2	Gruppe B: Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende..	71
5.6	Auswirkungen unterschiedlicher städtischer Nutzung	74
6	Diskussion	75
7	Empfehlungen für Kommunen	80
8	Ausblick und Forschungsbedarf	82
9	Danksagung	83
10	Literatur	83
11	Anhang	87

Abbildungsverzeichnis

Abb. 01: Einflussfaktoren auf epiphytische Flechten in Städten	18
Abb. 02: Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 1971 – 2000, Stand: Juni 2014 (Noppel 2017) ...	22
Abb. 03: Karte mit Positionen der Untersuchungspunkte in Wiesbaden (W) und Mainz (M).....	24
Abb. 04: links: Flechtenaufnahmegitter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005); rechts: Flechtenkartierung in der Praxis.....	26
Abb. 05: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung mit dem Aufnahmegitter der VDI 3799), nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A.....	29
Abb. 06: Erläuterung der Bewertungsmatrix, nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A	29
Abb. 07: Flechten-Trägerbäume im Umfeld einer geringen Versiegelung (oben: Mainz Volkspark, M-G13a) und einer starken Versiegelung (unten: Mainz Karmeliterstraße, M-E12).....	35
Abb. 08: Horizontoscop nach TONNE (Bild: Institut für Tageslichttechnik Stuttgart).....	38
Abb. 09: Datenlogger an Trägerbaum in Wiesbaden - Nerotal Süd	39
Abb. 10: Bodenversiegelung im Nahbereich der Trägerbäume in Anzahl der Bäume.....	41
Abb. 11: Nutzung in der näheren Umgebung der Trägerbäume in Anzahl der Bäume.....	41
Abb. 12: Verkehrseinfluss der Trägerbaum-Standorte	42
Abb. 13: Abstand der Trägerbäume zur nächsten Kfz-befahrenen Straße.....	42
Abb. 14: Breite der nächstgelegenen Straße	43
Abb. 15: Besonnungsdauer des Mittelstammes der Trägerbäume im August	44
Abb. 16: Beispiel hochreduzierter Informationen in abgeleiteten Klimadaten; aufgetragen wurden die Anzahl der Sommertage gegen den Wert „Heiße Tage“, was naturgemäß eine hohe Übereinstimmung zeigt; aber auch der Zusammenhang „Tropennächte“ ist evident „heisse_tage_71_2000“: mittlere jährliche Anzahl heißer Tage ($N_{T_{max} \geq 30^\circ C}$) im Zeitraum 1971 – 2000, „tropen_nä_71_2000“: mittlere jährliche Anzahl der Tropennächte ($N_{T_{min} \geq 20^\circ C}$) im Zeitraum 1971 – 2000; aus Noppel (2017).....	46
Abb. 17: Box-Plot der Flechten-Frequenzsumme der hauptsächlich aufgenommenen Baumarten Esche, Linden- und drei Ahornarten	47
Abb. 18: Flechten-Frequenzsumme, aufgetragen gegen den Baumumfang	48
Abb. 19: DCA. Frequenz der einzelnen Flechtenarten und Überlagerung wichtiger morphologischer Gruppen; SF: Summe Frequenz; Kürzel: Flechtenarten-Frequenz (vgl. Anhang 1). Ordinationsdiagramme bzw. deren Achsen besitzen keine Einheiten.	50
Abb. 20: RDA. Kürzel: Flechtenarten-Frequenz (vgl. Anhang 1) und quantitative Standortfaktoren sowie kategoriale Daten (3: Spitzahorn, 5: Zuckerahorn).....	51
Abb. 21: Temperaturverlauf am Mittelstamm von Trägerbäumen in Wiesbaden (W) und Mainz (M) vom 22.-27.8.2017.....	55

Abb. 22: Verlauf der relativen Luftfeuchte am Mittelstamm von Trägerbäumen in Wiesbaden (W) und Mainz (M).....	56
Abb. 23: Frequenzsumme der Großen Blattflechten in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte an Trägerbäumen; Luftfeuchtemessung an sechs Tagen im August 2017 in Wiesbaden und Mainz.....	57
Abb. 24: Zeitreihen der Jahresmittelwerte von 1997 bis 2015 aller Luftmessstationen in Hessen; gemittelt wurden die Werte der Stationen gleichen Charakters (Verkehrsschwerpunkte, Städte, ländlicher Raum (HLNUG 2017)).....	58
Abb. 25: Karte der Luftgüte Wiesbadens 1994 (Datenquelle: HLNUG, veröffentlicht unter (Kirschbaum und Windisch 1995); wenige angrenzende Messflächen sind zusätzlich dargestellt.....	61
Abb. 26: Karte der Luftgüte in Wiesbaden und Mainz 2017.....	65
Abb. 27: Üppige Bestände mit großen Blattflechten (links im Bild <i>Parmelia sulcata</i>) und Strauchflechten (Bildmitte: <i>Evernia prunastri</i>) kommen im Untersuchungsgebiet nur an mikroklimatisch begünstigten Lokalitäten vor.....	68
Abb. 28: Mittlere Artenzahl der „Großen Blattflechten“ pro Baum.....	69
Abb. 29: Mittlere Frequenz der Blattflechte Furchen-Schüsselflechte (<i>Parmelia sulcata</i>).....	70
Abb. 30: Tolerant gegenüber städtischen Belastungsfaktoren: <i>Phaeophyscia orbicularis</i> (links oben), <i>Phaeophyscia nigricans</i> (rechts oben) und <i>Hyperphyscia adglutinata</i> (unten); Fotos: Kirschbaum.....	71
Abb. 31: Mittlere Frequenz der kleinblättrigen Schwärzlichen Schwielenflechte (<i>Phaeophyscia nigricans</i>).....	72
Abb. 32: Mittlere Frequenzen der Großen Blattflechten an Trägerbäumen unter unterschiedlicher Nutzungsintensität im Umfeld der Bäume.....	74
Abb. 33: Furchen-Schüsselflechte (<i>Parmelia sulcata</i>).....	81

Tabellenverzeichnis

Tab. 01: Unterschiede stark versiegelter innenstädtischer Zonen im Vergleich zum Umland und mögliche Auswirkungen auf Flechten	19
Tab. 02: Statistische Daten für Wiesbaden und Mainz	21
Tab. 03: Baumartengruppen nach VDI 3957 Blatt 13, mit Baumumfang in cm (VDI 3957 Blatt 13 2005).....	25
Tab. 04: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Stand: 2005	27
Tab. 05: Kategorien der Versiegelung im direkten Umfeld der Trägerbäume	35
Tab. 06: Kategorien der Flächennutzung im direkten Umfeld der Trägerbäume	36
Tab. 07: Kategorien der Verkehrsbelastung im direkten Umfeld der Trägerbäume.....	36
Tab. 08: Abstand des Trägerbaumes zur Straße.....	36
Tab. 09: Beschreibung der Straßenbreite	37
Tab. 10: Technische Daten des Datalogger UT330C.....	39
Tab. 11: Anteile der Baumarten an den kartierten Trägerbäumen an insgesamt 86 Untersuchungspunkten in Wiesbaden und Mainz.....	40
Tab. 12: Mittelwerte aus fünfminütigen Messungen mit Datenloggern vom 22.-27.8.2017 an Trägerbäumen in 1,5 Metern Höhe und südlicher Exposition.....	52
Tab. 13: Meteorologische Daten im Zeitraum 22.-27. August von Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes in fünf Metern Höhe	53
Tab. 14: Veränderung des Vorkommens ausgewählter Arten von 1989 bis 2017 im Stadtgebiet von Wiesbaden; Zeigerwerte für Reaktion (R) und Eutrophierung (N) nach (Wirth 2010)	60
Tab. 15: Veränderung des Vorkommens ausgewählter Arten von 1989/90 bis 2017 im Stadtgebiet von Mainz; Zeigerwerte für Reaktion (R) und Eutrophierung (N) nach (Wirth 2010).....	63
Tab. 16: Indizes, die das Vorkommen feuchtebedürftiger und poleophober Flechtenarten quantifizieren (aus: Windisch 2016)	67
Tab. 17: Indizes, die das Vorkommen eutrophierungs- und wärmetoleranter sowie poleotoleranter Flechtenarten quantifizieren (aus: Windisch 2016)	71

Glossar

Abundanz	Häufigkeit, d. h. Anzahl der Individuen einer Art, bezogen auf ihren Wuchsort
Eutrophierungszeiger	Flechtenarten, die eine übermäßige Nährstoffversorgung tolerieren
FDW	Flechtendiversitätswert; in den FDW gehen Flechten-Artenzahl und deren Frequenz in einem Messgitter ein
Frequenz	bei der Flechtenkartierung ermittelter Häufigkeitswert; wird berechnet aus der Anzahl der von einer Art bewachsenen Messgitterfelder (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13)
„Große Blattflechten“	Auswahl breitlappiger Gattungen: Flavoparmelia, Hypogymnia, Hypotrachyna, Melanelixia, Melanohalea, Parmelia, Parmelina, Platismatia, Pleurosticta und Punctelia, die als feuchtbedürftig gelten
KLIMPRAX Stadtklima Wiesbaden-Mainz	Projekt KLIMPRAX „Klimawandel in der Praxis“ unter Federführung des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie
LGI	Luftgüteindex, ermittelt nach Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure 3957 Blatt 13
Poleophobie	Meidung menschlichen Einflusses bzw. von Städten (poleophobe Arten meiden die Stadtzentren) (vgl. S. 16)
Poleotoleranz	Tolerierung menschlichen Einflusses bzw. von Städten (poleotolerante Arten können in Stadtzentren gedeihen)
Substrat	Untergrund, auf dem Flechten wachsen, bei den hier betrachteten epiphytischen Flechten ist dies die Baumborke
Thallus	Flechtenkörper
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung und Problemstellung

Größere Städte sind häufig wärmer und trockener als ihr Umland. Ursache ist die dichte Bebauung und die damit einhergehende hohe Flächenversiegelung. In der Stadt emittierte Luftschadstoffe können sich anreichern. Die Auswirkungen auf lebende Organismen (Biota) sind vielfältiger Natur. Für den Menschen überwiegen die negativen Folgen, die sommerliche Hitzestress-Episoden mit sich bringen (Endlicher 2012). Städte werden auch als „Schaufenster in die Zukunft“ des Klimawandels bezeichnet, denn die städtische Wärmeinsel nimmt die globale Erwärmung bis zu einem gewissen Grad lokal voraus (Sukopp und Wurzel 1995).

Die vorliegende Arbeit ist in das Projekt „KLIMPRAX Stadtklima Wiesbaden-Mainz“ unter Leitung des Fachzentrums Klimawandel und Anpassung des HLNUG eingebettet. Das Projekt hat die temperaturbedingten Folgen des Klimawandels im Fokus, die die städtische Hitzebelastung noch weiter verstärken werden. Stadtklimatische Belange in kommunalen Planungsprozessen und Abwägungsentscheidungen sollen gestärkt und den Kommunen ein Handlungsleitfaden an die Hand gegeben werden (Singer-Posern 2018).

Im Vorfeld der Arbeit fand eine Methodenentwicklung statt (Windisch 2016). Für die Modellgebiete Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg wurde ermittelt, inwieweit die Wirkungen von Stadtklima auf Flechten dargestellt werden können. Die Arbeit basiert auf bereits vorhandenen Daten, die zuvor im Rahmen von Luftgüteuntersuchungen erhoben worden waren. Es handelte sich um Datensätze zur Biodiversität, zum Vorkommen und zur Abundanz von Arten und ökologischen Artengruppen. Die Flechtendaten wurden mit Daten zu Flächennutzung und Stadtklima mittels multivariater statistischer Methoden in Beziehung gesetzt. Es konnten zwei ökologische Gruppen von Flechten differenziert werden. Die erste Gruppe, welcher feuchtebedürftige Strauchflechten und eine Auswahl großer Blattflechtengattungen angehören, meiden die Stadtzentren. Die zweite Gruppe hingegen besteht aus relativ trocken- und eutrophierungstoleranten Flechtengattungen. Sie zeigt in den Stadtzentren höhere Frequenzen als im Umland. Die Ergebnisse der Studie gehen in die vorliegende Arbeit ein.

Die Städte Wiesbaden und Mainz sind mit insgesamt knapp einer halben Million Einwohnern deutlich größer als die in der Vorstudie untersuchten drei Städte (jeweils unter 90.000 Einwohner). Daher sind auch im Gebiet Wiesbaden/Mainz deutliche Wirkungen stadtypischer

Belastungen auf Flechten zu erwarten. Eine Neuerhebung von Flechtendaten nach einer standardisierten Kartierungsmethode soll die Datengrundlage liefern, um die Ergebnisse der Vorstudie auf das KLIMPRAX-Gebiet Wiesbaden-Mainz übertragen zu können. Die Flechtendaten sollen mit denen einer modellbasierten Analyse des Stadtklimas verschnitten werden, die der Deutsche Wetterdienst 2017 veröffentlicht hat (Noppel 2017). Durch eigene Mikroklimamessungen soll die Spannbreite der mikroklimatischen Standortparameter an den untersuchten Baumstämmen erfasst werden. Die Ziele der Arbeit sind:

- Darstellung der Entwicklung der lufthygienischen Situation seit den 1990er Jahren
- Statische Prüfung von Zusammenhängen der Flechtenverbreitung mit mikroklimatischen, standörtlichen und lufthygienischen Parametern
- Visualisierung der Vorkommen der in der Vorstudie gefundenen Flechtenarten oder Artenkombinationen für das Projektgebiet Wiesbaden-Mainz

Die Ergebnisse sollen zur Weiterentwicklung der Methode zum Monitoring der städtischen Überwärmung beitragen. Sie soll zukünftig den Umweltbehörden der Kommunen und der Länder bei der Berücksichtigung stadtklimatischer Belange in kommunalen Planungsprozessen zur Verfügung stehen. Räumliche Muster von Stadtklimaerscheinungen könnten möglicherweise durch eine Flechtenkartierung visualisiert werden und die Aussagen von Klimagutachten ergänzen. Dabei sind Effekte von Frischluftbahnen auf Biota ebenso interessant wie die von Hitzeinseln.

2 Stadtklima und Flechten

2.1 Was ist „Stadtklima“?

Typisch für Städte ist ihre intensive Nutzung durch den Menschen. Städtische Flächen sind weitgehend bebaut, der unversiegelte Flächenanteil ist reduziert. Oberflächenwasser wird rasch abgeführt und steht so nicht mehr zur Verdunstung zur Verfügung. Die Aktivitäten des Menschen führen zu einer Beeinträchtigung der Luftqualität. Emittenten wie Kfz-Verkehr, Industrie, Gewerbe und Hausbrand privater Haushalte produzieren gas- und partikelförmige Luftschadstoffe.

Die lokalklimatischen Folgen der urbanen Nutzung werden im Begriff „**Stadtklima**“ zusammengefasst. Das Wetterlexikon des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES versteht unter Stadtklima „das gegenüber dem Umland durch die Bebauung und anthropogene Emissionen (wie z. B. Luftschadstoffe oder Abwärme) modifizierte Mesoklima von Städten und Ballungsräumen. Das Stadtklima ist insbesondere durch die Eigenschaften von Baustoffen bezüglich Wärmespeicherung und Reflexion von Sonnenstrahlung, durch die starke Versiegelung des Bodens und das Fehlen von Vegetation sowie durch die hohe aerodynamische Rauigkeit der Bebauung und der damit verbundenen geringen Windgeschwindigkeit gekennzeichnet. ... Während windschwacher Hochdruckwetterlagen bildet sich über der Stadt eine Dunstglocke mit hohen Luftschadstoffkonzentrationen und eine ausgeprägte Wärmeinsel mit erhöhten Lufttemperaturen.“ (DWD 2018)

Während die **städtische Überwärmung** im Sommer typisch für das Stadtklima ist und als Belastung für den Menschen gilt, sind auch die Winter in der Stadt milder als im Umland. SUKOPP & WITTING nennen unter anderem eine Verkürzung der winterlichen Frostperiode und eine Verminderung der Frostintensität (DWD 2018).

Die höheren Temperaturen in der Stadt – verbunden mit einem rascheren Niederschlagsabfluss – haben im Sommer eine geringere **Luftfeuchte** als im Umland zur Folge (Malberg 2007). Die Differenz des Wasserdampfdrucks zwischen Umland und Stadt beträgt rund 1 hPa. Der Autor beschreibt weiterhin eine verminderte Taubildung in Städten.

Inbesondere bei austauscharmen Wetterlagen reichern sich die in der Stadt emittierten **Luftschadstoffe** in bodennahen Luftschichten an. Einen Vergleich der Immissionskonzentration (insbesondere Feinstaub) in der Stadt Berlin mit denen des Umlandes zieht ENDLICHER:

An städtischen und verkehrsreichen Standorten wurde 2010 ein Jahresmittelwert der PM₁₀-Konzentration von etwa 30 µg/m³ gemessen, während es im ruralen Hintergrund 20 µg/m³ waren (Endlicher 2012).

Die klimatischen Veränderungen der urbanen Räume betreffen somit das **Mesoklima**, worunter eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2.000 km und eine typische Betrachtungszeit von einer Stunde bis hin zu einer Woche verstanden wird. Kleinskaligere Phänomene mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern werden durch das Mikroklima beschrieben (Orlanski 1975).

Das **Mikroklima** wird von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z. B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst. Verschiedenheiten in der Geländeform oder im Pflanzenbewuchs können dabei auf engem Raum große Unterschiede in der Temperatur oder der Windgeschwindigkeit verursachen. So kann es z. B. an einem Sommertag über einer Asphaltdecke mehrere Grad wärmer sein als über einer benachbarten, feuchten Wiese. Auch in klaren Nächten können sich, z. B. durch unterschiedliche Ausstrahlungsbedingungen, auf kleinem Raum signifikante Temperaturunterschiede ergeben. Bedeutsam ist das Mikroklima vor allem für die jeweilige Flora und Fauna eines Areals, aber auch der Mensch ist dem Mikroklima direkt ausgesetzt (DWD 2018).

Im Umweltatlas Hessen des HLNUG ist das **Bioklima** als die Summe aller auf den lebenden Organismus wirkenden Faktoren des Klimas definiert (HLNUG 2018). Die Faktoren des Klimas sind laut dieser Quelle Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie die Strahlungsverhältnisse. Oft wird der Begriff des Bioklimas jedoch auf den Menschen bezogen. So definiert der Deutsche Wetterdienst in seinem Wetterlexikon das Bioklima als „...die Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus. Entsprechend ihrer Ausprägung und Wirkung werden sie als belastend, schonend oder als Reiz empfunden“ (HLNUG 2018). Weiter wird aufgeführt, dass „zu den bioklimatischen Belastungsfaktoren insbesondere Wärmebelastung, Strahlungsarmut und schadstoffhaltige Luft zählen“. In der Arbeit von ENDLICHER wird der Bioklimabegriff präzisiert, indem von Humanbioklima die Rede ist (Endlicher 2012).

Die räumliche Ausdehnung stadtklimatischer Effekte wird maßgeblich vom Versiegelungsgrad und der Bebauungsstruktur bestimmt. Die Versiegelung ist in vielen Städten im Zentrum am höchsten und nimmt zur Peripherie hin ab. Entsprechend verhält sich die Verteilung der Tempe-

ratur. So hat sich der Begriff der städtischen Wärmeinsel etabliert (Malberg 2007; Henninger 2011). Durch heterogene Flächennutzung sind jedoch in manchen Städten durchaus mehrere Wärmeinseln in einer Stadt zu beobachten (Hupfer et al. 2006).

2.2 Auswirkungen des Stadtklimas auf Flechten

Flechten reagieren aufgrund ihrer Biologie sensibel auf das Bioklima. Sie sind eine Lebensgemeinschaft aus einem Pilz und einem Partner, der Photosynthese betreiben kann (Alge oder Cyanobakterium). Der Aufbau gleicht einem schwammähnlichen Gebilde (Thallus), welches **Wasser** ungehindert aufnehmen oder abgeben kann. Daher werden Flechten neben den Moosen und den Algen zu den poikilohydrinen (wechselfeuchten) Organismen gezählt. Die Aufnahme von Wasser in Form von Regen, Nebel oder Tau erfolgt passiv über die gesamte Oberfläche. Durch Aufnahme von Wasser quillt der Thallus auf und beginnt, Stoffwechsel zu betreiben. Die Photosynthese erzeugt Zucker zur Energieversorgung der Flechtenpartner. Wenn die relative Luftfeuchte in der Umgebung der Flechte niedrig ist, wird das Wasser rasch und ungehindert wieder abgegeben. Ist die Flechte ausgetrocknet, geht sie in einen Zustand „latenten Lebens“ über, in dem sie schadlos einige Zeit überdauern kann, ohne Stoffwechsel zu betreiben. Somit sind die Lebensvorgänge von Flechten in großem Maße von ihrem Quellungsstatus abhängig. Übertragen auf das Stadtklima hat die geringere sommerliche Luftfeuchte in der Stadt ein rascheres Austrocknen der Flechten zur Folge. Hinzu kommt der durch höhere nächtliche Temperaturen geminderte Taufall, der verhindert, dass die Flechten in den Morgenstunden feucht genug sind, um Stoffwechsel betreiben zu können. Damit verkürzt sich die Zeit, in der die Flechten photosynthetisch aktiv sind und Biomasse aufbauen können. Die wenigen relativ trockenheitstoleranten Arten haben an lufttrockeneren Wuchsorten Konkurrenzvorteile gegenüber der Mehrzahl der feuchtebedürftigen Arten.

Der Stoffwechsel der Flechten ist weiterhin – so wie alle biochemischen Vorgänge – positiv von der **Temperatur** abhängig. Dabei haben die meisten Flechtenspezies im Vergleich zu Gefäßpflanzen ein niedriges physiologisches Temperaturoptimum, das zwischen 10 und 20 °C liegt (Schöller 1997). Der Autor unternahm Stoffwechselformen bei der einheimischen, in stark besonnten Magerrasen wachsenden Bodenflechte *Cladonia foliacea* und stellte fest, dass bereits ab 26 °C kein positiver Stoffwechsel mehr zu verzeichnen war. Die Atmung des Pilzes verbrauchte bei solchen Temperaturen mehr Energie, als die Algen durch Photosynthese produzieren können. Er konstatierte auch, dass Flechten bei Besonnung austrocknen, lange bevor ihre

Thallus-Temperatur 30 °C überschritten hat.

Beim Stadtklimabiomonitoring mit Flechten werden die Flechten am Mittelstamm senkrecht stehender, gut belichteter Bäume untersucht. Es handelt sich um relativ trockene Standorte, denn das Wasser läuft rasch ab, die Borke kann kaum Wasser speichern und die Sonneneinstrahlung sorgt für ein schnelles Austrocknen der Flechten.

Mit dem Wärmeinseleffekt größerer Städte geht die Anreicherung von Luftschadstoffen einher. Flechten sind ausgesprochen empfindlich gegen **Immissionen**. Sie nehmen gasförmige und gelöste Luftschadstoffe über ihre gesamte Oberfläche auf. Die Schadstoffe können akkumuliert werden. Da Flechten ganzjährig vorhanden und stoffwechselaktiv sind, wirken toxische Schadstoffe auch im Winter – bei erhöhten Immissionen – auf die Flechten ein. Ihre Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen wurde schon zu Beginn der Industrialisierung dokumentiert. Eine Pionierarbeit war die des finnischen Arztes und Botanikers NYLANDER, der im 19. Jahrhundert die epiphytische Flechtenvegetation von Paris erfasste (Nylander 1866) und den Rückgang der Flechten auf Luftverschmutzung zurückführte. Bis heute sind zahllose Flechtenkartierungen, vorwiegend mitteleuropäischer Städte, erschienen. In Karten wurde veranschaulicht, dass noch bis Mitte der 1980-er Jahre des letzten Jahrhunderts im Zentrum vieler Städte eine „Flechtenwüste“ vorlag und mehr oder weniger konzentrisch darum zunächst eine „Kampfzone“ und dann eine „Normalzone“ folgten. Einen Überblick über zahlreiche frühe Arbeiten gibt NATHO, in dem über Flechtenwüsten in den Großstädten Berlins, Münchens, Bonns, Hannovers und Hamburgs berichtet wird (Natho 1964). Der Autor nennt Arbeiten in einer Reihe (überwiegend polnischer) nicht-industrialisierter Kleinstädte, in denen die am dichtesten bebauten Zentren ebenfalls Flechtenwüsten aufwiesen (Rydzak 1959). Er ging auf die damals in zahllosen Arbeiten kontrovers geführte Diskussion ein, ob die Luftverschmutzung oder die Trockenheit in Städten für den Rückgang der Flechten hauptverantwortlich ist („Gastheorie“ versus „Wüsten-theorie“) und plädierte dafür, beide Faktoren gemeinsam zur Erklärung der Flechtenverbreitung in Städten heranzuziehen.

Für die Fähigkeit einiger Flechtenarten, in der städtischen Atmosphäre zu leben, findet sich in der Literatur der Begriff „Poleotoleranz“ (griechisch „πόλη“: Stadt), der in zahlreichen Arbeiten aufgegriffen wurde (Erichsen 1930; Trass 1973; Barkman 1958; Romanova 2015). Dem steht die „Poleophobie“ gegenüber, die für das Meiden der Städte durch Flechten steht.

Bis Mitte der 80-er Jahre des letzten Jahrhunderts erwiesen sich **säurebildende Luftschadstoffe**, allen voran das SO₂, als Hauptursache für das Zurückweichen der Flechten aus den Städten

(Nash III 2010). Arbeiten aus hessischen Städten liegen vor für Frankfurt (Kirschbaum 1973), Wiesbaden (Heidt und Strack 1989) sowie Gießen und Wetzlar (Kirschbaum et al. 2012). Mit dem technischen Fortschritt in der Luftreinhaltung konnte die SO₂-Konzentration in Deutschland und anderen westeuropäischen Ländern deutlich gesenkt werden. Es folgten die ersten Arbeiten zur Rückkehr von Flechten in die Städte: „Lichen recolonization in Londons cleaner air“ (Rose und Hawksworth 1981) oder „Wiederbesiedelung der Innenstadt von München durch Flechten“ (Kandler und Poelt 1984). Säuretolerante Flechtenarten wie *Lecanora conizaeoides* – zu Zeiten saurer Luftbelastungen oft die einzige epiphytische Art der Stadtzentren – traten ihren Rückzug aus den Städten an (Wirth 1993) und die Artendiversität bzw. -frequenz erhöhte sich (Vorbeck und Windisch 2002; Kirschbaum et al. 2012). Diese Entwicklung ist ein eindrucksvoller Beleg dafür, dass insbesondere saure Luftschadstoffe einen verheerenden Effekt auf Flechten hatten, der sich zwar nicht auf Städte begrenzte, dort jedoch aufgrund der höheren Immissionskonzentrationen und der Lufttrockenheit besonders stark zum Tragen kam.

Aus aktuellen Untersuchungen in Deutschland sind keine städtischen Flechtenwüsten mehr bekannt. Die SO₂-Konzentrationen liegen seit Jahren auf niedrigem Niveau (Jahresmittelwert in Wiesbaden-Süd in 2016 bei 1,0 µg/m³) (HLNUG 2017). Die im Fokus der Messprogramme stehenden Luftschadstoffe sind andere geworden. Zu den Schadstoffgruppen, die nicht in dem Maße verringert werden konnten wie das SO₂, gehören Stickstoffoxide, Feinstaub und Ozon.

Photooxidantien wie Ozon haben für die vorliegende Fragestellung nur geringe Bedeutung, da es sich in der Stadt aufgrund der dort vorhandenen ozonzerstörenden Substanzen weniger anreichert. Zudem kann die nachgewiesene schädigende Wirkung von Ozon auf Flechten (Nash III 2010) an strahlungsreichen Tagen kaum eintreten, weil die Flechtenthalli dann ausgetrocknet und damit nicht sensitiv sind (Ruoss et al. 1991).

