

Institution

Technische Hochschule Mittelhessen

Projekttitle

Wirkungsermittlung von Stadtklimaeffekten auf Biota anhand von Flechten

- Abschlussbericht -

Laufzeit

01.08.2015 – 31.03.2016



Projektleitung

Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch

Projektbearbeitung

Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch, Gießen

Dr. Horst Tresp, Herrenberg (Statistik)

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Gießen, Juni 2016

Legende zum Titelbild:

In Stadtzentren ist die Zahl der Flechtenarten reduziert. Nur wenige Arten, die den Eintrag nährstoffhaltiger Stäube und eine geringere Wasserversorgung tolerieren, können hier gedeihen, wie *Phaeophyscia orbicularis*, *Physcia adscendens* und die gelbe *Xanthoria parietina* (links). Die epiphytischen Strauchflechten, hier *Evernia prunastri*, kommen an feuchteren Standorten vor und können als Anzeiger kühlerer Stadtbezirke genutzt werden (rechts).

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung und Abstract	1
2	Einleitung und Problemstellung	4
3	Stadtklima und Flechten	6
3.1	Was ist „Stadtklima“?	6
3.2	Auswirkungen des Stadtklimas auf Flechten	8
4	Städtische Untersuchungsgebiete	14
5	Methoden	16
5.1	Datenerhebung zu Flächennutzung und Stadtklima	16
5.1.1	Zentrumsnähe	16
5.1.2	Versiegelung	17
5.1.3	Verkehrsbelastung	19
5.1.4	Gießener Stadtklimagutachten	20
5.2	Datenerhebung aus dem Luftgüte-Biomonitoring mit Flechten	22
5.3	Berechnung potentiell relevanter Flechten-Indizes für das Stadtklima-Biomonitoring	22
5.3.1	Mittlere Artenzahl	23
5.3.2	Mittlere Frequenz einzelner Arten und Artengruppen	26
5.3.3	Flechten-Zeigerwerte nach WIRTH	27
5.4	Statistische Analyse	27
6	Ergebnisse	29
6.1	Ergebnis der multivariaten Analyse	29
6.2	Verbreitungsmuster der Flechten	32
6.2.1	Gruppe A) Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende	32
6.2.2	Gruppe B) Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende	34
6.3	Wirkungen städtischer Grünflächen	38
6.4	Vergleich mit dem Gießener Klimagutachten	40
7	Diskussion	41
8	Empfehlungen für das Projekt „KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz“	46
9	Literatur	49
	Anhang	53

Abbildungsverzeichnis

Abb. 01: Zeitreihen der Jahresmittelwerte von 1995 bis 2014 aller Luftmessstationen in Hessen; gemittelt wurden die Werte der Stationen gleichen Charakters (Verkehrsschwerpunkte, Städte, ländlicher Raum); Quelle: (HLUG 2015).....	11
Abb. 02: Einflussfaktoren auf epiphytische Flechten in Städten	12
Abb. 03: Räumliches Ausdehnungsmuster der untersuchten Städte.....	14
Abb. 04: Verdichteter Innenstadtbereich der untersuchten Städte mit Markierung des Zentrums	16
Abb. 05: Kategorien der Versiegelung in der Umgebung der Flechten-Trägerbäumen; Flechtenkartierung Gießen, Fläche 500 x 500 m	18
Abb. 06: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte der Stadt Gießen (GEO-NET Umweltconsulting GmbH 2014)	21
Abb. 07: Bilanz der Siedlungsräume im Stadtgebiet von Gießen mit durchschnittlicher Ausprägung der Klimaparameter in einer windschwachen Sommernacht um 4:00 Uhr (GEO-NET Umweltconsulting GmbH 2014)	21
Abb. 08: Biplot der Redundanzanalyse; oben: gemeinsame Anordnung der Arten- und Umweltdaten; rot: Überlagerung der Zeigerwerte sowie der wichtigsten unabhängigen Umweltvariablen; AZ: mittl. Artenzahl, mF: mittl. Frequenz; unten: Ordination der Messflächen und dazugehörigen Zentroide der Städte; G: Gießen, W: Wetzlar, A: Aschaffenburg. Diagramme können überlagert werden.....	31
Abb. 09: Mittlere Artenzahl der Strauchflechten pro Baum an Messflächen in den untersuchten Städten. Datengrundlage: Kartierungen Aschaffenburg 2009 (Vorbeck et al. 2009), Gießen und Wetzlar 2015 (Kirschbaum 2016)	33
Abb. 10: Tolerant gegenüber den städtischen Belastungsfaktoren sind <i>Phaeophyscia orbicularis</i> (links oben), <i>Phaeophyscia nigricans</i> (rechts oben), <i>Hyperphyscia adglutinata</i> (unten); Fotos: Kirschbaum	34
Abb. 11: Summe der mittleren Frequenz der Phaeophyscia- und Hyperphyscia-Arten pro Baum an Messflächen in den untersuchten Städten. Datengrundlage: Kartierungen Aschaffenburg 2009 (Vorbeck et al. 2009), Gießen und Wetzlar 2015 (Kirschbaum 2016)	35
Abb. 12: Lage der zum Vergleich herangezogenen Trägerbäume in der Ernst-Leitz-Straße/Wetzlar	38
Abb. 13: Furchen-Schüsselflechte (<i>Parmelia sulcata</i>), eine euryöke Referenzart	40
Abb. 14: Mikroklimagradienten im Straßenrandbereich (Mader 1979)	42

Tabellenverzeichnis

Tab. 01: Unterschiede stark versiegelter innenstädtischer Zonen im Vergleich zum Umland und mögliche Auswirkungen auf Flechten	13
Tab. 02: Kenndaten der untersuchten Städte im Vergleich; aus (Meynen et al. 1960; HLUG 2015; Stadt Aschaffenburg 2016; Hessisches Statistisches Landesamt 2016; Deutscher Wetterdienst 2016).....	15
Tab. 03: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13, Stand: 2005.....	25
Tab. 04: Die 20 häufigsten Flechtentaxa in der Kartierung in Wetzlar in 2015 (Kirschbaum 2016)	26
Tab. 05: Indizes, die das Vorkommen feuchtebedürftiger und poleophober Flechtenarten quantifizieren	32
Tab. 06: Indizes, die das Vorkommen eutrophierungs- und wärmetoleranter sowie poleotoleranter Flechtenarten quantifizieren	34
Tab. 07: Mittlere Flechtenfrequenzen im Zentrum von London und Moskau nach einer Stichprobenkartierung im April 2016; Methode nach Richtlinie des VDI (Anhang A); Kartierung in Moskau durch Pungin.....	37
Tab. 08: Flechtenfrequenzen an Linden in der Ernst-Leitz-Straße in Wetzlar; aus (Kirschbaum 2016) sowie zusammenfassende Indizes.....	39

Glossar

Abundanz	Häufigkeit, d. h. Anzahl der Individuen einer Art, bezogen auf ihren Wuchsort
Eutrophierungszeiger	Flechtenarten, die eine übermäßige Nährstoffversorgung tolerieren
Frequenz	bei der Flechtenkartierung ermittelter Häufigkeitswert; wird berechnet aus der Anzahl der von einer Art bewachsenen Messgitterfelder (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13)
Poleophobie	Meidung menschlichen Einflusses bzw. von Städten (poleophobe Arten meiden die Stadtzentren) (vgl. S. 9)
Poleotoleranz	Tolerierung menschlichen Einflusses bzw. von Städten (poleotolerante Arten können in Stadtzentren gedeihen)
Thallus	Flechtenkörper
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Zusammenfassung und Abstract

Titel: Wirkungsermittlung von Stadtklimaeffekten auf Biota anhand von Flechten

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 Wiesbaden-Mainz“ eingebettet, das die temperaturbedingten Folgen des Klimawandels in urbanen Systemen untersucht.

Datengrundlage sind Flechtenkartierungen Gießens, Wetzlars und Aschaffenburgs. Es wurden 46 Flechten-Indizes berechnet, die potentiell relevant für das Biomonitoring von Stadtklimaeffekten sind. Dazu gehören Daten 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. Zur Visualisierung der Ergebnisse erfolgten kartografische Darstellungen vier aussagekräftiger Varianten der Flechten-Indizes in den untersuchten Städten.

Es konnten zwei ökologische Gruppen von Flechten differenziert werden: Der Gruppe A gehören die feuchtebedürftigen Strauchflechten und eine Auswahl großer Blatflechtengattungen an. Sie meiden die Stadtzentren. Dagegen besteht die Gruppe B aus relativ trocken- und eutrophierungstoleranten Vertretern der Gattungen *Phaeophyscia* und *Hyperphyscia*. Sie zeigen in den Stadtzentren höhere Frequenzen als im Umland.

Die Faktorenkomplexe „Stadtklima“ und „Luftverunreinigungen“ sind in Städten eng miteinander verknüpft. Beide wirken auf Flechten, eine Differenzierung ist jedoch schwierig.

Wird der Begriff des Stadtklimas so weit gefasst, dass die stadtypische Anreicherung von Luftschadstoffen inbegriffen ist, so stellen die Flechten geeignete, integrierende Bioindikatoren dar. In gering eutrophierten Stadtrandbezirken stehen Flechtenindizes bereit, die Kaltluftgebiete anzeigen, in denen die Wasserversorgung, etwa durch morgendlichen Taufall, gewährleistet ist. Es sind dies die Vertreter der Gruppe A.

Wirkungen kleinräumiger Flächennutzung wie städtischer Grünzüge mit Flechten nachzuweisen, ist prinzipiell möglich, bei der vorhandenen Datenlage jedoch schwierig, denn die ausgewerteten Untersuchungen richteten ihren Fokus auf Immissionswirkungen. Es konnte jedoch an einem Beispiel in der Ernst-Leitz-Straße in Wetzlar gezeigt werden, dass Bäume direkt an der Straße ein anderes Flechtenartenspektrum tragen als die in einer Grünanlage in der unmittelbaren Umgebung. Der Sachverhalt ist auch aus der Literatur bekannt.

Ein Vergleich der drei untersuchten Städte (Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg) ergibt, dass beide der oben genannten Flechtengruppen (A und B) im Wesentlichen die gleichen Verbreitungsmuster zeigen. Sie sind demzufolge für das Biomonitoring auch in anderen Städten wie Wiesbaden und Mainz geeignet.

Es wird vorgeschlagen, das Flechten-Biomonitoring zum Nachweis der Wirkungen stadtklimabedingter Faktoren in das KLIMPRAX-Projekt aufzunehmen. Flechten reagieren auf städtetypische Belastungsfaktoren wie Überwärmung und integrieren gleichzeitig lufthygienische Faktoren. Die Empfehlungen für die Umsetzung in Wiesbaden und Mainz betreffen Datenerfassung und Auswertung. Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf, wie etwa die Notwendigkeit zur Erfassung mikroklimatischer Standortdaten, wurde formuliert.

Abstract

Title: Determination of the effects of urban climate on biota by using lichens

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 Wiesbaden-Mainz", which analysis the consequences of climate change in urban systems due to temperature.

Data basis are lichen-mappings in Gießen, Wetzlar and Aschaffenburg. 46 lichen-indices were calculated, which are potentially relevant to the biomonitoring of urban climate effects. These include data on the biodiversity, the occurrence and abundance of species and ecological groups of species. The lichen data were correlated with data on land use and urban climate by means of multivariate statistical methods. To visualize the results geographic maps were made showing four meaningful variants of lichen-indices in the cities studied.

There are two ecological groups of lichens which were differentiated into:

The Group A, where humidity requiring fruticose lichens and a selection of large foliose lichens genera belong to. These lichens avoid the city centers.

In contrast, the group B consists of representatives that are relatively tolerant of drought and eutrophication. These species belong to the genera *Phaeophyscia* and *Hyperphyscia*. They show in the city centers higher frequencies than in the surrounding areas.

The clusters of ecological factors concerning urban climate and air pollution are closely linked in cities. Lichens are affected by both and a differentiation is difficult. If the concept of the urban climate would be defined more broadly, so that the urban-typical accumulation of air pollutants is included, the lichens represent suitable, integrating biological indicators. In moderate eutrophicated city outskirts lichen indices are available, showing the cold air areas where the water supply is ensured by the morning dew. These are the representatives of the group A.

To detect effects of small-scale land use such as urban green corridors by means of lichens, is principally possible. But the available data make it difficult, because the evaluated investigations are focused to effects of air pollution. It could be shown by an example in the Ernst-Leitz-Straße in Wetzlar that trees just off the road bear a different range of lichen species than in a green area in the direct surrounding. The facts are known from the existing literature as well.

A comparison of the three analyzed cities (Gießen, Wetzlar and Aschaffenburg) surveyed shows that both of the above groups of lichens (A and B) have substantially the same distribution pattern. Thus, they are suitable for biomonitoring in other cities such as Wiesbaden and Mainz as well.

As a proposal the lichen biomonitoring should be added into the KLIMPRAX project to detect the effects of city climate related factors. Lichens react to city-related stress factors such as overheating and integrate simultaneously air hygiene factors. The recommendations for implementation in the project in Wiesbaden and Mainz concern collection and evaluation of data. Further research and investigation requirements, such as the necessity for detecting microclimatic location data, were already formulated.

2 Einleitung und Problemstellung

Besonders größere Städte bilden aufgrund der dichten Bebauung und damit einhergehenden hohen Flächenversiegelung ein eigenes Stadtklima aus. So ist es in Städten häufig wärmer und trockener als im Umland. 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 Wiesbaden-Mainz“ unter Leitung des Fachzentrums Klimawandel Hessen des HLNUG eingebettet. Das Projekt hat die temperaturbedingten Folgen des Klimawandels im Fokus. Stadtklimatische Belange in kommunalen Planungsprozessen und Abwägungsentscheidungen sollen gestärkt und den Kommunen ein Handlungsleitfaden an die Hand gegeben werden (Singer-Posern 2014).

In dieser Arbeit soll eine Methode entwickelt werden, um Wirkungen stadtklimabedingter Faktoren auf Biota nachzeichnen zu können. Dabei sollen die als Indikatoren für Luftgüte und Klimawandel bewährten Flechten verwendet werden. Aufgrund ihrer Biologie als wechselfeuchte Organismen reagieren sie sensibel auf das Wasserangebot an ihren Wuchsorten. Epiphytische Flechten sind in Städten heutzutage allgegenwärtig und können ganzjährig als Bioindikatoren genutzt werden. Zudem integrieren sie mikroklimatische und immissionsökologische Faktoren. Erste Erfahrungen zur Darstellung stadtklimatischer Effekte auf Flechten für München (Vorbeck und Windisch 2002) und Aschaffenburg (Vorbeck et al. 2009) liegen vor. So konnten in beiden Städten Kaltluftschneisen durch das Flechtenvorkommen nachgezeichnet werden.

Als Datengrundlage des vorliegenden Projektes dienen aktuelle Daten aus Flechtenkartierungen der hessischen Städte Gießen und Wetzlar sowie Aschaffenburg in Unterfranken. Durch eine genauere Betrachtung der Flechtendaten und den Abgleich mit weiteren verfügbaren Standortdaten soll eine neue Methode zum Monitoring der städtischen Überwärmung entwickelt werden. Sie soll zukünftig den Umweltbehörden der Kommunen und der Länder bei der Berücksichtigung stadtklimatischer Belange in kommunalen Planungsprozessen zur Verfügung stehen.

