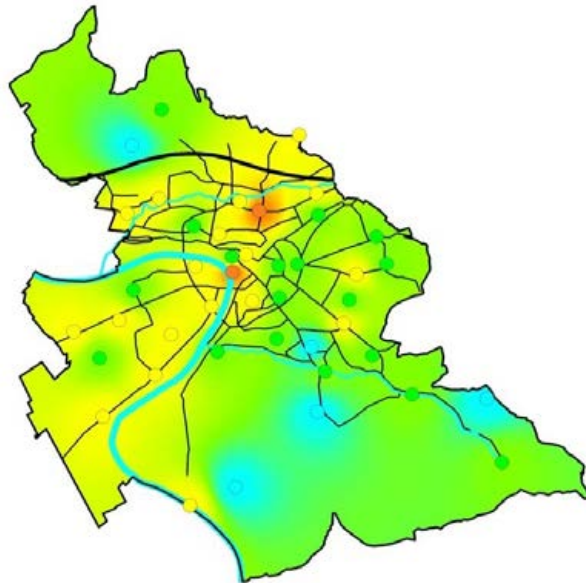


Flechtenkartierung Aschaffenburg 2015

Bewertung der lufthygienischen Situation
und Bioindikation des Klimawandels



Auftraggeber:

Stadt Aschaffenburg
Amt für Umwelt- und Verbraucherschutz
Dalbergstr. 15, 63739 Aschaffenburg

Bearbeitung:

Fraxinus GbR

Alexander Vorbeck, Dipl.-Ing. Umweltschutz
Prof. Dr. rer. nat. Ute Windisch
Marion Eichler, Dipl.-Biologin
Rainer Cezanne, Dipl. Biologe
Heimbach 8, 63776 Mömbris
Tel.: 0 60 29 / 99 56 44



Aschaffenburg, 18.10.2016

Inhaltsverzeichnis

1 ZUSAMMENFASSUNG	1
2 EINLEITUNG	5
3 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	6
3.1 Klima	6
3.2 Immissionssituation	11
3.2.1 Schwefeldioxid	11
3.2.2 Kohlenmonoxid	12
3.2.3 Stickstoffoxide	13
3.2.4 Ozon	15
3.2.5 Staub	16
4 FLECHTEN ALS BIOINDIKATOREN	18
4.1 Biologie	18
4.2 Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen	19
4.3 Wirkungen verkehrsbedingter Immissionen	21
4.3.1 Stickstoffverbindungen	22
4.3.2 Stäube	22
4.4 Bioindikation des Klimawandels	24
5 METHODEN	27
5.1 Vergleichbarkeit der Daten aus den Erhebungen 1991 bis 2015	27
5.2 Luftgüteuntersuchung	28
5.2.1 Messnetz	28
5.2.2 Trägerbäume	28
5.2.3 Erfassung der Flechten	30
5.2.4 Berechnung der Luftgüteindizes (LGI)	30
5.2.5 Bewertung der Luftgüteindizes (LGI)	31
5.3 Klimawandel-Biomonitoring	33
6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	35
6.1 Aktuelle Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13	36
6.2 Zeitliche Entwicklung der Luftgüte von 1997 bis 2015	39
6.2.1 Entwicklung der Luftgütewerte (LGW) von 1997 bis 2002	40
6.2.2 Entwicklung der Luftgüteindizes (LGI) von 2002 bis 2009	42
6.2.3 Entwicklung der Luftgüteindizes (LGI) von 2009 bis 2015	44
6.2.4 Entwicklung des Einflusses eutrophierender Verbindungen von 2009 bis 2015	47
6.3 Entwicklung der Flechtenbestände 1991 bis 2015	49
6.3.1 Entwicklung der Gesamtartenzahlen	49
6.3.2 Entwicklung des Artenspektrums	50
6.4 Biomonitoring des Klimawandels	54