Stickstoffoxide und **Feinstaub** sind in Städten gegenüber dem ländlichen Raum erhöht und der (Straßen-)Verkehr ist der Hauptemittent dieser Schadstoffgruppen (vgl. Kapitel 5.4.). Neben Stickstoffoxiden werden von Kraftfahrzeugen auch geringe Mengen Ammoniak aus-gestoßen (Frahm 2006). Abrieb und Dieselruß erhöhen den Feinstaubgehalt der Luft (Umweltbundesamt 2005). Wie Untersuchungen an Flechten gezeigt haben, hat der Straßenverkehr einen düngenden (eutrophierenden) Effekt auf verkehrsnahen städtischen Lebensräume (Cape et al. 2004; Frahm 2006). Durch Kraftfahrzeuge emittierte Stickstoffoxide werden von Flechten zwar nicht direkt als Nährstoffe genutzt, erzeugen aber als Folgeprodukt in der Atmosphäre Salpetersäure (HNO₃) (Abb. 01). Diese reagiert mit Ammoniak weiter zu Ammoniumnitrat, welches von den Flechten

als Nährstoff aufgenommen wird. Nach Untersuchungen von DÄMMGEN können Feinstäube zu 25-50 % aus Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat bestehen (Dämmgen et al. 2010) und enthalten demnach einen deutlichen Anteil bioverfügbaren Stickstoffs. So konnte in der Blattflechte *Parmelia sulcata* an stark befahrenen Straßen in Gießen ein stark erhöhter Stickstoffgehalt von über 3 % gefunden werden, während der Gehalt in Flechtenthalli an Vergleichsstandorten ohne Verkehrseinfluss unter 1,5 % lag (Windisch et al. 2016). Nach ENDLICHER sind auch die städtischen Böden durch Eutrophierung und Alkalisierung verändert. Als Ursachen der Eutrophierung nennt er Kontamination durch Stäube, Abfälle oder Abwasser. Die Alkalisierung städtischer Böden wird auf das Vorhandensein technogener Substrate wie Bau- und Trümmerschutt zurückgeführt (Endlicher 2012). Durch Aufwirbelungen von Stäuben können die nährstoffhaltigen, alkalischen Bodenbestandteile wiederum an die Bäume und Flechten gelangen.

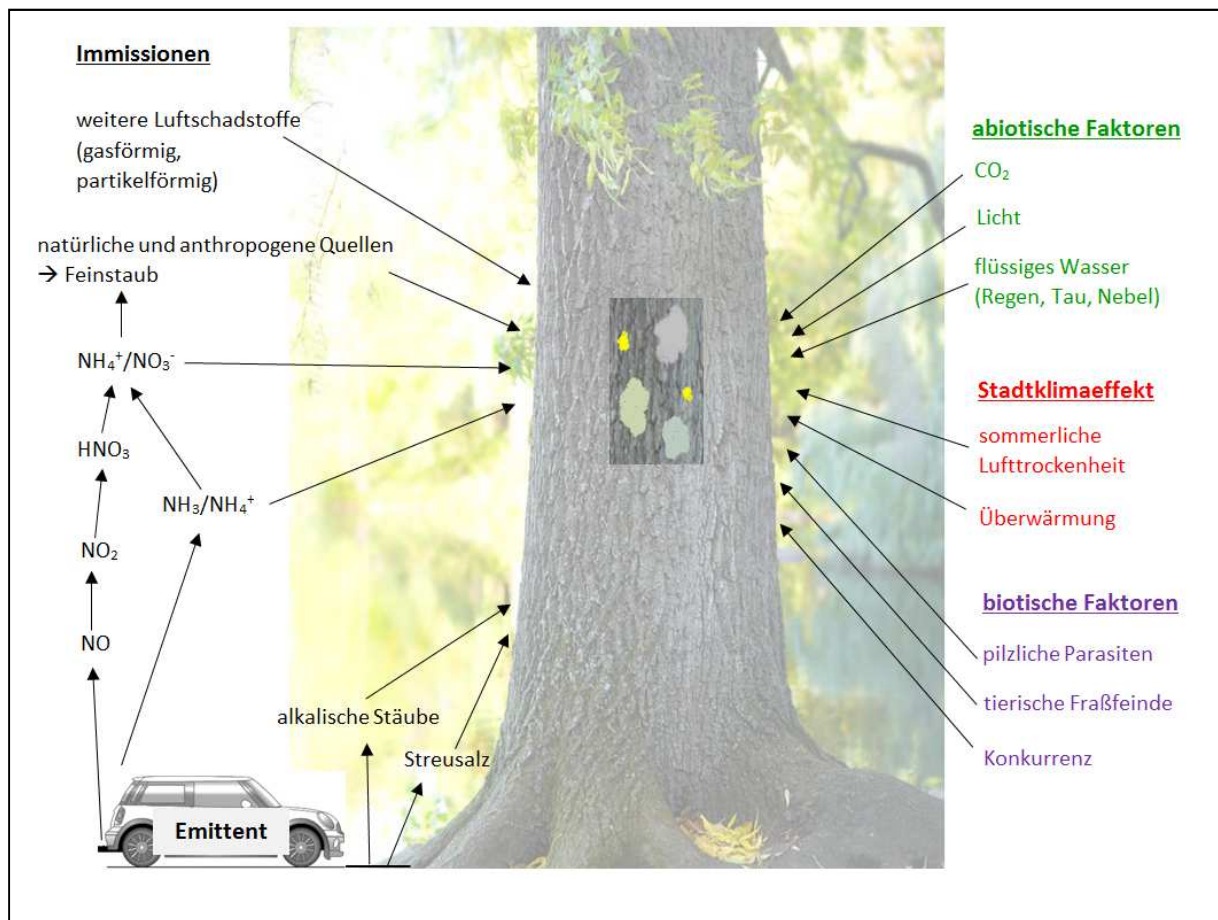


Abb. 01: Einflussfaktoren auf epiphytische Flechten in Städten

Die angenommenen Auswirkungen der städtetypischen Einflussfaktoren auf Flechten werden in Tab. 01 zusammengefasst. Durch eine Flechtenkartierung möglicherweise quantifizierbare Beobachtungen werden genannt.

Tab. 01: Unterschiede stark versiegelter innenstädtischer Zonen im Vergleich zum Umland und mögliche Auswirkungen auf Flechten

Merkmale	Vergleich zum Umland	mögliche Auswirkungen auf Flechten	mögliche quantifizierbare Beobachtungen
<u>Mitteltemperaturen</u>	höher	Beschleunigung des Stoffwechsels und Verlängerung der stoffwechselaktiven Zeitspanne, aber nur bei ausreichender Feuchte (vor allem im Herbst, Winter, Frühjahr)	Anstieg der Artenzahl und Abundanz wärmeliebender Arten höhere mittlere Temperaturzeigerwerte der Flechten
<u>Luftfeuchte im Sommer</u>	geringer	häufigere Austrocknung des Flechtenthallus und vorübergehende Inaktivierung der Lebensvorgänge	Förderung Artenzahl und Abundanz der (wenigen) trockenheitstoleranten Arten gegenüber den (zahlreichen) feuchtebedürftigen Arten niedrigere mittlere Feuchtezeigerwerte der Flechten
<u>morgendliche Taubildung</u>	geringer	Reduktion der Photosynthese in den Morgenstunden, da Flechten seltener ausreichend durchfeuchtet sind	höhere mittlere Frequenzen trockenheitstoleranter Arten der Krustenflechten und schmallappigen Blattflechten
<u>Immissionen</u> eutrophierende Komponenten (partikelgebunden, NH ₃)	höher	Schädigung eutrophierungsempfindlicher Arten Förderung eutrophierungstoleranter Arten	Erniedrigung der Flechtendiversität Erhöhung der mittleren Nährstoffzeigerwerte

Flechtenkartierungen in Städten liegen in der Regel immissionsökologische Fragestellungen zugrunde. Es werden Daten zu Diversität und Frequenz epiphytischer Flechten erhoben. Die Luftqualität hat sich in den deutschen Städten in den letzten drei Jahrzehnten soweit verbessert, dass

Flechten bis in die Stadtzentren angetroffen werden können. Erst dadurch wurde die Voraussetzung geschaffen, Flechten zum Stadtklimabiomonitoring einzusetzen. Inwieweit zukünftig – neben den eutrophierenden bzw. schädigenden Wirkungen der Luftschadstoffe – auch die Wirkungen der städtischen Wärmeinsel zur Erklärung der städtischen Flechtenverbreitung herangezogen werden können, bleibt zu erforschen.

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Rhein-Main-Gebiet. Es umfasst die hessische Landeshauptstadt Wiesbaden und die direkt südlich angrenzende rheinland-pfälzische Landeshauptstadt Mainz. Mit seiner Taunusrandlage ist Wiesbaden im Jahresmittel etwas niederschlagsreicher als Mainz (Tab. 02). Die Anzahl der Tage, an denen die Höchsttemperatur in Wiesbaden 30 °C erreicht („heiße Tage“), ist geringer als in Mainz (Abb. 02).

Tab. 02: Statistische Daten für Wiesbaden und Mainz

	Wiesbaden	Mainz
Fläche	203,93 km ²	97,74 km ²
Einwohner (Stand: 31.12.2016)	277.619	213.528
Jahresmitteltemperatur (AM Online Projects)	9,6 °C	9,8 °C
Jahresniederschlag (AM Online Projects)	613 mm	553 mm

Das Stadtklima in Wiesbaden und Mainz ist Gegenstand des Projekts Klimawandel in der Praxis („KLIMPRAX“), in dem stadtklimatische Belange in kommunalen Planungsprozessen berücksichtigt werden sollen. Das Projekt beschäftigt sich mit den temperaturbedingten Klimafolgen für Kommunen. Mainz und Wiesbaden gehören, gemessen an der Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 1971-2000, deutschlandweit neben Karlsruhe, Freiburg und Frankfurt zu den fünf wärmsten Städten Deutschlands (Noppel 2017).

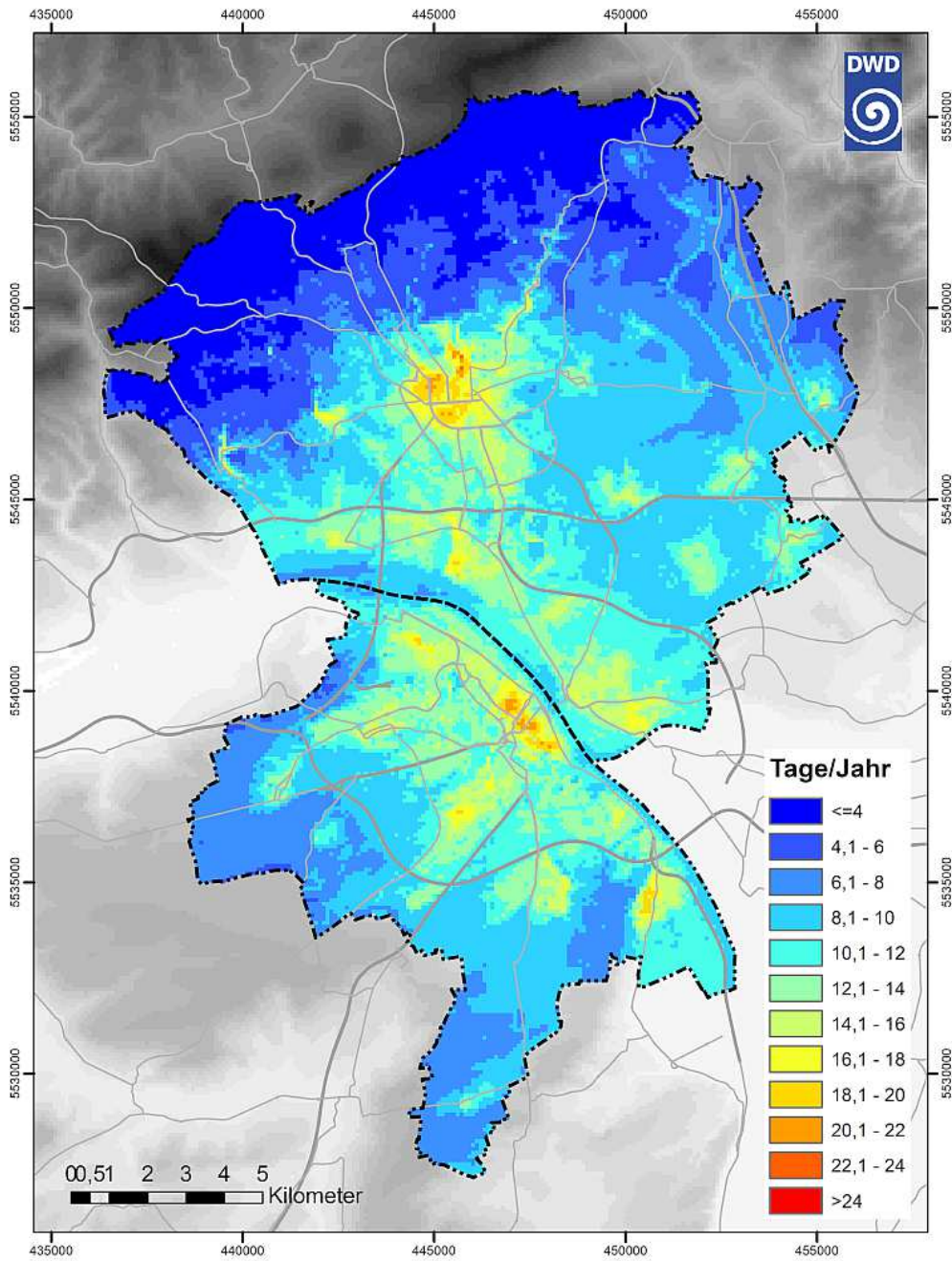


Abb. 02: Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 1971 – 2000, Stand: Juni 2014 (Noppel 2017)

4 Methoden

Es werden Flechten-Grunddaten nach einer standardisierten Methode erhoben. Die Methode stammt aus dem Luftgüte-Biomonitoring. Diese Grunddaten dienen zur Beurteilung der Luftgüte. Weiterhin werden sie zum Stadtklimabiomonitoring herangezogen.

4.1 Flechtenkartierung zur Bestimmung der Luftgüte

Eine Bestimmung der Luftgüte und der Wirkung eutrophierender Luftverunreinigungen mittels einer Flechtenkartierung wurde vorgenommen, um die zeitliche Entwicklung der lufthygienischen Situation seit der letzten Flechtenkartierung in den 1990er Jahren zu dokumentieren. Dazu wurden im Untersuchungsgebiet flächendeckend geeignete Bäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. Die Datenerfassung erfolgte auf Basis einer bewährten und standardisierten Erfassungsmethode (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 Anhang A), die im Luftgüte-Biomonitoring seit den 1970er Jahren in Hessen erfolgreich angewendet wird.

4.1.1 Messnetz

Zur ersten Orientierung wird ein Messnetz mit einer Maschenweite von 1 km x 1 km über das Untersuchungsgebiet Wiesbaden-Mainz gelegt. Pro Fläche werden ein bis drei Untersuchungspunkte festgelegt. Sowohl am Taunusrand im Norden der Stadt als auch im verdichteten Innenstadtbereich von Wiesbaden und Mainz wird engmaschiger untersucht als in den Außenbereichen der beiden Städte. So ergeben sich auf der Fläche der Stadt Wiesbaden insgesamt 52, in Mainz 33 Untersuchungspunkte (Abb. 3). An jedem Punkt werden 4-6 Bäume untersucht. Die Bäume eines Untersuchungspunktes stehen auf homogenen Geländeabschnitten, das heißt, dass sie nach Begutachtung des Umfeldes der Bäume augenscheinlich möglichst identische Standortigenschaften aufweisen. Die Liste der Untersuchungspunkte findet sich im Anhang 2.

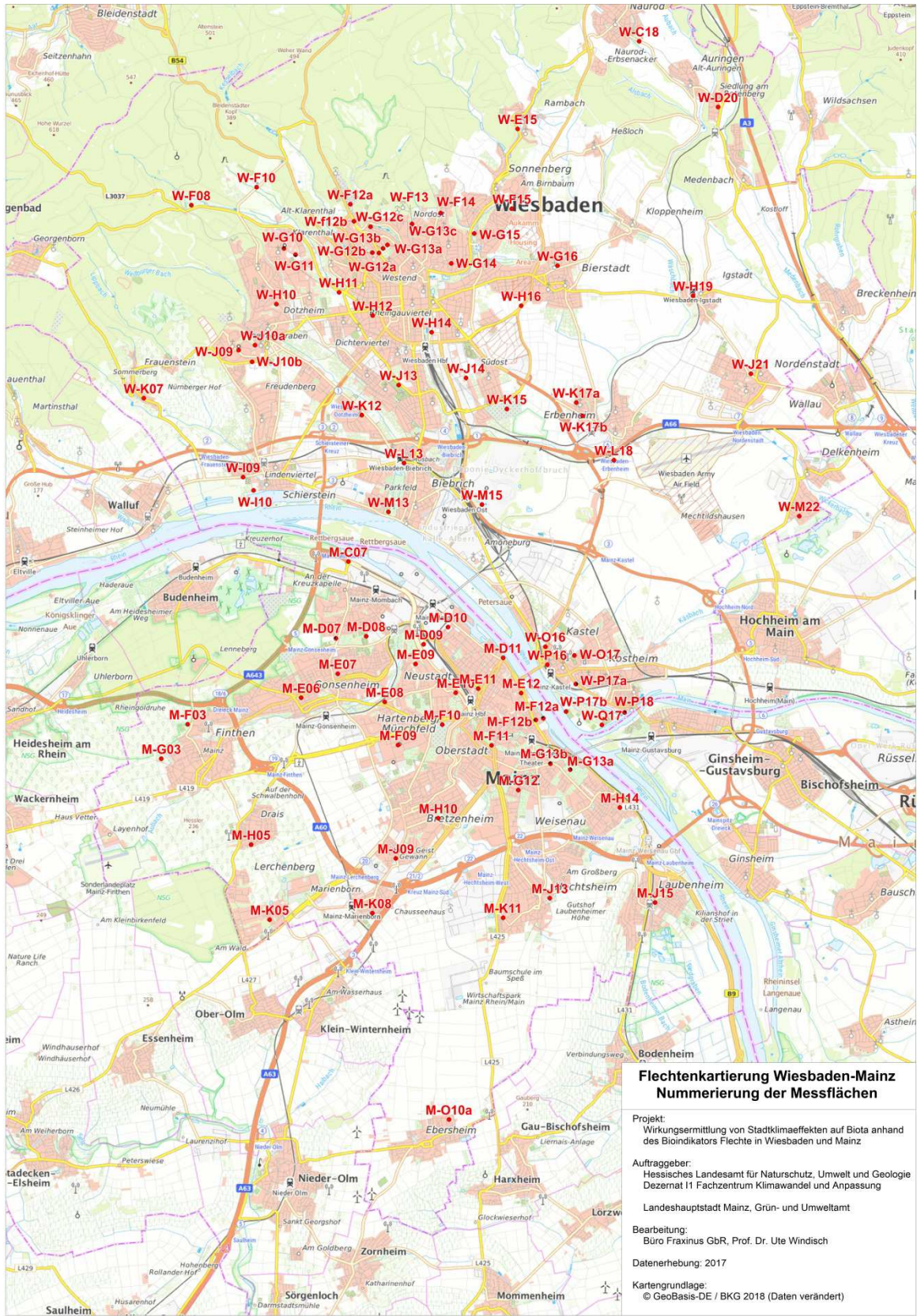


Abb. 03: Karte mit Positionen der Untersuchungspunkte in Wiesbaden (W) und Mainz (M)

4.1.2 Trägerbäume

Bei einer Luftgüteuntersuchung wird angestrebt, alle Standortfaktoren möglichst einheitlich zu halten, um Unterschiede bei den Luftschadstoffwirkungen herauszuarbeiten. Dies betrifft auch die Auswahl der Flechten-Trägerbäume. Die Auswahl der Bäume erfolgt zum einen nach den Anforderungen der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 3957 Blatt 13), wonach die Bäume frei stehend und gerade gewachsen sind sowie der Baumartengruppe 1 (Tab. 03) angehören. Zum anderen sollen die Bäume eines Untersuchungspunktes einem homogenen Geländeabschnitt angehören, das heißt, sie sollen möglichst identischen stadtklimatischen und immissionsökologischen Standortbedingungen ausgesetzt sein. Die Lage der Trägerbäume wird vor Ort durch ein GPS erfasst und als UTM-Koordinaten gespeichert. Es werden Baumart und Stammumfang dokumentiert.

Tab. 03: Baumartengruppen nach VDI 3957 Blatt 13, mit Baumumfang in cm (VDI 3957 Blatt 13 2005, vereinfacht)

Gruppe 1 subneutrale Baumrinde	Gruppe 2 saure Baumrinde
Spitzahorn (70 bis 280)	Schwarz-Erle (70 bis 280)
Esche (70 bis 280)	Hänge-Birke (70 bis 280)
Ulme (70 bis 280)	Kirsche (70 bis 280)
Walnussbaum (70 bis 280)	Zwetschge (70 bis 160)
Manna-Esche (70 bis 280)	Stiel-Eiche (70 bis 280)
Hybrid-Pappel (70 bis 280)	Trauben-Eiche (70 bis 280)
Bergahorn (70 bis 280)	Birnbaum (70 bis 160)
Apfelbaum (70 bis 160)	Winterlinde (70 bis 280)
Birnbaum (70 bis 160)	Sommerlinde (70 bis 280)
Winterlinde (70 bis 280)	
Sommerlinde (70 bis 280)	

4.1.3 Erfassung der Flechten

Im Rahmen der Flechten-Dauerbeobachtung wurden Mitte der 1990er Jahre im Stadtgebiet von Wiesbaden an 18 Messflächen Flechtendaten erhoben. Dabei wurde ein Messgitter verwendet wie in VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Anhang A beschrieben (VDI 3957 Blatt 13 2005). Um die Daten mit denen der letzten Kartierungen vergleichen zu können, wird dieses Gitter wieder eingesetzt.

Zur Erfassung der Flechten wird das Gitter mit zehn Gitterfeldern (je 10 x 10 cm) an der am stärksten bewachsenen Stammseite angelegt (Abb. 04).

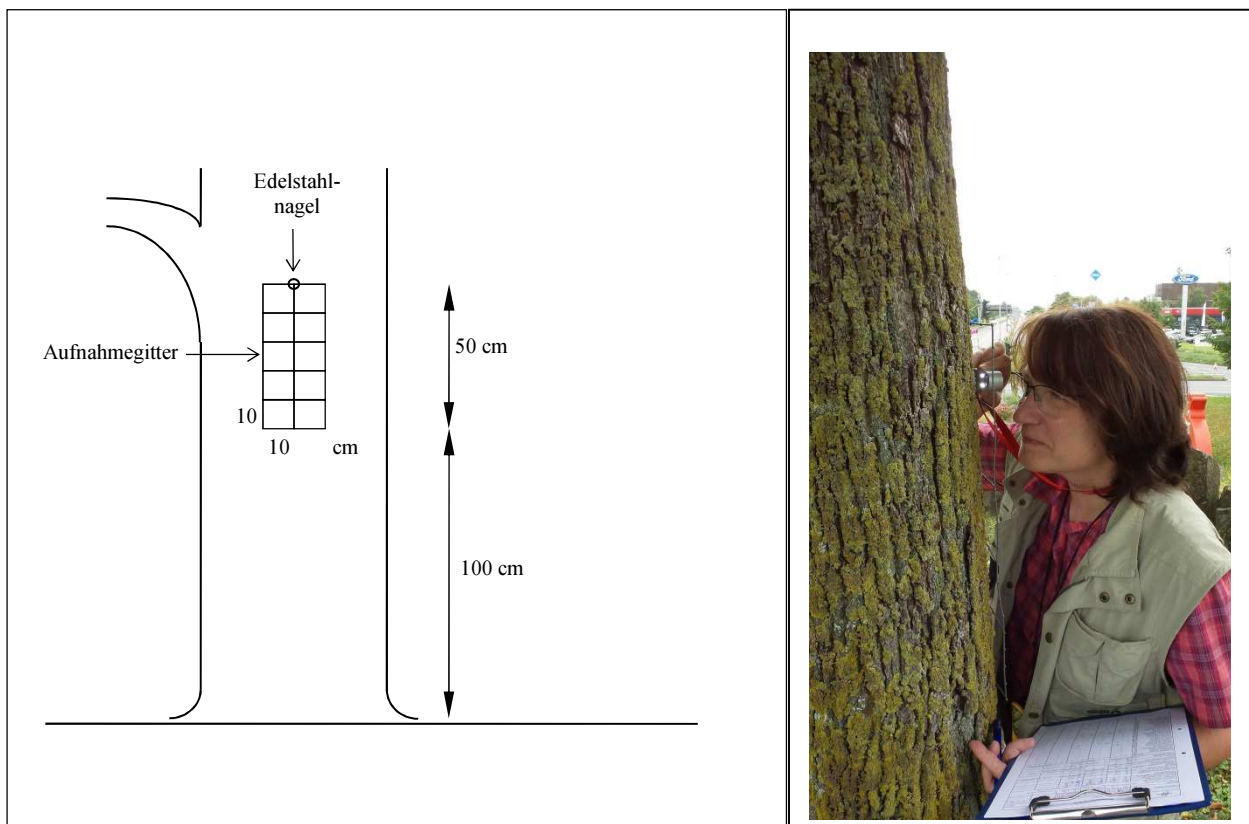


Abb. 04: links: Flechtenaufnahmegerät am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005); rechts: Flechtenkartierung in der Praxis

Die Himmelsrichtung (Exposition) wird ermittelt. Für jede vorgefundene Flechtenart wird erfasst, in wie vielen der zehn Felder des Gitters die Art vorkommt (Frequenz). Ist eine Identifikation der Flechten vor Ort nicht sicher möglich, werden unter Schonung des Bestandes Proben genommen und im Labor bestimmt. Als Bestimmungsliteratur dient das Werk von WIRTH (Wirth et al. 2013). Das Datenmaterial wird in eine EDV-Datenbank eingegeben und für die Berechnung potentiell stadtklimarelevanter Flechten-Indizes verwendet.

4.1.4 Berechnung des Luftgüteindex (LGI)

Die Datenauswertung erfolgt nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13).

Aus der Anzahl der im Aufnahmegitter vorhandenen Arten und deren Häufigkeit werden zunächst Flechten-Diversitätswerte (FDW) errechnet. Die FDW werden für die Eutrophierung anzeigenden Arten (Eutrophierungszeiger) und für die übrigen Arten (Referenzarten) getrennt berechnet. Eutrophierungszeiger sind die in Tabelle 4 genannten Arten. Alle übrigen Flechtenarten, die nach dem vorangegangenen Punkt nicht in der Liste der Eutrophierungszeiger erscheinen, werden nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 13 als Referenzarten bezeichnet (VDI 3957 Blatt 13 2005).

Tab. 04: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Stand: 2005

Flechtenspezies
<i>Caloplaca citrina</i>
<i>Caloplaca holocarpa</i>
<i>Lecanora dispersa</i>
<i>Lecanora hagenii</i>
<i>Lecanora muralis</i>
<i>Phaeophyscia nigricans</i>
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>
<i>Physcia adscendens</i>
<i>Physcia caesia</i>
<i>Physcia dubia</i>
<i>Physcia tenella</i>
<i>Physconia grisea</i>
<i>Rinodina</i> spp.
<i>Xanthoria candelaria</i>
<i>Xanthoria parietina</i>
<i>Xanthoria polycarpa</i>

In der Kartierung wurden alle Arten der Eutrophierungszeigerliste außer *Caloplaca citrina*, *Lecanora muralis* und *Rinodina spp.* im Messgitter gefunden.

Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Zeigerwerten für Flechten nach WIRTH (2010). In einer neunstufigen Skala werden dabei die Ansprüche der Arten gegenüber wichtigen ökologischen Faktoren wie Temperatur, Feuchte, Eutrophierung und Rinden-pH-Wert ausgedrückt.

Für die ermittelten Flechtendiversitätswerte können in der Bewertungsmatrix (Abb. 05) die entsprechenden Luftgüteindizes (LGI), zum Beispiel „4 E2“, ausgelesen werden. Für jede Messfläche wird ein LGI ermittelt. Die Bewertung des LGI ist in Abb. 06 erläutert. Der Luftgüteindex repräsentiert die Belastung durch Luftverunreinigungen, hier mit einem Schwerpunkt auf saure und eutrophierende Komponenten. Er setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt, die zweite Ziffer symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern. Dabei wird die Luftgüte verbal mit „sehr hoch - hoch - mäßig - gering - sehr gering“ bewertet und mit der entsprechenden Farbe in der Luftgütekarte gekennzeichnet.

Die Grunddaten der früheren Untersuchung aus 1994 werden nach derselben Methode ausgewertet.