Räumliche Muster von Stadtklima-Erscheinungen könnten möglicherweise visualisiert werden und die Aussagen von Klimagutachten ergänzen. Dabei sind Effekte von Frischluftbahnen auf Biota ebenso interessant wie die von Hitzeinseln.

3 Stadtklima und Flechten

3.1 Was ist „Stadtklima“?

Typisch für Städte ist ihre intensive Nutzung durch den Menschen. Städtische Oberflächen sind großflächig bebaut, die vegetationsbedeckte Fläche 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 privater Hausbrand 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.“

(Deutscher Wetterdienst 2016b).

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 (Sukopp und Wittig 1998).

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.

Insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen reichern sich die in der Stadt emittierten **Luftschadstoffe** in bodennahen Luftschichten an. Einen Vergleich der Immissionskonzentrationen

trationen (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 Lebensdauer 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 (Deutscher Wetterdienst 2016b).

Im Umweltatlas Hessen des HLNUG ist das **Bioklima** als die Summe aller auf den lebenden Organismus wirkenden Faktoren des Klimas definiert (HLNUG 2016). 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“ (Deutscher Wetterdienst 2016b). 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 bestimmt, der in vielen Städten im Zentrum am höchsten ist und zur Peripherie hin abnimmt.

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

Das Bioklima im Stadtzentrum kann durch die Luftverschmutzung und die erhöhte Wärmebelastung deutlich ungünstiger ausgebildet sein als in der Peripherie der Stadt. Aufgabe der Stadtplanung ist es, durch eine Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils und einer Verbesserung der Durchlüftung ungünstigen Situationen entgegenzuwirken (Deutscher Wetterdienst 2016a).

3.2 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 poikilohydran (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 Stoffwechselformungen bei der einheimischen, in stark besonnenen 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 Stadtklima-Biomonitoring 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 Hessen 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 an den hessischen Luftmessstationen in 2014 bei 1,6 µg/m³) (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2015). 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 (Abb. 01).

Photooxidantien wie **Ozon** haben für die vorliegende Fragestellung nur geringe Bedeutung, da es sich in der Stadt aufgrund der dort vorhandenen ozonzerstörenden Substanzen nicht 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 1991).

Stickstoffoxide und **Feinstaub** sind in Städten gegenüber dem ländlichen Raum erhöht (Abb. 01) und der (Straßen)verkehr ist der Hauptmittler dieser Schadstoffgruppen.

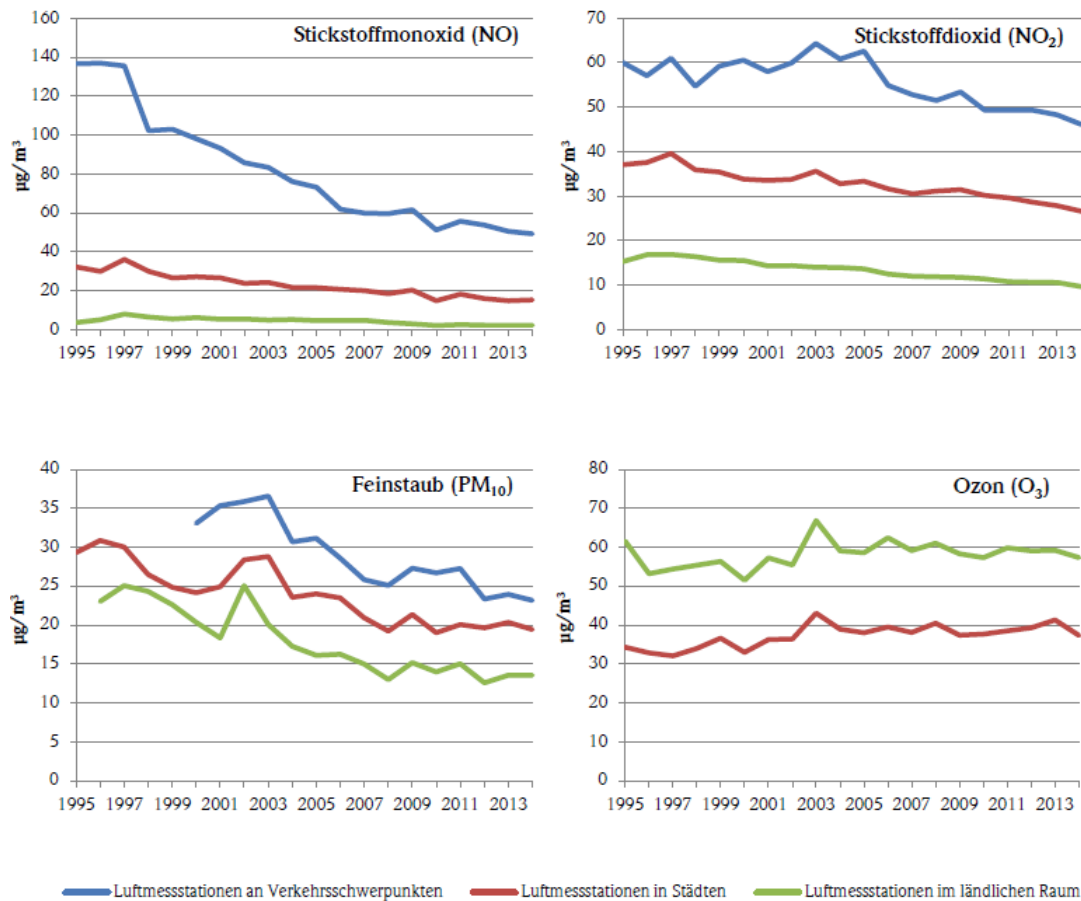


Abb. 01: Zeitreihen der Jahresmittelwerte von 1995 bis 2014 aller Luftmessstationen in Hessen; gemittelt wurden die Werte der Stationen gleichen Charakters (Verkehrsschwerpunkte, Städte, ländlicher Raum); Quelle: (HLUG 2015).

Neben Stickstoffoxiden werden von Kraftfahrzeugen auch geringe Mengen Ammoniak ausgestoßen (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 verkehrsnaher städtische 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 (HNO_3) (Abb. 02). Diese reagiert mit Ammoniak weiter zu Ammoniumnitrat, welches von den Flechten als Nährstoff aufgenommen wird. Nach Untersuchungen von DÄMMGEN ET AL. bestehen Feinstäube zu 25-50 % aus Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat (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 Vergleichs-

standorten 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.

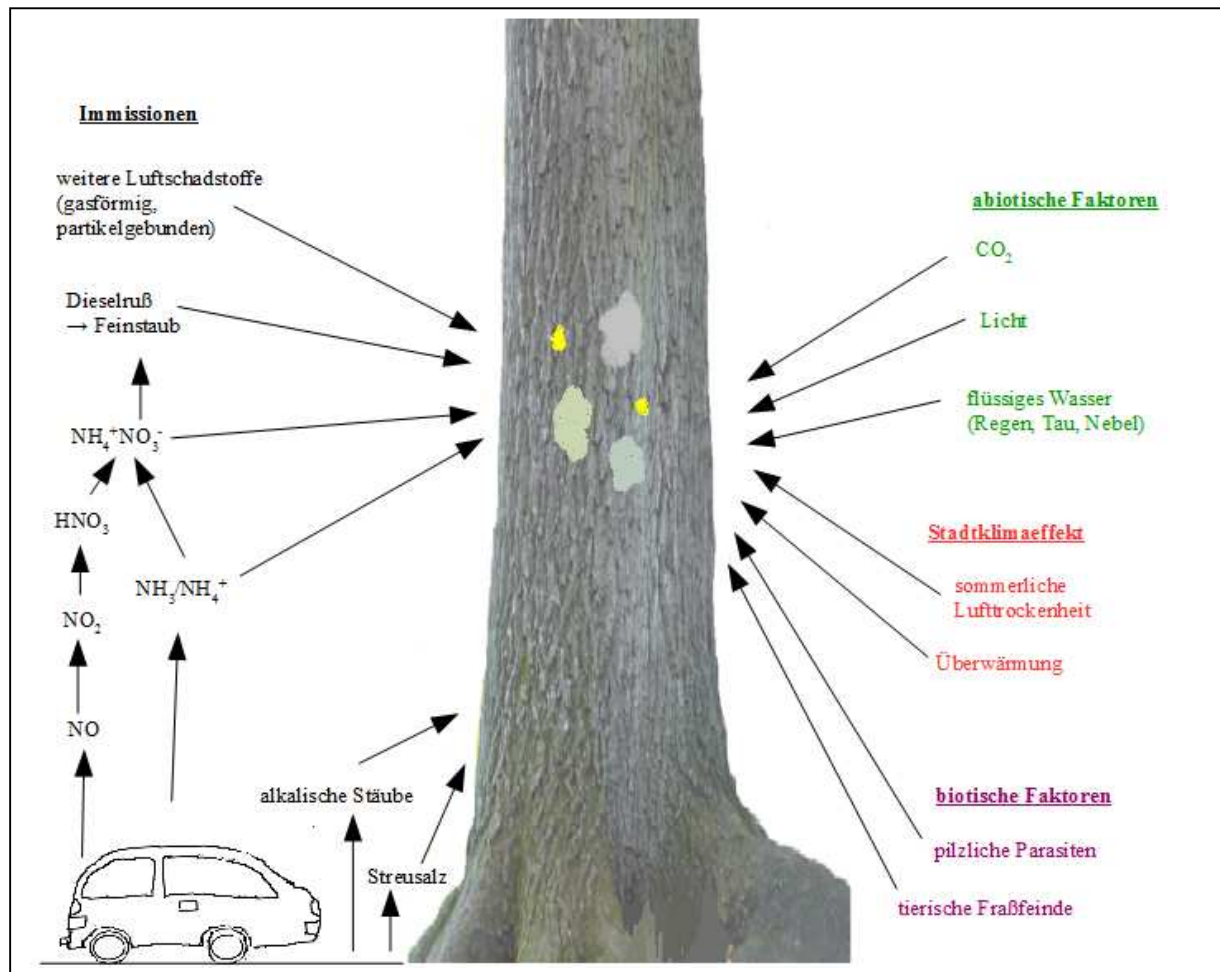


Abb. 02: Einflussfaktoren auf epiphytische Flechten in Städten

Die angenommenen Auswirkungen der städtetypischen Faktoren 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

Die Flechtenkartierungen in Städten haben in der Regel immissionsökologische Fragestellungen. 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 Stadtklima-Biomonitoring einzusetzen. Es ist zu erwarten, dass – neben den eutrophierenden Wirkungen der Luftschadstoffe – in Zukunft auch die Wirkungen der städtischen Wärmeinsel zur Erklärung der städtischen Flechtenverbreitung herangezogen werden können.

4 Städtische Untersuchungsgebiete

Betrachtet wurden die Mittelstädte Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg (Abb. 03). In ihrer Flächenausdehnung bis zu 76 km² sind sie einander ähnlich (zum Vergleich: Frankfurt/Main 248 km²). Gießen und Wetzlar liegen in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander an der Lahn in Mittelhessen.

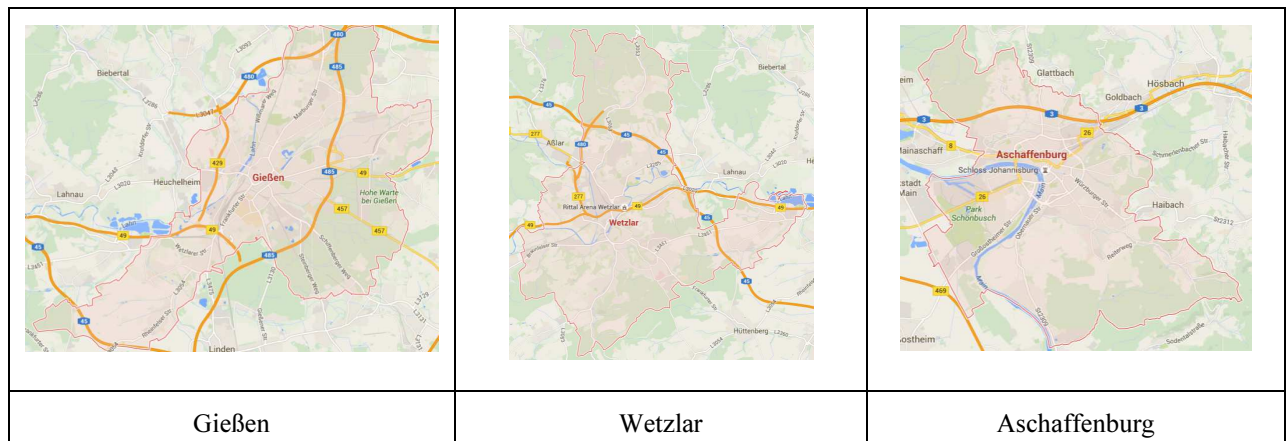


Abb. 03: Räumliches Ausdehnungsmuster der untersuchten Städte

Aschaffenburg ist etwa 90 Kilometer entfernt in südöstlicher Richtung in Unterfranken zu finden. Die Stadt liegt am Main auf 138 Metern Höhe und in einer der wärmsten Regionen Bayerns. Gießen und Wetzlar ab einer Höhe von etwa 160 Metern. Die Jahresmitteltemperatur der vergangenen acht Jahre liegt in Aschaffenburg bei 10,6 °C, damit beträgt sie ein Grad mehr als in der Region Gießen/Wetzlar. Der Jahresniederschlag ist in Aschaffenburg mit 651 mm ebenfalls höher als in Gießen und Wetzlar (Tab. 02).

Tab. 02: Kenndaten der untersuchten Städte im Vergleich; aus (Meynen et al. 1960; HLUg 2015; Stadt Aschaffenburg 2016; Hessisches Statistisches Landesamt 2016; Deutscher Wetterdienst 2016).