7 MASSNAHMENEMPFEHLUNGEN	59
7.1 Verbesserung der Emissions- und Immissionssituation	59
7.2 Verbesserung der stadtklimatischen Verhältnisse	59
8 LITERATURVERZEICHNIS	61
ANHANG	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 01: Vergleich der Luftgütekarten nach VDI 3957 Blatt 13 von 2009 und 2015	3
Abb. 02: Zeitliche Entwicklung des Vorkommens von Klimawandelzeigern in % der kartierten Messflächen	4
Abb. 03: Verlauf der Jahresmitteltemperatur an der DWD Messstelle Kahl am Main von 1990 bis 2008	6
Abb. 04: Verlauf der Jahresniederschlagssumme an der DWD Messstelle Kahl am Main von 1990 bis 2010	7
Abb. 05: Stärkewindrose der Windmessstation Aschaffenburg des LfU von 2004 aus (Deutscher Wetterdienst 2009)	8
Abb. 06: Jahresmittel der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen (Früh et al. 2011)	10
Abb. 07: Langzeitverlauf der SO ₂ -Konzentration in Aschaffenburg (LfU 2009)	12
Abb. 08: Langzeitverlauf der SO ₂ -Konzentration in Kleinwallstadt (LfU 2015)	12
Abb. 09: Langzeitverlauf Kohlenmonoxid (CO) in Aschaffenburg (LfU 2009)	13
Abb. 10: Langzeitverlauf Stickstoffdioxid (NO ₂) in Aschaffenburg (LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015)	13
Abb. 11: Langzeitverlauf Stickstoffmonoxid (NO) in Aschaffenburg (LfU 2015)	14
Abb. 12: Emissionen und Immissionen von Stickoxiden in Aschaffenburg (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009)	15
Abb. 13: Langzeitverlauf Ozon (O ₃) in Aschaffenburg (LfU 2015)	15
Abb. 14: Langzeitverlauf der Feinstaub (PM ₁₀)-Konzentration in Aschaffenburg/Schweinheimer Str. (LfU 2009)	16
Abb. 15: Emissionen und Immissionen von Feinstaub in Aschaffenburg (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009)	17
Abb. 16: Schematischer Querschnitt durch eine Blattflechte (Kirschbaum und Wirth 1995), ergänzt	18
Abb. 17: Flechtenbewuchs an Eschen in verschiedenen Luftgütezeiten	19
Abb. 18: Zeitreihen der Jahresmittelwerte von 1995 bis 2014 aller Luftmessstationen in Hessen; gemittelt wurden die Werte der Stationen gleichen Charakters (Verkehrsschwerpunkte, Städte, ländlicher Raum); (HLUG 2015)	21
Abb. 19: Einflussfaktoren auf epiphytische Flechten in Städten	23
Abb. 20: Klimawandelzeigerindex (KWI) an 25 Messflächen des Untersuchungsgebietes Bayern im Jahr 1996 und 2011 (Zahlen in der Karte: Nummer der Messfläche; * signifikante Änderung, p < 0,05) Daten aus (Windisch et al. 2011), ergänzt in (VDI 3957 Blatt 20 2016)	25

Abb. 21: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Klimawandelzeiger (FDW _{KWZ}) von 1992 – 2012 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007 und 2012 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht	26
Abb. 22: Flechtenaufnahmegeritter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005)	30
Abb. 23: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindex anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung mit dem Aufnahmegeritter der VDI 3799); aus: (VDI 3957 Blatt 13 2005)	32
Abb. 24: Erläuterung zur Bewertungsmatrix	32
Abb. 25: Der Klimawandelzeiger <i>Flavoparmelia caperata</i>	33
Abb. 26: Vergleich der Luftgütekarten nach VDI 3799 von 1997 und 2002; aus Vorbeck und Windisch (2002b)	41
Abb. 27: Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13 von 2002	42
Abb. 28: Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13 von 2009	43
Abb. 29: Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13 von 2015	43
Abb. 30: Veränderung des Luftgüteindex von 2009 bis 2015	46
Abb. 31: Veränderung des Einflusses eutrophierender Verbindungen von 2009 bis 2015	47
Abb. 32: Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Hessens (Jahresmittelwerte auf der Basis von Stundenmittelwerten) (HLNUG 2016; aus: Kirschbaum 2016)	48
Abb. 33: Die stickstoffliebende Gewöhnliche Schwielenflechte (<i>Phaeophyscia orbicularis</i>)	51
Abb. 34: Die acidophytische Blasenflechte (<i>Hypogymnia physodes</i>)	52
Abb. 35: Vorkommen von Klimawandelzeigern in % der kartierten Messflächen von 1991 bis 2015	55
Abb. 36: Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW _{KWZ}) 2002	56
Abb. 37: Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW _{KWZ}) 2009	57
Abb. 38: Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW _{KWZ}) 2015	57
Abb. 39: Mittlere Artenzahl der Strauchflechten pro Baum an Messflächen in Aschaffenburg, Gießen und Wetzlar; aus: (Windisch 2016); Daten aus (Vorbeck et al. 2009) und (Kirschbaum 2016)	58