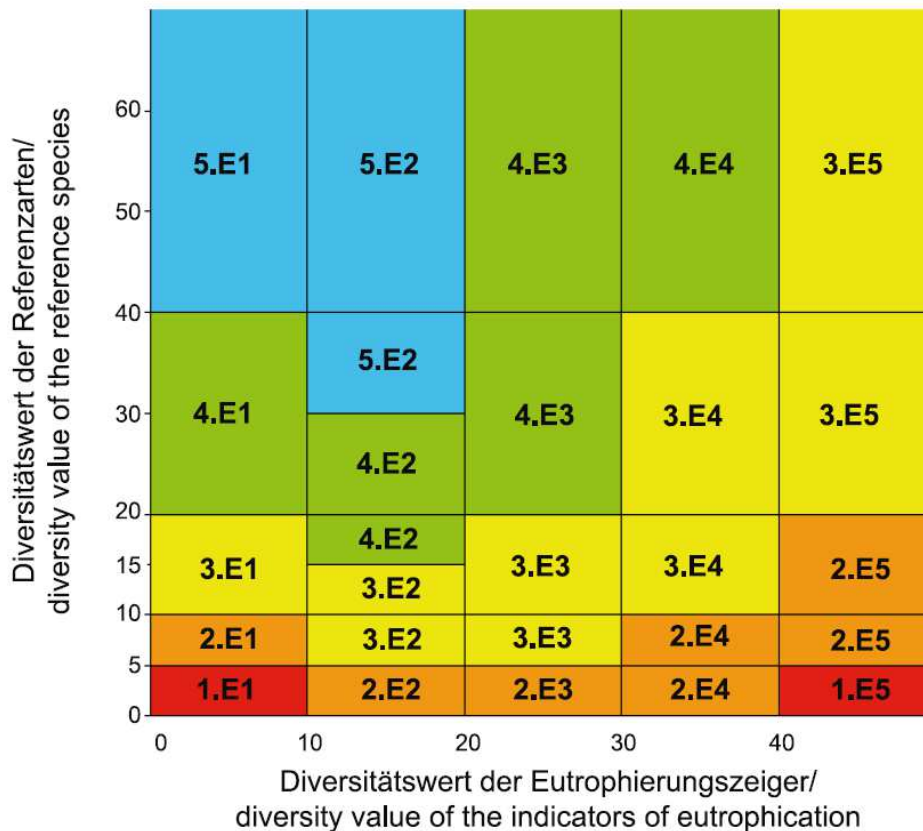


Abb. 05: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung mit dem Aufnahmegitter der VDI 3799), nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A

Bewertung der Luftgüte/Evaluation of air quality	Indexwert (erste Ziffer) und Farbe/Index value (first digit) and colour
sehr hohe Luftgüte/very high air quality	5
hohe Luftgüte/high air quality	4
mäßige Luftgüte/moderate air quality	3
geringe Luftgüte/low air quality	2
sehr geringe Luftgüte/very low air quality	1

Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger/ diversity values of the indicators for eutrophication	Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen/ influence of eutrophication substances	Indexwert (zweite Ziffer)/ Index value (second digit)
sehr hoch/very high	sehr stark/very strong	E5
hoch/high	stark/strong	E4
mäßig/moderate	mäßig/moderate	E3
niedrig/low	gering/low	E2
sehr niedrig/very low	sehr gering/very low	E1

Abb. 06: Erläuterung der Bewertungsmatrix, nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A

4.2 Stadtklimabiomonitoring

Es soll untersucht werden, inwieweit – neben den eutrophierenden bzw. schädigenden Wirkungen der Luftschadstoffe – auch die Wirkungen der städtischen Wärmeinsel zur Erklärung der städtischen Flechtenverbreitung herangezogen werden können. Dazu wurden die Flechtendaten der Luftgütekartierung nach verschiedenen Varianten ausgewertet, um Flechtendindizes zu finden, die geeignet sind, Stadtklimaeffekte darzustellen.

4.2.1 Berechnung potentiell relevanter Flechten-Indizes für das Stadtklimabiomonitoring

Auf Basis der unterschiedlichen Ansprüche von Flechtenspezies gegenüber abiotischen Faktoren (z. B. der Temperatur, der Feuchtigkeitsversorgung, etc.) werden ökologische Flechtengruppen zusammengestellt. Grundlage für die Einordnung der Gruppen sind Literaturdaten zur Flechtenökologie und eigene Geländeerfahrungen.

Aus den Grunddaten der Luftgütekartierung werden Flechten-Indizes für die ökologischen Flechtengruppen neu berechnet. Die Häufigkeit der Flechten im Messgitter (Frequenz) geht in den Index ein. Den ausgewählten Indizes liegen Annahmen zugrunde, die im Folgenden überprüft werden sollen.

Einzelne Arten (Frequenz_Art_x)

Jede Flechtenart hat spezifische Ansprüche an ihren Wuchsort. Im Umkehrschluss erlaubt das Vorkommen einer Art in zahlreichen Messgitterflächen (hohe Frequenz) Rückschlüsse auf die dort vorhandenen Standorteigenschaften. Die Frequenz der häufiger erfassten Arten wird berechnet und geht in die statistische Auswertung ein.

Gesamtartenzahl der Flechten (Summe_Frequenz_alle_Arten)

Nach den biozönotischen Gesetzen von THIENEMANN ist die Zahl der vorkommenden Arten dort am geringsten, wo die abiotischen Umweltbedingungen limitierend sind und am höchsten unter Bedingungen, die einer Vielzahl von Organismen eine lebensfreundliche Umwelt bieten (Odum 1991). Sind Wärmeinseleffekte ausgeprägt, sind die Perioden mit positiver Stoffwechselbilanz der Flechten gegenüber dem Umland möglicherweise kürzer.

Kühlezeiger (Summe_Frequenz_Kühlezeiger)

Kühlezeiger meiden stark versiegelte und überwärmte Innenstadtbereiche und kommen verstärkt in Kaltluftschneisen vor, wie auch Erfahrungen in Aschaffenburg zeigen (Vorbeck et al. 2009).

Als Kühlezeiger wurden Flechtenarten definiert, die eine Temperaturzahl ≤ 4 haben. Die Temperaturzahl ist ein ökologischer Zeigerwert nach WIRTH (Wirth 2010).

Wärmezeiger (Summe_Frequenz__Wärmezeiger)

Der städtische Wärmeinseleffekt führt möglicherweise zu einem gehäuften Vorkommen wärme liebender Flechtenspezies im Stadtzentrum im Vergleich zum Umland. Als Wärmezeiger werden hier Flechtenarten definiert, die eine Temperaturzahl ≥ 7 haben.

Klimawandelzeiger (Summe_Frequenz_KWZ)

Klimawandelzeiger unter den Flechten sind solche Arten, die geeignet sind, Wirkungen des Klimawandels nachzuweisen, zu bewerten und zu dokumentieren. Im Sinne eines „Frühwarnsystems“ zeigen diese Flechten klimawandelbedingte Veränderungen der Biodiversität an. Die Liste der Klimawandelzeiger, die 45 Flechtenarten umfasst, wurde in der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20 zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen veröffentlicht (VDI 3957 Blatt 20 2015). Die Arten haben ihren Verbreitungsschwerpunkt in subatlantisch-submediterranen Regionen mit mildfeuchten Wintern. Sie waren bisher in Deutschland in ihrer Verbreitung klimatisch begrenzt oder nicht bekannt. Seit einigen Jahren wandern sie von Westen und Süden her in Deutschland ein.

Mit *Flavoparmelia soredians*, *F. caperata*, *Hypotrachyna afrorevoluta*, *Melanohalea laciniatula*, *Melanohalea elegantula*, *Parmotrema perlatum*, *Punctelia jeckeri*, *P. subrudecta* und *Punctelia borrieri* wurden neun Arten der Klimawandelzeiger in Wiesbaden und Mainz kartiert.

Neutrophyten und Eutrophierungszeiger (Summe_Frequenz_Neutroph_Eutroph)

Neutrophyten sind Flechtenarten, die auf Substraten mit einem neutralen pH-Wert siedeln, Eutrophierungszeiger bevorzugen nährstoffangereicherte Substrate. Die Ausbreitung dieser Gruppe von Arten wird möglicherweise durch stadttypische Alkalisierung und Nährstoffanreicherung der städtischen Habitate gefördert. Als „Neutrophyten und Eutrophierungszeiger“ werden Flechtenarten definiert, die eine Reaktionszahl > 5 und eine Eutrophierungszahl (früher Nährstoffzahl) > 5 haben. Es handelt sich um Zeigerwerte nach WIRTH (Wirth 2010).

Acidophyten und Oligotrophiezeiger (Summe_Frequenz_Acidoph_Oligotroph)

Hier handelt es sich im Gegensatz zur zuvor genannten Gruppe um Species, die saurere, nährstoffärmere Baumrinden bevorzugen. Es gehören solche Arten in die Gruppe, die eine Reaktionszahl < 4 und eine Eutrophierungszahl < 4 haben. Es handelt sich um Zeigerwerte nach WIRTH (Wirth 2010).

Gattungen *Phaeophyscia* und *Hyperphyscia* (Summe_Frequenz_Phaeoph_Hyperphy)

In den untersuchten Stadtgebieten sind dies *Phaeophyscia orbicularis*, *Phaeophyscia nigricans* und *Hyperphyscia adglutinata* (vgl. Fotos auf Seite 71). Es handelt sich um kleine, schmal-lappige, an die Rinde eng angepresste Blattflechten, die in Habitaten mit einer übermäßigen Nährstoffversorgung anzutreffen sind. Die Spezies *Phaeophyscia orbicularis* gilt als eine der toxi- und eutrophierungstolerantesten Blattflechten (Wirth et al. 2013). Als sehr euryöke und häufige Art besiedelt sie sowohl nährstoffangereicherte Rinden als auch basenreiches Gestein. Ähnlich wird das bevorzugte Substrat von *Phaeophyscia nigricans* beschrieben. Nach einer immissionsbezogenen Flechtenstudie in München kommt *Ph. nigricans* häufiger an Straßenbäumen in unmittelbarer Nähe zu stark befahrenen Straßen vor als an nahe gelegenen Bäumen, die aber weiter von der Straße entfernt standen (Vorbeck und Windisch 2002).

Habituell den Phaeophysciern ähnlich ist *Hyperphyscia adglutinata*. Auch diese – aufgrund ihrer geringen Größe leicht zu übersehende – Art liegt sehr eng dem Untergrund an. Nach WIRTH ist sie temperat bis mediterran verbreitet, wächst insbesondere in den warmen und milden Gebieten Deutschlands und bevorzugt subneutrale, oft staubimprägnierte Rinde und mineralreiches Gestein (Wirth et al. 2013).

Wuchsformen (Summe_Frequenz_Krustenflechten, Summe_Frequenz_Blattflechten, Summe_Frequenz_Strauchflechten)

Flechten werden in drei Wuchsformen (Krusten-, Blatt- und Strauchflechten) eingeteilt. Laut früheren Arbeiten – aus Zeiten hoher saurer Schadstoffbelastung – fielen vom Stadtrand zum Stadtzentrum zuerst die Strauchflechten, dann die Blattflechten und zuletzt die Krustenflechten aus (Barkman 1958; Beschel 1958; Hoislbauer 1979).

Möglicherweise spielt bei der geringen Toxizität der Strauchflechten und ihrem Meiden von Städten („Poleophobie“) die Morphologie eine wichtige Rolle: Bei Strauchflechten sind sowohl Ober- als auch Unterseite des Thallus exponiert und stehen dem Wasser- und Stoffaustausch zur Verfügung. Sie können deshalb rascher austrocknen als Krusten- und Blattflechten. In Wiesbaden und Mainz wurden aktuell mit *Anaptychia ciliaris*, *Cladonia fimbriata*, *Evernia prunastri*, *Pseudevernia furfuracea*, *Ramalina farinacea*, *Ramalina fraxinea* und *Usnea hirta* insgesamt sieben Strauchflechtenarten angetroffen.

Die Blattflechten sind eine recht inhomogene Gruppe, die Übergänge von Arten mit dicht angepressten Thalli (z. B. *Phaeophyscia orbicularis*) bis hin zu Spezies mit sehr locker aufliegenden bis aufsteigenden Loben (z. B. *Platismatia glauca*) zeigen.

Die Krustenflechten sind mit dem Substrat verwachsen und bewerkstelligen den Wasser- und

Stoffaustausch nur mit ihrer Thallusoberseite und erscheinen nach diesem Kriterium als hygrisch weniger anspruchsvoll als die zuvor genannten Strauchflechten.

Große Blattflechten (Summe_Frequenz_GrBlatt)

Große Blattflechten sind anspruchsvoller bezüglich der Wasserversorgung als die deutlich kleineren und schmallappigen Blattflechtengattungen und Krustenflechten, da die Loben der großlappigen Blattflechten locker auf dem Substrat aufliegen. Sowohl Ober- als auch Unterseite der Flechtenkörper sind in Kontakt mit der Atmosphäre und können Wasser abgeben. Dadurch trocknen sie rascher aus als viele der schmallappigen, der Borke eng anliegenden Blattflechten, wie z. B. Phaeophyscien oder Physconien. Es wurde eine Auswahl breitlappiger, in den untersuchten Städten regelmäßig anzutreffender Gattungen getroffen: *Flavoparmelia*, *Hypogymnia*, *Hypotrachyna*, *Melanelixia*, *Melanohalea*, *Parmelia*, *Parmelina*, *Platismatia*, *Pleurosticta* und *Punctelia*. Die Gattung *Xanthoria* wurde ausgeschlossen.

Eutrophierungszeiger nach VDI 3957 Blatt 13 (Summe_Frequenz_Eutroph_VDI3957)

Eutrophierungszeiger unter den Flechten sind Arten, die eine übermäßige Nährstoffversorgung anzeigen. Möglicherweise erhöht sich die Häufigkeit von Eutrophierung anzeigenden Flechtenarten in Stadtzentren, welche durch Aufwirbelungen nährstoffhaltiger Bodenbestandteile und Emission eutrophierender Verbindungen eine Nährstoffanreicherung erfahren (vgl. Kapitel 2.2).

Nach der Flechtenkartierungs-Richtlinie des VDI sind 16 Arten als Eutrophierungszeiger ausgewiesen (vgl. Tab. 04) (VDI 3957 Blatt 13 2005). Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Ellenberg'schen Zeigerwerten für Flechten, die von WIRTH um ökologische Kennzahlen für Flechten ergänzt wurden (Ellenberg et al. 2001; Wirth 2010).

4.2.2 Erhebung von Standortparametern in der Umgebung der kartierten Flechten-Trägerbäume

Zur späteren Interpretation der Flechtendaten werden Daten zur Umgebung der kartierten Bäume benötigt. Daher werden Standortparameter für jeden der kartierten Trägerbäume vor Ort ermittelt oder mittels eines Geografischen Informationssystems aus einer Analyse des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen (Noppel 2017).

4.2.2.1 Kenndaten zu Topografie und Nutzung

Geländehöhe und Landnutzungsklassen

Sowohl die Geländehöhe der Trägerbäume in Meter über Normalnull als auch die jeweilige Landnutzung stammen aus der Arbeit des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (Noppel 2017). Dabei liegen 15 Typen der Landnutzung mit städtischer Bebauung vor. In die Klassifizierung gehen die mittlere Gebäudehöhe, der mittlere Wandflächenindex sowie der mittlere Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden ein. Weitere 15 Landnutzungstypen beschreiben den unbebauten Raum. Nähere Erläuterungen sind der DWD-Analyse zu entnehmen (Noppel 2017).

- Geländehöhe nach DWD 2017, Abb. 4-1, „Topografie_dgm50_BKG_Muklimo_fl“ (gel_hoehe)
- Landnutzungsklasse nach DWD 2017, Abb. 4-2 (land_nutz)

Versiegelung im Nahbereich der Bäume

Auf versiegelten Flächen wird das Wasser rasch abgeführt und die Bildung von Verdunstungskälte verhindert. Zudem absorbieren die überwiegend dunklen Flächen (Asphalt) viel Wärme; so kommt es an heißen Tagen zu einer starken Erwärmung. Während der Kartierung wird vor Ort die Bodenversiegelung in einem Radius von 20 Metern um den Trägerbaum herum ermittelt. Als versiegelte Flächen werden solche angesehen, die betoniert oder asphaltiert sind. Die Aufnahme erfolgt in vier Kategorien (Tab. 05, vgl. auch Abb. 07).

Tab. 05: Kategorien der Versiegelung im direkten Umfeld der Trägerbäume

Kategorie	Versiegelung in %	Beschreibung
1	0-25	kaum versiegelt
2	25-50	mäßig versiegelt
3	50-75	überwiegend versiegelt
4	75-100	stark versiegelt



Abb. 07: Flechten-Trägerbäume im Umfeld einer geringen Versiegelung (oben: Mainz Volkspark, M-G13a) und einer starken Versiegelung (unten: Mainz Karmeliterstraße, M-E12)

Nutzung im Nahbereich der Bäume

Zusätzlich zur Landnutzungs-kategorie (vgl. Kapitel 4.2.2.1) wird vor Ort die Nutzung im nahen Umfeld der Trägerbäume beurteilt und in vier Kategorien eingeteilt

Tab. 06: Kategorien der Flächennutzung im direkten Umfeld der Trägerbäume

Kategorie	Beschreibung
1	ländlich
2	Wohngebiet
3	industriell
4	gemischt
5	Grünanlage, Park, Friedhof

Verkehrseinfluss

Die Trägerbäume städtischer Flechtenkartierungen stehen häufig an Straßen, was mit einer direkten Beeinflussung des Mikroklimas und der Schadstoffbelastung einhergeht. Daher wird das Ausmaß der Verkehrsbelastung bei der Geländeerfassung vor Ort erhoben (Tab. 7). Der Abstand der Trägerbäume zur Straße wird in fünf Stufen erfasst (Tab. 8). Die Breite der Straße wird nach Tabelle 9 beschrieben.

Tab. 07: Kategorien der Verkehrsbelastung im direkten Umfeld der Trägerbäume

Kategorie	Beschreibung
1	unmittelbarer Verkehrseinfluss; bis 10 m Abstand zu Hauptverkehrsstraßen und Ampelkreuzungen
2	indirekter Verkehrseinfluss; 10-50 m Abstand zu Hauptverkehrsstraßen
3	innerstädtische Wohngebiete, verkehrsberuhigte Zonen oder Nebenstraßen
4	Parks und Grünanlagen, ländliche Gebiete

Tab. 08: Abstand des Trägerbaumes

zur Straße

Kategorie	Abstand in Meter
1	0-2
2	2-10
3	10-20
4	20-50
5	> 50

Tab. 09: Beschreibung der Straßenbreite

Kategorie	Breite
1	Fuß- und Radweg
2	Straße mit 1-3 Fahrstreifen
3	Straße mit 4-6 Fahrstreifen
4	Straße mit mehr als 6 Fahrstreifen

4.2.2.2 Daten aus einer Stadtklimaanalyse des DWD

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellte für das Projektgebiet im Jahr 2017 eine modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung zur Verfügung (Noppel 2017). Unter anderem wurde eine Simulation meteorologischer Parameter in fünf Metern Höhe für einen windschwachen, heißen Sommertag vorgenommen. Typisch für einen solchen Tag sind hohe Temperaturen, ein nur sehr schwacher, großräumiger Wind aus Westsüdwest und ein wolkenloser Himmel. Unter diesen Voraussetzungen treten lokale Ausprägungen von Stadtklimaeffekten anschaulich hervor.

Für jeden Baumstandort der Flechtenkartierung werden unter Zuhilfenahme einer GIS-Software aus dem DWD-Gutachten folgende Daten entnommen:

- Lufttemperatur um 16 MESZ nach DWD 2017, Abb. 5-1 (temp_16)
- Lufttemperatur um 4 MESZ nach DWD 2017, Abb. 5-3 (temp_4)
- Gefühlte Temperatur um 16 MESZ nach DWD 2017, Abb. 5-4 (geftemp_16 Uhr)
- Gefühlte Temperatur um 4 MESZ nach DWD 2017; Abb. 5-6 (geftemp_4 Uhr)
- Anzahl Sommertage 1971-2000; DWD 2017, Abb. 6-1, „Kenntage_1971_2000_sommertage_00_fl“ (somm_tage_71_2000)
- Anzahl heiße Tage; DWD 2017, Abb. 6-2, „Kenntage_1971_2000_heissetage_00_fl“ (heisse_tage_71_2000)
- Anzahl Tropennächte; Abb. 6-3, „Kenntage_1971_2000_tropennaechte_00_fl“ (tropen_nä_71_2000)

4.2.3 Mikroklimatische Parameter der Flechtenhabitate

Im Vorkapitel wurden Standortdaten wie die zur Lufttemperatur aus der Umgebung der Trägerbäume in fünf Metern Höhe und damit über der Baumkrone behandelt. Der Lebensraum (Habitat) der kartierten Flechten ist ein Stammabschnitt am Mittelstamm der Bäume. Hier könnten Faktoren wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit beispielsweise durch direkte Sonneneinstrahlung oder Beschattung durch die Baumkrone andere Ausprägungen erfahren. Um die Schwankungsbreite wichtiger Mikroklimaparameter der Flechtenhabitate zu erfassen, wurden Mikroklimamessungen am Mittelstamm einiger kartierter Bäume vorgenommen.

4.2.3.1 Besonnung

Eine Anforderung an die untersuchten Trägerbäume ist, dass sie freistehend sind, was eine gute Lichtversorgung impliziert. Gerade in Städten findet jedoch in der Regel eine Horizonteneinengung, etwa durch Gebäude, aber auch benachbarte Bäume statt. Eine direkte Sonneneinstrahlung auf die untersuchten Flechtenbestände findet meist nur während einiger Stunden des Tages statt.

Die tägliche Besonnungsdauer wird mit einem Horizontoscop (Abb. 8) ermittelt. Das Messgerät arbeitet mit einer durchsichtigen, gekrümmten Schale, durch die Strahlen aus der Umgebung auf ein sogenanntes „stereographisches Sonnenstands-Diagramm für 50 °N“ projiziert werden.

Durch Ablesen des Diagramms können die Tagesstunden mit Besonnung jeweils für einen bestimmten Monat abgelesen werden. Durch Gebäude reflektierte Strahlung wird nicht berücksichtigt. Stunden, in denen die Baumkronen benachbarter Bäume Lichtflecken erzeugten, werden hingegen mitgezählt. Für jeden Baumstamm wird die tägliche Besonnungsdauer in Stunden für den Monat August abgelesen. Die Messung findet am Baumstamm im Bereich des Flechtenmessgitters statt.



Abb. 08: Horizontoscop nach TONNE (Bild: Institut für Tageslichttechnik Stuttgart)

4.2.3.2 Datenloggermessungen: Temperatur, Luftfeuchte, Taupunkt

An fünf Messpunkten im Wiesbadener Stadtgebiet sowie drei Punkten in Mainz werden Datenlogger zur Erfassung mikroklimatischer Daten installiert.

Die Datenlogger der Firma Uni-Trend Technology Limited in der Ausführung UT330C werden in 1,5 Metern Höhe (in Höhe des Flechtenmessgitters) in Südexposition am Trägerbaum befestigt (Abb. 09). Über interne Sensoren erfolgt die Erfassung von Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, zusätzlich wird der Taupunkt angegeben. Die Daten werden vollautomatisch aufgezeichnet und gespeichert und werden im Anschluss an die Messungen über die USB-Schnittstelle ausgelesen.



Abb. 09: Datenlogger an Trägerbaum in Wiesbaden - Nerotal Süd

Tab. 10: Technische Daten des Datalogger UT330C

Temperatur-Messbereich	-40 bis +80 °C
Auflösung	0,1 °C
Genauigkeit	0 bis 40 °C: 0,5 °C; 40 bis 70 °C: 1 °C
Luftfeuchte-Messbereich	750 bis 1100 hPa
Auflösung	0,1 hPa
Genauigkeit	+/- 3 hPa

5 Ergebnisse

5.1 Kenndaten der Flechtenkartierung

Im Projektgebiet Wiesbaden-Mainz wurden an 85 Untersuchungspunkten Flechten-Datensätze von insgesamt 452 **Trägerbäumen** erhoben. An den 52 Untersuchungspunkten in Wiesbaden wurden 280 Bäume kartiert, in Mainz waren es an 33 Punkten 172 Bäume. Ahorne und Linden lieferten die meisten Trägerbäume (Tab. 11).

Tab. 11: Anteile der Baumarten an den kartierten Trägerbäumen an insgesamt 86 Untersuchungspunkten in Wiesbaden und Mainz

Name	wissenschaftlicher Name	Anzahl der Bäume
Spitzahorn	Acer platanoides	153
Linde	Tilia cordata/platyphyllos	129
Bergahorn	Acer pseudoplatanus	83
Esche	Fraxinus excelsior	48
weitere Ahornarten (außer Berg- und Feldahorn)	Acer ssp.	26
Feldahorn	Acer campestre	8
Sonstige		9
Summe		452

Im vorliegenden Projekt wurden insgesamt 71 **Flechtentaxa** an den insgesamt 452 Trägerbäumen kartiert. Dabei fanden sich im Stadtgebiet von Wiesbaden an 280 Bäumen insgesamt 67 Flechtentaxa, in Mainz waren es an 172 Bäumen 48 Taxa.

Die **Geländehöhe** der Trägerbäume umfasst eine Spanne von knapp 200 Höhenmetern. Die mit 84 m ü. NN am tiefsten gelegenen Bäume stehen in Mainz- Laubenheim, mit 282 m ü. NN am höchsten gelegen sind die Bäume auf dem Golfplatz Chausseehaus in Wiesbaden.

Das **Landnutzungsmodell** des Deutschen Wetterdienstes weist „Ein- und Mehrfamilienhäuser“ sowie „Öffentliche Gebäude, Industrie- und Lagergebäude“ als häufigste Landnutzungsklassen im bebauten Gebiet aus. Im unbebauten Gebiet sind die mit Abstand häufigste Landnutzung „Wald“ und „Ackerflächen“. Wiesbaden hat wesentlich mehr Waldflächen als Mainz mit seinem Übergang in den Taunus im Norden der Stadt (Noppel 2017).

Die Vor-Ort-Erfassung der **Versiegelung** ergab, dass der größte Teil der Bäume auf Flächen steht, die in einem Radius von 20 Metern kaum versiegelt sind (Abb. 10)

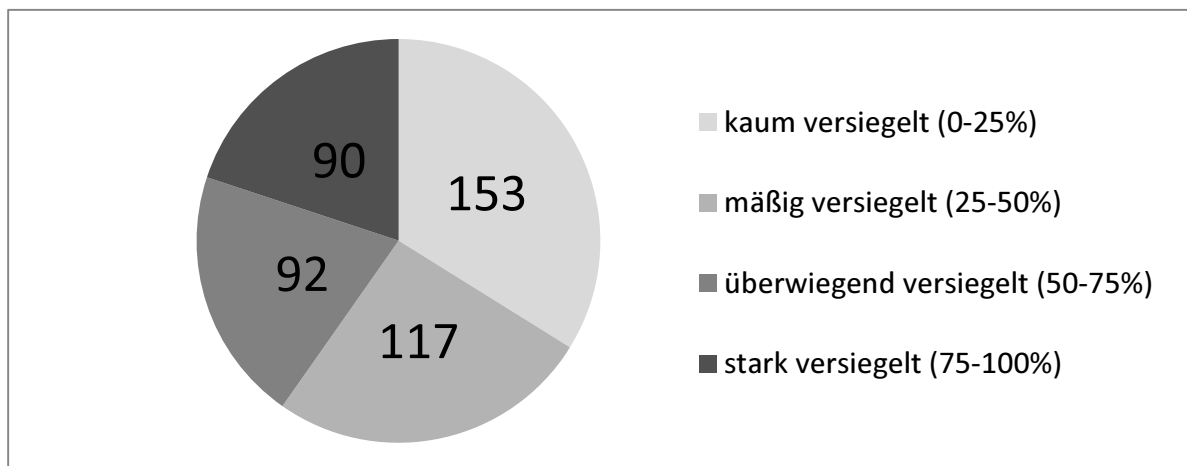


Abb. 10: Bodenversiegelung im Nahbereich der Trägerbäume in Anzahl der Bäume

Eine einfache Erhebung der **Nutzung** in der einsehbaren näheren Umgebung der Bäume ergab, dass die meisten Bäume in Wohngebieten stehen, gefolgt von Bäumen in Grünanlagen, Parks oder Friedhöfen (Abb. 11).