Stadt	Gießen	Wetzlar	Aschaffenburg
Naturräumliche Haupteinheit	348 Marburg-Gießener Lahntal	302 Östlicher Hintertaunus und 348 Marburg-Gießener	232 Untermainebene
Fläche in km²	72,56	75,67	62,45
Einwohner	83.628 (30.6.2015)	51.416 (30.6.2015)	68.167 (31.12.2014)
Einwohner/km²	1.107	679	1.092
Höhe in m ü. NHN Stadtmitte	159	156	138
Jahresmitteltemperaturen 2008-2015 (Quelle: DWD 2016, Werte bearbeitet)	9,6 °C (Station Gießen-Wettenberg, ländlich)	9,6 °C (Station Gießen-Wettenberg, ländlich)	10,6 °C (Station Schaaheim, ländlich)
mittlere Jahresniederschläge 2008-2015 (Quelle: DWD 2016, Werte bearbeitet)	591 mm (Station Gießen-Wettenberg, ländlich)	591 mm (Station Gießen-Wettenberg, ländlich)	651 mm (Station Schaaheim, ländlich)
mittlere Luftfeuchte 2008-2015 (Quelle: DWD 2016, Werte bearbeitet)	79,2 % (Station Gießen-Wettenberg, ländlich)	79,2 % (Station Gießen-Wettenberg, ländlich)	77,9 % (Station Schaaheim, ländlich)
NO₂-Jahresmittelwert 2014	45,1 µg/m ³ (Station Gießen, Westanlage, zentrale Lage)	31,1 µg/m ³ (Station Herrmannsteiner Str., zentrale Lage)	29 µg/m ³ (Station Bussardweg, zentrale Lage)
Feinstaub (PM₁₀)-Jahresmittelwert 2014	25,5 µg/m ³ (Station Gießen, Westanlage, zentrale Lage)	22,3 µg/m ³ (Station Herrmannsteiner Str., zentrale Lage)	- (keine Messung)

5 Methoden

5.1 Datenerhebung zu Flächennutzung und Stadtklima

Ziel der Arbeit ist es, stadtklimatisch relevante Standortdaten mit den Vorkommen der epiphytischen Flechten abzugleichen. Dazu wurden zunächst geografische Koordinaten ermittelt, die in der vorliegenden Arbeit als **Messpunkt** bezeichnet werden. Diese Messpunkt-Koordinaten stellen den geografischen Mittelpunkt der Trägerbäume einer Messfläche aus dem Biomonitoring der Luftgüte dar. In der Regel stehen die Trägerbäume eines Messpunktes nahe beieinander und weisen ähnliche Standortfaktoren auf.

5.1.1 Zentrumsnähe

Es wird angenommen, dass der Versiegelungsgrad im Zentrum von Städten am höchsten ist und dieser zur Peripherie hin abnimmt. Ein solches Muster ist Voraussetzung zur Bildung einer städtischen Wärmeinsel, bei der Stadtklimaeffekte im Stadtzentrum am deutlichsten ausgeprägt sind.

In den untersuchten Städten wurde das aufgrund seiner Versiegelung und Verdichtung erkennbare Stadtzentrum festgelegt (Abb. 04). Für Gießen wurde als Stadtzentrum die Straße „Mäusburg“ angenommen, in Wetzlar der Punkt „Ecke Sophienstraße/Waldschmidtstraße“ und in Aschaffenburg die „Erbsengasse“.

Die Entfernung vom Stadtzentrum zu den Messpunkten wurde ermittelt.



Abb. 04: Verdichteter Innenstadtbereich der untersuchten Städte mit Markierung des Zentrums

5.1.2 Versiegelung

Die Intensität der Flächennutzung beeinflusst die Ausprägung einer städtischen Wärmeinsel. Als Maß für die Nutzungsintensität wurde der Versiegelungsgrad eines Quadrates mit einer Seitenlänge von 500 Metern ($0,25 \text{ km}^2$) per Luftbilddauswertung ermittelt. Dazu wurde zunächst der geografische Mittelpunkt der Trägerbäume einer Messfläche errechnet. Dieser Punkt ist das Zentrum des betrachteten Quadrates.

Als „nicht versiegelt“ wurden solche Flächen bezeichnet, auf denen im Luftbild Vegetation bzw. offene Bodenflächen zu erkennen waren. Der prozentuale Versiegelungsgrad wurde in vier Kategorien eingeteilt.

- Kategorie 1: versiegelte Fläche 0-25 %
städtisches Umland inklusive der Ortsrandlagen; Umgebung der Trägerbäume überwiegend unversiegelt
- Kategorie 2: versiegelte Fläche 25-50 %
Lockere Bebauung mit einem Anteil an kleineren innerstädtischen (oder innerörtlichen) Grünflächen (Parks, Grünstreifen entlang von Verkehrswegen oder Gewässern, Sportanlagen, siedlungsbegleitendes Grün)
- Kategorie 3: versiegelte Fläche 50-75 %
innerstädtische (oder innerörtliche) Zone, die einen Anteil an unversiegelten Flächen hat
- Kategorie 4: versiegelte Fläche 75-100 %
städtische Kernzone; mit einem hohen Anteil an versiegelten Flächen

Beispiele von Messpunkten in Gießen sind der Abb. 05 zu entnehmen.




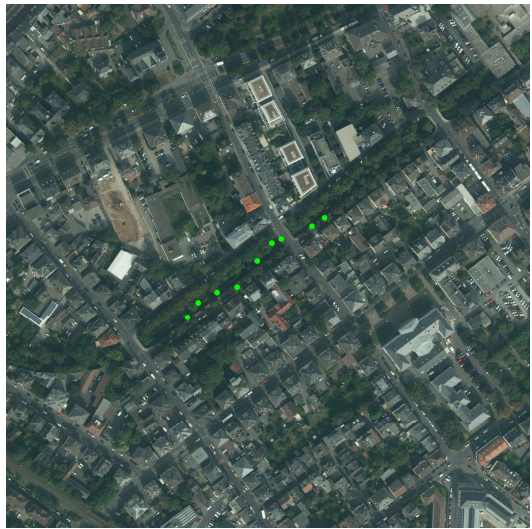
	
<p>Kategorie 1: Versiegelung 0-25% Gießen, Schwanenteich</p>	<p>Kategorie 2: Versiegelung 25-50% Vetzberg</p>
	
<p>Kategorie 3: Versiegelung 50-75 % Gießen, Kropbacher Weg</p>	<p>Kategorie 4: Versiegelung 75-100 % Gießen, Stadtzentrum, Löberstraße</p>

Abb. 05: Kategorien der Versiegelung in der Umgebung der Flechten-Trägerbäumen;
Flechtenkartierung Gießen, Fläche 500 x 500 m

5.1.3 Verkehrsbelastung

Die Trägerbäume städtischer Flechtenkartierungen stehen häufig an Straßen, was mit einer direkten Beeinflussung des Mikroklimas und der Schadstoffbelastung einhergeht. Daher wurde das Ausmaß der Verkehrsbelastung bei der Geländeerfassung vor Ort erhoben. Wenn die Belastung der Bäume innerhalb eines Messpunktes weitestgehend homogen war, wird dem Standort eine Verkehrskategorie zugeordnet. Wenn keine Homogenität vorlag, geht der Messpunkt nicht in die Auswertung ein.

- Kategorie 1: bis 10 m Abstand zu Hauptverkehrsstraßen und Ampelkreuzungen
- Kategorie 2: 10-50 m Abstand zu Hauptverkehrsstraßen
- Kategorie 3: innerstädtische Wohngebiete, verkehrsberuhigte Zonen bzw. Nebenstraßen
- Kategorie 4: Parks und Grünanlagen, ländliche Gebiete

5.1.4 Gießener Stadtklimagutachten

Für die Stadt Gießen liegt eine aktuelle Klimaanalyse vor (GEO-NET Umweltconsulting GmbH 2014). Sie beschreibt die klimatisch-lufthygienische Situation in Gießen unter Anwendung eines Klimamodells (FITNAH). Eingangsdaten für die Modellierung waren Geländedaten (z. B. Geländehöhe, Neigung), Nutzungsdaten (z. B. Versiegelung, Gebäudehöhe, Vegetationshöhe) sowie Immissionsdaten (die durch den Straßenverkehr verursachten Stickstoffoxid-Emissionen).

Ergebnis des Klimagutachtens ist eine Karte der klima- und immissionsökologischen Funktionen für die Stadt (Abb. 06). In einem Raster mit einer Auflösung von 25 Metern wurden die Flächen bioklimatisch bewertet („ungünstig“ bis hin zu „sehr günstig“). Weiterhin wurden Aussagen zur Ausdehnung von Kaltluftströmungen, zu verkehrsbedingten Luftbelastungen und der Richtung des Luftaustausches getroffen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die im Klimagutachten für Gießen ausgewiesene bioklimatische Situation für jeden Messpunkt aus der Karte (Abb. 06) ausgelesen. Die Kategorien werden in Anlehnung an das Gutachten folgendermaßen definiert:

- Kategorie 0: Grün- und Freiflächen außerhalb des Siedlungsraums
- Kategorie 1: sehr günstige bioklimatische Situation des Siedlungsraums
- Kategorie 2: günstige bioklimatische Situation des Siedlungsraums
- Kategorie 3: weniger günstige bioklimatische Situation des Siedlungsraums
- Kategorie 4: ungünstige bioklimatische Situation des Siedlungsraums

Ein weiteres Ergebnis des Klimagutachtens ist eine Gegenüberstellung der gefundenen Bioklimazonen hinsichtlich einiger Klimaparameter und ihres Flächenanteils (Abb. 07). Es zeigt sich, dass nur etwa 1 % der Siedlungsfläche ungünstige bioklimatische Verhältnisse aufweist, während immerhin gut 77 % der Fläche mit „günstig“ oder „sehr günstig“ bewertet wurden.

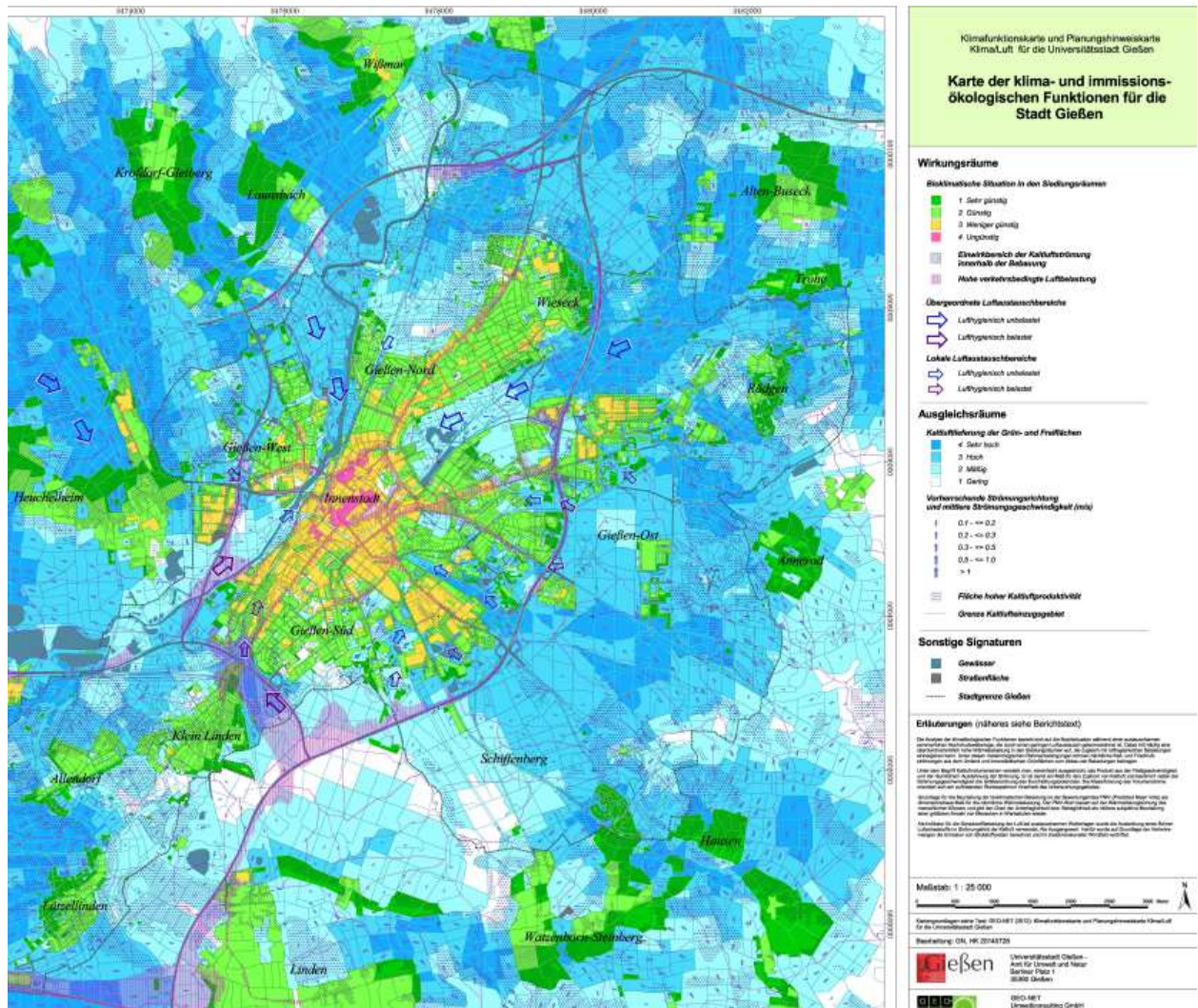


Abb. 06: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte der Stadt Gießen (GEO-NET Umweltconsulting GmbH 2014)

Bioklimatische Verhältnisse	Temperatur (°C)	Windgeschwindigkeit (m·s ⁻¹)	Kaltluftvolumenstrom (m ³ ·s ⁻¹)	Kaltluftproduktionsrate (m ³ ·m ⁻² ·s ⁻¹)	Fläche (km ²)	Anteil an der Siedlungsfläche (%)
Sehr günstig	17,3	0,26	1229	7,0	2,81	15,7
Günstig	18,8	0,11	586	5,3	11,00	61,6
Weniger günstig	20,2	0,03	271	4,0	3,86	21,6
Ungünstig	21,1	0,01	63	3,3	0,20	1,1

Abb. 07: Bilanz der Siedlungsräume im Stadtgebiet von Gießen mit durchschnittlicher Ausprägung der Klimaparameter in einer windschwachen Sommernacht um 4:00 Uhr (GEO-NET Umweltconsulting GmbH 2014)

5.2 Datenerhebung aus dem Luftgüte-Biomonitoring mit Flechten

In dieser Arbeit konnte auf Daten aus regelmäßig durchgeführten Luftgüte-Biomonitoring-projekten zurückgegriffen werden. Die Erhebung der Daten erfolgt nach einem standardisierten Verfahren des VEREINS DEUTSCHER INGENIEURE, der Richtlinie VDI 3957 Blatt 13 (VDI 3957 Blatt 13 2005). Die Standardisierung betrifft insbesondere die Trägerbäume (Baumart, Umfang, Beschattung, etc.) sowie die Erfassung der Flechten in einer festgelegten Aufnahmefläche (Messgitter). In jeder Messfläche werden 6-10 geeignete Bäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. Zur Erfassung der Flechten wird das Gitter mit 10 Gitterfeldern (je 10 x 10 cm) am Mittelstamm der am stärksten bewachsenen Stammseite angelegt (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Anhang A). Es werden alle Flechtenarten aufgenommen. Für jede vorgefundene Art wird notiert, in wie vielen der zehn Felder des Gitters die Art vorkommt (Frequenz).

Weitere Informationen, auch zu den beteiligten Wissenschaftlern, liefern die Originalarbeiten. Für Aschaffenburg ist dies ein Gutachten der Stadt Aschaffenburg (Vorbeck et al. 2009), für Gießen und Wetzlar der Abschlussbericht, der 2016 fertiggestellt werden wird (Kirschbaum 2016).