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 01: Baumartengruppen nach VDI 3957 Blatt 13, mit Baumumfang in cm (VDI 3957 Blatt 13 2005)	29
Tab. 02: Anteile der Baumarten an den kartierten Trägerbäumen an 44 Messflächen	29
Tab. 03: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 (ergänzt)(VDI 3957 Blatt 13 2005)	31
Tab. 4: Liste der Klimawandelzeiger (VDI 3957 Blatt 20 2016)	34
Tab. 5: Statistische Daten des Projektes	35
Tab. 06: Methoden der bisherigen Aschaffener Flechtenkartierungen	40
Tab. 07: Bilanz der Veränderung der Indexwerte von 2009 bis 2015	44
Tab. 08: Entwicklung der Luftgüteindizes von 2009 bis 2015 (Erklärung der Indizes am Ende der Tabelle)	44
Tab. 09: Entwicklung der Artenzahlen	49
Tab. 10: Vorkommen ausgewählter nitrophytischer (stickstoffliebender) Flechtenarten von 1991 bis 2015 (Auswertung der bei allen Kartierungen durchgängig untersuchten Messflächen)	51
Tab. 11: Vorkommen ausgewählter acidophytischer (säuretoleranter) Flechtenarten von 1991 bis 2015 (Auswertung der bei allen Kartierungen durchgängig untersuchten Messflächen)	53
Tab. 12: Vorkommen von Klimawandelzeigern an jeweils in allen Kartierungen untersuchten Messflächen in Aschaffenburg	54

1 ZUSAMMENFASSUNG

Technische Immissionsmessungen berücksichtigen meist nur wenige Leitstoffe. Mit Hilfe der Bioindikation mit Flechten kann die Wirkung der Gesamtheit der Schadstoffe in Kombination mit den jeweiligen klimatischen Verhältnissen auf Organismen sichtbar gemacht werden.

In Aschaffenburg wurden bereits 1991, 1997, 2002 und 2009 Flechtenkartierungen zur Erfassung der lufthygienischen Situation durchgeführt (Wiegel et al. 1991; Rabe 1997; Vorbeck und Windisch 2002b; Vorbeck et al. 2009). Dabei wurde 2002 und 2009 ein besonderes Augenmerk auf den Wirkungsnachweis verkehrsbedingter Immissionen gelegt. Ebenso wurden die Flechtenkartierungen in Hinblick auf Kaltluftentstehungsgebiete und deren Abflüsse ausgewertet sowie die Veränderungen der Flechtenvegetation mittels Folienverfahren nach VDI 3957 dokumentiert.

Im Jahr 2015 wurde die Flechtenkartierung nach der Methode der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 (VDI 3957 Blatt 13 2005) durch das Büro Fraxinus GbR wiederholt, um die lufthygienische Entwicklung in der Stadt zu dokumentieren. Eine weitere Zielsetzung war, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Flechtenvegetation in Aschaffenburg zu analysieren.

Das zentrale Ergebnis der Flechtenkartierung ist die Luftgütekarte (Abb. 01 und Luftgütekarte auf Seite 37). Sie stellt die klimatisch-lufthygienische Situation des Untersuchungsgebietes anhand der ermittelten Luftgüteindizes dar. Im Stadtgebiet ist die Spanne von geringer Luftgüte (orange) bis hin zu sehr hoher Luftgüte (blau) vertreten. Sehr geringe Luftgüte (rot) wurde nicht festgestellt. Geringe (orange) und mittlere Luftgüte (gelb) kommen vor allem in der Innenstadt und den Stadtteilen Nilkheim, Strietwald und Damm, sowie dem Westteil von Obernau vor. Die Stadtteile Schweinheim, der Ostteil von Obernau sowie der Ostteil der Kernstadt weisen eine hohe Luftgüte (grün) auf. Noch günstiger stellt sich die lufthygienische Situation in den etwas höher gelegenen unbebauten Gebieten nördlich und südlich sowie auch östlich Aschaffenburgs dar (blau).