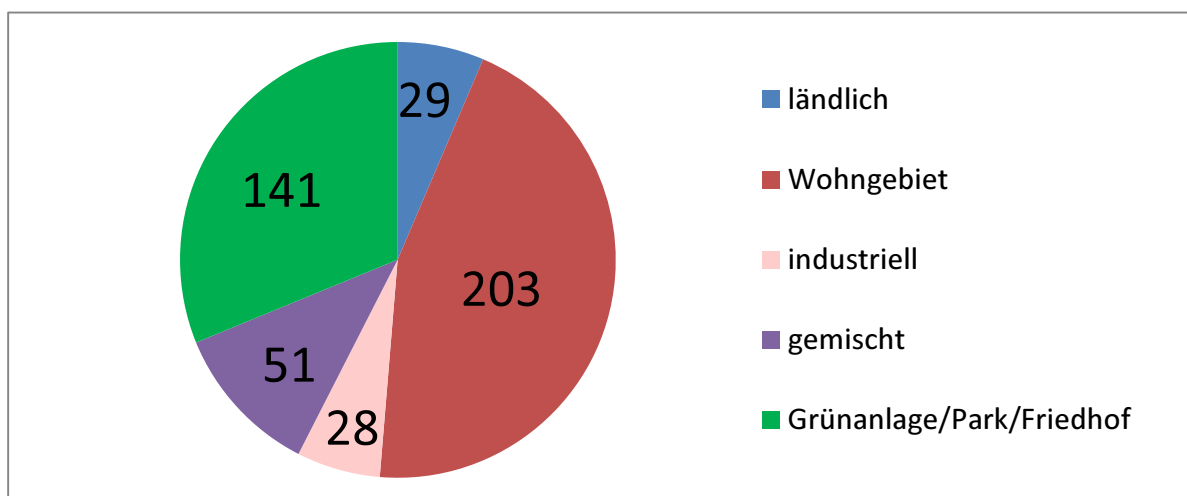


Abb. 11: Nutzung in der näheren Umgebung der Trägerbäume in Anzahl der Bäume

Bezüglich der **Verkehrsbelastung** wurde vor Ort notiert, dass die meisten Bäume an Nebenstraßen in innerstädtischen Wohngebieten standen (Abb. 12). Der Abstand der Bäume zur nächsten Straße lag zum größten Teil bei zwei bis zehn Metern oder darunter (Abb. 13). Die angrenzenden Verkehrswege waren überwiegend mit ein bis drei Fahrstreifen ausgestattet (Abb. 14).

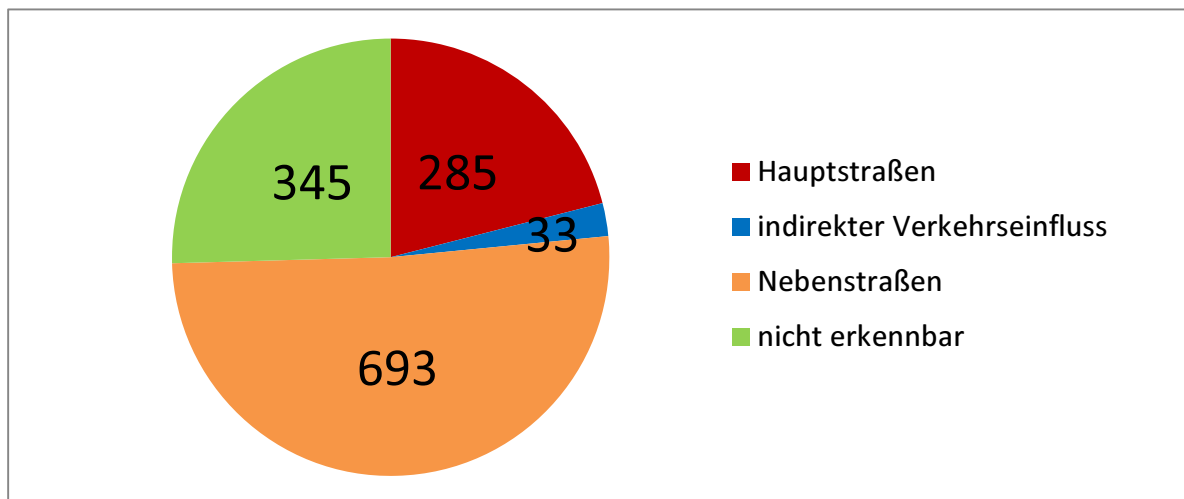


Abb. 12: Verkehrseinfluss der Trägerbaum-Standorte

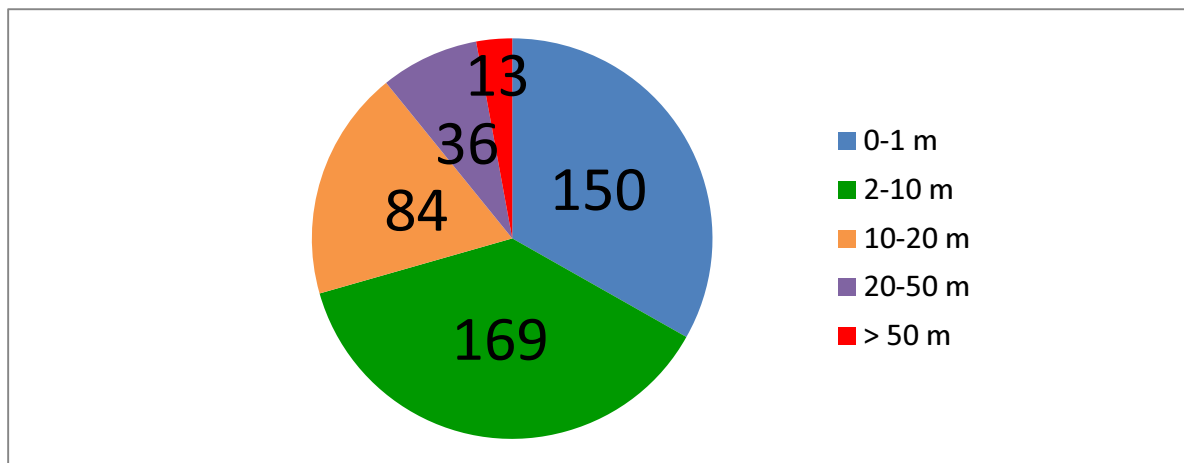


Abb. 13: Abstand der Trägerbäume zur nächsten Kfz-befahrenen Straße

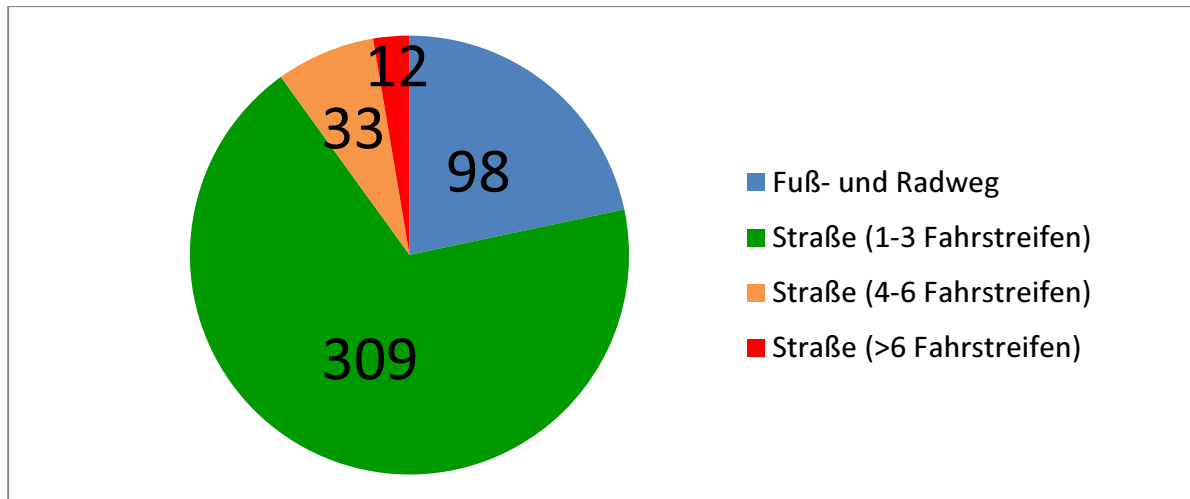


Abb. 14: Breite der nächstgelegenen Straße

Die **Daten aus der Stadtklimaanalyse des Deutschen Wetterdienstes** für einen windschwachen, heißen Sommertag lassen lokale Ausprägungen von Stadtklimaeffekten hervortreten. Beispielfhaft sei hier die Lufttemperatur genannt. Die folgenden Angaben stammen aus der Simulation meteorologischer Parameter in fünf Metern Höhe, entnommen mittels eines Geografischen Informationssystem aus der Datenquelle von Noppel (2017) (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Lufttemperatur über den Flechtenträgerbäumen (in fünf Metern Höhe) liegt um 16:00 Uhr um fast 4 °C auseinander (33,5 °C in Mainz, Stresemannstr. bis hin zu 37,4 °C in Wiesbaden, Marcobrunnerstr.). Für morgens um 4:00 Uhr wurde ein Temperaturunterschied von 4,5 °C kalkuliert (21,7 °C in Wiesbaden-Schierstein, Kleinau-Str. und 26,2 °C in Wiesbaden, Golfplatz Chausseehaus, wo der hohe Waldanteil die nächtliche Abkühlung bremst).

Die vor Ort mit dem Horizontoscop gemessene **Besonnungsdauer** im Bereich des Messgitters am Mittelstamm der kartierten Bäume ergab, dass der Großteil der Stämme im August zwischen vier und zehn Stunden direkte Sonneneinstrahlung erhielt (Abb. 15). Sowohl der abschirmende Effekt der Baumkronen im vollen Laub als auch die typisch städtische Horizonteinengung durch Gebäude ist für niedrige Werte verantwortlich.

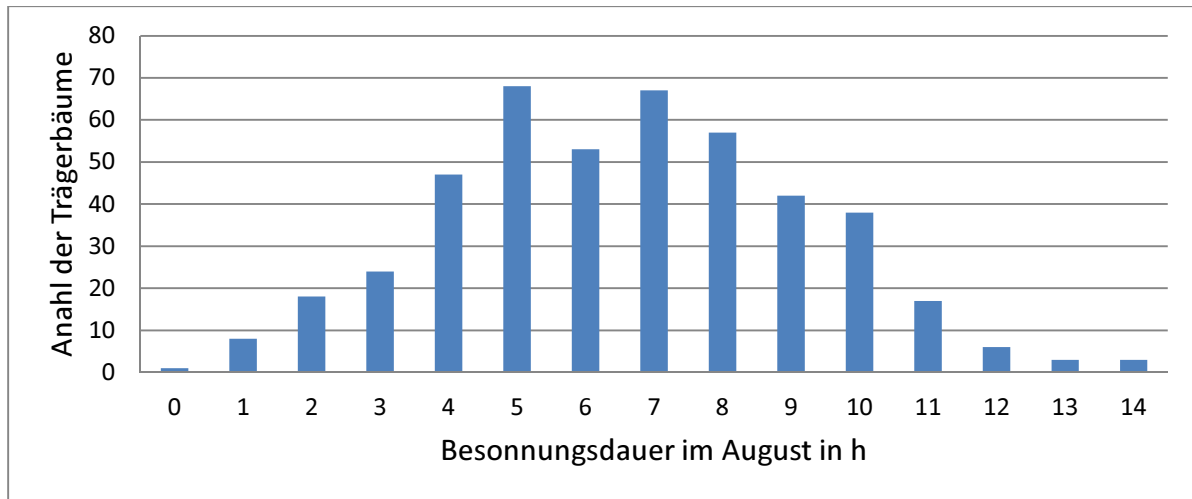


Abb. 15: Besonnungsdauer des Mittelstammes der Trägerbäume im August

5.2 Statistische Auswertung

Die Standortdaten der Trägerbäume und die berechneten Flechtenindizes wurden kritisch geprüft und für die folgende multivariate Analyse zugeschnitten.

5.2.1 Vorbemerkungen und erste Datenprüfung

Der Datensatz enthält Angaben zu den Flechtenvorkommen (Ort und Menge) sowie Umweltdaten der jeweiligen Örtlichkeit. Bei einigen Standortdaten handelt es sich um aus Klimamodellen abgeleitete Daten - also nicht am Baumstandort gemessene Werte. Dies stellt eine gewisse Einschränkung ihrer Aussagekraft dar, die in Kauf genommen werden musste. Auch wenn unzählige Klima-Messgrößen zur Verfügung stehen, ist deren informationstheoretischer Gehalt mit fast jeder Einzelvariablen darstellbar. Daher fließen sie nicht in ihrer Gesamtheit in weitere komplexe Analysen ein. Vielmehr wurde mit der Lufttemperatur um 4 MESZ nach DWD (2017) eine der zur Auswahl stehenden Messgrößen verwendet. Meist wurden jedoch vor Ort erhobene Daten bevorzugt.

Der Grund für die Beschränkung auf nur wenige abgeleitete Klimavariablen soll anhand eines Beispiels (Abb. 16) und den Klimavariablen „Sommertage, Heiße Tage; Tropennächte“ verdeutlicht werden. Durch die hohe Korrelation der Variablen müssen nicht alle drei Variablen in die Analyse eingehen, es genügt eine.

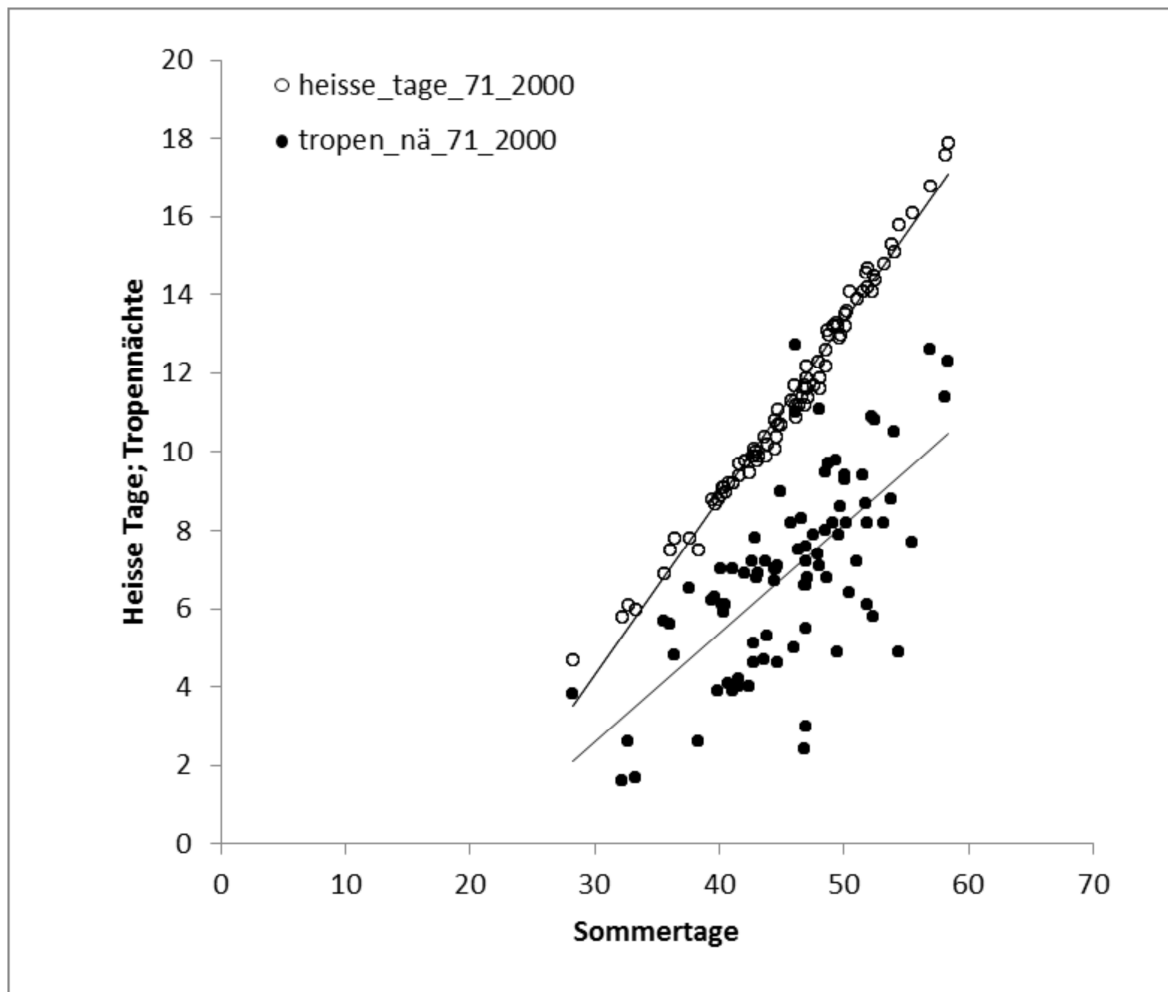


Abb. 16: Beispiel hochreduzierter Informationen in abgeleiteten Klimadaten; aufgetragen wurden die Anzahl der Sommerstage gegen den Wert „Heiße Tage“, was naturgemäß eine hohe Übereinstimmung zeigt; aber auch der Zusammenhang „Tropennächte“ ist evident „heisse_tage_71_2000“: mittlere jährliche Anzahl heißer Tage ($N_{T_{max} \geq 30 \text{ °C}}$) im Zeitraum 1971 – 2000, „tropen_nä_71_2000“: mittlere jährliche Anzahl der Tropennächte ($N_{T_{min} \geq 20 \text{ °C}}$) im Zeitraum 1971 – 2000; aus Noppel (2017)

Geprüft wurde, inwieweit statistisch gesicherte Zusammenhänge zwischen Flechten- und Standortdaten vorliegen. Zur Analyse wurden Frequenzdaten der Arten verwendet. Diese erwiesen sich als hochkorreliert mit der Artenzahl, differenzieren aber die Bedeutung der jeweiligen Art. Mit den Artenzahlen selbst wurden nicht weiter gerechnet.

Flechtendaten, die auf weniger als fünf Vorkommen (d. h. die entsprechende Art kommt auf weniger als fünf Bäumen vor) beruhen, wurden aus dem Datensatz entfernt. Als exakte Variable wurde der gemessene Baumumfang bei den Analysen berücksichtigt. Da die Expositionsdaten naturgemäß positiv mit den Sonnenstunden korreliert sind und keine differenziertere Ableisungen erfolgten, wurden lediglich die Sonnenstunden des Monats August in die Ordinationen einbezogen. Als geographische Koordinaten ging die "Lage im Untersuchungsgebiet" (UTM Koor-

dinaten - hier die letzten fünf Ziffern) in die Auswertung ein. Der N-S Gradient ist zwar eine unspezifische Größe, wobei darin aber neben der Ortsinformationen (Linie der „Lage im Untersuchungsgebiet“) evtl. Wirkgrößen wie Kaltluftabflüsse des Taunus und weitere spezifische Standorteigenschaften aus, die nicht explizit erhoben wurden, enthalten sind.

Daten für Baumart, Versiegelung, Nutzung und Verkehr lagen als Kategorien vor und wurden entsprechend kodiert (Dummy Variable) und analysiert. Dabei wurden häufige Klassen (die häufigste Baumart Linde, Versiegelung > 75 %, Wohngebiet, unmittelbare Verkehrsbelastung) als Referenz mitgeführt.

Insgesamt wurde mit $n = 438$ Datensätzen bzw. Frequenzaufnahmen gerechnet.

Es sollte geprüft werden, ob die am häufigsten kartierten Baumarten systematisch unterschiedliche Flechten-Frequenzsummen aufweisen. Ergebnis einer Varianzanalyse und multiple Vergleiche zwischen den Frequenzsummen der fünf Hauptbaumarten ergaben keine signifikanten Unterschiede, so dass die gefundenen Unterschiede nicht auf unterschiedliche Baumarten zurückzuführen sind. Da keine signifikanten Unterschiede vorliegen, wird zu dieser Frage lediglich eine Grafik (Abb. 17) gezeigt. Die Bildung von Baumartengruppen beim Luftgüte-Verfahren nach VDI (vgl. Kap. 4.1) ist demnach zulässig.

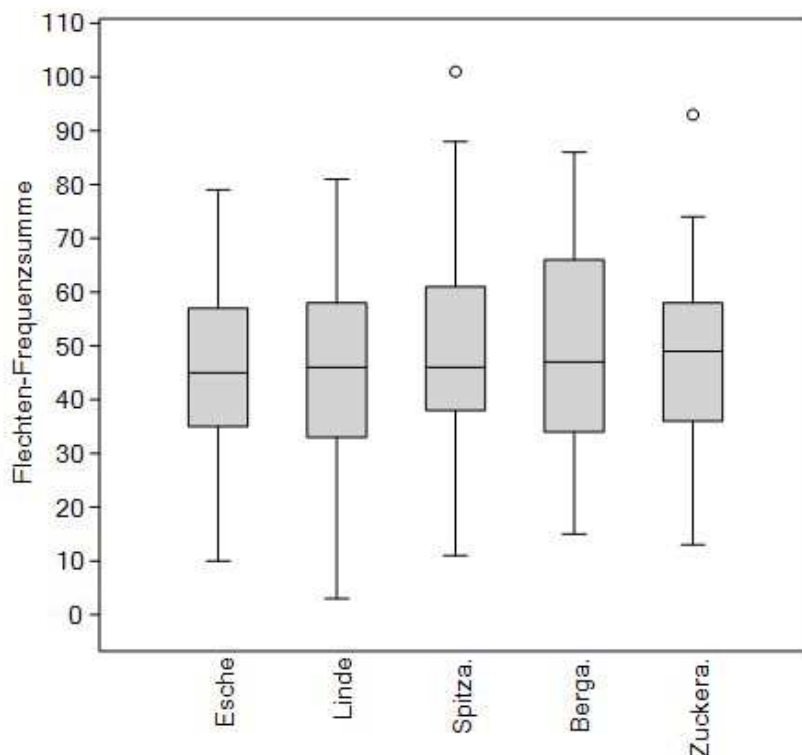


Abb. 17: Box-Plot der Flechten-Frequenzsumme der hauptsächlich aufgenommenen Baumarten Esche, Linden- und drei Ahornarten

Ein deutlicher Einfluss hingegen ist dem Baumumfang beizumessen. In den hier untersuchten Städten gilt offenbar, dass mit zunehmendem Baumalter Artenzahl und Frequenzsumme der Flechten an den Bäumen abnehmen (Abb. 18). Die Unterschiede zwischen den verwendeten drei Durchmesserklassen sind (ANOVA) signifikant.

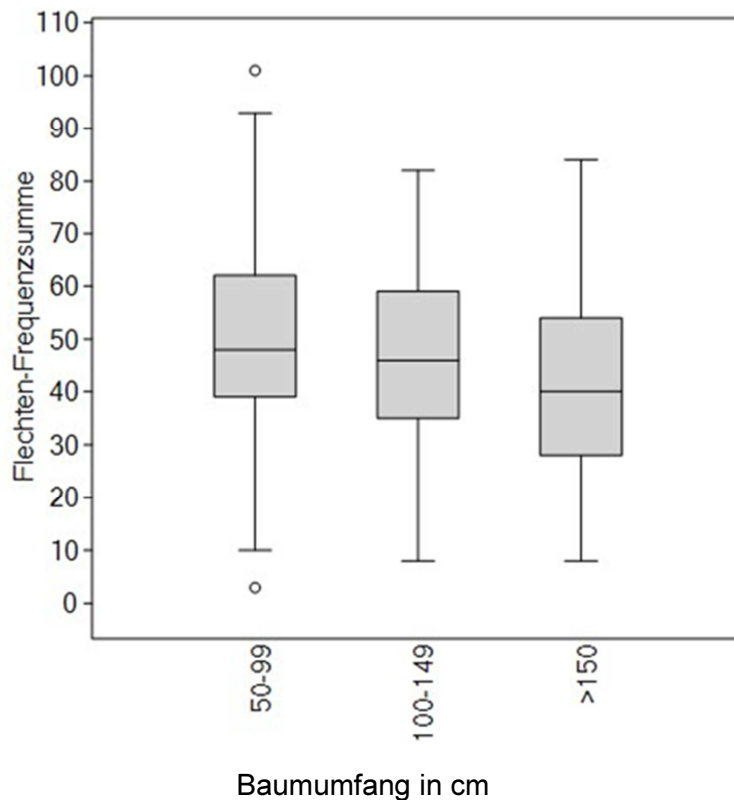


Abb. 18: Flechten-Frequenzsumme, aufgetragen gegen den Baumumfang

Da die Bäume innerhalb der Untersuchungspunkte jeweils einen unterschiedlichen Baumumfang haben und somit gemischt in die Luftgüte-Beurteilung eingehen, sollte der Einfluss vernachlässigbar sein.

5.2.2 Multivariate Analyse

Bei ökologischen Freilanduntersuchungen – wie der vorliegenden – beeinflussen naturgemäß viele Faktoren das Ergebnis.

Ziel der multivariaten Analyse ist es, die Bedeutung von möglichen Einflussfaktoren auf die Flechtenverbreitung zu beschreiben. Es sollen Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Arten (sowie Standorten bzw. Umweltfaktoren) visualisiert werden.

Dazu werden die Zusammenhänge in einem Koordinatensystem (Ordinationsdiagramm) veranschaulicht. Dabei wird eine Vielzahl von Variablen auf wenige Dimensionen eingeschränkt (Dorman und Kühn 2012). Die Achsen des Koordinatensystems stellen solche Gradienten dar, die einen möglichst großen Teil der Varianz erklären (Leyer und Wesche 2008). Dabei haben die Achsen nur die Aufgabe, den Datensatz maximal zu spreiten. Die Achsen selbst werden aus den Art- und/oder Standortdaten errechnet. Ihre Skalierung ist daher willkürlich.

Zur Bestimmung der Gradientenlänge des Flechten-Frequenzsumme-Datensatzes wurde ein Ordinationsdiagramm erzeugt, indem eine DCA (Detrended Correspondence Analysis) vorgenommen wurde. Die erhaltene Gradientenlänge lag zwischen 3 und 4 (3,9 SD; Standardabweichung), so dass theoretisch keine Einschränkung bei der weiteren Datenanalyse (lineare vs. unimodale Modelle) besteht.

(Zur Erklärung: Die Gradientenlänge einer DCA kann in Einheiten der Standardabweichung wiedergegeben werden. Liegt der Wert über 4 (Einheiten) wird eine unimodale „lange“ Optimumskurve als Reaktion (response) der Art auf einen – wenn nicht gemessen, dann hypothetischen – Umweltgradienten angenommen, ist der Wert niedriger, liegt wahrscheinlich eine „kurze“ lineare Art-Umweltfaktor-Reaktion vor.)

Zur Darstellung des Arten-Frequenzdatensatzes und seiner ersten Strukturierung wurde ebenfalls die DCA verwendet. Den einzelnen Arten wurden zusätzlich die wichtigsten morphologischen Gruppen überlagert. Das heißt, die gesamte Struktur des Arten-Datensatzes wird dargestellt und zur besseren Orientierung werden die morphologischen Gruppen hinterlegt. Dies ist keine Analyse, vermag aber die Struktur des gesamten Artdatensatzes in einer einzigen Grafik darzustellen (Abb. 19). Arten die entgegengesetzt entlang einer Achse stehen, schließen sich quasi aus.

Es wird deutlich, dass die Frequenzsumme (SF) der Vertreter der kleinblättrigen Flechtengattung *Phaeophyscia* gegenläufig zu der der SF der Krustenflechten ist. Das heißt, es bestehen möglichen-

erweise Konkurrenzeffekte zuungunsten der Krustenflechten.

Die Frequenzsummen der Großen Blatflechten und die der Strauchflechten dagegen zeigen ein „gleichgerichtetes“ ähnliches Muster. Weiterhin wird hier wie auch in der Voruntersuchung deutlich, dass die Vertreter innerhalb der Gruppe der Blatflechten heterogen bezüglich ihrer Ansprüche sind. Die Morphologie der Blatflechten (kleinblättrig vers. großblättrig) bestimmt offensichtlich die Verbreitung der Arten.