5.3 Berechnung potentiell relevanter Flechten-Indizes für das Stadtklima-Biomonitoring

Ziel war es, Flechten-Indizes zu finden, die relevant sind für das Monitoring von Stadtklima-Effekten. Dazu wurden die vorhandenen Flechtendaten ausgewertet. Auf Basis der unterschiedlichen Ansprüche von Flechtenspezies gegenüber abiotischen Faktoren (z. B. der Temperatur, der Feuchtigkeitsversorgung, etc.) wurden Flechtengruppen zusammengestellt. Grundlage dafür waren veröffentlichte Daten zur Flechtenökologie oder eigenen Geländeerfahrungen.

Es wurden 46 verschiedene Varianten von Flechtenindizes gebildet, die im nächsten Schritt mit den oben beschriebenen Daten zu Flächennutzung und Stadtklima in Beziehung gesetzt werden sollten. Die Varianten sind in Anhang 4 gelistet und im Folgenden erklärt.

5.3.1 Mittlere Artenzahl

Für diese Indizes wurden mittlere Artenzahlen pro Messpunkt, als Mittelwert pro Trägerbaum, berechnet.

Gesamtartenzahl der Flechten

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.

Die Berechnungen wurden analog für Kombinationen von Flechtentaxa durchgeführt, die nach ökologischen Kriterien zusammengestellt wurden. Es sind dies:

Kühlezeiger

Flechtenarten, die eine Temperaturzahl ≤ 4 haben. Die Temperaturzahl ist ein ökologischer Zeigerwert nach WIRTH (Wirth 2010). (Erläuterungen zu den Zeigerwerten ab Seite 27).

Es liegen Erfahrungen in Aschaffenburg vor, wonach diese Arten den stark versiegelten Innenstadtbereich meiden und in Kaltluftschneisen verstärkt vorkommen (Vorbeck et al. 2009).

Wärmezeiger

Flechtenarten, die eine Temperaturzahl ≥ 7 haben. Der städtische Wärmeinseleffekt führt möglicherweise zu einem gehäuften Vorkommen wärmeliebender Flechtenspezies im Stadtzentrum im Vergleich zum Umland.

Klimawandelzeiger

Bei dieser Gruppe handelt es sich um 45 Flechtenarten, die im Biomonitoring des Klimawandels eingesetzt werden. Sie haben ihren Verbreitungsschwerpunkt in subatlantisch-submediterranen Regionen mit mildfeuchten Wintern. Die Arten 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. Diese Informationen entstammen der Richtlinie 3957 Blatt 20, die der VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE im Jahr 2016 herausgeben wird (VDI 3957 Blatt 20 2016).

Neutrophyten und Eutrophierungszeiger

Flechtenarten, die eine Reaktionszahl > 5 und eine Eutrophierungszahl (früher Nährstoffzahl) > 5 haben; Zeigerwerte nach WIRTH (Wirth 2010). Die Ausbreitung dieser Gruppe von Arten wird

möglicherweise durch stadttypische Alkalisierung und Nährstoffanreicherung der städtischen Habitate gefördert.

Acidophyten und Oligotrophiezeiger

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

Gattungen *Phaeophyscia* und *Hyperphyscia*

In den untersuchten Stadtgebieten sind dies *Phaeophyscia orbicularis*, *Phaeophyscia nigricans* und *Hyperphyscia adglutinata* (vgl. Fotos auf Seite 34). 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 immisionsbezogenen 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

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 Toxitoleranz 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 den drei untersuchten Städten kamen mit *Anaptychia ciliaris*, *Cladonia spec.*, *Evernia prunastri*, *Pseudevernia furfuracea*, *Ramalina fari-*

nacea, *Ramalina fraxinea*, *Usnea dasypoga*, *Usnea hirta* und *Usnea substerilis* insgesamt neun Strauchflechten-Taxa vor.

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.

Große Blattflechten

Es wurde eine Auswahl breitlappiger, in den untersuchten Städten regelmäßig anzutreffender Gattungen getroffen: *Flavoparmelia*, *Hypogymnia*, *Melanelixia*, *Melanohalea*, *Parmelia*, *Parmelina*, *Platismatia*, *Pleurosticta* und *Punctelia*. 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 und sie dadurch rascher austrocknen als viele der schmallappigen, enganliegenden Blattflechten, wie z. B. Phaeophysciiden oder Physconiiden.

Eutrophierungszeiger nach VDI 3957 Blatt 13

Nach der genannten Richtlinie des VDI sind 16 Arten als Eutrophierungszeiger ausgewiesen (Tab. 03) (VDI 3957 Blatt 13 2005).

Tab. 03: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 Blatt 13, Stand: 2005

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

Referenzarten nach VDI 3957 Blatt 13

Alle übrigen Flechtenarten, die nach dem vorangegangenen Punkt nicht in der Liste der Eutro-

phierungszeiger erscheinen, sind nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 13 Referenzarten (VDI 3957 Blatt 13 2005).

5.3.2 Mittlere Frequenz einzelner Arten und Artengruppen

Die vorliegenden Daten aus der Flechtenkartierung enthalten auch quantitative Angaben, die durch eine standardisierte Kartierung in einem Messgitter erhoben wurden. So wurde die **mittlere Frequenz** für einzelne Arten ausgewertet. Für diese Variante wurden die 20 aktuell in Wetzlar häufigsten Arten ausgewählt (Tab. 04). Sie entsprechen weitestgehend den häufigsten Arten der Gießener Kartierung. Nach einer früheren Untersuchung in beiden Städten erreichen nur relativ wenige Arten höhere mittlere Frequenzen im Messgitter (Kirschbaum und Windisch 2014).

Tab. 04: Die 20 häufigsten Flechtentaxa in der Kartierung in Wetzlar in 2015 (Kirschbaum 2016)

Flechtentaxa	
<i>Amandinea punctata</i>	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>
<i>Candelaria concolor</i>	<i>Phaeophyscia nigricans</i>
<i>Candelariella reflexa</i> -Gruppe	<i>Physcia adscendens</i>
<i>Evernia prunastri</i>	<i>Physcia tenella</i>
<i>Hypogymnia physodes</i>	<i>Physconia grisea</i>
<i>Lecanora expallens</i>	<i>Polycaulonia candelaria</i> -Gruppe
<i>Lepraria incana</i>	<i>Polycaulonia polycarpa</i>
<i>Melanelixia subaurifera</i>	<i>Punctelia jeckeri</i>
<i>Melanohalea exasperatula</i>	<i>Punctelia subrudecta</i>
<i>Parmelia sulcata</i>	<i>Xanthoria parietina</i>

Weiterhin wurde die mittlere Frequenz auch für die im vorigen Kapitel genannten Artenkombinationen berechnet. Dabei entspricht die mittlere Frequenz der Eutrophierungszeiger und der Referenzarten dem Flechtendiversitätswert (FDW_{Eu} , FDW_{Ref}) der Richtlinie 3957 Blatt 13 zum Luftgütemonitoring (VDI 3957 Blatt 13 2005).

5.3.3 Flechten-Zeigerwerte nach WIRTH

Ökologische Zeigerwerte für Flechten wurden im Jahre 1991 erstmalig veröffentlicht, eine Aktualisierung und Erweiterung auf 516 Arten erfolgte 2010 (Wirth 2010). Für die vorliegende Fragestellung wurden die Zeigerwerte für Temperatur, Feuchte, Eutrophierung und Reaktion ausgewertet. Es wurden ungewichtete **mittlere Zeigerwerte** für die Messpunkte ermittelt. Diese Werte gehen als Umweltvariablen in die statistische Analyse ein.

Die **Temperaturzahl (T)** beschreibt das Vorkommen der Flechten im Wärmegefälle von den hohen Gebirgslagen bis in die wärmsten Tieflagen Mitteleuropas.

Die **Feuchtezahl (F)** wird für Flechten anders definiert als für Gefäßpflanzen, weil Flechten als wechselfeuchte (poikilohydre) Organismen hinsichtlich ihres Wasserhaushaltes weitgehend von den atmosphärischen Feuchtebedingungen abhängig sind. So beschreibt die Feuchtezahl das Vorkommen der Flechten von trockensten Bereichen bis hin zu niederschlagsreichen Gebieten (über 1.400 mm), an denen Flechten nur kurzfristig austrocknen.

Die **Reaktionszahl (R)** gibt Aufschluss über die pH-Verhältnisse der Flechtenhabitats. Als extrem sauer werden Standorte mit einem pH-Wert unter 3,4 aufgefasst, als basisch werden Standorte mit einem pH-Wert über 7 bezeichnet.

Die **Eutrophierungszahl (N, Düngungstoleranz)** ersetzt die frühere „Nährstoffzahl“ und gewichtet das Maß der übermäßigen Nährstoffanreicherung von außen. Als Nährstoffquellen kommen düngende Stäube oder organische und anorganische Stickstoffverbindungen (aus Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen oder Tierexkrementen) in Frage.

5.4 Statistische Analyse

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist ein großer komplexer (= multivariater) Datensatz, der aufgrund dieser Eigenschaft zunächst auch nur mit Hilfe multivariater Methoden untersucht werden sollte. Das Ergebnis multivariater Verfahren ist nicht so sehr ein endgültiges Resultat, wie das im Falle von einfachen statistischen Tests (Experimente), oder einer einfachen Regressionsbeziehung der Fall ist, vielmehr wird geschaut, wo überhaupt Information vorhanden ist. Erst ab einem gewissen Informationsgehalt lohnt es sich, sich mit den Daten weiter zu beschäftigen und man verschwendet keine Ressourcen in der Aufstellung dutzender Korrelationsanalysen,

die am Ende alle gleich aussehen und eine wissenschaftlich getroffene Entscheidung im Grunde nicht zulassen.

„Die“ einzig richtige multivariate Analyse gibt es dabei nicht. Man kann sich bei Verwendung so genannter Ordinationsverfahren an verschiedenen Lehrbüchern orientieren, die jeweils unterschiedliche Verfahren bevorzugen. Bei den Analysen folgten wir weitgehend den Empfehlungen von LEPŠ & ŠMILAUER und LEGENDRE & LEGENDRE (Lepš und Šmilauer 2003; Legendre und Legendre 1998). Der Begriff Ordination bedeutet nichts anderes als Ordnung. Im einfachen Fall hat man dafür nur Arten bzw. eine Artenliste und Aufnahmedaten (Stichprobe, Örtlichkeit an denen die Arten gefunden wurden) zur Verfügung. Zwar könnte man selbst für eine Ordnungsstruktur sorgen – etwa die Anordnung der Aufnahmeorte nach ihrer Distanz zum Stadtzentrum, nur hätte man damit ein denkbares Ergebnis schon vorweg genommen. Die numerischen Verfahren der Ordination legen die in den Daten selbst vorhandenen Ordnungsstrukturen offen und machen diese zum Ausgangspunkt weiterer wissenschaftlicher Betrachtungen.

Nach Bereinigung des Gesamtdatensatzes, die in erster Linie die Entfernung hochreduzierter – häufig abgeleiteter – Daten bedeutet (Multikollinearität), wurde die sogenannte Gradientenlänge des Artendatensatzes mit Hilfe einer DCA (Detrended Correspondence Analysis) bestimmt. Man erhält über die Gradientenlänge einen Hinweis darauf, ob sich eher unimodale oder lineare Verfahren für die weitere Analyse eignen. Der erhaltene Wert von 2,052 liegt unterhalb von drei, wonach die Autoren LEPŠ & ŠMILAUER (Lepš und Šmilauer 2003) zu linearen Verfahren raten.

Das danach ausgewählte Verfahren zur Ermittlung der Arten-Umweltbeziehungen ist die Redundanzanalyse (Redundancy Analysis, RDA). Es unterstellt lineare Abhängigkeitsbeziehungen zwischen der Flechtenvegetation und den erhobenen Umweltvariablen.

6 Ergebnisse

6.1 Ergebnis der multivariaten Analyse

Die Ergebnisse der Redundanzanalyse werden graphisch mittels Biplot-Scaling dargestellt. Normalerweise werden hierbei Arten und Aufnahmen gleichzeitig präsentiert, nur würde dies im vorliegenden Fall zu einer unübersichtlichen Darstellung führen. Daher wurden zwei Diagramme erstellt (Abb. 08). Die Interpretation erfolgt so, dass von jedem Punkt das Lot auf den Pfeil gefällt wird. Dazu kann eine Verlängerung des Pfeiles angenommen werden, ebenso auf der anderen Seite über den Ursprungspunkt hinaus. Arten im Zentrum verhalten sich recht indifferent gegenüber den Umweltparametern. Je weiter die projizierten Werte von der Pfeilspitze (maximaler Wert) entfernt sind, desto höher wird die Abundanz der Art bei Zunahme der Variablen. Die Reihenfolge der Arten entlang der Umweltvariablen ist ebenso interpretationsfähig.

Das zentrale Ergebnis der RDA ist, dass insgesamt 0,28 (28 %) der Variabilität der Artendaten durch die sechs als Umweltfaktoren eingesetzten Variablen (Temperaturzahl, Feuchtezahl, Reaktionszahl, Eutrophierungszahl, Baumumfang und Entfernung vom Stadtzentrum) erklärt werden kann. Auf den in der Grafik dargestellten zwei Achsen werden rund 22 % der erklärten Varianz abgebildet.

Wie zu erwarten, ordnen die aus den Artendaten abgeleiteten Zeigerwerte den Artendatensatz am besten. Dies erbringt im Grunde aber keine neuen Erkenntnisse außer dass Eutrophierung (N-Zahl) und Reaktion (R-Zahl) sich gegenläufig zur Feuchte (F-Zahl) verhalten. Dies wurde bereits in einer zuvor gerechneten DCA klar ersichtlich und bedarf keiner weiteren Interpretationen.

In der letztlich zu verwendenden Grafik treten die Variablen Baumumfang und Entfernung zum Stadtzentrum auf. Diese haben als einzige unabhängige Variable für die Erklärung der Variabilität der Artendaten eine gewisse Relevanz.

Die abgeleiteten, d.h. zu den Artendaten redundanten Zeigerwerte laden vor allem die 1. Achse. Eine Erklärung des Artvorkommens erbringt dies nicht, zeigt aber schön, wie sich die Arten gegenüber den Zeigerwerten anordnen. Die unabhängigen Daten Baumumfang und Entfernung vom Stadtzentrum laden die zweite Achse und können einen Teil der Artenvariabilität erklären.

Der erste Biplot (Abb. 08, oben) differenziert die Artenzahl der feuchtebedürftigen Strauchflechten und „Großen Blattflechten“ von zwei anderen Gruppen. Das sind zum einen die Krustenflechten *Lecanora expallens* und *Lepraria incana*-Gruppe, deren mittlere Frequenz mit zunehmendem Baumumfang ansteigt, was sich mit dem feuchteren Mikroklima in den Borken tiefrissiger, älterer Bäume erklären lässt. Die andere Gruppe ist die der relativ trocken-toleranten Vertreter der Gattungen *Phaeophyscia* und *Hyperphyscia*, deren Frequenz in den Stadtzentren höher ist als im Umland.