Im bebauten Stadtgebiet wirken sich eine hohe Dichte an Emittenten, insbesondere der Verkehr und der Hausbrand, ungünstig auf die Luftqualität aus. Die Tallagen sind zudem durch Inversionswetterlagen belastet und für lokale Windsysteme nur eingeschränkt zugänglich.

Die Luftqualität hatte sich bei den vergangenen Untersuchungen im Vergleich zur Vorgängerkartierung jeweils deutlich verbessert. Während 1997 noch überwiegend hohe und sehr hohe lufthygienische Belastungen vorherrschten, war das Bild 2002 durch mäßige bis geringe Belastungen geprägt. Es konnte eine deutliche Abnahme der Wirkung saurer Schadgase und eine Zunahme der Wirkung von düngenden Immissionen festgestellt werden. Von 2002 bis 2009 hatte sich die lufthygienische Situation insgesamt noch weiter verbessert. Allerdings war die Verbesserung bei weitem nicht so stark wie in den Jahren zuvor.

Während die Luftgüteindizes von 1997 bis 2002 im Innenstadtbereich am deutlichsten angestiegen sind, profitierten von 2002 bis 2009 vor allem die Messflächen am Rand der Bebauung von der gestiegenen Luftgüte.

Bis 2015 konnten im Vergleich zu 2009 durch die Flechten keine markanten Veränderungen der Luftqualität im Stadtgebiet mehr festgestellt werden (Abb. 01). Dieser Sachverhalt wird auch durch technische Messungen belegt. Allerdings konnte an 13 der 44 kartierten Messflächen eine Zunahme der Wirkung düngender Immissionen anhand eines Eutrophierungsindex nach VDI festgestellt werden.

Diese Entwicklung und die Veränderung des Artenspektrums belegen, dass die Wirkung saurer Schadgase, insbesondere Schwefeldioxid heute keine bedeutende Rolle mehr spielt. Dagegen zeigten düngende Immissionen wie durch Stickstoffoxide, Ammoniak und Stäube zwischen 2002 und 2015 eine deutlich zunehmende Wirkung.

Die Artenzahlen hatten sich bei den bisherigen Kartierungen von 23 in 1991, über 29 in 1997, 45 in 2002 bis auf 92 Arten in 2009 erhöht. Analog zum Luftgüteindex stagniert auch die Flechtenartenzahl 2015 mit 87 Arten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass 2015 weniger Stationen kartiert wurden als 2009. Allerdings setzt sich beim Flechtenartenspektrum die Verschiebung zugunsten düngungstoleranter Arten fort.

Nach den Ergebnissen der Flechtenkartierung sollte in Zukunft ein besonderes Augenmerk auf die Reduktion der Stickoxide und des Feinstaubes gelegt werden. Einer der wichtigsten Ansatzpunkte ist hier der Kfz-Verkehr. Eine Fortschreibung und sukzessive Umsetzung des Maßnahmenplanes für Luftreinhaltung wird empfohlen.