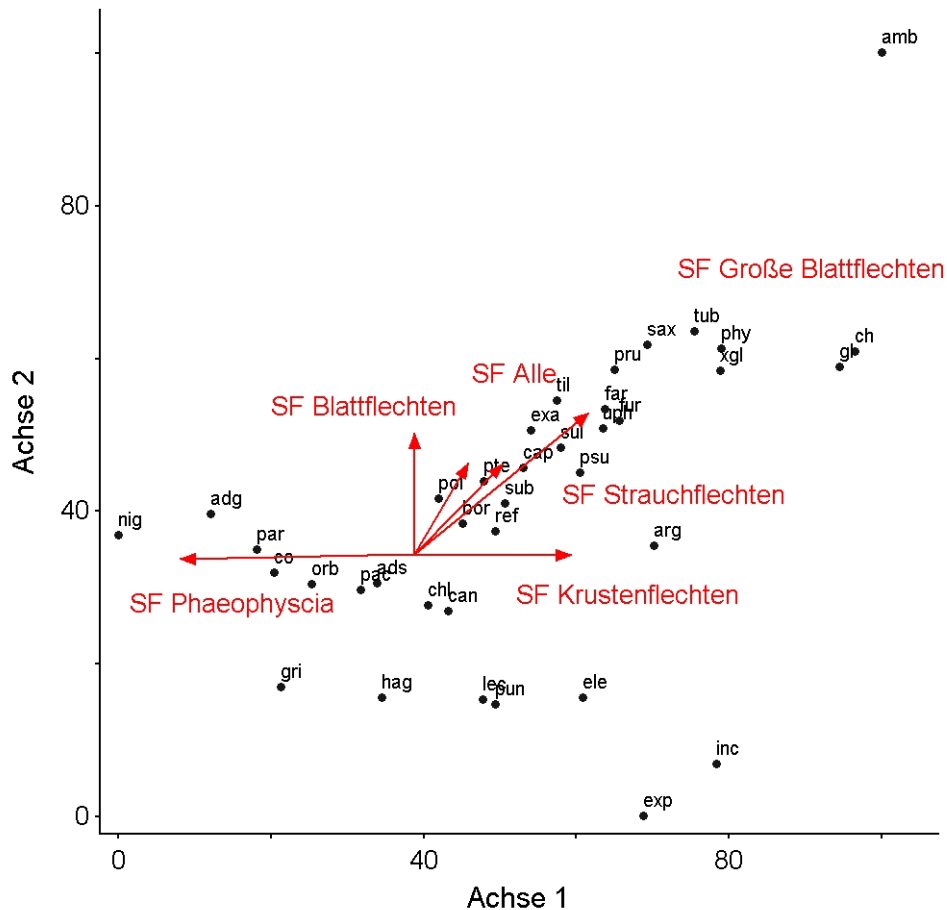


Abb. 19: DCA. Frequenz der einzelnen Flechtenarten und Überlagerung wichtiger morphologischer Gruppen; SF: Summe Frequenz; Kürzel: Flechtenarten-Frequenz (vgl. Anhang 1). Ordinationsdiagramme bzw. deren Achsen besitzen keine Einheiten.

Die Ergebnisse der folgenden Redundanzanalyse (RDA) werden graphisch mittels Biplot-Scaling dargestellt (Abb. 20). Normalerweise werden hierbei Arten und Aufnahmen gleichzeitig präsentiert, nur würde dies im vorliegenden Fall zu einer unübersichtlichen Darstellung führen. Die Interpretation erfolgt so, dass von jedem Punkt das Lot auf die als Pfeile dargestellten Umweltvariablen gefällt wird. Dazu kann eine Verlängerung des Pfeiles angenommen werden. Arten im Zentrum verhalten sich indifferent gegenüber den hier verwendeten Umweltparametern. Je

weiter die projizierten Werte von der Pfeilspitze entfernt sind, desto höher ist die Abundanz der Art bei Zunahme der Variablen. „Lage im Untersuchungsgebiet“ - auch wenn dies keine direkt interpretierbare Variable ist (siehe aber Kartendarstellung) - lädt sie die erste Hauptachse, der Baumumfang die zweite. Insgesamt wird die Artenvariabilität lediglich durch einen sehr kleinen Prozentsatz (5,4 %) durch die gezeigten quantitativen Variablen erklärt. Keine interpretierbaren Beiträge liefern die abgeleiteten kategorialen Daten. D.h. der Untersuchungsraum wird durch diese Variablen, die häufig nur wenige Kategorien umfassen, nur so wenig differenziert, dass hiervon kaum eine Wirkung auf die Flechtengemeinschaft abgeleitet werden kann. Dies gilt auch für die nicht gezeigten Zentroide der Städte Mainz und Wiesbaden.

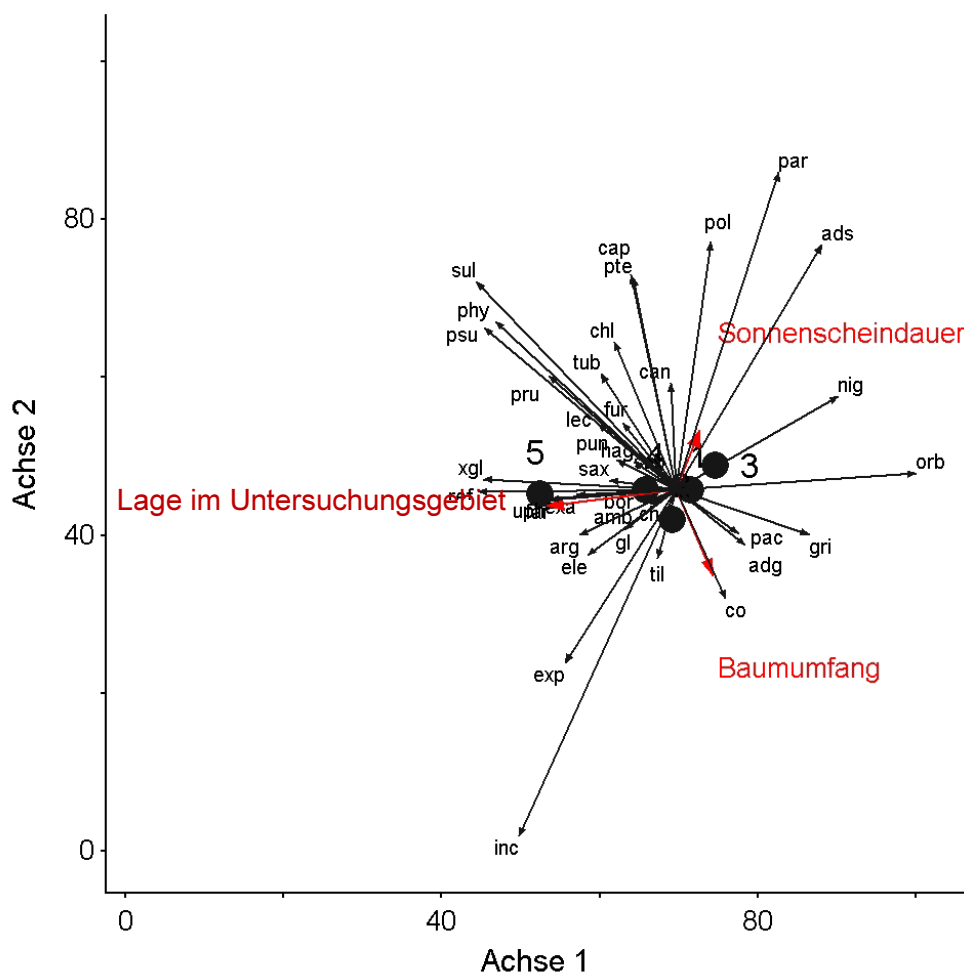


Abb. 20: RDA. Kürzel: Flechtenarten-Frequenz (vgl. Anhang 1) und quantitative Standortfaktoren sowie kategoriale Daten (3: Spitzahorn, 5: Zuckerahorn)

Die Baumarten 1 - 5 differenzieren die Flechtengemeinschaft kaum. Eine gewisse Modifizierung erfolgt durch Spitzahorn und Zuckerahorn. Als Gründe kommen hierbei fundamentale Unterschiede raum-zeitlicher Skalenniveaus (Beispiel: Landnutzungskategorien vs. Flechtenmikrostandort u. ä.) in Frage.

Als Fazit ist zu folgern, dass in Zukunft für die Flechtenverbreitung spezifischere Standortdaten zu erheben sind, die ein ökologisches oder zumindest physiologisches Wachstumsmodell der Flechten unmittelbar stützt. Dazu gehören etwa Licht bzw. Besonnung während der feuchten Monate, da nur in diesen Monaten eine länger andauernde Regeneration der Flechtenthalli möglich ist. Wichtig ist dabei, die Originaldaten vor der Mittelwertbildung zu verwenden, da nur so die tatsächlich vorhandene Bandbreite der Variablen (Extreme werden nicht „herausgemittelt“) der Analyse zugeführt wird.

Insgesamt zeigt sich, dass die Stadtgebiete Mainz und Wiesbaden zwar eine differenzierte Flechtenvegetation besitzen, diese aber nicht erschöpfend durch abgeleitete, hochreduzante, kategoriale - ein biologisches Modell nicht ausreichend stützende - Variablen erklärt werden können. Der geringe Einfluss der wenigen quantitativen Variablen erscheint für sich betrachtet zwar zunächst wissenschaftlich unspektakulär, stützt auf der anderen Seite das angewandte Luftgüte-Verfahren, da hier gerade keine erheblichen Störgrößen (Trägerbäume, Baumumfang) gewünscht sind.

5.3 Ergebnisse der sechstägigen Mikroklimamessungen

Die Mikroklimamessungen fanden im Hochsommer 2017 vom 22. bis 27. August bei trockenem Wetter statt. Die höchsten Mitteltemperaturen und die niedrigste mittlere relative Luftfeuchte wurden an den Mainzer Stationen nahe des Hauptbahnhofes (M-E11, M-F12a) gemessen. Die mittleren Temperaturen im Norden Wiesbadens lagen etwa 2 °C darunter.

Tab. 12: Mittelwerte aus fünfminütigen Messungen mit Datenloggern vom 22.-27.8.2017 an Trägerbäumen in 1,5 Metern Höhe und südlicher Exposition

Kürzel	Ort	mittl. Temperatur in °C	mittl. Luftfeuchte in %
M-E11	Mainz - Bonifatiusplatz	22,9	63,2
M-F12a	Mainz – Stresemannufer	22,0	68,0
W-H12	Wiesbaden – Marcobrunnerstraße	21,5	70,8
W-H10	Wiesbaden – Helmholtzstraße	20,7	70,1
W-G12c	Wiesbaden – Nerotal Süd	20,7	76,0
M-K05	Mainz - Lerchenberg	20,6	71,2
W-G13b	Wiesbaden - Johannes-Maaß-Straße	20,6	74,3
W-F12a	Wiesbaden - Nordfriedhof	20,4	75,6

Für die Aufgabenstellung interessant sind die Temperaturextreme. An den Stationen des Deutschen Wetterdienstes, an denen Daten in fünf Metern Höhe erfasst werden, betrug die Höchsttemperatur in Mainz-Lerchenberg für den betrachteten Zeitraum 26,5 °C und die Tiefsttemperatur in Wiesbaden-Auringen 9,4 °C (Tab. 13).

Tab. 13: Meteorologische Daten im Zeitraum 22.-27. August von Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes in fünf Metern Höhe

	Höchsttemperatur [°C]	Tiefsttemperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Großwetterlage
Wiesbaden- Auringen				
22.08.2017	23,2	9,4	0	Hoch Mitteleuropa
23.08.2017	25,7	11,4	0	Hoch Mitteleuropa
24.08.2017	23,8	13,7	0	Westlage, antizyklonal
25.08.2017	26,0	13,0	4	Westlage, antizyklonal
26.08.2017	26,2	16,4	0	Westlage, antizyklonal
27.08.2017	24,4	16,3	0	Westlage, antizyklonal
Mainz- Lerchenberg				
22.08.2017	23,6	11,7	0	Hoch Mitteleuropa
23.08.2017	26,2	13,3	0	Hoch Mitteleuropa
24.08.2017	23,8	17,0	0	Westlage, antizyklonal
25.08.2017	26,5	15,3	5	Westlage, antizyklonal
26.08.2017	25,7	17,0	0	Westlage, antizyklonal
27.08.2017	25,1	17,5	0	Westlage, antizyklonal

Am Mittelstamm der Trägerbäume, hier in 1,5 Metern Höhe und Südexposition, zeigten sich typische Tages-/Nachtverläufe (Abb. 21, Abb. 22). Die Maximaltemperatur von 37,9 °C wurde am 23. August in Wiesbaden-Nerotal-Süd (W-G12c) erreicht. Sie lag damit über 10 °C höher als etwa die Maximaltemperatur am Lerchenberg (dort in 5 Metern Höhe). An diesem Baum wurde am 22. August mit 11,0 °C auch die kälteste Temperatur des Messzeitraums erfasst. Das Tempe-

raturgefälle im Tag-/Nachtverlauf zeigt sich recht unterschiedlich. Vergleichsweise große mittlere Temperaturdifferenzen traten an den Bäumen der Stationen Mainz-Stresemannufer (M-F12a, 24,4 °C), Wiesbaden-Nordfriedhof (W-F12a, 24,4 °C) und Wiesbaden-Nerotal Süd (W-G12c, 26,9 °C) auf. Deutlich geringer lag die Temperaturspanne an den Stationen Wiesbaden-Helmholtzstr. (W-H10, 16,6 °C), Mainz-Lerchenberg (M-K05, 18,1 °C) und Wiesbaden-Marcobrunnerstr. (W-H12, 18,4 °C).

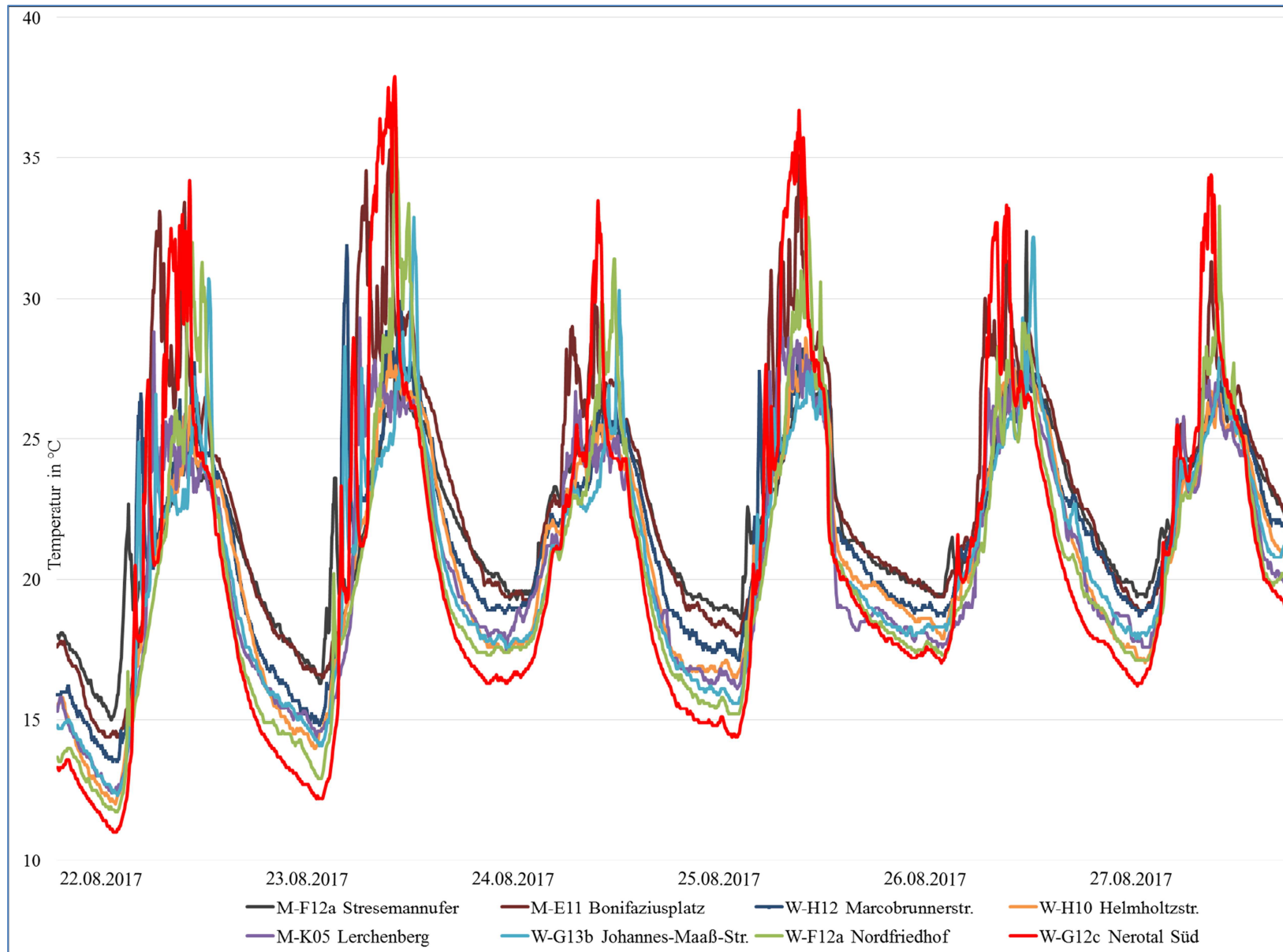


Abb. 21: Temperaturverlauf am Mittelstamm von Trägerbäumen in Wiesbaden (W) und Mainz (M) vom 22.-27.8.2017

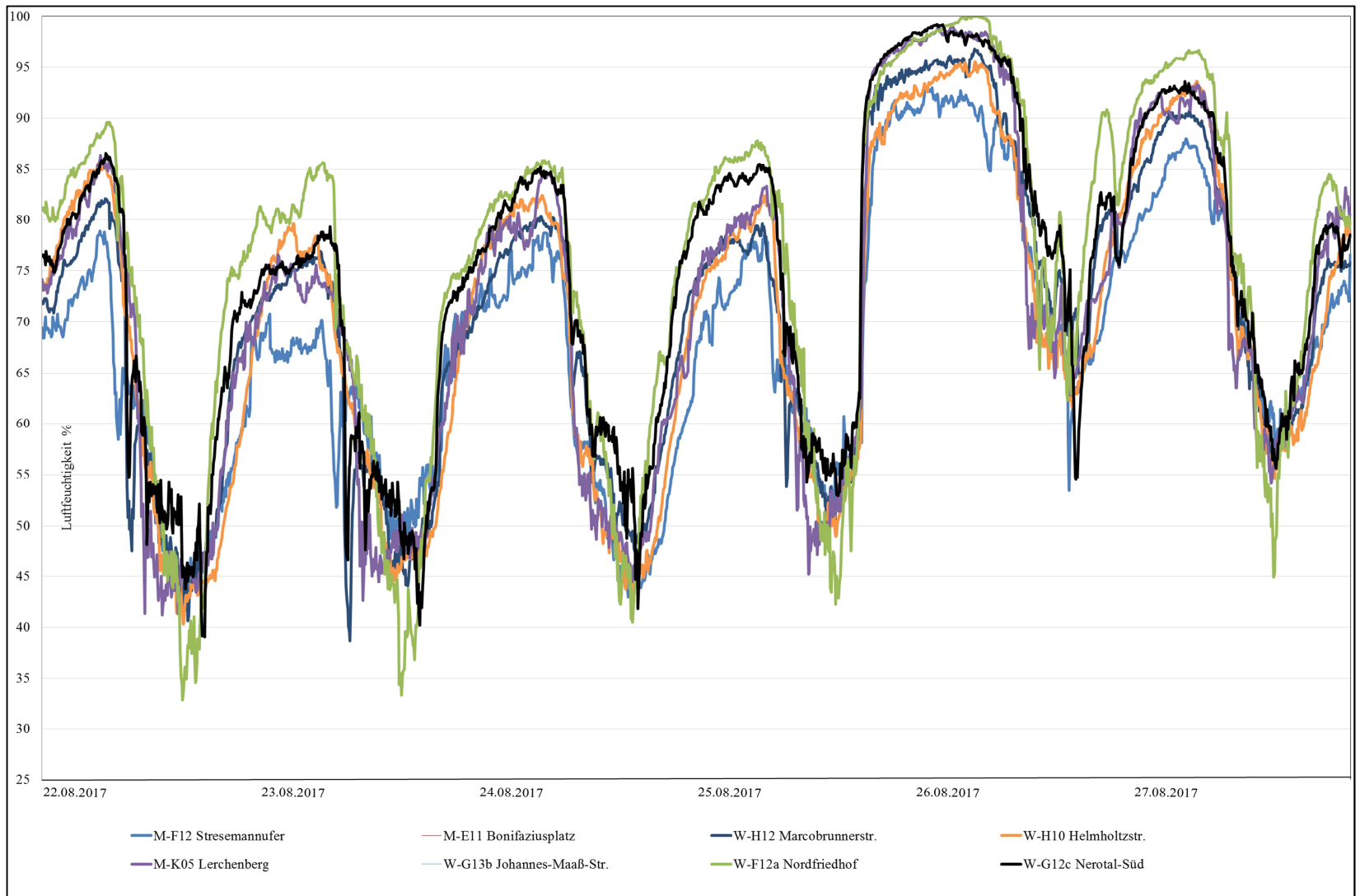


Abb. 22: Verlauf der relativen Luftfeuchte am Mittelstamm von Trägerbäumen in Wiesbaden (W) und Mainz (M)

Für die Flechten ist die nächtliche Abkühlung besonders relevant. Kühlt die Luft ab, kann sie nicht mehr so viel Wasserdampf aufnehmen und die relative Luftfeuchte steigt an. Bei hoher Luftfeuchte bleiben die Flechten länger stoffwechselaktiv, weil deren Wasserverlust verzögert wird. Trocknen sie aus, wie das beispielsweise an einem sonnigen, lufttrockenen Tag geschieht, gehen sie in einen inaktiven Zustand über (vgl. Kap. 2.2).

Auch die Häufigkeit von Taufall ist für die wechselfeuchten Flechten von Bedeutung. Das Abscheiden flüssigen Wassers als Tau oder Nebel aus dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf versorgt Flechten mit Wasser. Der Flechtenkörper nimmt das Wasser über die gesamte Oberfläche auf und der Stoffwechsel wird aktiviert.

Die untersuchten Bäume von Standorten mit einer vergleichsweise geringen mittleren relativen Luftfeuchte im Messzeitraum von unter 75 % (Tab. 12) tragen keine Großen Blattflechten. Erst bei höheren Luftfeuchtwerten konnte diese Gruppe im Messgitter an den Bäumen angetroffen werden (Abb. 23). Es wird angenommen, dass die höheren Ansprüche der Großen Blattflechten an die Feuchtigkeitsversorgung sie geeignet machen für die Wirkung von Stadtklimaeffekten. Da jedoch nur wenige Messdaten vorliegen, ist weitere Erforschung unumgänglich.

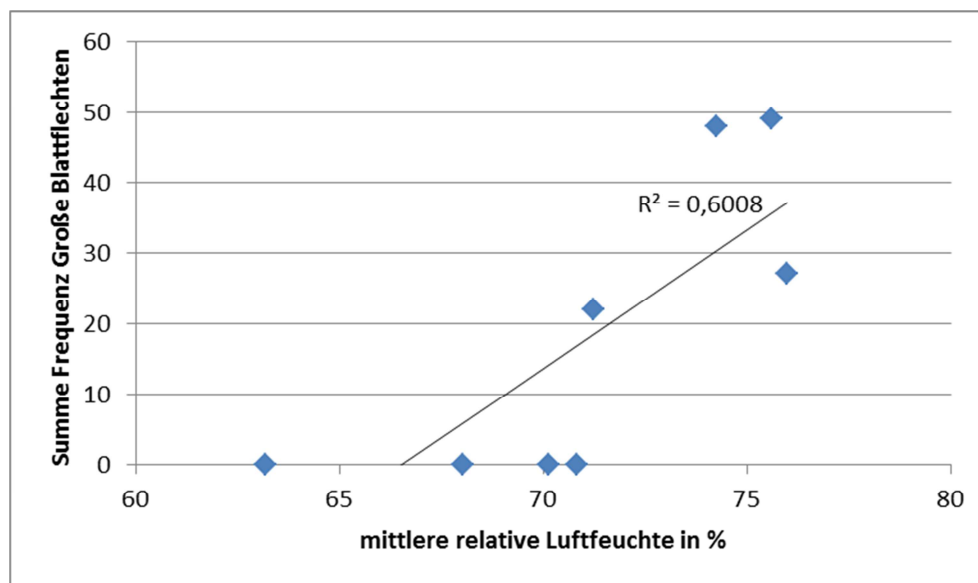


Abb. 23: Frequenzsumme der Großen Blattflechten in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte an Trägerbäumen; Luftfeuchtemessung an sechs Tagen im August 2017 in Wiesbaden und Mainz

5.4 Langfristige Entwicklung der Luftgüte

Der Begriff der Luftqualität bezieht sich auf die in der Luft enthaltenen Luftverunreinigungen. Die Luftschadstoffmessungen des HLNUG in Hessen belegen langfristig einen Rückgang der Luftschadstoffkonzentrationen von Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden und Feinstaub (HLNUG 2017). Die Werte der letzten 20 Jahre sind landesweit für viele Schadstoffe rückläufig (Abb. 24).

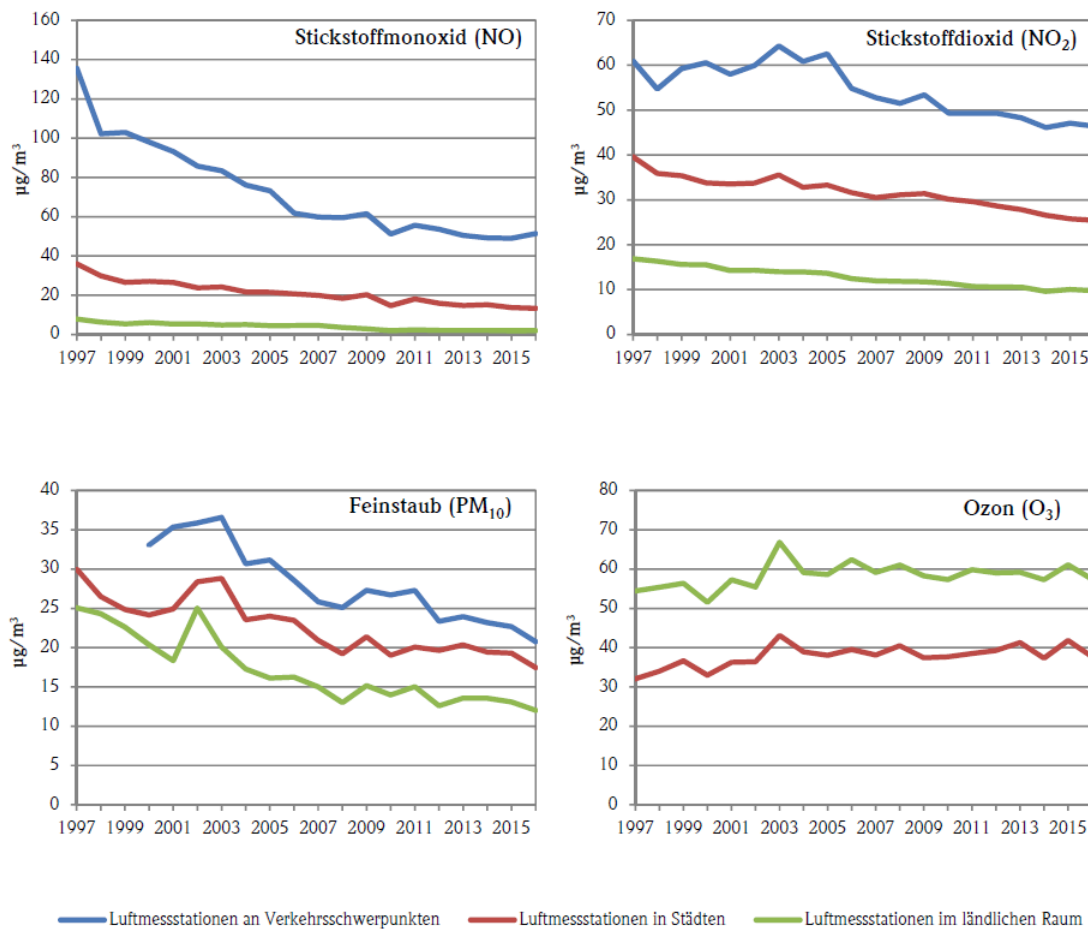


Abb. 24: Zeitreihen der Jahresmittelwerte von 1997 bis 2015 aller Luftmessstationen in Hessen; gemittelt wurden die Werte der Stationen gleichen Charakters (Verkehrsschwerpunkte, Städte, ländlicher Raum) (HLNUG 2017)

Auch die Bioindikation mittels einer Flechtenkartierung führt zu einer Aussage zur Luftgüte, denn es resultiert ein Luftgüteindex (LGI). Dieser legt seinen Schwerpunkt auf die Wirkungen saurer und düngender Schadstoffkomponenten auf Biota (hier: Flechten). Frühere Flechtenkartierungen zur Dokumentation der Luftgüte im Untersuchungsgebiet liegen vor und werden folgend ausgewertet.