Die grafische Darstellung (Ordination) der Messflächen (Abb. 08, unten) belegt eine gewisse Unterschiedlichkeit der Verbreitungsmuster der Arten. So zeigt die Gruppe links unten, dass in Aschaffenburg Messflächen untersucht wurden, die weiter vom Zentrum entfernt waren, mit älteren (tiefrissigeren) Bäumen und somit ein höheres Feuchteangebot für Flechten aufwiesen. Die Frequenz der bereits erwähnten Krustenflechten-Taxa *Lecanora expallens* und *Lepraria incana*-Gruppe ist hier am höchsten. Die Lage der Stadtzentroide zeigt, dass in Wetzlar mehr Messpunkte mit einem höheren Feuchteangebot kartiert worden waren, während in Gießen Eutrophierungswirkungen stärker ausgeprägt sind.

Als Fazit ist zu folgern, dass in Zukunft für die Flechtenverbreitung spezifischere Standortdaten zu erheben sind und diese in sinnvoller Weise mit bioklimatischen und anderen als relevant erachteten Daten zu vergleichen sind. 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. Sinnvoll erscheinen Standortdaten wie Baumart, Baumumfang, Lichtklima am Stamm, Straßennähe des Stammes, Salzeinfluss, etc..

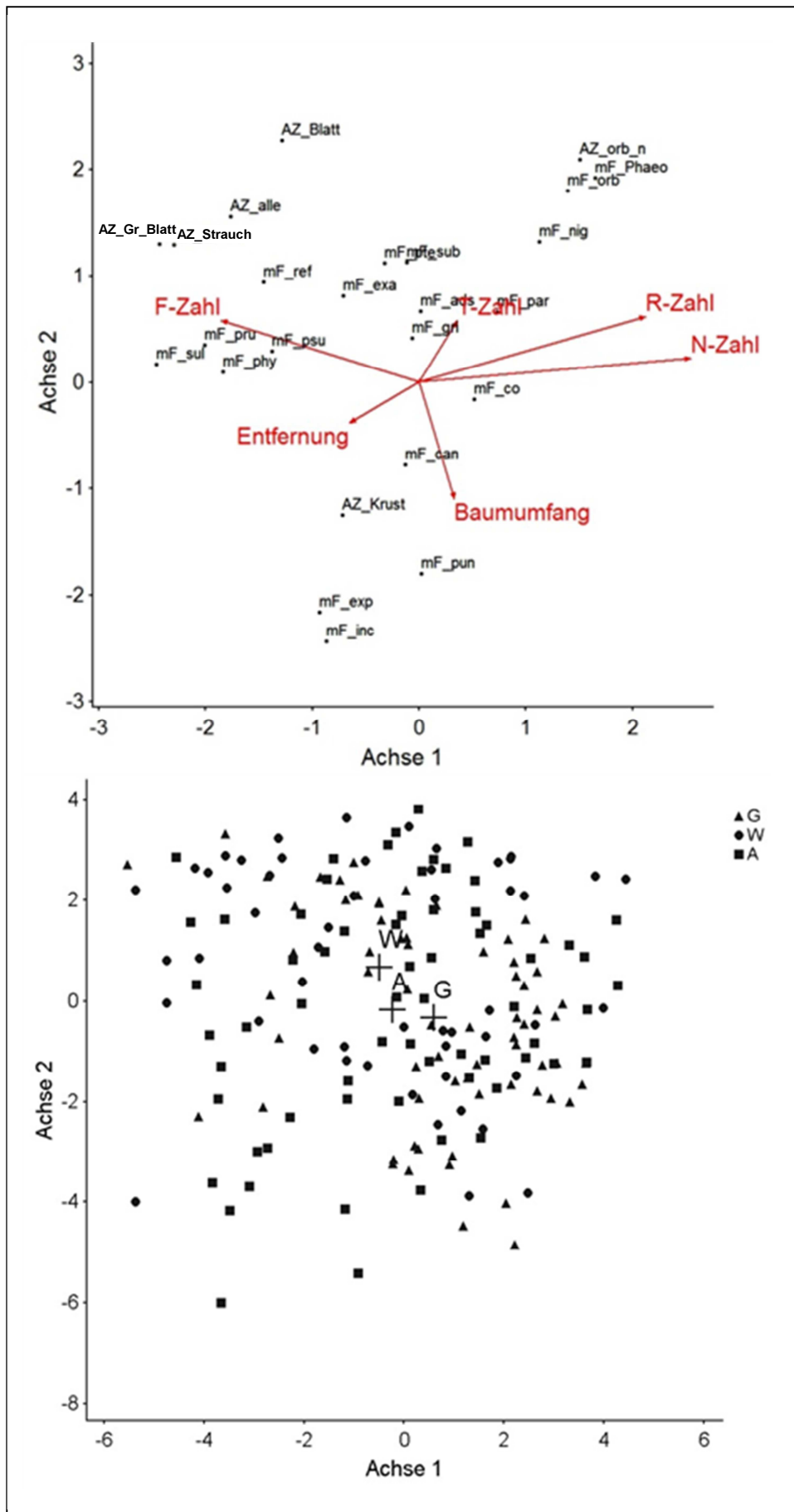


Abb. 08: Biplot der Redundanzanalyse; **oben:** gemeinsame Anordnung der Arten- und Umweltdaten; rot: Überlagerung der Zeigerwerte sowie der wichtigsten unabhängigen Umweltvariablen; AZ: mittl. Artenzahl, mF: mittl. Frequenz; Erklärung der Abkürzungen in Anhang 4; **unten:** Ordination der Messflächen und dazugehörigen Zentroide der Städte; G: Gießen, W: Wetzlar, A: Aschaffenburg. Diagramme können überlagert werden.

6.2 Verbreitungsmuster der Flechten

Auf Grundlage der statistischen Analyse wurden Arten oder Artenkombinationen ausgewählt, deren Verbreitung in Zusammenhang mit den stadtklimatischen Effekten der Trockenheit, Überwärmung sowie der Immissionen, hier insbesondere der eutrophierenden und alkalisierenden Schadstoffgruppen, stehen. Folgende Gruppen erwiesen sich in den untersuchten Städten als geeignet:

Gruppe A) Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende

Gruppe B) Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende

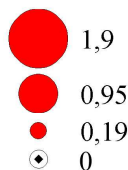
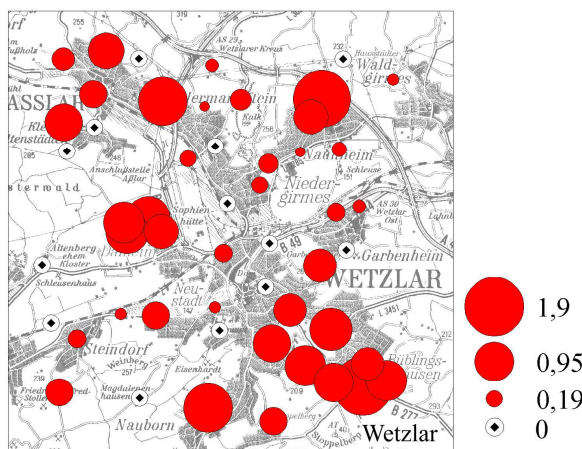
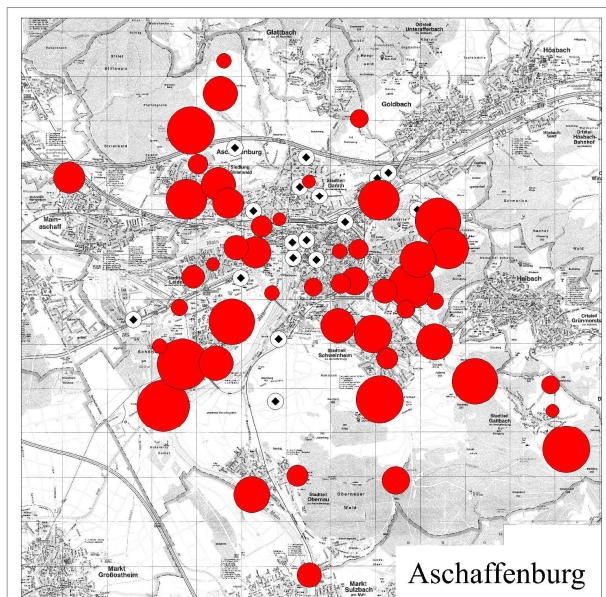
6.2.1 Gruppe A) Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende

In den untersuchten Städten zeigten die folgend aufgeführten Indizes den stärksten Zusammenhang mit der mittleren Feuchtezahl einer Messfläche (Tab. 05). Zudem stiegen die Indizes mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum an, was den Schluss zulässt, dass es sich um poleophobe Arten handelt.

Tab. 05: Indizes, die das Vorkommen feuchtebedürftiger und poleophober Flechtenarten quantifizieren

A-1	mittlere Artenzahl Große Blattflechten (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 der „Großen Blattflechten“ (vgl. S. 24) und der Strauchflechten sind in hohem Maße von der Wasserversorgung abhängig. Ihr Stoffwechsel kommt durch hohe Temperaturen und die dadurch bedingte Austrocknung des Thallus rasch zum Erliegen. Die Spezies *Parmelia sulcata* gehört zu den großen Blattflechten, *Evernia prunastri* zu den Strauchflechten. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich weiterhin schließen, dass die Flechtendiversität von der Feuchteversorgung abhängig ist und zu den Stadtzentren hin abnimmt. Die Diversität bzw. mittlere Frequenz der hier genannten Arten ist gleichzeitig negativ korreliert mit der mittleren Nährstoff- und Reaktionszahl der Messflächen.



mittlere Artenzahl der
Strauchflechten pro Baum

Die räumliche Verteilung der Artenzahl der Strauchflechten (Abb. 09) zeigt, dass die Arten die untersuchten Stadtzentren weitgehend meiden oder nur wenige Arten dort angetroffen werden. Es ist davon auszugehen, dass – neben anderen Parametern – die geringere Wasserverfügbarkeit an diesen Messflächen einen hemmenden Einfluss auf die Gruppe der Strauchflechten hat. Eine entsprechende Karte der mittleren Artenzahl zeigt Anhang 2.

6.2.2 Gruppe B) Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende

In den untersuchten Städten zeigten die folgend aufgeführten vier Indizes einen positiven Zusammenhang mit der Nähe zum Stadtzentrum, der Temperaturzahl sowie der Reaktionszahl und Nährstoffzahl. 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 positiv mit einem hohen Nährstoffangebot sowie höheren pH-Werte des Substrates.

Tab. 06: Indizes, die das Vorkommen eutrophierungs- und wärmetoleranter sowie poleotoleranter Flechtenarten quantifizieren

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. 10: Tolerant gegenüber den städtischen Belastungsfaktoren sind *Phaeophyscia orbicularis* (links oben), *Phaeophyscia nigricans* (rechts oben), *Hyperphyscia adglutinata* (unten); Fotos: Kirschbaum

Auch die räumliche Verteilung (Abb. 11) der Gruppe *Phaeophyscia/Hyperphyscia* (vgl. S. 24) zeigt, dass die Frequenz der Gruppe bis in die Stadtzentren hinein hoch ist.

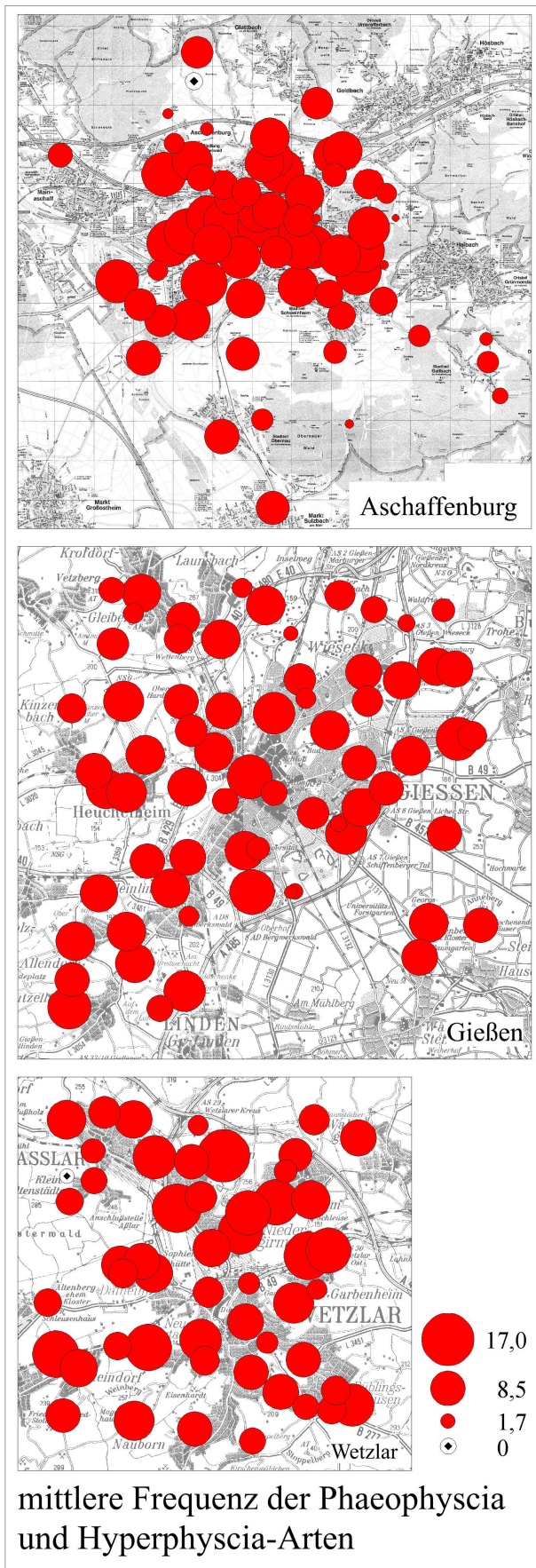


Abb. 11: Summe der mittleren Frequenz der *Phaeophyscia*- und *Hyperphyscia*-Arten pro Baum an Messflächen in den untersuchten Städten. Datengrundlage: Kartierungen Aschaffenburg 2009 (Vorbeck et al. 2009), Gießen und Wetzlar 2015 (Kirschbaum 2016)

Die Karte in Anhang 3 zeigt, dass die mittlere Artenzahl der Acidophyten und Oligotrophiezeiger in den untersuchten Stadtzentren im Vergleich zum Stadtrand niedrig ist und veranschaulicht, dass Alkalisierung und Eutrophierung der städtischen Habitate eine wichtige Rolle spielen.

In der vorliegenden Arbeit wurden relativ kleine Städte untersucht. Um der Frage nachzugehen, ob in Zentren großer Städte ein ähnliches Artenspektrum zu erwarten ist wie in Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg, wurde im Frühjahr 2016 eine stichprobenartige Kartierung im Zentrum zweier europäischer Großstädte (London: 6,5 Mio., Moskau 11,5 Mio. Einwohner) vorgenommen. Methodisch ist sie identisch mit den Kartierungen der vorliegenden Arbeit (Messgitter nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A).

Es zeigt sich eine erstaunliche Übereinstimmung sowohl der Artenliste als auch der Frequenzwerte Tab. 07, vgl. auch Tab. 08). Aus der Gruppe A der poleophoben Flechtenarten wurde kein Vertreter – weder der „Großen Blattflechten“ noch der Strauchflechten – gefunden, was sich mit den Erwartungen der vorliegenden Arbeit deckt. Die mittlere Flechtenartenzahl pro Baum in den Aufnahmen ist mit 2,8-6,3 außerordentlich niedrig. Aus der Gruppe B der poleotoleranten Arten finden sich die typischen Arten, allen voran *Phaeophyscia orbicularis*, die fast durchweg den maximal möglichen Frequenzwert von 10 erreicht.