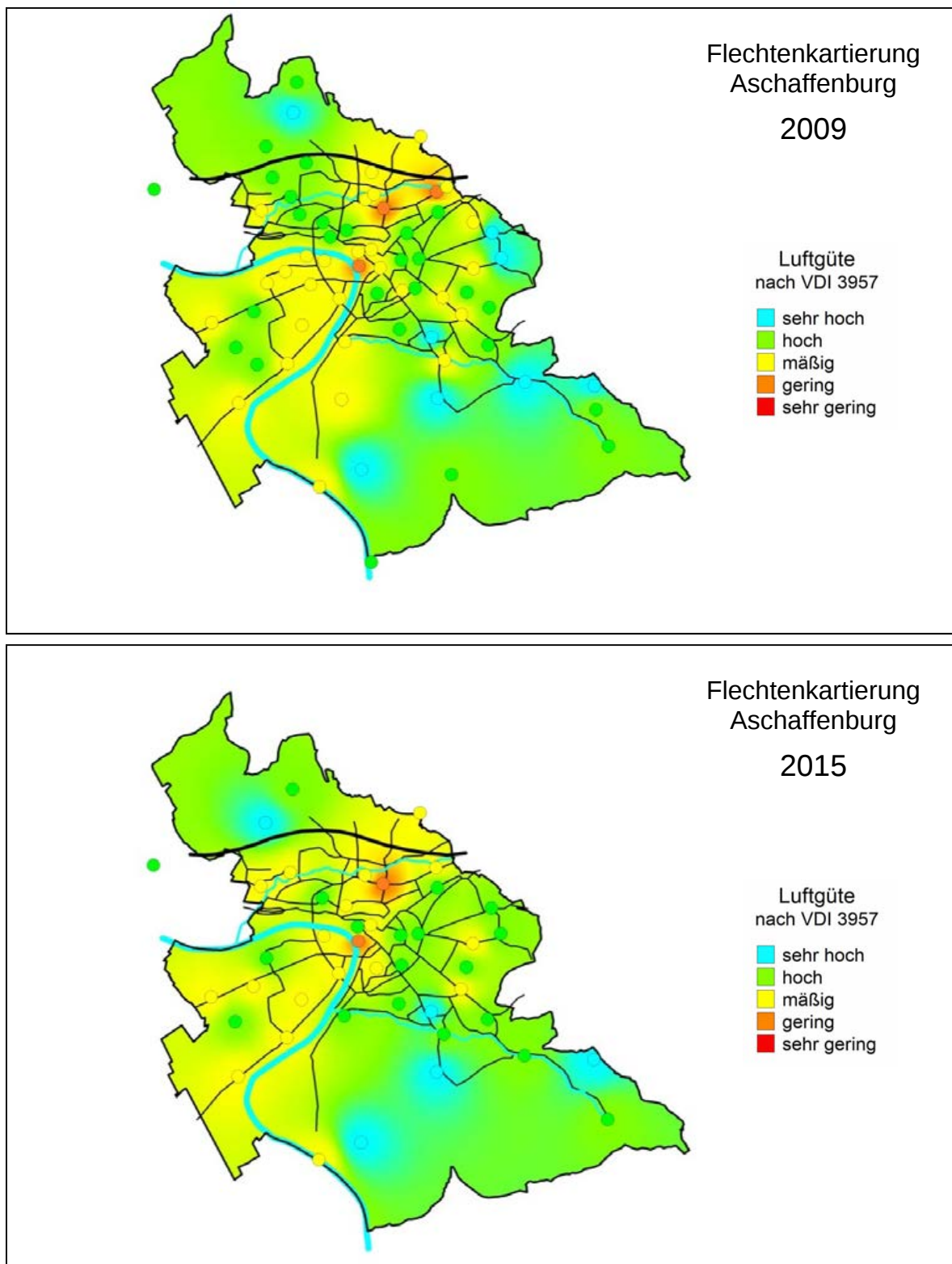


Abb. 01: Vergleich der Luftgütekarten nach VDI 3957 Blatt 13 von 2009 und 2015

Im Jahr 2015 erfolgte erstmals eine Auswertung der Flechtendaten nach einer neuen Methode des Klimawandel-Biemonitorings des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 3957 Blatt 20 2016). Durch eine Neukalkulation der vorhandenen Datenreihe wurde festgestellt, dass ausgewiesene Klimawandelzeiger unter den Flechten über einen Zeitraum von 25 Jahren deutlich zugenommen haben. Während 1991 nur eine dieser Arten an einer Messfläche vorkam, sind es mittlerweile 12 Arten. Fast alle Messflächen werden von Klimawandelzeigern besiedelt.