5.4.1 Erhebungen in Wiesbaden aus den Jahren 1989 und 1994

Für Wiesbaden und Umgebung ist eine städtische Flechtenkartierung aus dem Jahr 1989 veröffentlicht worden (Heidt und Strack 1989). Die Flechten wurden zwar ebenfalls am Mittelstamm von Bäumen untersucht, jedoch auf einer größeren Stammfläche und nach einer anderen Methode (IAP-Methode) als in der vorliegenden Arbeit. Daher sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar. Es wurden damals 55 Flechtenarten auf 126 untersuchten Planquadraten gefunden und konstatiert, dass Wiesbaden aufgrund seiner Taunusrandlage im Vergleich zu ähnlich strukturierten Räumen flechtenreich ist. In der aktuellen Untersuchung sind es 67 Arten an 52 Untersuchungspunkten, was auf eine deutliche Erhöhung der Artenzahl seit 1989 schließen lässt.

Um die durch die Flechten angezeigten Umweltveränderungen trotz geringer Datenkompatibilität nachvollziehen zu können, wurden die Vorkommen lediglich von ausgewählten Indikatorarten ausgewertet. Es wurde ermittelt, an wie vielen der Untersuchungspunkten die entsprechende Art vorkam (Tab. 14). So zeigt sich ein deutlicher Rückgang der acidophytischen (säuretolerierenden) Flechtenarten *Lecanora conizaeoides* und *Hypogymnia physodes*. Hingegen kommen aktuell die Arten *Evernia prunastri*, *Parmelia sulcata* und *Xanthoria parietina* an deutlich mehr Untersuchungspunkten vor als in 1989. Es lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass die Standorteigenschaften, die durch die Baumborke und die Atmosphäre geprägt werden, sich verändert haben. Die Borken sind nicht mehr angesäuert (R-Zahl ist gestiegen) und die Nährstoffversorgung der Flechten hat sich erhöht (N-Zahl ist gestiegen). Die Diversität hat sich erhöht, was auf eine Verbesserung der allgemeinen Luftgüte hinweist.

Einige Jahre später, in 1994, erfolgte im Rahmen eines landesweiten hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsprogramms (Kirschbaum und Windisch 1995) auch die Bearbeitung des Wiesbadener Stadtgebietes. Die Datenerfassung wurde schon damals nach der heute aktuellen Methode der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 vorgenommen. Aus dem Datenbestand wurden die Flechtendaten für 53 Messflächen herausgezogen und der Luftgüteindex nach der aktuellen Methode neu berechnet und in einer Karte dargestellt (Abb. 25). Die Arbeit dokumentiert eine überwiegend geringe bis sehr geringe Luftgüte für weite Teile des Stadtgebietes Wiesbaden für 1994 (Kirschbaum und Windisch 1995). Ausgenommen sind die nördlich am Taunusrand gelegenen Stadtbezirke, denen damals eine hohe Luftgüte bescheinigt werden konnte.

Tab. 14: Veränderung des Vorkommens ausgewählter Arten von 1989 bis 2017 im Stadtgebiet von Wiesbaden; Zeigerwerte für Reaktion (R) und Eutrophierung (N) nach (Wirth 2010)

Species	Vorkommen in % der untersuchten Flächen			Veränderung	R-Zahl	N-Zahl	Standortansprüche nach (Kirschbaum und Wirth 2010)
	Heidt & Strack 1989, (Heidt und Strack 1989)	Kirschbaum & Windisch 1994, (Kirschbaum und Windisch 1995)	Windisch 2018 (vorliegende Arbeit)				
Lecanora conizaeoides	91,3	90,1	3,9	↓	2	5	extrem acidophytisch, toxitolerant
Hypogymnia physodes	84,1	70,0	51,9	↘	3	3	acidophytisch
Evernia prunastri	4,0	11,3	67,3	↑	3	4	acido- bis neutrophytisch
Parmelia sulcata	41,3	60,4	88,5	↗	5	7	euryök
Xanthoria parietina	7,1	7,5	84,6	↑	7	8	basiphytisch, eutrophierungstolerant
Diversität (Artenzahl Flechten)	55 auf 1.260 Bäumen	33 auf 486 Bäumen	67 auf 452 Bäumen	↑			

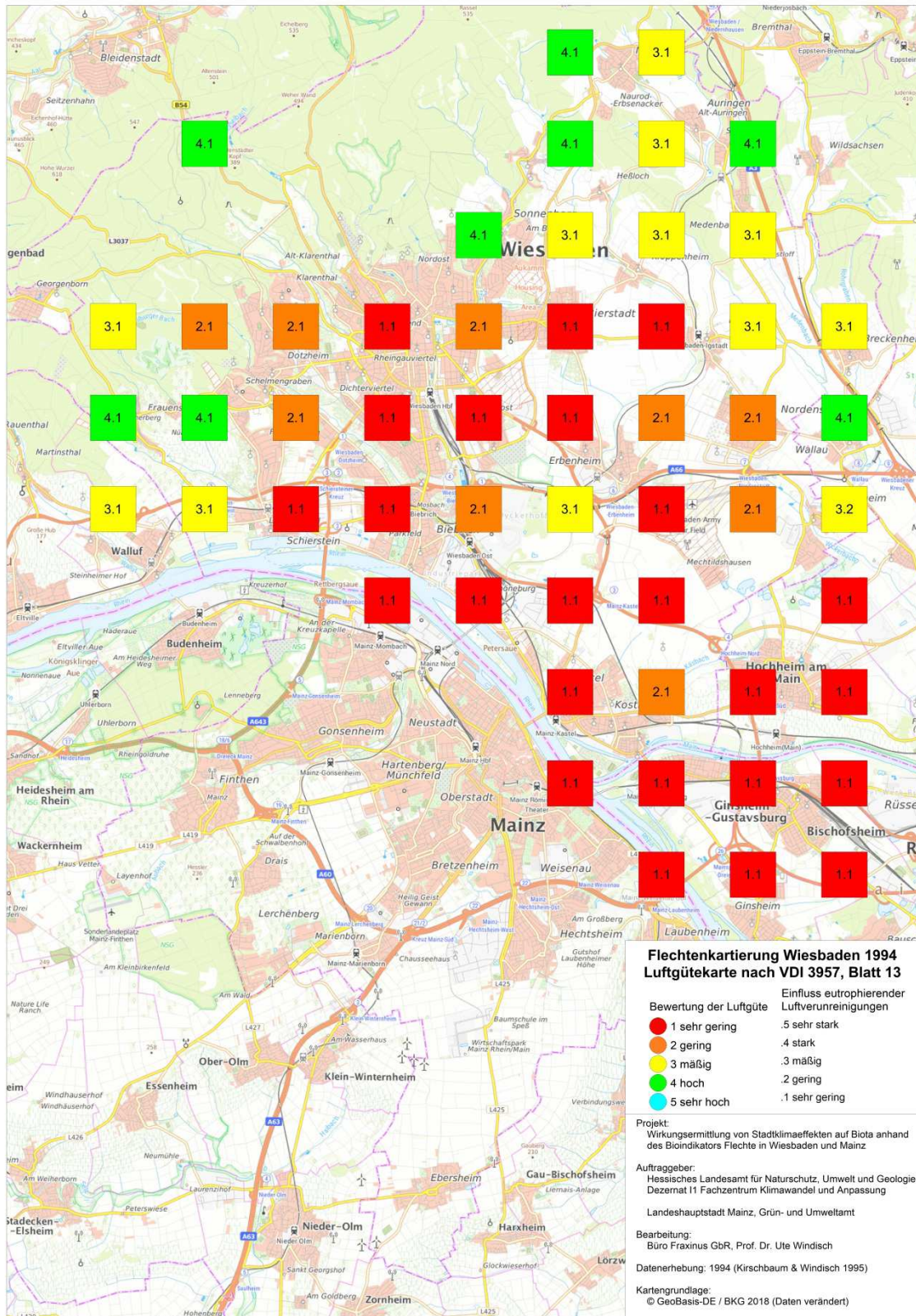


Abb. 25: Karte der Luftgüte Wiesbadens 1994 (Datenquelle: HLNUG, veröffentlicht unter Kirschbaum und Windisch 1995); zusätzlich dargestellt sind wenige angrenzende Messflächen







5.4.2 Erhebung in Mainz aus dem Jahr 1989/90

Der Luftreinhalteplan Mainz-Budenheim aus den 1990er Jahren beinhaltet eine immissionsökologische Flechtenkartierung der Universität Mainz von 1989/90 (Ministerium für Umwelt des Landes Rheinland-Pfalz 1993). Die Flechten wurden zwar ebenfalls am Mittelstamm von Bäumen untersucht, jedoch auf einer größeren Stammfläche und nach einer anderen Methode (IAP-Methode). Daher sind die Ergebnisse aus dieser Zeit, ähnlich wie in Wiesbaden, nicht direkt mit denen der aktuellen Arbeit vergleichbar.

Damals wurden in Mainz 40 Flechtenarten auf 95 untersuchten, 1 x 1 km großen Planquadraten, erfasst. Im Vergleich zu anderen industriellen Ballungsräumen galt Mainz somit als nicht extrem belastet. Dafür spricht auch, dass damals keine immissionsverursachte Flechten“wüste“ existierte, wie sie noch in anderen Gebieten auftrat. In der aktuellen Untersuchung sind es 48 Arten in 34 Quadraten, was eine deutliche Erhöhung der Artenzahl seit 1989 belegt.

Um die durch die Flechten angezeigten Umweltveränderungen trotz geringer Datenkompatibilität nachvollziehen zu können, wurden die Vorkommen ausgewählter Indikatorarten ausgewertet. Es wurde ermittelt, an wie vielen Untersuchungspunkten die entsprechende Art vorkam (Tab. 15). So zeigt sich das gleiche Bild wie in Wiesbaden. Deutlich zurückgegangen sind die acidophytischen (säuretolerierenden) Flechtenarten *Lecanora conizaeoides* und *Hypogymnia physodes*. Die Arten *Evernia prunastri*, *Parmelia sulcata* und *Xanthoria parietina* gedeihen an deutlich mehr Untersuchungspunkten als in 1989. Es lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass die Standorteigenschaften, die durch die Baumborke und die Atmosphäre geprägt werden, sich verändert haben. Die Borken sind nicht mehr angesäuert (R-Zahl ist gestiegen) und die Nährstoffversorgung der Flechten hat sich erhöht (N-Zahl ist gestiegen). Die Diversität der Arten pro Untersuchungsfläche hat sich erhöht, was auf eine Verbesserung der allgemeinen Luftgüte hinweist.

Tab. 15: Veränderung des Vorkommens ausgewählter Arten von 1989/90 bis 2017 im Stadtgebiet von Mainz; Zeigerwerte für Reaktion (R) und Eutrophierung (N) nach (Wirth 2010)

Flechtenart	Vorkommen in % der untersuchten Flächen		Veränderung	R-Zahl	N-Zahl	Standortansprüche nach (Kirschbaum und Wirth 2010)
	1989/90 (Ministerium für Umwelt des Landes Rheinland-Pfalz (Hrsg.) 1993)	2017 (vorliegende Arbeit)				
Lecanora conizaeoides	97,9	0,0		2	5	toxitolerant, sehr acidophytisch
Hypogymnia physodes	62,1	38,2		3	3	acidophytisch
Evernia prunastri	26,3	61,8		3	4	acido- bis neutrophytisch
Parmelia sulcata	60,0	82,4		5	7	euryök
Xanthoria parietina	27,4	94,1		7	8	basiphytisch, eutrophierungstolerant
Diversität (Artenzahl Flechten)	40,0	48,0				

5.4.3 Aktuelle Luftgütekarte

Das Ergebnis der Flechtenkartierung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 ist die Luftgütekarte (Abb. 26). Die Untersuchungspunkte sind mit einer Ziffernkombination versehen. Die erste Ziffer bezeichnet die Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt. Die zweite Ziffer symbolisiert den Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen.

Die Einstufung „sehr geringe Luftgüte“ (rot) wird an zwei Untersuchungspunkten in Wiesbaden-Biebrich sowie einem Punkt in Mainz-Drais vergeben. Für die drei Untersuchungspunkte ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Luftverschmutzung die Hauptursache für das geringe Vorkommen der Flechten. Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität sind dringend geboten. Der westlichere der beiden Biebricher Punkte liegt direkt in der Rheingaustraße am Biebricher Schlosspark (W-M13), die östlichere im Unteren Zwerchweg (W-M15). Belastungen durch Verkehr und industrielle Emittenten auf der Mainzer und Wiesbadener Seite des Rheins leisten einen Beitrag zu dieser ungünstigen lufthygienischen Situation.

Der Untersuchungspunkt in Drais ist umgeben von intensiver Landwirtschaft mit Sonderkulturen, vor allem des Obstbaus. Eine Kompostierungsanlage (Humuswerk Essenheim) rund. 3,5 km südwestlich von Drais verursacht zusätzlich Immissionen (und Gerüche), die mit der Hauptwindrichtung nach Drais getragen werden.

Eine „geringe Luftgüte“ (orange) wird überwiegend entlang der Rheinschiene und in den südlichen Stadtteilen von Mainz angetroffen. Mögliche Verursacher sind städtische Immissionen, Straßenverkehr, im Süden von Mainz außerdem Landwirtschaft.

Die Kategorie „mäßige Luftgüte“ (gelb) findet sich überwiegend zum einen rund um das Wiesbadener Rheingauviertel und im Osten der Stadt Wiesbaden und zum anderen in den rheinnahen Stadtteilen von Mainz.

Eine „hohe Luftgüte“ (grün) erreichen einige Untersuchungspunkte im Norden Wiesbadens am Taunusrand. Aber auch zentrumsnah finden sich kleinräumig günstige Situationen, so etwa in Wiesbaden-Schierstein am Spielplatz in der Kleinaustraße (W-L10) oder in Wiesbaden-Südost (Hasengartenstraße, W-J14), Südfriedhof, W-K15). In Mainz finden sich entsprechende Untersuchungspunkte, so etwa südlich des Mainzer Hauptbahnhofs im Grüngürtel am Judensand (M-E09).

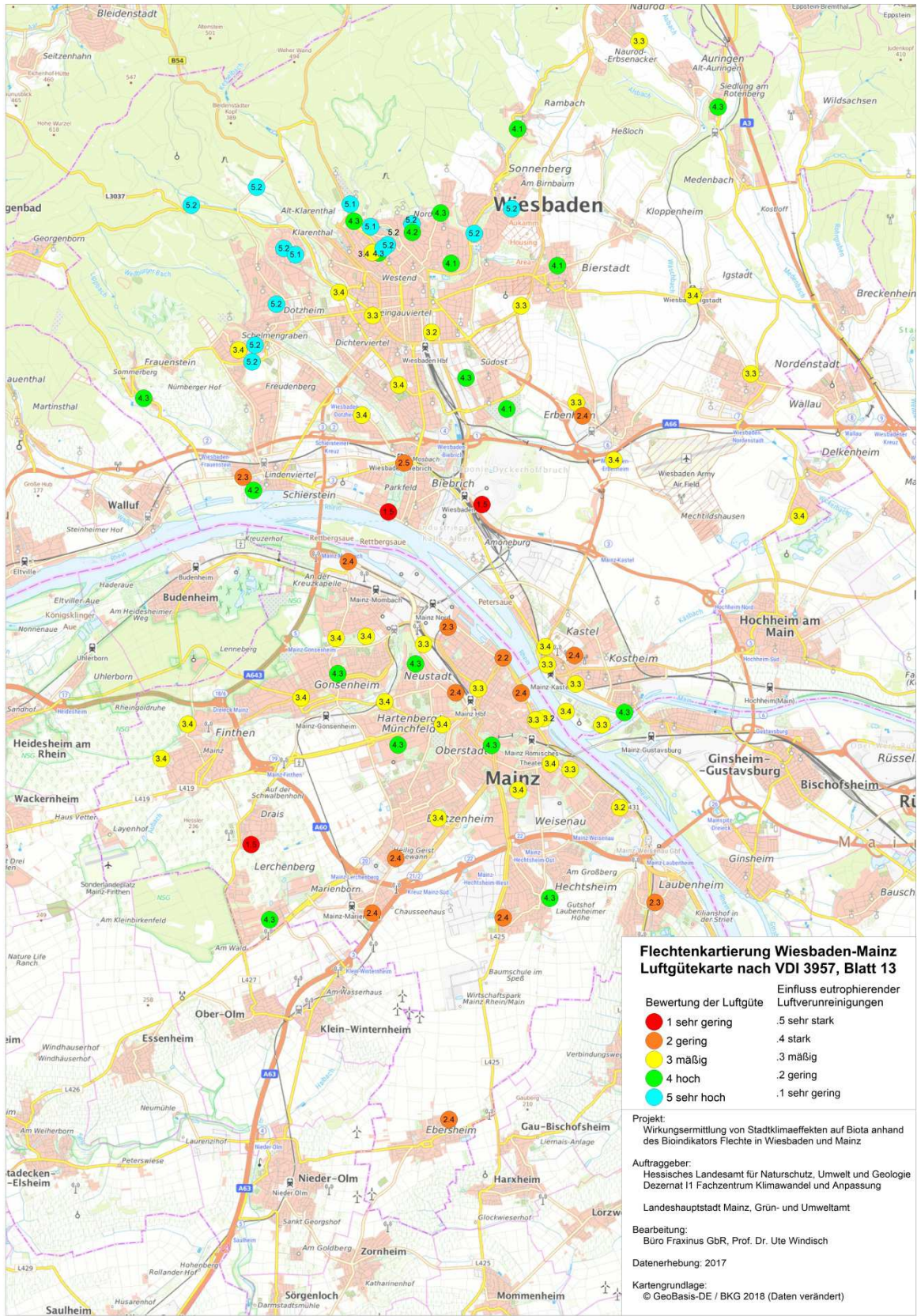


Abb. 26: Karte der Luftgüte in Wiesbaden und Mainz 2017

Die Auszeichnung „sehr hohe Luftgüte“ (blau) findet sich im Untersuchungsgebiet in eindrucksvoller Ausprägung am Taunusrand im Norden Wiesbadens. Üppige Flechtenbestände mit immisionsempfindlichen Arten wie *Parmelia saxatilis*, *Platismatia glauca*, *Hypogymnia physodes* und *Hypogymnia tubulosa* bedecken die Trägerbäume an 13 Untersuchungspunkten. Die Diversitätswerte der Luftgütezeiger (Kombination aus Artenzahl und Häufigkeit im Messgitter) erreichen hohe Werte ($FDW_{Ref}=60,8$ an W-J10b - Ludwig-Erhard-Straße; $FDW_{Ref}=59,5$ an W-H10 - Helmholtzstraße; $FDW_{Ref}=59$ an W-F12a - Platter Straße; $FDW_{Ref}=58,4$ an W-G12c - Nerotal-Süd), was zu dieser günstigen Luftgütestufe führt.

Die Entwicklung der Artenvorkommen und die daraus resultierenden Flechten-Luftgütekarte belegen eine Verbesserung der lufthygienischen Situation in den meisten Teilen des Projektgebietes. Für Wiesbaden liegen aus 1994 Daten vor, die mit den aktuell erhobenen kompatibel sind und die belegen, dass sich rund um das Rheingauviertel großräumig eine Verbesserung der Luftgüte um bis zu zwei Stufen ergeben hat. Auch im Bereich Mainz-Kastel werden aktuell deutlich bessere Werte erreicht, während die lufthygienische Situation in Biebrich bis heute als schlecht einzustufen ist. Damit folgen die Resultate anderen Erhebungen in Hessen. In Gießen und Wetzlar findet seit 1970 eine Langzeitstudie statt (Kirschbaum 2016). Beide Städte wurden mittlerweile sieben Mal untersucht. Dokumentiert werden die Verbesserung der durch die Flechten angezeigten lufthygienischen Situation, der Anstieg von Arten, die durch düngende Luftkomponenten gefördert werden sowie die Einwanderung neuer Arten, die als Klimawandelzeiger gelten. Somit ermöglicht die eingangs erwähnte Reduktion von Luftschadstoffkonzentrationen in Hessen vielen Flechtenarten, ihre Vorkommen auszuweiten bzw. stabilisieren.

5.5 Verbreitungsmuster der Flechten

Die Verbreitungsmuster aussagekräftiger Flechtenarten sollen kartographisch dargestellt werden. Dazu werden Artengruppen verwendet, die sich in einer Voruntersuchung als geeignet erwiesen haben, die Effekte von Städten auf die Flechtenverbreitung zu veranschaulichen. Die genannte Untersuchung basierte auf einer Auswertung von Kartierungsdaten in Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg (Windisch 2016).

Gruppe A) Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende

Gruppe B) Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende

5.5.1 Gruppe A: Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende

In der Voruntersuchung, bei der die Datensätze der einzelnen Arten mit den ökologischen Zeigerwerten der Messfläche verglichen wurden, zeigten die folgend aufgeführten Indizes den stärksten Zusammenhang mit der mittleren Feuchtezahl einer Messfläche (Tab. 16). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die feuchtebedürftigen Arten lufttrockenere Stadtzentren meiden. Zudem stiegen die Indizes mit zunehmender Entfernung von den untersuchten Stadtzentren (Gießen, Wetzlar Aschaffenburg) an (Windisch 2016), was den Schluss zulässt, dass es sich um poleophobe („städtemeidende“ Arten, vgl. Kap. 2.2) handelt.

Tab. 16: Indizes, die das Vorkommen feuchtebedürftiger und poleophober Flechtenarten quantifizieren (aus: Windisch 2016)

A-1	mittlere Artenzahl Große Blatflechten (AZ_Gr_Blatt)
A-2	mittlere Artenzahl Strauchflechten (AZ_Strauch)
A-3	mittlere Frequenz von <i>Parmelia sulcata</i> (mF_sul)
A-4	mittlere Artenzahl Alle Flechten (AZ_alle)
A-5	mittlere Frequenz von <i>Evernia prunastri</i> (mF_pru)

Die Wachstumsgeschwindigkeit von Flechten ist in hohem Maße von der Wasserversorgung abhängig. Ihr Stoffwechsel kommt durch hohe Temperaturen und die dadurch bedingte Austrocknung des Thallus rasch zum Erliegen. In der Vorstudie erwiesen sich die Indizes A-1 bis A-5 als geeignet, um städtische Wirkungen kartografisch darzustellen. Die Spezies *Parmelia sulcata* gehört zu den „Großen Blatflechten“, *Evernia prunastri* zu den Strauchflechten.

Im vorliegenden Projekt sollen die Indizes A-1 und A-3 exemplarisch dargestellt werden, um den Effekt der Städte Wiesbaden-Mainz auf diese Gruppe der poleophoben Flechten zu verdeutlichen. Die Indizes A-2 und A-5 sind prinzipiell in gleicher Weise geeignet, während A-4 hier keine Differenzierung liefert (Karten für A-2, A-4 und A5 im Anhang).

Die Karte der mittleren Artenzahlen der „Großen Blattflechten“ (Abb. 28) und die der mittleren Frequenz der Blattflechte *Parmelia sulcata* (Abb. 29) zeigen ein nahezu identisches Muster: Im Norden von Wiesbaden am Taunuskamm sind beide Indizes im Untersuchungsgebietes vergleichsweise stark ausgeprägt. Diese anspruchsvollen Arten werden gefördert durch

- eine höhere relative Luftfeuchte und häufigere Tauereignisse, die sich bei niedrigeren Temperaturen einstellt.
- eine geringere Immissionsbelastung.

Der beobachtete günstige Effekt wirkt sich nach Süden hin noch bis auf Höhe Schloss Freudenberg, Dotzheim-Wiesbadener Straße, Klarenthal, Platter Straße und Sonnenberg bis Parkstraße aus. Durch die Flechten nicht mehr nachzuweisen ist der Effekt im Rheingauviertel, am Hohenloheplatz und in Bierstadt. In Mainz gedeihen die poleophoben Arten noch recht gut in Gonsenheim und Hartenberg-Münchfeld und zeigen dort eine günstige Situation an. Es ist anzunehmen, dass der westlich angrenzende ausgedehnte Lennebergwald sich positiv auswirkt. Der nahezu völlige Ausfall der anspruchsvollen Arten ist vor allem entlang der Rheinschiene und in Wiesbaden-Biebrich deutlich. Als Ursachen kommen Wärmeinseleffekte und Luftbelastungen in Frage, die sich gegenseitig in ihrer Wirkung verstärken können.



Abb. 27: Üppige Bestände mit großen Blattflechten (links im Bild *Parmelia sulcata*) und Strauchflechten (Bildmitte: *Evernia prunastri*) kommen im Untersuchungsgebiet nur an mikroklimatisch begünstigten Lokalitäten vor.