Tab. 07: Mittlere Flechtenfrequenzen im Zentrum von London und Moskau nach einer Stichprobenkartierung im April 2016; Methode nach Richtlinie des VDI (Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005); Kartierung in Moskau durch PUNGIN, in London durch WINDISCH

	London, Regent's Park	London, St. James's-Park	Moskau, Muezon-Park	Moskau, Gorki-Park
Anzahl kartierter Linden	4	3	3	5
<i>Amandinea punctata</i>	0,75			
<i>Caloplaca spec.</i>			1,67	0,4
<i>Candelaria concolor</i>	3,75	0,67		
<i>Candelariella reflexa</i>	3,25	1,67		0,4
<i>Lecanora expallens</i>	0,25			
<i>Lecidella elaeochroma</i>	0,5			
<i>Phaeophyscia nigricans</i>	0,25		5,3	1,8
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	10	10	8	10
<i>Physcia adscendens</i>	5,5	0,67	0,67	2
<i>Physcia aipolia/stellaris</i>			3	0,2
<i>Physcia dubia</i>				0,2
<i>Polycaulonia polycarpa</i>	0,25			
<i>Xanthoria parietina</i>	7,5	2,33	1	0,2
A-1 mittl. Artenzahl Gr. Blattflechten	0	0	0	0
A-2 mittl. Artenzahl Strauchflechten	0	0	0	0
A-3 mittl. Frq. <i>Parm. sulcata</i>	0	0	0	0
A-4 mittl. Artenzahl Alle Flechten	6,25	3,67	4	2,8
A-5 mittl. Frq. <i>Eve. prunastri</i>	0	0	0	0
B-1 mittl. Artenzahl <i>Phaeophyscia orbicularis</i> , <i>Ph. nigricans</i>	1,25	1	2	1,4
B-2 Summe mittl. Frq. <i>Phaeophyscia/Hyerphyscia</i>	10,25	10	13,33	11,8
B-3 mittl. Frq. <i>Phaeophyscia orbicularis</i>	10	10	8	10
B-4 mittl. Frq. <i>Phaeophyscia nigricans</i>	0,25	0	5,33	1,8

6.3 Wirkungen städtischer Grünflächen

Die Aussagekraft des Datenmaterials ist hier recht eingeschränkt, denn der Fokus der bisherigen Untersuchungen lag nicht auf dem Nachweis kleinräumiger Effekte. Die Auswertung der Daten verdeutlichte, dass die Datensätze einer Messfläche in der Regel von standörtlich weitgehend homogenen Trägerbäumen stammen. So wiesen die benachbarten und gemeinsam kartierten Bäume meist die gleiche Flächennutzung auf. Daher kann nur an einem Beispiel (Messfläche in Wetzlar) die Wirkung kleinräumiger Nutzungsänderungen verdeutlicht werden. Die Messfläche liegt im Stadtzentrum an der Lahn. Die Bäume 1-4 stehen direkt an der Ernst-Leitz-Straße, während die Bäume 5-8 in unmittelbarer Umgebung in einer städtischen Grünanlage kartiert wurden.



Abb. 12: Lage der zum Vergleich herangezogenen Trägerbäume in der Ernst-Leitz-Straße/Wetzlar

Die Flechtenfrequenzen der Aufnahme sind in Tab. 08 wiedergegeben. Für beide Baumgruppen wurden die im vorigen Kapitel identifizierten Indizes (vgl. S. 32) berechnet. Weder bei der Artenzahl der Strauchflechten noch bei der der großen Blattflechten unterschieden sich die beiden Baumgruppen. Durch die zentrumsnahe Lage der Messfläche sind Vertreter beider Wuchsformen erwartungsgemäß reduziert. Deutliche Unterschiede ergaben sich bei der Frequenz von *Parmelia sulcata* (Abb. 13), die im Vorkapitel in der Gruppe A (Feuchtebedürftige und Stadtzentren-Meidende) eingestuft worden war. Die mittlere Frequenz beträgt an den Straßebäumen nur 1,25, während sie in der Grünanlage mit 7,75 deutlich häufiger angetroffen werden konnte. Ein ähnliches Muster zeigt *Phlyctis argena*.

Tab. 08: Flechtenfrequenzen an Linden in der Ernst-Leitz-Straße in Wetzlar; aus (Kirschbaum 2016) sowie zusammenfassende Indizes

Baumnummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Lage/Nutzung	direkt an Straße	direkt an Straße	direkt an Straße	direkt an Straße	Grün-anlage	Grün-anlage	Grün-anlage	Grün-anlage
Versiegelung in %	25-50	25-50	25-50	25-50	0-25	0-25	0-25	0-25
Baumumfang	169	162	190	208	156	141	98	100
Flechtentaxa								
<i>Amandinea punctata</i>	3	7	5	2				
<i>Candelaria concolor</i>			2					
<i>Candelariella reflexa</i>	3		5		10	5	8	2
<i>Candel. xanthostigma</i>	10	10	10	5	9	6	4	
<i>Evernia prunastri</i>							1	
<i>Hyperphyscia adglutinata</i>	1	1	1					
<i>Lecanora dispersa</i>	1							
<i>Lecanora expallens</i>					1	1		
<i>Lecanora hagenii</i>			1					
<i>Lecanora saligna</i>		2						
<i>Lepraria incana</i>				2		2		1
<i>Melanelixia glabrata</i>						2		
<i>Melanohalea elegantula</i>	1				10	7		4
<i>Melanohalea exasperatula</i>	8	10	7	10	10	10	10	10
<i>Parmelia sulcata</i>	1	2	2		9	8	9	5
<i>Phaeophyscia nigricans</i>	7	6	6	2				
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	10	10	10	10	10	10	1	3
<i>Phlyctis argena</i>		1			10	9		
<i>Physcia adscendens</i>	6	5	3			8		4
<i>Physcia caesia</i>	1	1						
<i>Physcia dubia</i>		1		2				
<i>Physcia tenella</i>	10	10	10	9	10	10	10	4
<i>Physconia grisea</i>	7	8	2	4	10	8	10	7
<i>Polycaulonia polycarpa</i>							1	
<i>Punctelia jeckeri</i>		1				1		1
<i>Punctelia subrudecta</i>			1					
<i>Xanthoria parietina</i>	6	4	4	1	1	5	4	1
A-1 mittl. AZ Gr. Blattfl.	5				5			
A-2 mittl. AZ Strauchfl.	0				1			
A-3 mittl. Frq. <i>P. sulcata</i>	1,25				7,75			
A-4 mittl. AZ alle Flechten	14				11,75			
A-5 mittl. Frq. <i>E. prunastri</i>	0				0,25			
B-1 mittl. Artenzahl <i>Ph. orbicul.</i> , <i>Ph. nigricans</i>	2				1			
B-2 mittl. Frequenz <i>Phaeoph.</i>/<i>Hyperphyscia</i>	16				6			
B-3 mittl. Frequenz von <i>Phaeophyscia orbicularis</i>	10				6			
B-4 mittlere Frequenz <i>Phaeophyscia nigricans</i>	5,25				0			

Auch die Flechten-Indizes aus Gruppe B (Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende) unterschieden sich deutlich. So liegt die mittlere Frequenz von *Phaeophyscia orbicularis* an den Straßenbäumen im Vergleich zu den Werten aus der Grünanlage deutlich höher. Die ökologisch ähnlichen Arten *Phaeophyscia nigricans* und *Hyperphyscia adglutinata* wurden sogar nur an den Bäumen an der Straße erfasst. Da die Konzentration gasförmiger Luftschadstoffe an diesen nahe gelegenen Vergleichsstandorten weitgehend identisch sein dürfte, sind kleinräumige Effekte wie mikroklimatische Unterschiede – bedingt durch die höhere Flächenversiegelung – und Staubimprägung der Bäume durch den Straßenverkehr als Ursache anzunehmen.



Abb. 13: Furchen-Schüsselflechte (*Parmelia sulcata*), eine euryöke Referenzart

6.4 Vergleich mit dem Gießener Klimagutachten

Es fand ein Vergleich der Flechtendaten mit dem Klimagutachten der Stadt Gießen statt. In diesem Gutachten ist die bioklimatische Situation in den Siedlungsräumen in vier Kategorien bewertet und in einer Klimafunktionskarte (vgl. Seite 21) dargestellt. Die gesonderte statistische Auswertung der Gießener Daten mit den Bioklimakategorien des Gutachtens ergab keine deutlichen Zusammenhänge zwischen den Flechten-Indizes und den vier Bioklima-Kategorien.

Die Verbreitungskarten der Flechten belegen jedoch, dass die bioklimatisch ungünstigen Bereiche, die weitgehend im Stadtzentrum liegen, von den in Gruppe A identifizierten Flechtengruppen gemieden werden.

7 Diskussion

Die untersuchten Städte Gießen, Wetzlar und Aschaffenburg zeigen deutliche Wirkungen auf die Flechtenbestände. Als stadttypische Effekte auf Flechten wurden die Veränderung der Artenvielfalt und -frequenz sowie des Artenspektrums beobachtet. Dabei erwies sich die Differenzierung zweier ökologischer Gruppen von Flechten als hilfreich: Zum einen wurde eine feuchtebedürftige und die Stadtzentren meidende Gruppe benannt und der zweiten Gruppe der Eutrophierungs- und Wärmezeiger – die in den Stadtzentren gedeihen können – gegenübergestellt. Durch eine multivariate Analyse wurden Flechten-Indizes (A-1 bis A-5 sowie B-1 bis B-4) gefunden, die geeignet sind, quantitative Aussagen zu treffen.

Zu den Indizes, die mit Daten zu feuchtebedürftigen, Stadtzentren meidenden Flechten gebildet werden, gehören die mittlere Artenzahl der „Großen Blattflechten“ und der Strauchflechten, die Gesamtartenzahl, sowie die mittlere Frequenz (im Messgitter) der Blattflechte *Parmelia sulcata* und der Strauchflechte *Evernia prunastri*. Diese Indizes sind geeignet, luftfeuchtere und gering durch städtische Wirkungen belastete Zonen in einer Stadt anzuzeigen. In den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts stufte BARKMAN es als weltweites Phänomen ein, dass von den Stadtzentren nach außen die Abfolge Krustenflechten – Blattflechten – Strauchflechten zu beobachten ist (Barkman 1958).

In dieser Zeit standen die sauren Immissionen als Ursache von städtischen „Flechtenwüsten“ im Vordergrund. Die oftmals einzige Flechtenart, die in Stadtzentren angetroffen wurde, war die extrem toxischtolerante und acidophytische Krustenflechte *Lecanora conizaeoides*. Mit dem Rückgang der sauren Luftverunreinigungen zog die Art sich aus den Städten zurück (vgl. Kapitel 3.2, Seite 34) und die Bedingungen für Flechten verbesserten sich langsam. Die Wiederbesiedelung der Städte mit Flechten begann (vgl. Seite 10).

Dies wurde auch für Gießen und Wetzlar in einer langfristigen Biomonitoring-Studie, die bis heute fortgeführt wird, belegt. So stieg der durch Flechten angezeigte Luftgüteindex seit 1970 stetig an. Die pH-Werte der ehemals angesäuerten Baumborken erhöhten sich deutlich, so z. B. die der Linde in Gießen von pH 3,2 in 1970 auf pH 5,5 im Jahr 2010. Eine besonders starke Ausbreitung wird für solche Arten dokumentiert, die tolerant gegenüber Eutrophierung sind und höhere Borken-pH-Werte bevorzugen (Kirschbaum et al. 2012).

Der Beitrag des Straßenverkehrs zur Eutrophierung städtischer Habitate wurde in Kapitel 3.2 (vgl. Seite 10) näher erläutert. Entlang der Straßen führen Stickstoffoxide, Ammoniak und Feinstaub zu einer übermäßigen Nährstoffversorgung der Baumflechten. Stadtbürtige, alkalische Stäube werden auf den Baumborken deponiert und erhöhen deren pH-Wert. Von den versiegelten Straßen werden Partikel immer wieder aufgewirbelt (Endlicher 2012). Hinzu kommt die thermische Belastung, die von der asphaltierten Straßenoberfläche ausgeht. Der thermische Effekt lässt sich auch bei kleineren Straßen noch in ein paar Metern Entfernung von der Straße messen (Abb. 14) und betrifft somit die häufig zur Flechtenkartierung herangezogenen Straßenbäume.

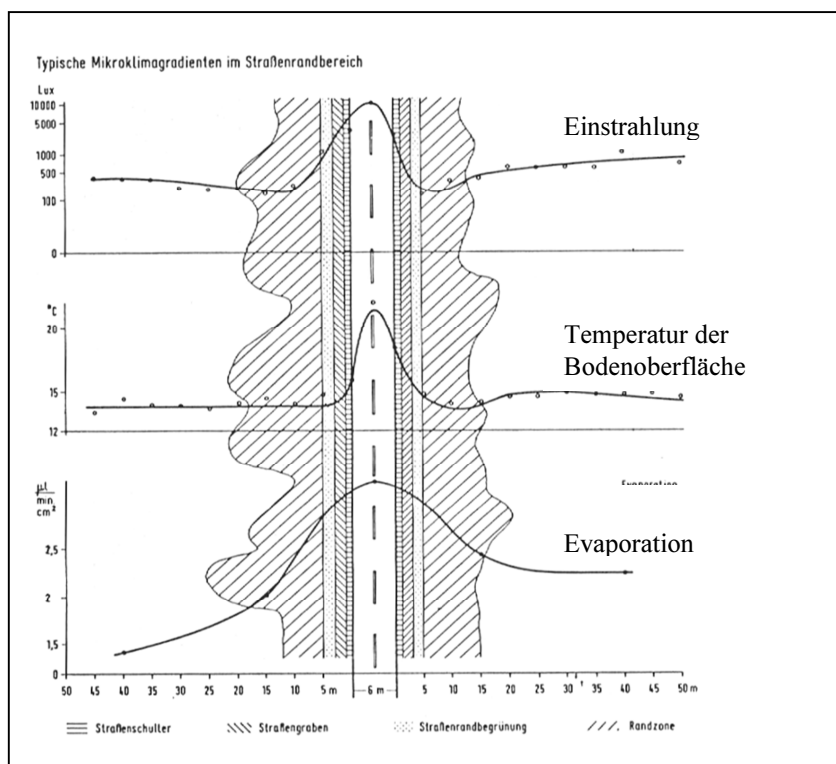


Abb. 14: Mikroklimagradienten im Straßenrandbereich (Mader 1979)

Einige der Wirkungen des Straßenverkehrs auf Flechten sind bereits erforscht: Die Stickstoffgehalte in Flechten an Straßen sind erhöht (Windisch et al. 2016). Da die meisten Flechtenarten an nährstoffarme Lebensräume angepasst sind, ist das Flechtenarteninventar entlang stark befahrener Straßen auf wenige eutrophierungstolerante Spezies reduziert. In einigen Arbeiten wurden diese verkehrstoleranten Arten benannt, so zum Beispiel für München und Düsseldorf (Vorbeck und Windisch 2002; Stapper und Kricke 2004). Es handelt sich insbesondere um *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis*. Die erfolgreiche Ausbreitung der beiden Arten in verkehrsbelasteten Stadtzentren lässt sich dadurch begründen, dass sie als schmallappige und enganliegende Blattflechtenarten hygriech weniger anspruchsvoll sind als die großen Blattflechten und sehr

wahrscheinlich rascher wachsen als Krustenflechten. Habituell ähnlich, aber in Aschaffenburg, Gießen und Wetzlar noch nicht häufig, sind *Hyperphyscia adglutinata* und die Gruppe *Physcia aipolia/stellaris*, die sich in den Stadtzentren möglicherweise in den nächsten Jahren weiter ausbreiten werden. Auch die Krustenflechten-Taxa *Caloplaca pyracea* und *Lecanora dispersa*-Gruppe sind an staubimprägnierten Straßenbäumen in den Stadtzentren regelmäßig anzutreffen.