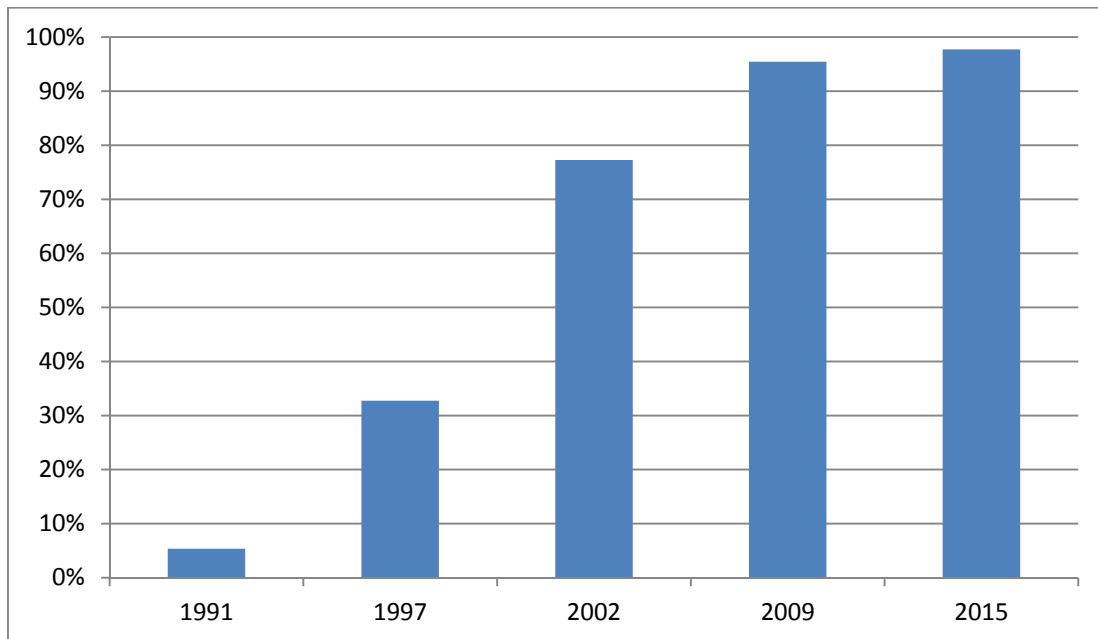


Abb. 02: Zeitliche Entwicklung des Vorkommens von Klimawandelzeigern in % der kartierten Messflächen

Das bedeutet, dass das Klima seit 1991 in Aschaffenburg milder, ozeanischer und wärmer geworden sein muss. Der Klimawandel in der Region ist durch langjährige Messungen des DWD in Frankfurt belegt (Früh et al. 2011).

Die Zunahme von Klimawandelzeigern ist nicht regional begrenzt, sondern lässt sich auch überregional nachweisen. Der Untermain erwies sich im Landesvergleich sowohl in Hessen als auch in Bayern als Region mit der stärksten Zunahme von Klimawandel anzeigenden Flechtenarten (vgl. Kapitel 4.4) (Windisch et al. 2011; Windisch et al. 2014).

Um der erwarteten regionalen Klimaerwärmung im gesamten Stadtgebiet gegenzusteuern ist eine klimagünstige Gestaltung der Stadt in möglichst vielen Stadtbereichen notwendig. Parks und Grünanlagen, aber auch Fassaden- und Dachbegrünung nehmen unter zukünftigen Klimabedingungen in ihrer Bedeutung stark zu. Ein nicht unwesentlicher Anteil der Immissionen stammt aus der regionalen Hintergrundbelastung. Der Klimawandel ist ein globales Phänomen. Daher ist ein überregionales Engagement für die Reduktion von Emissionen und den Klimaschutz nötig.

Eine Wiederholung der Flechtenkartierung zur Dokumentation der lufthygienischen Entwicklung und den Wirkungen des Klimawandels empfiehlt sich nach etwa fünf Jahren.

2 EINLEITUNG

Die Stadt Aschaffenburg beauftragte im Frühjahr 2015 das Büro Fraxinus mit der Wiederholung der Untersuchung und lufthygienischen Beurteilung des epiphytischen Flechtenbewuchses in Aschaffenburg.

Die Flechtenkartierung ist eine Methode der Bioindikation. Im Gegensatz zu technischen Messungen, bei denen die Konzentrationen einzelner Schadstoffe gemessen werden, können mit Hilfe von Flechten die Wirkung von Schadstoffen auf Organismen und Sachgüter fassbar gemacht werden. So kann es bei gleichzeitiger Einwirkung mehrerer Schadstoffe zu synergistischen Wirkungen kommen. „Bioindikatoren sind Lebewesen, die auf eine Schadstoffbelastung mit einer deutlichen und eindeutigen Veränderung ihrer Lebensfunktion antworten.“ (Kirschbaum und Wirth 1995).