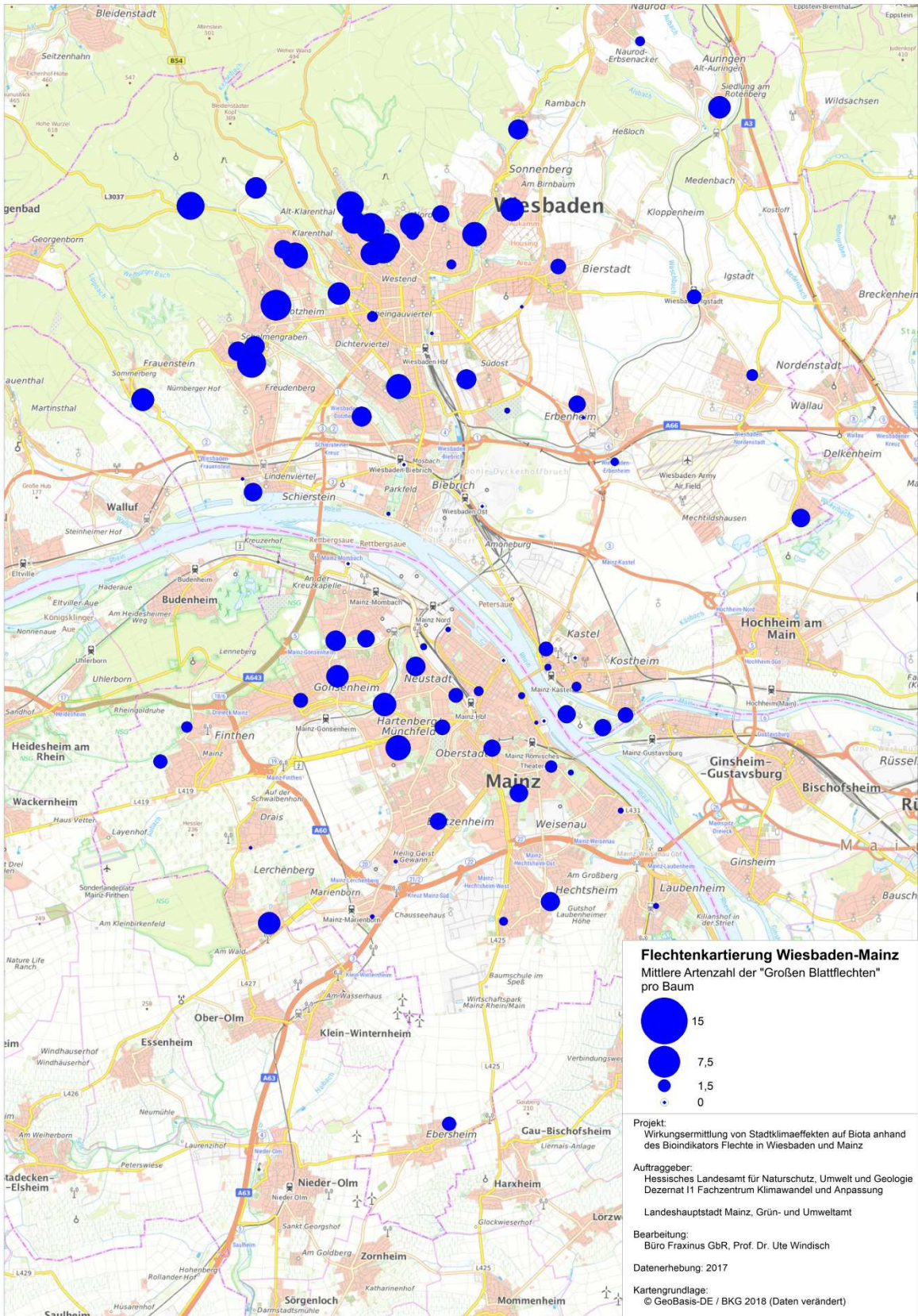


Abb. 28: Mittlere Artenzahl der „Großen Blattflechten“ pro Baum

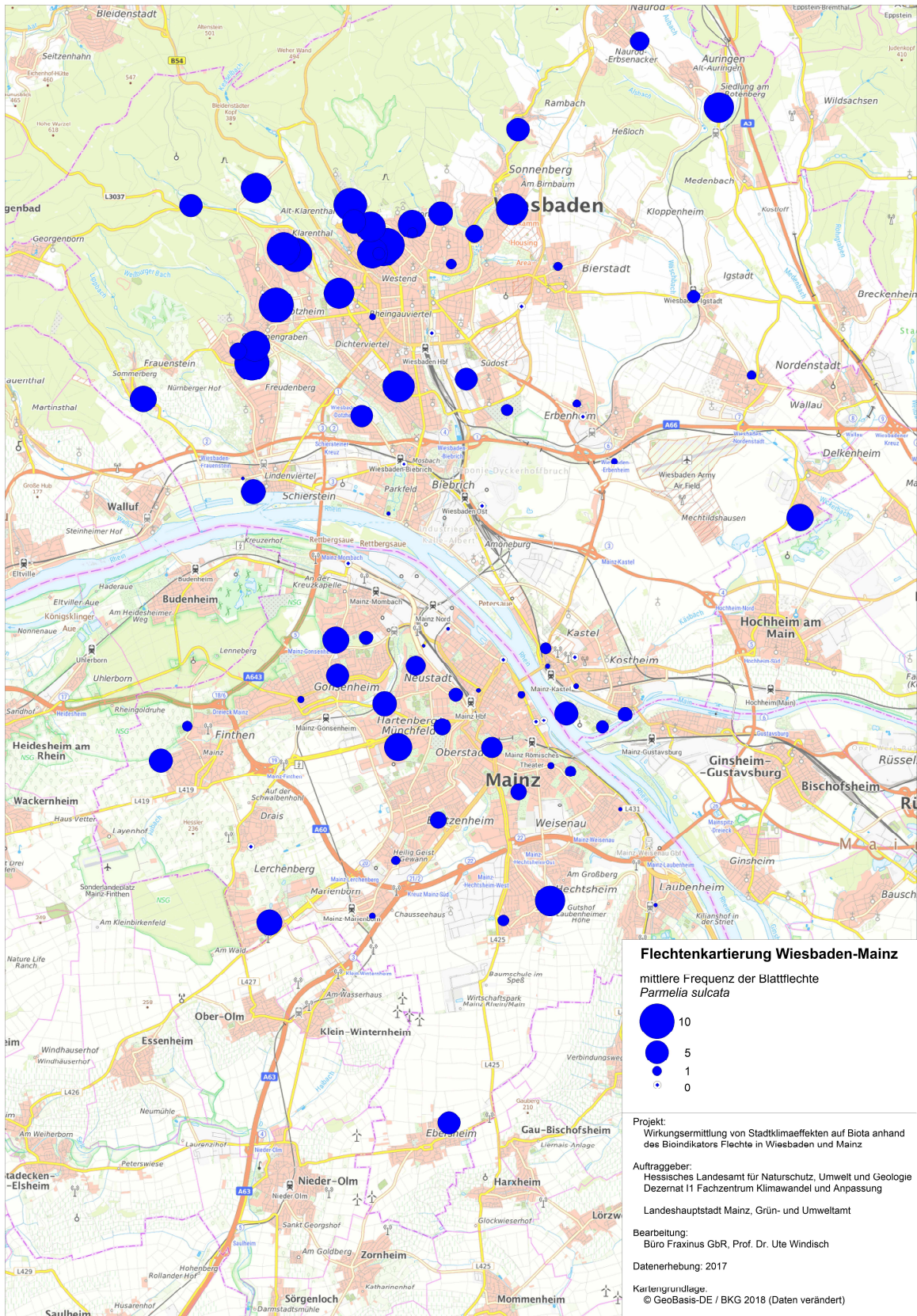


Abb. 29: Mittlere Frequenz der Blattflechte Furchen-Schüsselflechte (*Parmelia sulcata*)

5.5.2 Gruppe B: Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende

In der Voruntersuchung zeigten die folgend aufgeführten vier Indizes einen positiven Zusammenhang mit der Nähe zum Stadtzentrum, den Zeigerwerten „Temperaturzahl“ sowie „Reaktionszahl“ und „Nährstoffzahl“ (Tab. 17). Mit *Phaeophyscia orbicularis*, *Ph. nigricans* und *Hyperphyscia adglutinata* konnte eine kleine Gruppe von Arten identifiziert werden, die in überwärmten Stadtzentren gedeihen kann. Ihre Häufigkeit korreliert zudem positiv mit einem hohen Nährstoffangebot sowie höheren pH-Wert des Substrates.

Tab. 17: Indizes, die das Vorkommen eutrophierungs- und wärmetoleranter sowie poleotoleranter Flechtenarten quantifizieren (aus: Windisch 2016)

B-1	mittlere Artenzahl <i>Phaeophyscia orbicularis</i> , <i>Ph. nigricans</i> (AZ_orb_nig)
B-2	mittlere Frequenz der Gattungen <i>Phaeophyscia</i> und <i>Hyperphyscia</i> (mF_Phaeo)
B-3	mittlere Frequenz von <i>Phaeophyscia orbicularis</i> (mF_orb)
B-4	mittlere Frequenz von <i>Phaeophyscia nigricans</i> (mF_nig)



Abb. 30: Tolerant gegenüber städtischen Belastungsfaktoren: *Phaeophyscia orbicularis* (links oben), *Phaeophyscia nigricans* (rechts oben) und *Hyperphyscia adglutinata* (unten); Fotos: Kirschbaum

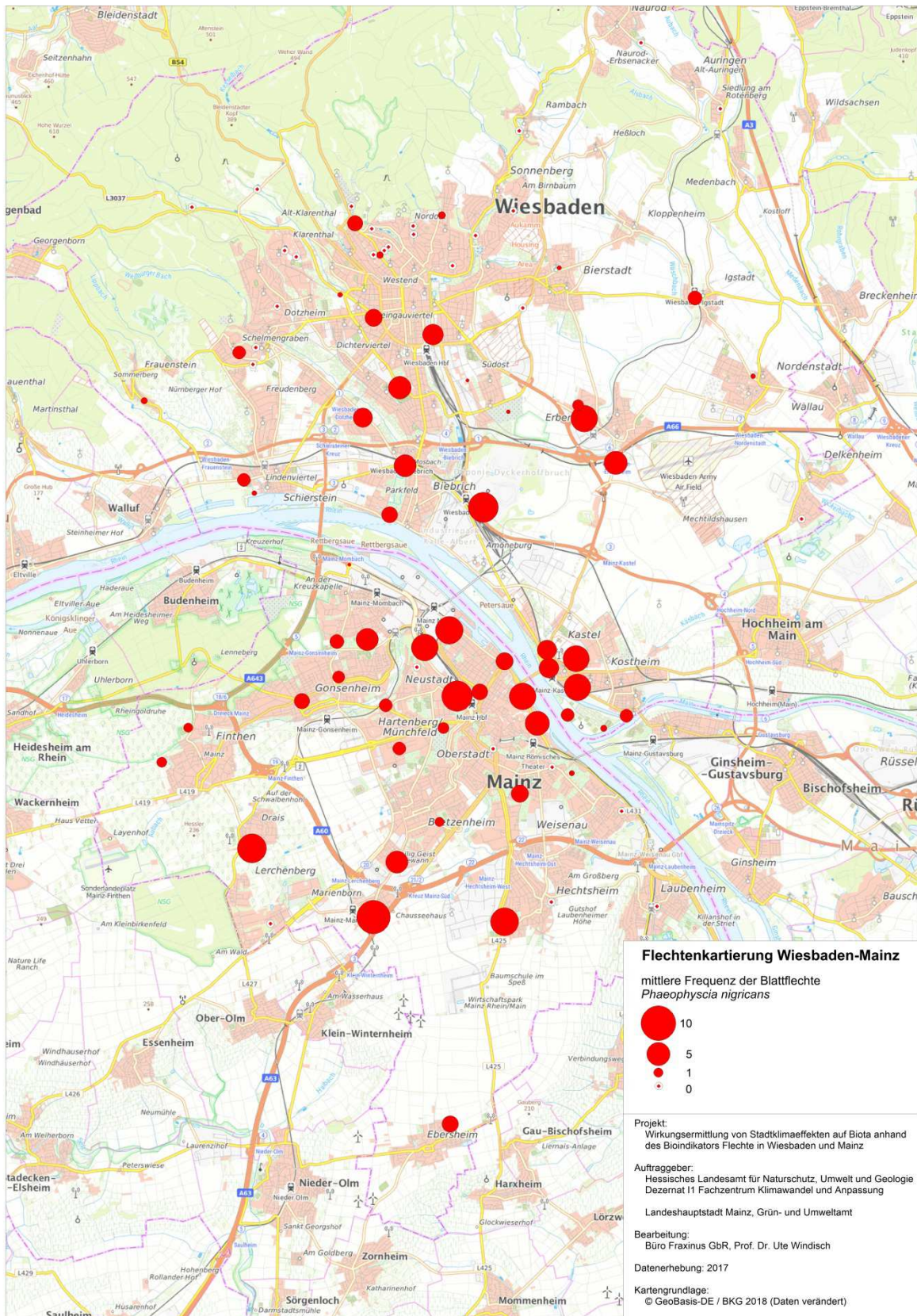
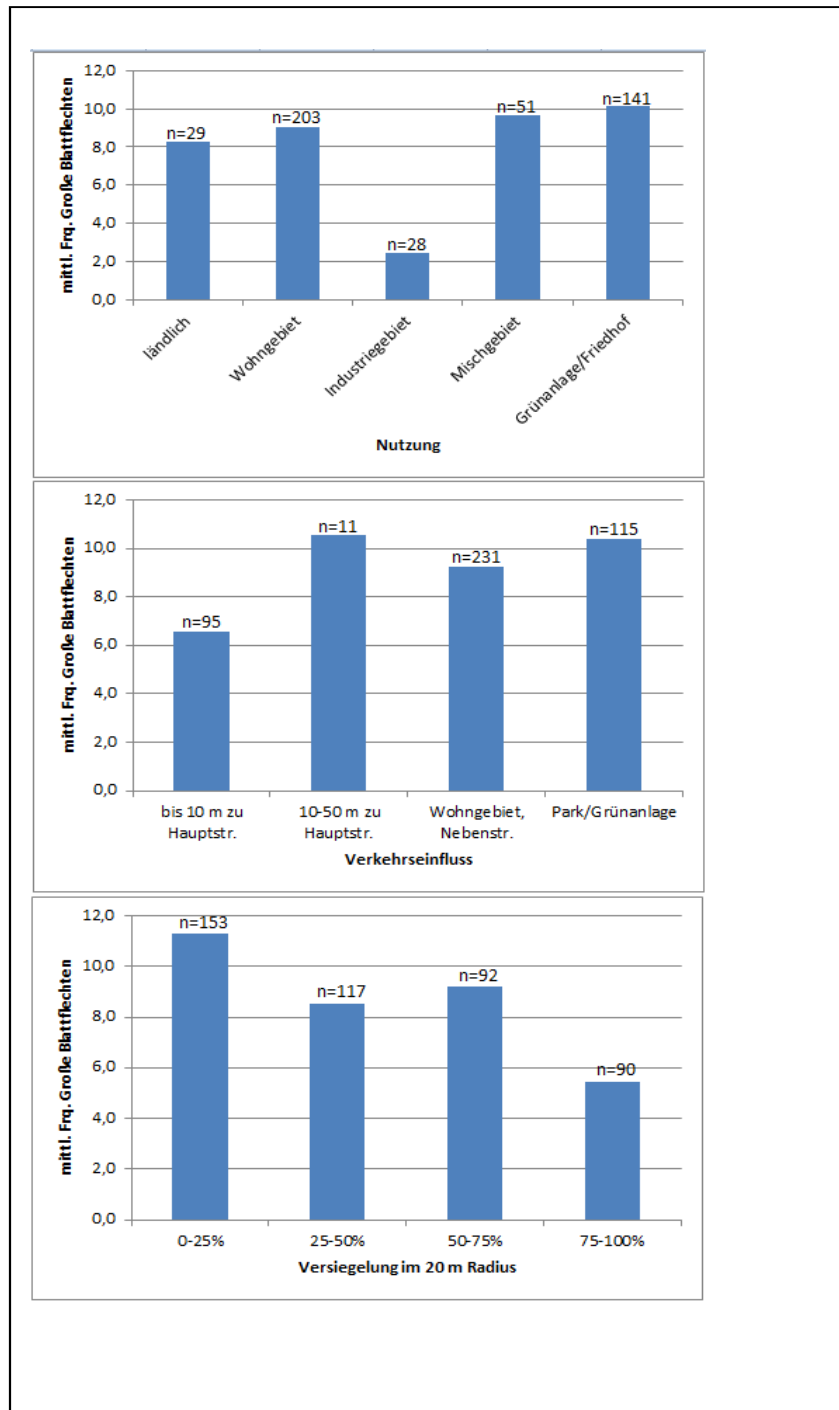


Abb. 31: Mittlere Frequenz der kleinblättrigen Schwärzlichen Schwielenflechte (*Phaeophyscia nigricans*)

Für Wiesbaden und Mainz zeigt der Index B-4 (mittlere Frequenz von *Phaeophyscia nigricans*) ein deutliches, der Gruppe A gegenläufiges Bild: Die Häufigkeit (Frequenz) der Flechtenart ist in Wiesbaden-Biebrich, in Mainz-Kastel und in Mainz in der Neustadt, in Drais und in Marienborn hoch. Im Norden von Wiesbaden am Stadtrand kommt die Art kaum vor. Die kleinblättrige Blattflechtenart kommt bevorzugt an Bäumen vor, die an stark befahrenen Straßen stehen. Deren Borken haben aufgrund verkehrsbedingter Staubbeaufschlagung einen hohen pH-Wert und ein hohes Nährstoffangebot. Ein dichtes Verkehrsnetz, wie es im Allgemeinen in Städten vorhanden ist, befördert das typische Vorkommen der Art.

5.6 Auswirkungen unterschiedlicher städtischer Nutzung

Um die Intensität der städtischen Nutzung zu erfassen, wurden Nutzungskategorien sowie Verkehrsbelastung und Versiegelung im Umfeld der Trägerbäume und ihr Zusammenhang zur Flechtenverbreitung ausgewertet.



Die mittlere Frequenz der Großen Blattflechten erreichte in Grünanlagen, fernab des Straßenverkehrs und bei geringer Bodenversiegelung die höchsten Werte (Abb. 32). Nur niedrige Werte resultierten dagegen in Industriegebieten, direkt an Hauptstraßen und bei starker Bodenversiegelung.

Abb. 32: Mittlere Frequenzen der Großen Blattflechten an Trägerbäumen unter unterschiedlicher Nutzungsintensität im Umfeld der Bäume

Für dieses Resultat konnte keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 5.2) und kann daher nur als Tendenz interpretiert werden. Dennoch erscheinen die Ergebnisse plausibel. Beispielsweise geht eine geringe Versiegelung mit einem offenen bzw. vegetationsbedecktem Boden einher, der Wasser verdunsten lässt und dadurch die Luftfeuchtigkeit erhöht und die Temperatur sinken lässt. Städtische Grünanlagen sind geprägt durch geringe Versiegelung. Die Gruppe „Große Blattflechten“ profitiert von einer guten Feuchtigkeitsversorgung und kann somit als Indikator für günstige stadtklimatische Wirkungen von Grünanlagen dienen.

6 Diskussion

Ziel der Arbeit ist, die Effekte auf Flechten, die sowohl von städtischer Luftverschmutzung als auch dem Wärmeinseleffekt verursacht werden, mittels Biomonitoring zu veranschaulichen. Die Flechtenkartierung von Wiesbaden und Mainz liefert flächendeckend Daten für das Biomonitoring der Luftgüte und belegt die Effekte der Städte auf Flechten. Die Daten können mit der Stadtklimaanalyse des DWD in Beziehung gebracht werden. Die an 452 untersuchten Bäumen gefundenen 72 Flechtentaxa bringen diverse ökologische Ansprüche an ihren Lebensraum mit. Ihr Vorkommen wird zum Biomonitoring herangezogen. Die in Wiesbaden und Mainz gefundenen Artenzahlen liegen etwa in der Größenordnung, die bei Luftgüteuntersuchungen in Mittelhessen gefunden wurden. So sind für Wetzlar 81 Arten auf 497 Trägerbäumen dokumentiert, in Gießen sind es 65 Arten auf 621 Bäumen (Kirschbaum 2016).

Stadtklimabiomonitoring

In der Arbeit wird das Konzept einer Vorstudie aufgegriffen, in der feuchtebedürftige und städtemeidende „poleophobe“ Flechtengruppen identifiziert worden waren. Die kartografische Darstellung der Gruppen veranschaulicht einerseits deren sehr gute Wachstumsbedingungen am nördlichen Stadtrand Wiesbadens im Einflussbereich des Taunuskammes und andererseits ihr Fehlen entlang der Rheinschiene und in Wiesbaden-Biebrich.

Da in städtischen Gebieten neben den typischen stadtklimatischen Modifikationen des Mikroklimas noch viele weitere Faktoren die Flechtenverbreitung beeinflussen, wird zur Klärung eine multivariate Analyse herangezogen. Besonderes Augenmerk wird auf vor Ort erhobene Daten gelegt, aber auch Daten aus der Stadtklimaanalyse fließen mit ein. Es zeigte sich, dass Flechten-

arten innerhalb einer morphologischen Gruppe ähnliche ökologische Ansprüche haben. Wie in der Voruntersuchung zeigen die Frequenzwerte der Gruppen „Große Blatflechten“ und Strauchflechten in der Datenanalyse ein gleiches Muster.

Einer Redundanzanalyse folgend, erklärt die „Lage im Untersuchungsgebiet“ am besten die Artenvariabilität. Der Nordwesten des Untersuchungsgebietes unterscheidet sich durch seine Taunusrandlage mikroklimatisch deutlich von den tieferen Lagen des Gebietes. Für die Flechten fördernd sind hier die tieferen Temperaturen, die eine höhere relative Luftfeuchte und häufigere Taubildung verursachen. Im Norden des Untersuchungsgebietes Wiesbaden und Mainz finden sich üppige Flechtenbestände mit bezüglich der Luftfeuchte und Luftqualität anspruchsvollen Arten, während nach Süden hin zur Rheinschiene nur noch eine verringerte Flechtenausstattung angetroffen werden kann. Dieses Muster ist nicht auf andere Untersuchungsgebiete mit anderen naturräumlichen Voraussetzungen übertragbar.

Die multivariate Analyse, bei der die Flechtendaten mit Daten aus der Stadtklimaanalyse des DWD (Noppel 2017) zur Lufttemperatur, gefühlten Temperatur, Geländehöhe, Landnutzungs-kategorie sowie Anzahl der Sommertage und der Tropennächte verrechnet wurden, lieferte keine statistisch abgesicherten Erkenntnisse. Die Spannweite der mikroklimatischen Faktoren wie der Lufttemperatur ist möglicherweise nicht groß genug, um eine statistisch abgesicherte Differenzierung der Flechtenbestände zu verursachen. Die Temperaturdifferenz der modellbasierten Analyse des DWD für einen windschwachen, heißen Sommertag beträgt im Untersuchungsgebiet in fünf Metern Höhe um 4:00 Uhr morgens 4,6 °C. Eigene Mikroklimamessungen am Mittelstamm von Bäumen, den Flechtenstandorten, ergaben beispielsweise für den 26. August 2017 eine morgendliche Temperaturdifferenz von 2,8 °C zwischen dem nördlichen Stadtrand und im Stadtzentrum gelegenen Messpunkten. Die Temperaturdifferenz einer Stadt im Vergleich zum Umland ist proportional zur Einwohnerzahl. Daher ist sie in Wiesbaden/Mainz erwartungsgemäß niedriger als etwa in Berlin, wo der Temperaturunterschied zum Umland bei einer Einwohnerzahl von rund 3,6 Millionen in den Nachtstunden immerhin 10 °C oder mehr betragen kann (Endlicher 2012).

Mikroklimamessungen an acht ausgewählten Trägerbäumen zeigen Tagesgänge für Temperatur und Luftfeuchtigkeit über sechs Tage im August. Temperatur und relative Luftfeuchte verhalten sich gegenläufig. Aufgrund ihres Stoffwechsels profitieren Flechten von einer höheren relativen Luftfeuchte, weil Wasserverluste verzögert werden. Dazu kommt, dass bei kühlen Temperaturen die relative Luftfeuchte ansteigt und es zu Taufall kommen kann. Tau stellt neben Nebel und

Regen eine Wasserquelle für Flechten dar. In der vorliegenden Untersuchung wurde gezeigt, dass eine mittlere relative Luftfeuchte unter 75 % an Sommertagen ein Gedeihen der anspruchsvolleren Flechtenarten nicht mehr erlaubt. Der Wert kann jedoch nur als erster Anhaltspunkt dienen. Eine Erhebung weiterer mikroklimatischer Standortdaten, auch über alle Jahreszeiten hinweg, wird empfohlen. Allgemein kann gesagt werden, dass verdunstende Oberflächen in der Stadt (Grünzüge, Dach- und Fassadenbegrünung, etc.) nicht nur für das menschliche Wohlbefinden, sondern auch für das Gedeihen von Flechten förderlich sind, da die Flechten durch die sommerliche höhere Luftfeuchtigkeit langsamer austrocknen und so länger Photosynthese betreiben können. Der günstige mikroklimatische Effekt städtischer Grünanlagen ist bekannt und dessen Effekt auch in einigen Flechtenkartierungen erwähnt. Nach BARKMAN wurde schon sehr früh beobachtet, dass in Grünzügen europäischer Städte (z. B. Oslo, Wien, Salzburg) die Epiphytenvegetation besser entwickelt war als im übrigen Stadtgebiet ((Haugsjå 1930; Sauberer 1951; Barkman 1958; Türk und Christ 1978). Bis heute wird dies immer wieder in Arbeiten erwähnt, z. B. für München (Vorbeck und Windisch 2002) und Düsseldorf (Schmitz et al. 2015).

Weiterhin spielen die nächtlichen Temperaturen offensichtlich eine wichtige Rolle. Nach einer Untersuchung in Düsseldorf nahmen die Flechten-Artenzahlen mit sinkender nächtlicher Temperatur zu (Stapper und Kricke 2004). Schon STEINER argumentierte: „Die geringe nächtliche Abkühlung wird zu verminderter Tauhäufigkeit führen; die rindenbewohnenden Flechten werden relativ selten in durchfeuchtetem Zustande die ersten Stunden nach Sonnenaufgang zur Stoffproduktion verwenden können.“ (Steiner 1957).

Zeitliche Entwicklung der Luftgüte

Die Luftgüte entwickelte sich seit 1989 positiv, wie dies auch in anderen Gebieten Hessens durch wiederholte Untersuchungen dokumentiert wird (Windisch et al. 2014; Kirschbaum 2016). Zu den bis heute ansteigenden Luftgüteindizes tragen sowohl der kontinuierliche Anstieg der Artenzahlen am Mittelstamm der Bäume als auch die höheren Flechten-Frequenzen bei. Die langfristig gesunkenen Luftschadstoffkonzentrationen sind Voraussetzung für die günstige Entwicklung der Flechtenbestände.

Die Eutrophierungszeiger unter den Flechtenarten steigen ebenfalls in Wiesbaden/Mainz und im übrigen Hessen an, was eine bessere Nährstoffverfügbarkeit anzeigt als früher. Sorge bereiten kontinuierlich steigende Eutrophierungseffekte, zu denen neben Landwirtschaft, Industrie und

Verkehr auch der Ferntransport von düngenden Stoffen in der Atmosphäre beitragen (Windisch et al. 2014; Windisch et al. 2016; Windisch 2017).

Auch wenn die Immissionszusammensetzung sich geändert hat, waren höhere Temperaturen in den Innenstädten im Vergleich zum Umland in den untersuchten Städten sicherlich auch vor Jahrzehnten schon vorhanden. Mit dem Rückgang der sauren Luftverunreinigungen wurde die Besiedelung der Städte mit Flechten – und damit mit einer Reihe geeigneter Bioindikatorarten – erst möglich. Wir verfügen derzeit in den drei untersuchten Städten über etwa 100 Flechtenarten, die am Mittelstamm standardisierter Trägerbäume zum Biomonitoring zur Verfügung stehen. Die Arten zeigen eine unterschiedliche Toleranz bezüglich der Umweltfaktoren, was sie zu Indikatoren unterschiedlicher Umweltfaktoren werden lässt. Selbst die hygriech anspruchsvollen Strauchflechten sowie die großen Blatflechten werden in Wiesbaden und Mainz gefunden. An 14 Untersuchungspunkten wird die höchste Luftgütestufe (blau) erreicht. Auch die empfindlicheren Flechtenspezies können potentiell das Stadtgebiet besiedeln und stehen dem Biomonitoring von Stadtklimawirkungen zur Verfügung.

Dennoch ist eine Differenzierung der Wirkungskomplexe „Stadtklima“ und „Luftverunreinigungen“ mit Flechten nach wie vor schwierig, wie auch von anderen Autoren eingeräumt wird (Türk und Christ 1978; Stapper und Kricke 2004). Durch ihre poikilohydre Lebensweise sind Flechten in hohem Maße auf die Aufnahme von Wasser über ihre Oberfläche abhängig. Da auch die Aufnahme von Nähr- und Schadstoffen über diesen Weg erfolgt, sind klimatische und immissionsökologische Einflüsse eng miteinander verknüpft.

Fazit

Daher erscheint es geeigneter, den Nachweis günstiger städtischer Klimabedingungen zu führen und die gefundenen Indizes der „feuchtebedürftigen und Stadtzentren meidenden Arten“ als Indikatoren für kühle und feuchte Luft zu verwenden. Stadtbezirke, in denen diese Indizes wie beispielsweise der Artenzahl der „Großen Blatflechten“ oder die der Strauchflechten hoch sind, verfügen über ausreichende Kaltluftbedingungen für diese hygriech anspruchsvollen Arten bei gleichzeitig geringer Immissionsbelastung.

Auch in der vorliegenden Arbeit wird deutlich, dass im bearbeiteten Untersuchungsgebiet Wiesbaden/Mainz die Wirkungen des Stadtklimas auf Flechten derzeit nicht von denen der Luftverunreinigungen zu differenzieren sind. Letztendlich ist zu überlegen, ob es überhaupt zielführend ist, beides zu trennen. Im Sinne des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES ist Stadtklima insbesondere wäh-

rend windschwacher Hochdruckwetterlagen nicht nur durch die städtische Wärmeinsel, sondern auch die eintretende Anreicherung von Luftschadstoffen geprägt. Zu den bioklimatischen Belastungsfaktoren gehört neben der Wärmebelastung auch die schadstoffhaltige Luft (DWD 2018).

7 Empfehlungen für Kommunen

Das Land Hessen blickt auf eine lange Tradition des Flechten-Biomonitorings zurück. Es liegt eine landesweite flächendeckende und engmaschige Ersterhebung vor, die 1995 veröffentlicht wurde. Auf diese Daten können Kommunen zurückgreifen und erhalten die Möglichkeit, die langfristige Entwicklung der Luftgüte zeitnah zu dokumentieren.

Für Kommunen wird eine standardisierte Flechtendaten-Erfassung nach der Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure empfohlen (VDI 3957 Blatt 13, Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005). Die Einhaltung der Richtlinienvorgaben ist Voraussetzung für die Kompatibilität mit den Daten der Erstkartierung. Aus dem Verfahren resultieren Bewertungen für Luftgüte und Eutrophierungswirkungen.

Zusätzliche Auswertungen sind möglich. So wird empfohlen, die Bestände der Gruppe A der Stadtzentren meidenden Flechten (vgl. Kap. 5.5.1 auf Seite 67) darzustellen.

Unter der Annahme, dass in einer Kommune der Versiegelungsgrad im Zentrum am höchsten ist und dieser zur Peripherie hin abnimmt, bildet sich im Zentrum eine Wärmeinsel. Mit einer Flechtenkartierung kann geprüft werden, in welcher Flächenausdehnung sich der Komplex Luftverunreinigung/städtische Trockenheit auswirkt.

Die Interpretation der Ergebnisse obliegt einem Fachgutachter und richtet sich nach den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass einer der geprüften Flechtenindizes bereits Anhaltspunkte für Wirkungen von Luftverunreinigungen und Lufttrockenheit geben kann. Es handelt sich um die Frequenz der großlappigen Blattflechte *Parmelia sulcata* im Messgitter. Die Erfassung der Art nach einer standardisierten Methode könnte der Umweltbildung zugutekommen. Die Vorteile sind:

- Die mittlere Frequenz der Sulcatflechte (*Parmelia sulcata*) im Messgitter erlaubt eine erste Aussage zu Lufthygiene und Feuchteversorgung.
- Die Art ist nach einer kurzen Einweisung für biologisch Interessierte relativ leicht zu identifizieren.