Neben dem Verkehrsaufkommen ist auch die bauliche Struktur einer Straße von Bedeutung. STAPPER und KRICKE beobachten für Düsseldorf eine auffallende „... Artenarmut der Epiphytenflora entlang verkehrsreicher enger schluchtartiger Straßen – insbesondere hier kommen *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* mit hoher Regelmäßigkeit vor – im Vergleich zu nahegelegenen breiten und locker bebauten, mindestens ebenso stark frequentierten Durchgangsstraßen, die wahrscheinlich besser durchlüftet sind.“ (Stapper und Kricke 2004). Vergleichbare ungünstige Verhältnisse zeigte die Schillerstraße in Aschaffenburg, wo die dichte Bebauung und ungenügende Belüftung zu einer Reduktion des Flechtenvorkommens im Vergleich zu benachbarten städtischen Messflächen führte (Vorbeck et al. 2009).

Auch wenn die Immissionszusammensetzung sich geändert hat, war eine Überwärmung der untersuchten Städte 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 hygriisch anspruchsvollen Strauchflechten sowie die großen Blatfflechten erreichen die hier untersuchten Stadtgebiete.

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 sie 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.

Bei der Verwendung der im Stadtzentrum bevorzugt anzutreffenden Gruppen der „Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren tolerierenden Arten“ (vgl. Seite 32) zum Nachweis von Stadtklimaeffekten ist anzunehmen, dass der Faktor Eutrophierung die Hauptursache für deren Verbreitung spielt.

Daher erscheint es geeigneter, den Nachweis günstiger städtischer Klimabedingungen zu führen und die gefundenen Indizes der „feuchtebedürftigen und Stadtzentren meidenden Arten“ (vgl. Seite 32) als Indikatoren für kühle und feuchte Luft zu verwenden. Stadtbezirke, in denen diese Indizes wie beispielsweise der Artenzahl der „Großen Blattflechten“ oder die der Strauchflechten hoch sind, verfügen über ausreichende Kaltluftbedingungen für diese hygri-sch anspruchsvollen Arten. Auch in einer Untersuchung in Aschaffenburg aus dem Jahr 2002 konnten aufgrund der Häufigkeit weitgehend identischer Flechtenarten Kaltluftentstehungsgebiete (mit gleichzeitig geringer lufthygienischer Belastung) identifiziert werden (Windisch und Vorbeck 2002).

Auch kleinräumige Änderungen abiotischer Faktoren in einer Stadt können mit Flechten nachgewiesen werden. Das ausgewertete Datenmaterial war zwar aufgrund seiner immissionsökologischen Fragestellung weniger für den Nachweis kleinräumig wechselnder Mikroklimabedingungen geeignet. Es konnte jedoch an einem Beispiel für Wetzlar gezeigt werden, dass sich eine Verkehrsfläche von einer benachbarten Grünanlage durch die Qualität der epiphytischen Flechten unterscheiden lässt: Die Lage im Stadtzentrum hatte zwar zur Folge, dass an den nahe beieinanderliegenden Baumgruppen nur wenige Strauchflechten vorkamen, aber mittels eines anderen feuchtezeigenden Indexes, der Frequenz der Blattflechte *Parmelia sulcata*, konnten die beiden Standorte unterschieden werden. An der Straße war die Frequenz von *Parmelia sulcata* niedriger, während die Indizes der Gruppe B (Eutrophierungs- und Wärmezeiger und Stadtzentren-Tolerierende) höher lagen. Daraus lässt sich folgern, dass in der Grünanlage eine bessere Feuchtigkeitsversorgung und ein geringerer Nährstoffeintrag vorhanden sind.

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). Städtische Grünanlagen ermöglichen das Gedeihen der Flechten, da sie durch die sommerliche höhere Luftfeuchtigkeit langsamer austrocknen und dadurch länger Photosynthese betreiben können. Weiterhin spielen die nächtlichen Temperaturen offensichtlich eine wichtige Rolle. Nach einer Untersuchung in Düsseldorf nahmen die Flechten-Artenzahlen mit sinkender relativer 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).

Voraussetzung für das Gedeihen der Flechten bei ausreichender Wasserversorgung ist allerdings eine Luft ohne flechtenschädigende Stoffe. Ist dies nicht der Fall, wie in München zu Zeiten hoher SO₂-Belastung, so sind „Bäume in der Nähe von Gewässern in der Regel flechtenfrei.“ (Schmid 1957). Einen Beitrag zur Schadstoffbindung leistet die Vegetation selbst. Nach ENDLICHER haben Laubbäume im Sommerhalbjahr ein Feinstaubbindungspotenzial von bis zu 10 % (Endlicher 2012).

Letztendlich ist zu überlegen, ob die oben geforderte Differenzierung der Wirkungen von Stadtklima und Luftverunreinigungen überhaupt zielführend ist. Im Sinne des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES umfasst der Begriff des Stadtklimas nicht nur die städtische Wärmeinsel, sondern auch die während windschwacher Hochdruckwetterlagen eintretende Anreicherung von Luftschadstoffen. Zu den bioklimatischen Belastungsfaktoren gehört neben der Wärmebelastung auch die schadstoffhaltige Luft (Deutscher Wetterdienst 2016b).

8 Empfehlungen für das Projekt

„KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz“

Mit dem Projekt „KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz“ sollen stadtklimatische Belange in kommunalen Planungsprozessen Berücksichtigung finden (HLNUG). Das Projekt beschäftigt sich mit den temperaturbedingten Klimafolgen für Kommunen.

Die Ergebnisse des vorliegenden Berichtes legen nahe, das Flechten-Biomonitoring zum Nachweis der Wirkungen standklimabedingter Faktoren in das KLIMPRAX-Projekt aufzunehmen. Es wird deutlich, dass Flechten auf städtetypische Belastungsfaktoren wie Überwärmung reagieren und gleichzeitig lufthygienische Faktoren integrieren.

Sowohl das Stadtklima als auch die städtischen Immissionen wirken auf Lebewesen (Biota) und damit sowohl auf Flechten als auch auf den Menschen. Wenn sich der Bauplan der Symbiose Flechte auch nicht mit dem des Menschen vergleichen lässt, sind doch beide prinzipiell den biologischen Gesetzmäßigkeiten unterworfen. Die Lebensvorgänge beider sind von der Temperatur, dem Wasser und schadstoffarmer Luft abhängig. Daher sollte im Projekt ein geeignetes Biomonitoringverfahren implementiert werden.

Die Flechten eignen sich aus folgenden Gründen im besonderen Maße:

- Flechten integrieren mikroklimatische und lufthygienische Wirkungen.
- In Hessen stehen an den geeigneten städtischen Trägerbäumen etwa 100 Flechtenarten mit abgestufter Empfindlichkeit bezüglich der Temperatur, der Wasserverfügbarkeit und der Nährstoffbelastung zur Verfügung.
- Epiphytische Flechten kommen in hessischen Städten bis in die Stadtzentren hinein vor.
- Für die Erfassung der Flechten im Gelände stehen standardisierte Methoden des VEREINS DEUTSCHER INGENIEURE (z. B. Richtlinie 3957 Blatt 13) zur Verfügung. Die Datenauswertung kann an die Fragestellung angepasst werden, so wie es in dieser Arbeit umgesetzt wurde.
- Für viele potentielle Untersuchungsgebiete in Hessen stehen frühere Arbeiten zur Vororientierung und zum Datenvergleich zur Verfügung.
- Langfristige Änderungen der klimatisch/lufthygienischen Situation können in Wiederholungsuntersuchungen dokumentiert werden.

- Der relativ geringe Aufwand einer Flechtenkartierung erlaubt ein für Städte unerlässliches dichtes Messnetz.
- Das HLNUG hat langjährige Erfahrungen bezüglich des Ablaufes, der Kosten und der Resultate solcher Biomonitoring-Projekte.

Die Grenzen des Flechten-Biomonitorings für stadtklimatische Fragestellungen liegen in der hier diskutierten ungenügenden Abgrenzbarkeit der mikroklimatischen und der immissionsverursachten Wirkungen. In der vorliegenden Arbeit wurde deutlich, dass die untersuchten Stadtzentren im Vergleich zum Stadtrand ein verändertes Arteninventar aufweisen, das von trocken- und eutrophierungstoleranten Flechtenarten geprägt ist. Welcher Anteil etwa der verminderten Taubildung oder z. B. der höheren Konzentration düngender Stäube zuzuordnen ist, kann mit dieser Methode nicht ermittelt werden.

Daher wird das Flechten-Biomonitoring empfohlen, um die Wirkungen des Stadtklimas zu dokumentieren mit der Vorgabe, dass der Begriff des Stadtklimas nicht nur die städtische Wärmeinsel, sondern auch die (während windschwacher Hochdruckwetterlagen eintretende) Anreicherung von Luftschadstoffen umfasst (vgl. S. 44).

Zur Verwertung der hier gewonnenen Erkenntnisse für das Projekt „KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz“ sollen einige Empfehlungen gegeben werden.

Die Städte Wiesbaden und Mainz sind mit insgesamt knapp einer halben Million Einwohnern deutlich größer als die hier untersuchten drei Städte, die jeweils unter 90.000 Einwohner haben. Daher sind auch im Gebiet Wiesbaden/Mainz deutliche Wirkungen stadttypischer Belastungen auf Flechten zu erwarten. Bisher ist nur eine städtische Flechtenkartierung im Projektgebiet veröffentlicht worden (Heidt und Strack 1989), die einen erheblichen Einfluss saurer Immissionen nachweist. Der Wandel des Artenspektrums nach dem Rückgang der sauren Immissionen ist anzunehmen, aber für das Projektgebiet noch nicht belegt.

In den Millionenstädten London und Moskau findet sich aktuell nach stichprobenartigen Untersuchungen selbst in innerstädtischen Grünanlagen nur eine reduzierte epiphytische Flechtenvegetation. Das Artenspektrum stimmt weitgehend mit dem der Stadtzentren Gießens, Wetzlars und Aschaffenburgs überein. Inwieweit sich die durch trocken- und eutrophierungstolerante Flechten angezeigte Ungunst-Zone in Wiesbaden/Mainz ausdehnt, kann in einer Erstuntersuchung ermittelt werden. Eine solche Untersuchung würde auch zeigen, ob die in dieser Arbeit als Stadtklima-Güteindikatoren identifizierten großen Blattflechten und Strauchflechten in die Zentren der

beiden Städte vordringen können. Die Lage Wiesbadens am südlichen Fuß des Taunus könnte sich günstig für die Besiedlungsmöglichkeiten der Stadt mit mikroklimatisch anspruchsvolleren Flechtenarten auswirken.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden können in einem Projekt in Wiesbaden/Mainz angewendet werden. Zusätzlich wird empfohlen, bezüglich der Datenerfassung von einem starren Messnetz abzuweichen und stattdessen Trägerbäume stadtklimatisch und immissionsökologisch homogener Geländeabschnitte auf Flechten zu untersuchen. Dabei sollten die Messpunkte so ausgewählt werden, dass nahe beieinanderliegende Flächen verschiedener Nutzung verglichen werden können (z. B. Grünanlage/Straße). Es wird empfohlen, bis zu vier Messpunkte pro km² zu untersuchen. Im Vorfeld einer Untersuchung sollte geprüft werden, ob genügend geeignete Trägerbäume vorhanden sind.

Bei der Datenauswertung sind nach derzeitigem Erkenntnisstand die in Tab. 05 (vgl. Seite 32) und in Tab. 06 (vgl. Seite 34) gelisteten Indizes geeignet, um Stadtklimawirkungen zu visualisieren. Weiterhin wird empfohlen, die mittlere Artenzahl der Säure- und Nährstoffarmutszeiger zu berechnen und darzustellen (vgl. Anhang 3).

Auf Basis aktueller Flechtendaten für Wiesbaden/Mainz sind in Zukunft weitere multivariate statistische Analysen zum Abgleich mit Standortdaten erforderlich. Um die Aussagekraft der Ergebnisse weiter zu verbessern, besteht weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf. Vordringlich wird die Erhebung mikroklimatischer Standortdaten an Bäumen empfohlen. In Frage kommen Messungen zum Tagesverlauf der Temperatur, der Lichtstärke, der Evaporation und der Luftfeuchtigkeit. Auch die Erhebung standortbezogener Immissions- und Geländedaten (z. B. zu Feinstaub, Ammoniak, Straßennähe des Stammes, Salzeinfluss, Baumart, Baumumfang, etc.) sind wünschenswert. Die Akkumulation eutrophierender Verbindungen in Biota kann durch eine Methode des passiven Monitorings mit Flechten gemessen werden (VDI 3957 Blatt 18 2015).

9 Literatur

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*. 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.

Deutscher Wetterdienst (2016): Abruf von Klimadaten. WESTE: Wetterdaten und -statistiken express. Online verfügbar unter www.dwd.de.

Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2016a): Wetterlexikon. Online verfügbar unter http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, zuletzt geprüft am 15.05.2016.

Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2016b): Wetterlexikon. Online verfügbar unter <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100310&lv3=100430>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

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.

GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2014): Bericht zur Klimafunktionskarte und Planungshinweiskarte Klima/Luft für die Universitätsstadt Gießen. Analyse der klima- und immissionsökologischen Funktionen im Stadtgebiet von Gießen und deren planungsrelevante Inwertsetzung im Rahmen einer vorsorgeorientierten Umweltplanung. Hg. v. Stadt Gießen.

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. (2011): *Stadtökologie. Bausteine des Ökosystems Stadt*. Paderborn: Schöningh.

Hessisches Statistisches Landesamt (2016): Statistische Daten. Online verfügbar unter <http://www.statistik-hessen.de/>, zuletzt geprüft am 16.05.2016.

HLNUG: KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz. Stadtklima in der kommunalen Praxis. Online verfügbar unter <http://www.hlnug.de/index.php?id=10236>, zuletzt geprüft am 11.05.2016.