Für die Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen haben sich Flechten als gute Bioindikatoren erwiesen. Dabei reagieren sie nicht nur auf einzelne Schadstoffkomponenten, sondern auf einen Komplex von Schadgasen (Herzig et al. 1987). Sie sind Zeiger für die biologisch wirksame Gesamtbelastung. RABE & BECKELMANN fanden, dass mit abnehmendem Flechtenbewuchs die Häufigkeit von menschlichen Atemwegserkrankungen steigt (Rabe und Beckelmann 1987).

Daneben haben sich Flechten auch als gute Bioindikatoren und Frühwarnsysteme für den Klimawandel bewährt. Früher und empfindlicher als höhere Pflanzen reagieren sie auf klimatische Veränderungen. Zum Klimawandel-Biomonitoring besteht seit 2016 erstmalig eine Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 3957 Blatt 20 2016).

Die Flechtenkartierung Aschaffenburgs im Jahr 2015 hat folgende Ziele:

- Die Entwicklung der Immissionswirkungen in Aschaffenburg seit 1991 soll dokumentiert werden. Dazu werden insbesondere die Luftgüteindizes nach VDI 3957 Blatt 13 und die Entwicklung des Flechtenartenspektrums herangezogen.
- Die Effekte des Klimawandels auf die Flechtenvegetation im Stadtgebiet für den Zeitraum seit 1991 soll nach der VDI 3957 Blatt 20 untersucht und dargestellt werden.

3 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Stadtgebiet von Aschaffenburg sowie eine Messfläche an der B 8 bei Mainaschaff. Die Untersuchungsstandorte sind im Anhang dargestellt.

3.1 Klima

Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Langjährige Temperaturmessungen liegen für die Station des Deutschen Wetterdienstes in Kahl am Main vor (Abb. 03). Dort lag die Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1990-2008 bei 10,9 °C. Der Juli hatte in diesem Zeitraum eine Durchschnittstemperatur von 20,0 °C und die Januartemperatur erreichte 2,5 °C. Kahl liegt wie Aschaffenburg in der Untermainebene, die die wärmste Region Bayerns ist. Ganzjährig hohe Luftfeuchtwerte deuten auf eine Belastung durch Schwüle hin (Dreiser 2000).

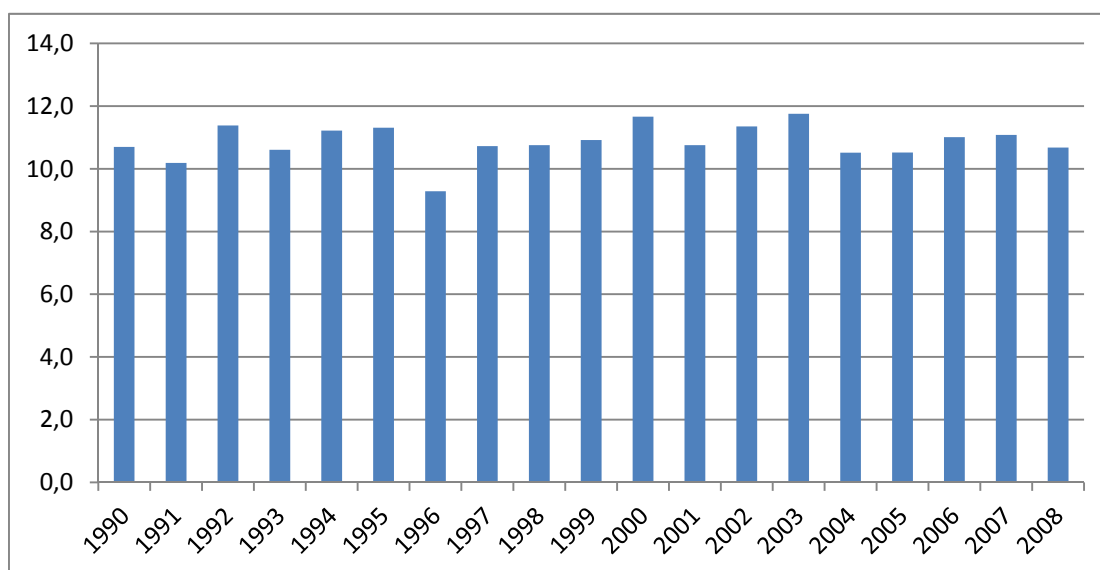


Abb. 03: Verlauf der Jahresmitteltemperatur an der DWD Messstelle Kahl am Main von 1990 bis 2008