- Die Kartierung der Art erfordert nur wenig Materialaufwand (Messgitter, Handlupe) und ist preisgünstig.
- Mittels einer Karte der Kommune könnte eine flächendeckende Erfassung der Flechte anschaulich dargestellt werden.



Abb. 33: Furchen-Schüsselflechte (*Parmelia sulcata*)

Somit ist die Flechtenart ein ideales Objekt für die Umweltbeobachtung in Kommunen. Auch für Schulprojekte würde sich eine solche Methode anbieten. Es wird empfohlen, einen Leitfaden für diese vereinfachte Methode bis hin zur Kartendarstellung zu entwickeln und anhand eines Pilotprojektes zu prüfen.

8 Ausblick und Forschungsbedarf

Aufgrund des globalen Klimawandels werden steigende Temperaturen erwartet. Insbesondere in den ohnehin wärmeren Stadtzentren führt eine weitere Aufheizung zukünftig zu einer Zunahme der Wärmebelastung für die Bevölkerung.

In der vorliegenden Arbeit wurden typisch städtische Effekte auf den Bioindikator Flechte untersucht. Dabei konnten die Wirkungen des lokalen städtischen Mikroklimas nicht von denen der Luftschadstoffe getrennt werden. Die Flechtenbestände werden von beiden Faktoren beeinflusst.

Bundesweit steht mit einer Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure eine neue Methode zur Verfügung, um die Wirkungen des Klimawandels auf den Bioindikator Flechte zu dokumentieren (VDI 3957 Blatt 20). Dabei werden Vorkommen von Flechtenarten ausgewertet, die für milde, ozeanische oder warme Klimagebiete charakteristisch sind und sich in den letzten Jahren in Deutschland zunehmend ausgebreitet haben. Die meisten der betreffenden Arten sind anspruchsvoll bezüglich der Luftfeuchte und meiden lufttrockene Stadtzentren. Sie stehen dort potentiell nur eingeschränkt für die Bioindikation zur Verfügung, was durch weitere Studien untersucht werden sollte.

Es hat sich gezeigt, dass die mikroklimatischen Ausprägungen am Wuchsort der Epiphyten, beispielsweise aufgrund der unterschiedlichen Erfassungshöhe, von denen der DWD-Messstationen abweichen. Daher wird empfohlen, in stadtklimatischen Projekten mit Flechten auch zukünftig Mikroklimadaten und weitere, für die statistische Auswertung geeignete, Standortdaten zu erheben, um die Datengrundlage zur Erklärung der Flechtenvorkommen zu erweitern.

Die Ausdehnung der städtischen Wärmeinsel erwies sich in Wiesbaden und Mainz als vergleichsweise klein. Es wird vorgeschlagen, die hier durchgeführten Methoden in einer Stadt mit größerer Flächenausdehnung weiter zu entwickeln. Dafür bietet sich in Hessen die Stadt Frankfurt an.

9 Danksagung

Gedankt sei allen Mitwirkenden und Unterstützern dieses Projektes:

- Frau Singer-Posern und Frau Zarda, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung des HLNUG
- Herrn Kelker und Frau Hopf, Umweltamt Mainz
- Herrn Probst, Umweltamt Wiesbaden
- Frau Mangold, Herrn Schlosser, Herrn Dr. Henze und Herrn Prof. Dr. Kirschbaum

10 Literatur

AM Online Projects (Hg.): Klimadaten für Städte weltweit.

Arnold, F. (1892): Zur Lichenenflora von München. 3 Teile: 1891, 1892, 1897. In: *Ber. Bayer. Bot. Ges.*, S. 1-147.

Barkman, J. J. (1958): Phytosociology and Ecology of Cryptogamic Epiphytes. Allgemeiner Teil. Assen, Netherlands: Van Gorcum & Comp. N.V.

Beschel, R. (1958): Flechtenvereine der Städte. Stadtflechten und ihr Wachstum. In: *Ber. naturwiss. med. Ver. Innsbruck* 52, S. 1–158.

Cape, J. N.; Tang, Y. S.; van Dijk, N.; Love, L.; Sutton, M. A.; Palmer, S. C. F. (2004): Concentrations of ammonia and nitrogen dioxide at roadside verges, and their contribution to nitrogen deposition. In: *Environmental Pollution* 132, S. 469–478.

Dämmgen, U.; Grünhage, L.; Dörger, G.; Hanewald, K. (2010): Beiträge zur Erstellung einer atmosphärischen Stickstoff-Bilanz für Hessen. 1. Bulk-Deposition von reaktivem Stickstoff. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Dormann, C. F.; Kühn, I. (2012): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. UFZ – Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (Hrsg.).

DWD (2017) – siehe Noppel (2017)

DWD - Deutscher Wetterdienst (2018): Wetterlexikon. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, zuletzt geprüft am 27.08.2018.

Ellenberg, H.; Weber, H.; Düll, R. (Hg.) (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Zeigerwerte von Flechten. Unter Mitarbeit von V. et al Wirth. 3. Auflage. Göttingen: Goltze (Scripta Geobotanica, 18: 221-243).

- Endlicher, W. (2012): Einführung in die Stadtökologie. Von der Stadtgeographie zur Stadtökologie. Stuttgart: UTB.
- Erichsen, C. F. E. (1930): Die Flechten des Moränengebiets von Ostschleswig mit Berücksichtigung der angrenzenden Gebiete. Hg. v. Botanischen Verein der Provinz Brandenburg.
- Frahm, J.-P. (2006): Der Einfluss von Ammoniak auf Stickstoff liebende Flechten in verkehrsbelasteten Gebieten. In: *Immissionsschutz* (4), S. 164–167.
- Haugsjå, P. K. (1930): Über den Einfluß der Stadt Oslo auf die Flechtenvegetation der Bäume. In: *Nyt Magazin for Naturvidenskaberne*.
- Heidt, V.; Strack, W. (1989): Kartierung der epiphytischen Flechten in Wiesbaden und Umgebung im Jahre 1989. In: *Schriftenreihe der Hess. Landesanstalt für Umwelt* Heft Nr. 92.
- Henninger, S. (Hg.) (2011): Stadtökologie. Bausteine des Ökosystems Stadt. Paderborn: Schöningh.
- HLNUG (2017): Lufthygienischer Jahresbericht 2016. Teil I: Kontinuierliche Messungen. Wiesbaden.
- HLNUG (2018): Umweltatlas Hessen. Bioklima. Online verfügbar unter http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/bio/bioklima_txt.htm, zuletzt geprüft am 22.08.2018.
- Hoislbauer, G. (1979): Rindenflechten im oberösterreichischen Zentralraum und ihre Abhängigkeit von Umwelteinflüssen. In: *Stapfia* 5, S. 1–69.
- Hupfer, P.; Heyer, E.; Chmielewski, F. (2006): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12., überarb. Aufl. Wiesbaden: Teubner.
- Kandler, O.; Poelt, J. (1984): Wiederbesiedlung der Innenstadt von München durch Flechten. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 37 (3), S. 90–95.
- Kirschbaum, U. (1973): Auswirkungen eines industriell-urbanen Ballungsraumes auf die epiphytische Flechtenvegetation in der Region Untermain. Dissertation.
- Kirschbaum, U.; Windisch, U. (1995): Beurteilung der lufthygienischen Situation Hessens mittels epiphytischer Flechten. Wiesbaden: Hess. Landesanst. für Umwelt.
- Kirschbaum, U.; Wirth, V. (2010): Flechten erkennen - Umwelt bewerten. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Kirschbaum, U.; Cezanne, R.; Eichler, M.; Hanewald, K.; Windisch, U. (2012): Long-term monitoring of environmental change in German towns through the use of lichens as biological indicators. Comparison between the surveys of 1970, 1980, 1985, 1995, 2005 and 2010 in Wetzlar and Giessen. In: *Environmental Science Europe* (24), S. 1–19.
- Kirschbaum, U. (2016): Immissionsbezogene Flechtenkartierungen in Gießen und Wetzlar. Abschlussbericht im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).
- Leyer, I.; Wesche, K. (2008): Multivariate Statistik in der Ökologie. Eine Einführung. Berlin: Springer.
- Malberg, H. (2007): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Ministerium für Umwelt des Landes Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1993): Luftreinhalteplan Mainz-Budenheim. 1. Fortschreibung 1987-1995. Mainz.

- Nash III, T. H. (Hg.) (2010): Lichen Biology. 2. Aufl. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Natho, G. (1964): Flechtenentwicklung in Städten (Ein Überblick). In: *Drudea* 4 (1), S. 33–44.
- Noppel, H. (2017): Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz. Abschlussbericht des DWD (Hrsg.) zum Arbeitspaket 3 des Projektes KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz – Stadtklima in der kommunalen Praxis.
- Nylander, W. (1866): Les Lichens des Jardins du Luxembourg. In: *Bull. Soc. Bot. France* 13, S. 364–371.
- Odum, E. P. (1991): Prinzipien der Ökologie. Lebensräume, Stoffkreisläufe, Wachstumsgrenzen. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.
- Orlanski, I. (1975): A rational subdivision of scales for atmospheric processes. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* (56), S. 527–530.
- Romanova, E. V. (2015): Diversity and trends in distribution of lichens in native and artificial planting in Iskitim (Western Siberia, Russia). In: *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences* (2(11)), S. 197–208.
- Rose, C. I.; Hawksworth, D. L. (1981): Lichen recolonization in London's cleaner air. In: *Nature* 289, S. 289–292.
- Ruoss, E.; Vornarburg, C.; Joller, T. (1991): Möglichkeiten und Grenzen der Flechtenbioindikation bei der Bewertung der Umweltsituation in der Zentralschweiz. In: *VDI-Berichte 901*, S. 81–102.
- Rydzak, J. (1959): Influence of small towns on the lichen Vegetation. VII. Discussion and general conclusions. In: *Ann. Univ. Marie-Curie Skłodowska* 13c, S. 275.
- Sauberer, A. (1951): Die Verteilung rindenbewohnender Flechten in Wien, ein bioklimatisches Großstadtproblem." 3 (1951): 116-121. In: *Wetter & Leben* (3), S. 116–121.
- Schmitz, U.; Stapper, N.; Stevens, M.; Wirooks, L.; Leisten, A. (2015): Klimafolgenmonitoring Landeshauptstadt Düsseldorf 2014. Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Gruppen der Tier- und Pflanzenwelt. Hg. v. Umweltamt der Stadt Düsseldorf.
- Schöller, H. (1997): Some aspects concerning the influence of substrate, biotope and organism-specific factors of decline and threat of lichens in Central Europe, in particular Hesse (Germany). In: *Bibliotheca Lichenologica* 67, S. 267–276.
- Singer-Posern, S. (2018): Handlungsleitfaden für die kommunale Planungspraxis. Öffentliche Veranstaltung zum Thema: Herausforderung Klimawandel - Handeln für lebenswerte Städte. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden, 16.08.2018.
- Stapper, N. J.; Kricke, R. (2004): Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorteutrophierung und verkehrsbedingten Immissionen. In: *Limprichtia* 24, S. 187–208.
- Steiner, M. (1957): Rindenepiphyten als Indikatoren des Stadtklimas. In: *Medizin und Städtebau* 2, S. 119–124.
- Sukopp, H.; Wurzel, A. (1995): Klima- und Florenveränderungen in Stadtgebieten. In: *Angewandte Landschaftsökologie* 4 (95), S. 103–130.
- Trass, H. (1973): Lichen sensitivity to the air pollution and index of poleotolerance (I.P.). In: *Folia Cryptog. Estonica* 3, S. 19–22.

Türk, R.; Christ, R. (1978): Untersuchungen über den Flechtenbewuchs an Eichen im Stadtgebiet Salzburgs und über den Wasserhaushalt einiger charakteristischer Flechten. In: *Phyton (Austria)* 18 (3-4), S. 107–126.

Umweltbundesamt (2005): Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM). Hg. v. UBA. Berlin.

VDI 3957 Blatt 13 (2005): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. In: *VDI/DIN Handbuch Reinhaltung der Luft*.

VDI 3957 Blatt 20 (2015): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. In: *VDI/DIN Handbuch Reinhaltung der Luft*.

Vorbeck, A.; Windisch, U. (2002): Flechtenkartierung München - Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. In: *Materialien des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)*.

Vorbeck, A.; Windisch, U.; Eichler, M.; Cezanne, R. (2009): Immissionsbezogene Flechtenkartierung Aschaffenburg. unter besonderer Berücksichtigung des Straßenverkehrs - Wiederholungsuntersuchung 2008/09 -: unveröff. Gutachten im Auftrag der Stadt Aschaffenburg.

Windisch, U.; Cezanne, R.; Eichler, M. (2014): Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen 2012. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden. Online verfügbar unter http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/nachhaltigkeit/14-05-07_Abschlussbericht_DBF_2012_endversion.pdf.

Windisch, U. (2016): Wirkungsermittlung von Stadtklimaeffekten auf Biota anhand von Flechten. Hg. v. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden.

Windisch, U.; Pungin, A.; Meckel, T. (2016): Wirkungen von Verkehrsbelastungen auf die Flechtendiversität sowie den Stickstoff- und Chlorophyllgehalt von *Parmelia sulcata* in Hessen. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 76 (4), S. 128–135.

Windisch, U. (2017): Einsatzmöglichkeiten von Flechten beim Biomonitoring atmosphärischer reaktiver Stickstoffeinträge. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 77 (4), S. 123–126.

Wirth, V. (1993): Trendwende bei der Ausbreitung der anthropogen geförderten Flechte *Lecanora conizaeoides*? In: *Phytocoenologia* 23, S. 625–636.

Wirth, V. (2010): Ökologische Zeigerwerte von Flechten - erweiterte und aktualisierte Fassung. In: *Herzogia* 23 (2), S. 229–248.

Wirth, V.; Hauck, M.; Schultz, M. (2013): Die Flechten Deutschlands. 1. Auflage. 2 Bände: Eugen Ulmer Verlag.

Fotos mit Quellenangabe Kirschbaum:

Kirschbaum, U. (2018): Lichen Gallery. Homepage der Technischen Hochschule Mittelhessen. zuletzt aufgerufen am 27.8.2018 unter

<https://www.thm.de/lse/fachbereich/team/professoren/profile/94-ulrich-kirschbaum-13.html>

11 Anhang

Anhang 1: Liste der für die statistische Analyse zugrunde liegende Daten (pro Trägerbaum der Flechtenkartierung ein Datensatz)

Anhang 2: Liste der Untersuchungspunkte

Anhang 1: Liste der für die statistische Analyse zugrunde liegende Daten (pro Trägerbaum der Flechtenkartierung ein Datensatz)

	Abkürzung	Erklärung	Datenquelle
1	Station	Bezeichnung des homogenen Geländeabschnittes, M: Mainz, W: Wiesbaden	
2	UTM East 32U	UTM-Koordinate des Baumes	Vor-Ort-Erhebung
3	UTM_North	UTM-Koordinate des Baumes	Vor-Ort-Erhebung
4	b_art	Baumart	Vor-Ort-Erhebung
5	umfang	Baumumfang in 1,5 m Höhe	Vor-Ort-Erhebung
6	Exposition	Exposition des Messgitters am Baum	Vor-Ort-Erhebung
7	Besonn_h	Besonnungsdauer August in h	Vor-Ort-Erhebung mit Horizontoskop
8	versiegelung	Versiegelung im 20 m Radius in 4 Kategorien: 1 = 0-25 %; 2 = 25-50 %; 3 = 50-75 %; 4 = 75-100 %	Vor-Ort-Erhebung
9	Nutzung	Nutzung in 5 Kategorien: 1 = ländlich; 2 = Wohngebiet; 3 = industriell; 4 = gemischt; 5 = Grünanlage/Park/Friedhof	Vor-Ort-Erhebung
10	verk_b	Verkehrsbelastung in 4 Kategorien: 1 = unmittelb. Verkehrseinfl., bis 10 m zu Hauptstr. u. Ampelkreuzungen; 2 = indirekter Verkehrseinfluss, 10-50 m Abstand zu Hauptverkehrsstr.; 3 = innerstädt. Wohngebiete, verkehrsber. Zonen o. Nebenstr.; 4 = Parks und Grünanlagen, ländliche Gebiete	Vor-Ort-Erhebung
11	Abst_Str	Abstand zur Straße in m in 5 Kategorien: 1 = 0-2 m; 2 = 2-10 m; 3 = 10-20 m; 4 = 20-50 m; 5 = >50 m	Vor-Ort-Erhebung

	Abkürzung	Erklärung	Datenquelle
12	Breite_Str	Breite der Straße in 4 Kategorien: 1 = Fuß- und Radweg; 2 = Straße (1-3 Fahrstreifen); 3 = Straße (4-6 Fahrstreifen); 4 = Straße (>6 Fahrstreifen)	Vor-Ort-Erhebung
13	temp_16	Lufttemperatur um 16 MESZ nach DWD 2017, Abb. 5-1	Datenauszug aus Modellsimulation
14	temp_4	Lufttemperatur um 4 MESZ nach DWD 2017, Abb. 5-3	Datenauszug aus Modellsimulation
15	geftemp_16 Uhr	Gefühlte Temperatur um 16 MESZ nach DWD 2017, Abb. 5-4	Datenauszug aus Modellsimulation
16	geftemp_4 Uhr	Gefühlte Temperatur um 4 MESZ nach DWD 2017; Abb. 5-6	Datenauszug aus Modellsimulation
17	gel_hoehe	Geländehöhe nach DWD 2017, „Topografie_dgm50_BKG_Muklimo_fl“	Datenauszug aus Modellsimulation
18	land_nutz	Landnutzungsklasse nach DWD 2017	Datenauszug aus Modellsimulation
19	somm_tage_71_2000	Anzahl Sommertage 1971-2000; DWD 2017, Abb. 6-1	Datenauszug aus Modellsimulation
20	heisse_tage_71_2000	Anzahl heiße Tage; DWD 2017, Abb. 6-2	Datenauszug aus Modellsimulation
21	tropen_nä_71_2000	Anzahl Tropennächte; Abb. 6-3	Datenauszug aus Modellsimulation
22	Frq_pun	<i>Amandinea punctata</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
23	Frq_co	<i>Candelaria concolor</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
24	Frq_ref	<i>Candelariella reflexa</i> -Gruppe	Frequenz im Messgitter (1-10)
25	Frq_pru	<i>Evernia prunastri</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
26	Frq_phy	<i>Hypogymnia physodes</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
27	Frq_exp	<i>Lecanora expallens</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
28	Frq_inc	<i>Lepraria incana</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
29	Frq_psu	<i>Melanelixia subaurifera</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
30	Frq_exa	<i>Melanohalea exasperatula</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
31	Frq_sul	<i>Parmelia sulcata</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
32	Frq_orb	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)
33	Frq_nig	<i>Phaeophyscia nigricans</i>	Frequenz im Messgitter (1-10)

	Abkürzung	Erklärung	Datenquelle
34	Frq_ads	Physcia adscendens	Frequenz im Messgitter (1-10)
35	Frq_pte	Physcia tenella	Frequenz im Messgitter (1-10)
36	Frq_gri	Physconia grisea	Frequenz im Messgitter (1-10)
37	Frq_can	Polycaulonia candelaria-Gruppe	Frequenz im Messgitter (1-10)
38	Frq_cap	Flavoparmelia caperata	Frequenz im Messgitter (1-10)
39	Frq_pol	Polycaulonia polycarpa	Frequenz im Messgitter (1-10)
40	Frq_uph	Punctelia jeckeri	Frequenz im Messgitter (1-10)
41	Frq_adg	Hyperphyscia adglutinata	Frequenz im Messgitter (1-10)
42	Frq_amb	Parmeliopsis ambigua	Frequenz im Messgitter (1-10)
43	Frq_arg	Phlyctis argena	Frequenz im Messgitter (1-10)
44	Frq_bor	Punctelia borrieri	Frequenz im Messgitter (1-10)
45	Frq_ch	Cetraria chlorophylla	Frequenz im Messgitter (1-10)
46	Frq_chl	Lecanora chlorotera	Frequenz im Messgitter (1-10)
47	Frq_ele	Melanohalea elegantula	Frequenz im Messgitter (1-10)
48	Frq_far	Ramalina farinacea	Frequenz im Messgitter (1-10)
49	Frq_fur	Pseudevernia furfuracea	Frequenz im Messgitter (1-10)
50	Frq_gl	Platismatia glauca	Frequenz im Messgitter (1-10)
51	Frq_hag	Lecanora hagenii-Gr.	Frequenz im Messgitter (1-10)
52	Frq_lec	Lecidella elaeochroma	Frequenz im Messgitter (1-10)
53	Frq_pac	Candelaria pacifica	Frequenz im Messgitter (1-10)
54	Frq_par	Xanthoria parietina	Frequenz im Messgitter (1-10)
55	Frq_sax	Parmelia saxatilis	Frequenz im Messgitter (1-10)

	Abkürzung	Erklärung	Datenquelle
56	Frq_sub	Punctelia subrudecta	Frequenz im Messgitter (1-10)
57	Frq_til	Parmelian tiliacea	Frequenz im Messgitter (1-10)
58	Frq_tub	Hypogmnia tubulosa	Frequenz im Messgitter (1-10)
59	Frq_xa	Candelariella xanthostigma	Frequenz im Messgitter (1-10)
60	Frq_xgl	Melanelixia glabratula	Frequenz im Messgitter (1-10)
61	SuFrq_alleArten	alle Arten	Frequenzsumme im Messgitter
62	SuFrq_Kühle	Kühlezeiger	Frequenzsumme im Messgitter
63	SuFrq_Wärme	Wärmezeiger	Frequenzsumme im Messgitter
64	SuFrq_KWZ	Klimawandelzeiger	Frequenzsumme im Messgitter
65	SuFrq_Neut_Eutr	Neutrophyten und Eutrophierungszeiger	Frequenzsumme im Messgitter
66	SuFrq_Acido_Oligo	Acidophyten und Oligotrophiezeiger	Frequenzsumme im Messgitter
67	SuFrq_Phaeo_Hyp	Phaeophyscia- und Hyperphyscia-Arten	Frequenzsumme im Messgitter
68	SuFrq_Krusten	Krustenflechten	Frequenzsumme im Messgitter
69	SuFrqBlatt	Blattflechten	Frequenzsumme im Messgitter
70	SuFrqStrauch	Strauchflechten	Frequenzsumme im Messgitter
71	SuFrq_GrBlatt	Gruppe "Große Blattflechten"	Frequenzsumme im Messgitter
72	SuFrq_Eu_VDI	Eutropierungszeiger nach VDI 3957 Blatt 13	Frequenzsumme im Messgitter
73	SuFrq_Ref_VDI	Referenzarten nach VDI 3957 Blatt 13	Frequenzsumme im Messgitter

Anhang 2: Liste der Untersuchungspunkte

Nummer	Stadt	Ortsbezeichnung
M-C07	Mainz	Mombach, Kreisel Hauptstr.
M-D07	Mainz	Obere Kreuzstr. (Parkplatz)
M-D08	Mainz	An der Brunnenstube
M-D09	Mainz	Rheingauwall
M-D10	Mainz	Kaiser-Karl-Ring
M-D11	Mainz	Rheinallee
M-E06	Mainz	Breite Straße (Kiga Spielpl.)
M-E07	Mainz	Canisiusstraße
M-E08	Mainz	Am Fort Gonsenheim
M-E09	Mainz	Am Judensand
M-E10	Mainz	Wallstraße
M-E11	Mainz	Bonifaziusplatz
M-E12	Mainz	Rheinstraße/Karmeliterstraße
M-F03	Mainz	Finthen, Sportplätze
M-F09	Mainz	Johann-Joachim-Becher-Weg
M-F10	Mainz	Hauptfriedhof
M-F11	Mainz	Obere Zahlbacher Straße
M-F12a	Mainz	Stresemannufer
M-F12b	Mainz	Rheinstraße/Holzstraße
M-G03	Mainz	Finthen, Hauweg
M-G12	Mainz	Zeppelinstraße
M-G13a	Mainz	Volkspark, südl. Minigolfplatz
M-G13b	Mainz	Am Rosengarten/Abtsgasse
M-H05	Mainz	Drais, Marc-Chagall-Straße
M-H10	Mainz	Albert-Stohr-Str

Nummer	Stadt	Ortsbezeichnung
M-H14	Mainz	Dr.-Friedrich-Kirchhoff-Straße/Moritzstraße
M-J09	Mainz	Marienborn, Marienborner Straße
M-J13	Mainz	Hechtsheim, Friedhof
M-J15	Mainz	Laubenheim, Am Leitgraben
M-K05	Mainz	Lerchenberg, Palestrinaweg
M-K08	Mainz	Marienborn, Friedhof
M-K11	Mainz	Bürgermeister-Heinrich-Dreibus-Straße
M-O10a	Mainz	Ebersheim, Dresdener Straße
W-C18	Wiesbaden	Naurod, Auringer Str.
W-D20	Wiesbaden	Am Rotenberg, Alsbachblick
W-E15	Wiesbaden	Rambach, Niedernhausener Straße
W-F08	Wiesbaden	Golfplatz Chausseehaus
W-F10	Wiesbaden	Tierpark Fasanerie, Winterstraße
W-F12a	Wiesbaden	Nordfriedhof
W-F12b	Wiesbaden	Platter Straße, nahe Nr. 73
W-F13	Wiesbaden	Freseniusstraße, Nord
W-F14	Wiesbaden	Idsteiner Straße
W-F15	Wiesbaden	Sonnenberg, Flandernstraße
W-G10	Wiesbaden	Geschwister-Scholl-Straße, West
W-G12a	Wiesbaden	Platter Straße
W-G12b	Wiesbaden	Comeniusstraße
W-G12c	Wiesbaden	Neroberg, Nerotal Süd
W-G13a	Wiesbaden	Alter Friedhof, Nordrand
W-G13b	Wiesbaden	Alter Friedhof, Johannes-Maaß-Straße
W-G13c	Wiesbaden	Freseniusstraße, Süd
W-G14	Wiesbaden	Abeggstraße
W-G15	Wiesbaden	Aukamm Park
W-G16	Wiesbaden	Bierstadt, Friedhof Ost

Nummer	Stadt	Ortsbezeichnung
W-H10	Wiesbaden	Helmholtzstraße
W-H11	Wiesbaden	Klarenthaler Straße, Hochschule
W-H12	Wiesbaden	Marcobrunnerstraße
W-H14	Wiesbaden	Friedrich-Ebert-Allee/Lessingstraße
W-H16	Wiesbaden	Nauroder Straße, B455
W-H19	Wiesbaden	Igstadt, Hinterbergstraße
W-J09	Wiesbaden	Hans-Böckler-Straße
W-J10a	Wiesbaden	Friedrich-Engels-Weg
W-J10b	Wiesbaden	Ludwig-Erhard-Straße
W-J13	Wiesbaden	Konrad-Adenauer-Ring
W-J14	Wiesbaden	Hasengartenstraße
W-J21	Wiesbaden	Nordenstadt, Friedhof
W-K07	Wiesbaden	Frauenstein, Quellbornstraße
W-K12	Wiesbaden	Kärntner Straße
W-K15	Wiesbaden	Südfriedhof
W-K17a	Wiesbaden	Erbenheim, Am Hochfeld 14
W-K17b	Wiesbaden	Tempelhofer Straße
W-L09	Wiesbaden	Schierstein, Söhnleinstraße
W-L10	Wiesbaden	Schierstein, Spielplatz Kleinau-Straße
W-L13	Wiesbaden	Äppelallee
W-L18	Wiesbaden	Friedhof Erbenheim
W-M13	Wiesbaden	Rheingaustraße/Biebricher Schlosspark
W-M15	Wiesbaden	Unterer Zwerchweg
W-M22	Wiesbaden	Delkenheim, Rosenheimer Straße
W-O16	Wiesbaden	Boelckestraße
W-O17	Wiesbaden	Steinern Straße
W-P16	Wiesbaden	Rathausstraße
W-P17a	Wiesbaden	Kostheimer Landstraße

Nummer	Stadt	Ortsbezeichnung
W-P17b	Wiesbaden	Franziska-Retzinger-Promenade
W-P18	Wiesbaden	Mainufer
W-Q17	Wiesbaden	Konrad-Schollmayer-Straße

Der Lichenologe ARNOLD untersuchte die Flechtenflora von München und kam zu dem Schluss, ...

... „daß theils das Zusammenwohnen einer größeren Bevölkerung und vorzugsweise die Einwirkung des durch den Verbrauch der Stein- und Braunkohlen verursachten Rauches das Verkommen der Lichenen herbeiführt.“

(Arnold 1892)