- HLNUG (2016): Umweltatlas Hessen. Stand 2016, zuletzt geprüft am 17.05.2016.
- HLUG (2015): Lufthygienischer Jahresbericht 2014. Teil 1: Kontinuierliche Messungen. Wiesbaden.
- 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: *Naturw. Rundschau Heft 3*, S. 90–95.
- Kirschbaum, U. (1973): Auswirkungen eines industriell-urbanen Ballungsraumes auf die epiphytische Flechtenvegetation in der Region Untermain. Dissertation.
- Kirschbaum, U. (2016): Umweltbewertung mit Hilfe von Flechtenkartierungen in Wetzlar und Gießen. Vergleich zwischen den Erhebungen von 1970, 1980, 1995 und 2015. In Vorbereitung. Hg. v. HLUG.
- 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.; Windisch, U. (2014): Ein Vorschlag zur Modifizierung der Richtlinie VDI 3957 Blatt 13. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 74 (5), S. 207–210.
- Lackovicova, A.; Lisicka, E.; Pisut, I. (1988): Literature on lichen indication in socialist countries. In: *Biologia* 43 (1), S. 77–86.
- Legendre, P.; Legendre, L. (1998): Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier.
- Lepš, J.; Šmilauer, P. (2003): Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Theory and applications. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Mader, H. J. (1979): Die Isolationswirkung von Verkehrsstraßen auf Tierpopulationen untersucht am Beispiel von Arthropoden und Kleinsäugetern der Waldbiozönose. In: *Schriftreihen für Landschaftspflege und Naturschutz* (19), S. 26–33.
- Malberg, H. (2007): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Meynen, E.; Schmithüsen, J.; Gellert, J.F.; Neef, E.; Müller-Miny, H.; Schultze, J.-H (1960): Karte der Naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bad Godesberg: Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Nash III, T. H. (2010): Lichen sensitivity to air pollution. In: T. H. Nash III (Hg.): *Lichen Biology*. 2. Aufl. Cambridge, New York: Cambridge University Press, S. 301–316.
- Natho, G. (1964): Flechtenentwicklung in Städten (Ein Überblick). In: *Drudea* 4 (1), S. 33–44.
- 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. (1991): Flechtenreichtum - ein Spiegelbild des Naturraumpotentials. In: *Mitteil. d. Naturforschenden Gesellschaft Luzern* 32, S. 197–213.
- 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.
- Schmid, A. (1957): Die epixyle Flechtenvegetation von München. Dissertation. Universität München, München.
- 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. (2014): KLIMPRAX. - ein Projektbeispiel zur praxisgerechten Klimaanpassung in Kommunen. HLUG, 24.06.2014.
- Stadt Aschaffenburg (2016): Internetpräsenz. Online verfügbar unter <http://www.aschaffenburg.de/de/>, zuletzt geprüft am 16.05.2016.
- 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.; Wittig, R. (Hg.) (1998): Stadtökologie. Ein Fachbuch für Studium und Praxis. Stuttgart: Fischer.
- 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), 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 auf Pflanzen (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. Berlin: Beuth-Verlag.

VDI 3957 Blatt 18 (2015): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Bioindikation). Erfassen von Stickstoffanreicherungen in der Blatflechte *Parmelia sulcata* zum Nachweis von Immissionswirkungen. Berlin: Beuth-Verlag.

VDI 3957 Blatt 20 (2016): Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen (Vorentwurf).

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.; 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.; Vorbeck, A. (2002): Immissionsbezogene Flechtenkartierung Aschaffenburg unter besonderer Berücksichtigung des Straßenverkehrs. Wiederholungsuntersuchung 2002: unveröff. Gutachten der Stadt Aschaffenburg.

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. In: *Herzogia* 23 (2), S. 237–247.

Wirth, V.; Hauck, M.; Schultz, M.; Bruyn, U. de (2013): Die Flechten Deutschlands. Stuttgart: Ulmer.

Fotos mit Quellenangabe Kirschbaum:

Kirschbaum, U. (2016): Lichen Gallery. Homepage der Technischen Hochschule Mittelhessen. zuletzt aufgerufen am 29.4.2016 unter <http://www.thm.de/lse/fachbereich/team/professoren/profile/13-94-Kirschbaum.html>

Anhang

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)

Anhang 1: Ergebnisse der multivariaten Statistik

VARIATION IN MAIN MATRIX REPRESENTED BY SECOND MATRIX

6 = number of canonical axes
 6.90698 = sum of all canonical eigenvalues
 25.0000 = total variance in response variables (main matrix)
 0.276279 = proportion of variance in main matrix explained by predictors

AXIS SUMMARY STATISTICS

Number of canonical axes: 3 of 6 possible.
 Total variance in the species data: 25.00

	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Eigenvalue	3.747	1.662	0.919
Variance in species data			
% of variance explained	15.0	6.6	3.7
Cumulative % explained	15.0	21.6	25.3
Pearson Corr., Response-Pred.*	0.825	0.597	0.705
Kendall Corr., Response-Pred.	0.639	0.418	0.509

* Correlation between sample scores for an axis derived from the response variables (main matrix) and the sample scores that are linear combinations of the predictors (second matrix).

CORRELATIONS AND BIPLLOT SCORES for 6 Arten

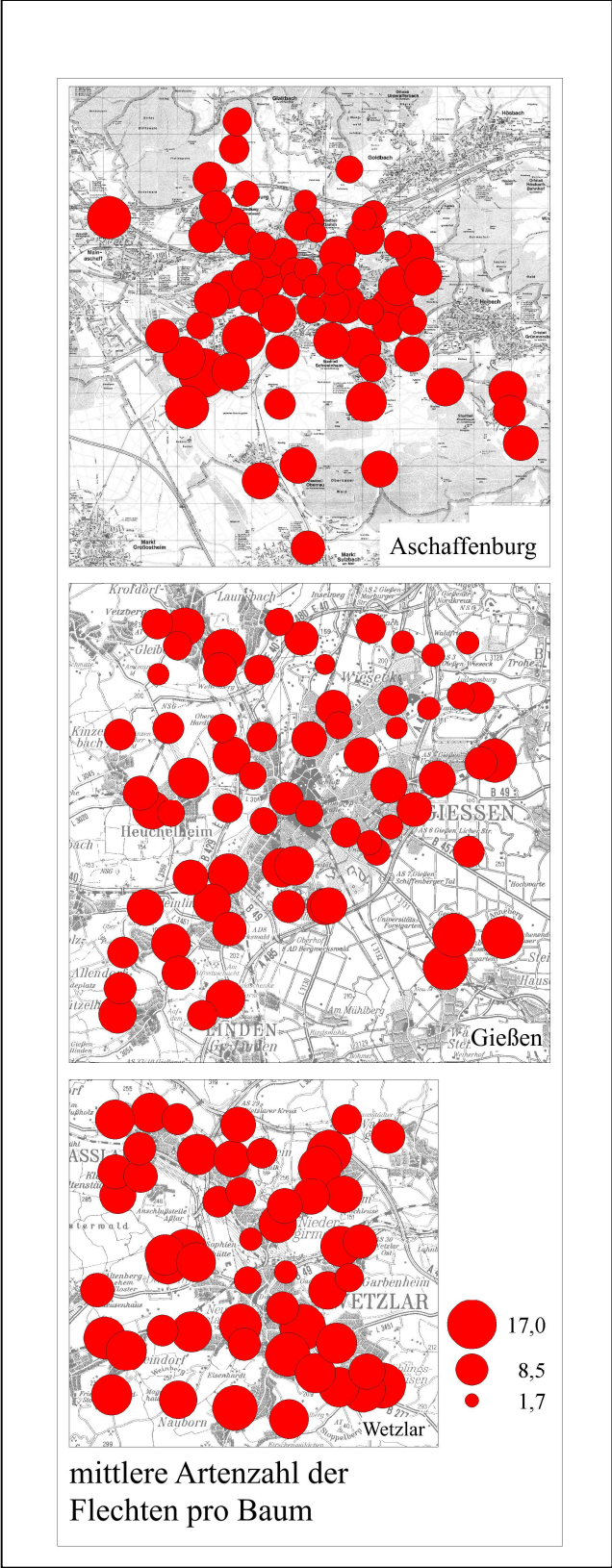
Variable	Correlations*			Biplot Scores		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3
1 Baumumfa	0.126	-0.638	0.142	0.327	-1.106	0.184
2 Entfernu	-0.251	-0.223	0.536	-0.654	-0.388	0.692
3 T-Zahl	0.138	0.332	-0.596	0.360	0.575	-0.769
4 F-Zahl	-0.714	0.332	0.292	-1.860	0.576	0.377
5 R-Zahl	0.816	0.352	0.451	2.125	0.611	0.582
6 N-Zahl	0.979	0.129	-0.101	2.551	0.224	-0.131

* Correlations are "intra-set correlations", i.e. between fitted site scores and predictors.
 Biplot scores have been multiplied by inflation factor reported above.

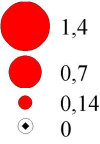
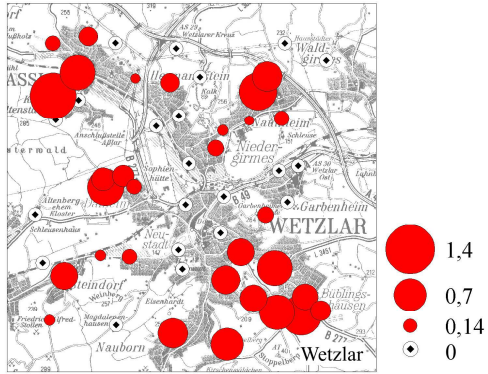
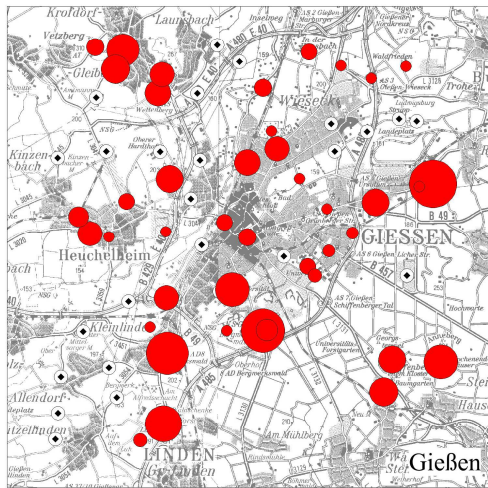
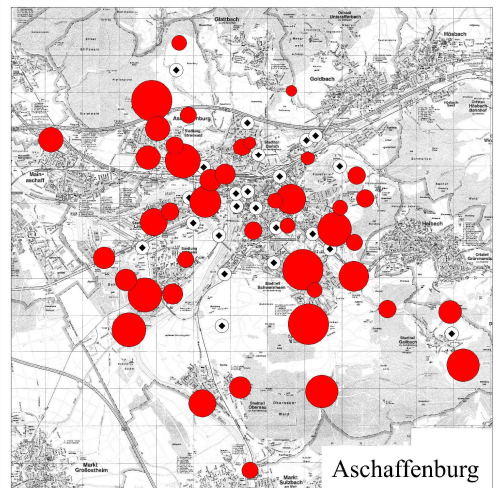
INTER-SET CORRELATIONS for 6 Arten

Variable	Correlations		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3
1 Baumumfa	0.104	-0.380	0.100
2 Entfernu	-0.207	-0.133	0.378
3 T-Zahl	0.114	0.198	-0.420
4 F-Zahl	-0.589	0.198	0.206
5 R-Zahl	0.673	0.210	0.318
6 N-Zahl	0.808	0.077	-0.071

Anhang 2: Mittlere Artenzahl aller Flechtentaxa pro Baum an Messflächen in den untersuchten Städten. Datengrundlage: Kartierungen Aschaffenburg 2009 (Vorbeck et al. 2009), Gießen und Wetzlar 2015 (Kirschbaum 2016)



Anhang 3: Mittlere Artenzahl der Acidophyten und Oligotrophiezeiger pro Baum an Messflächen in den untersuchten Städten. Datengrundlage: Kartierungen Aschaffenburg 2009 (Vorbeck et al. 2009), Gießen und Wetzlar 2015 (Kirschbaum 2016)



mittlere Artenzahl der Acidophyten und Oligotrophiezeiger pro Baum

Anhang 4: Berechnete Flechtenindizes

Variante	Berechnung von	Flechtenindex	Abkürzung
1	mittlere Artenzahl	Gesamtartenzahl	AZ_alle
2		Kühlezeiger	AZ_Kühle
3		Wärmezeiger	AZ_Wärme
4		Klimawandelzeiger	AZ_KWZ
5		Neutrophyten und Eutrophierungszeiger	AZ_Neut_Eutr
6		Acidophyten und Oligotrophiezeiger	AZ_Acido_Oligo
7		Phaeophyscia und Hyperphyscia	AZ_orb_n
8		Wuchsform: Krustenflechten	AZ_Krusten
9		Wuchsform: Blattflechten	AZ_Blatt
10		Wuchsform: Strauchflechten	AZ_Strauch
11		Große Blattflechten	AZ_Gr_Blatt
12		Eutrophierungszeiger nach VDI 3957 Blatt 13	AZ_Eu_VDI
13		Referenzarten nach VDI 3957 Blatt 13	AZ_Ref_VDI
14	mittlere Frequenz	<i>Amandinea punctata</i>	mF_pun
15		<i>Candelaria concolor</i>	mF_co
16		<i>Candelariella reflexa-Gruppe</i>	mF_ref
17		<i>Evernia prunastri</i>	mF_pru
18		<i>Hypogymnia physodes</i>	mF_phy
19		<i>Lecanora expallens</i>	mF_exp
20		<i>Lepraria incana</i>	mF_inc
21		<i>Melanelixia subaurifera</i>	mF_psu
22		<i>Melanohalea exasperatula</i>	mF_exa
23		<i>Parmelia sulcata</i>	mF_sul
24		<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	mF_orb
25		<i>Phaeophyscia nigricans</i>	mF_nig
26		<i>Physcia adscendens</i>	mF_ads
27		<i>Physcia tenella</i>	mF_pte
28		<i>Physconia grisea</i>	mF_gri
29		<i>Polycaulonia candelaria-Gruppe</i>	mF_can
30		<i>Polycaulonia polycarpa</i>	mF_pol
31		<i>Punctelia jeckeri</i>	mF_ulo
32		<i>Punctelia subrudecta</i>	mF_sub
33		<i>Xanthoria parietina</i>	mF_par
34		Gesamtartenzahl	mF_alle
35		Kühlezeiger	mF_Kühle
36		Wärmezeiger	mF_Wärme
37		Klimawandelzeiger	mF_KWZ
38		Neutrophyten und Eutrophierungszeiger	mF_Neut_Eutr
39		Acidophyten und Oligotrophiezeiger	mF_Acido_Oligo
40		Phaeophyscia und Hyperphyscia	mF_Phaeo
41		Wuchsform: Krustenflechten	mF_Krusten
42		Wuchsform: Blattflechten	mF_Blatt
43		Wuchsform: Strauchflechten	mF_Strauch
44		Große Blattflechten	mF_Gr_Blatt
45		Eutrophierungszeiger nach VDI 3957 Blatt 13	mF_Eu_VDI
46		Referenzarten nach VDI 3957 Blatt 13	mF_Ref_VDI