Niederschlag

Die Jahresniederschlagssumme liegt in der Untermainebene zwischen 550 und 750 mm und steigt zum Spessart hin schnell auf z.T. über 1000 mm an. Etwas über 50 % entfallen auf die Sommermonate, im Winter ist ein sekundäres Maximum ausgebildet (Dreiser 2000).

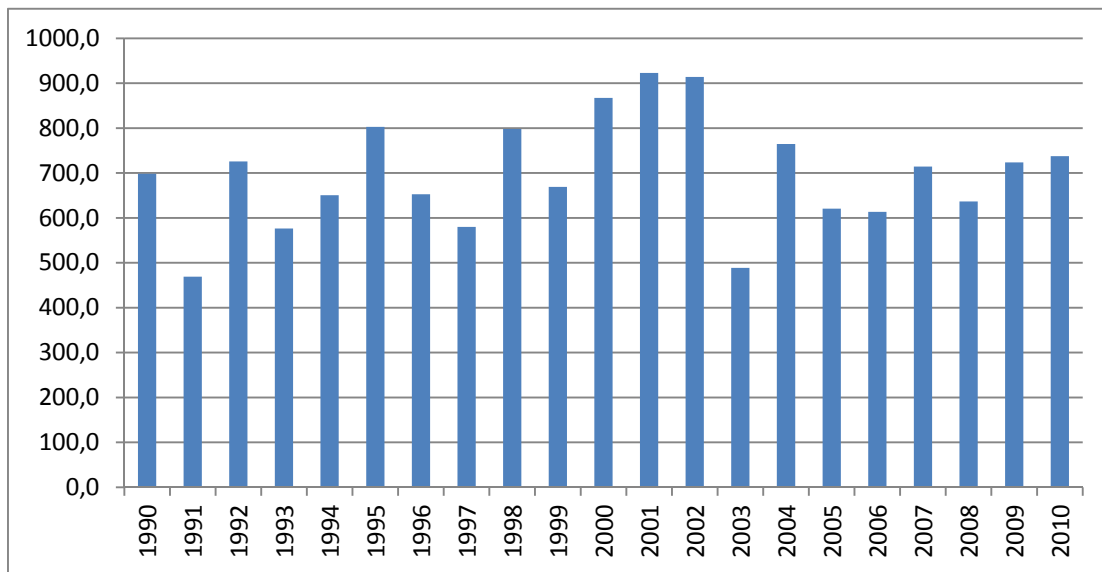


Abb. 04: Verlauf der Jahresniederschlagssumme an der DWD Messstelle Kahl am Main von 1990 bis 2010

Wind

Im Rahmen des Klimagutachtens Aschaffenburg wurde an der Kompostierungsanlage in der Obernburger Straße eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,7 m/s gemessen. Die Hauptwindrichtung schwankt für das gesamte Stadtgebiet zwischen Südwest und Südost. Die Winde aus westlichen und südwestlichen Richtungen können ungehindert in die Stadt hinein strömen (Dreiser und Samimi 2000).

Die Messstelle des Landesamtes für Umwelt in Aschaffenburg misst eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s. Sie zeigt als Hauptwindrichtung Südwest und Nordost, wobei die südwestlichen Winde überwiegen. Die beiden Sektoren 210 und 240° haben zusammen 32 %, die Sektoren 30 und 60° einen Anteil von 29 %. Winde quer zu der von der Aschaff gebildeten Bucht sind dagegen deutlich seltener. Die Richtung Süd (180°) hat noch rund 8 %, West und Ost (Sektoren 270 bzw. 90°) haben etwa 6 % bzw. 5 % Anteil (Deutscher Wetterdienst 2009).

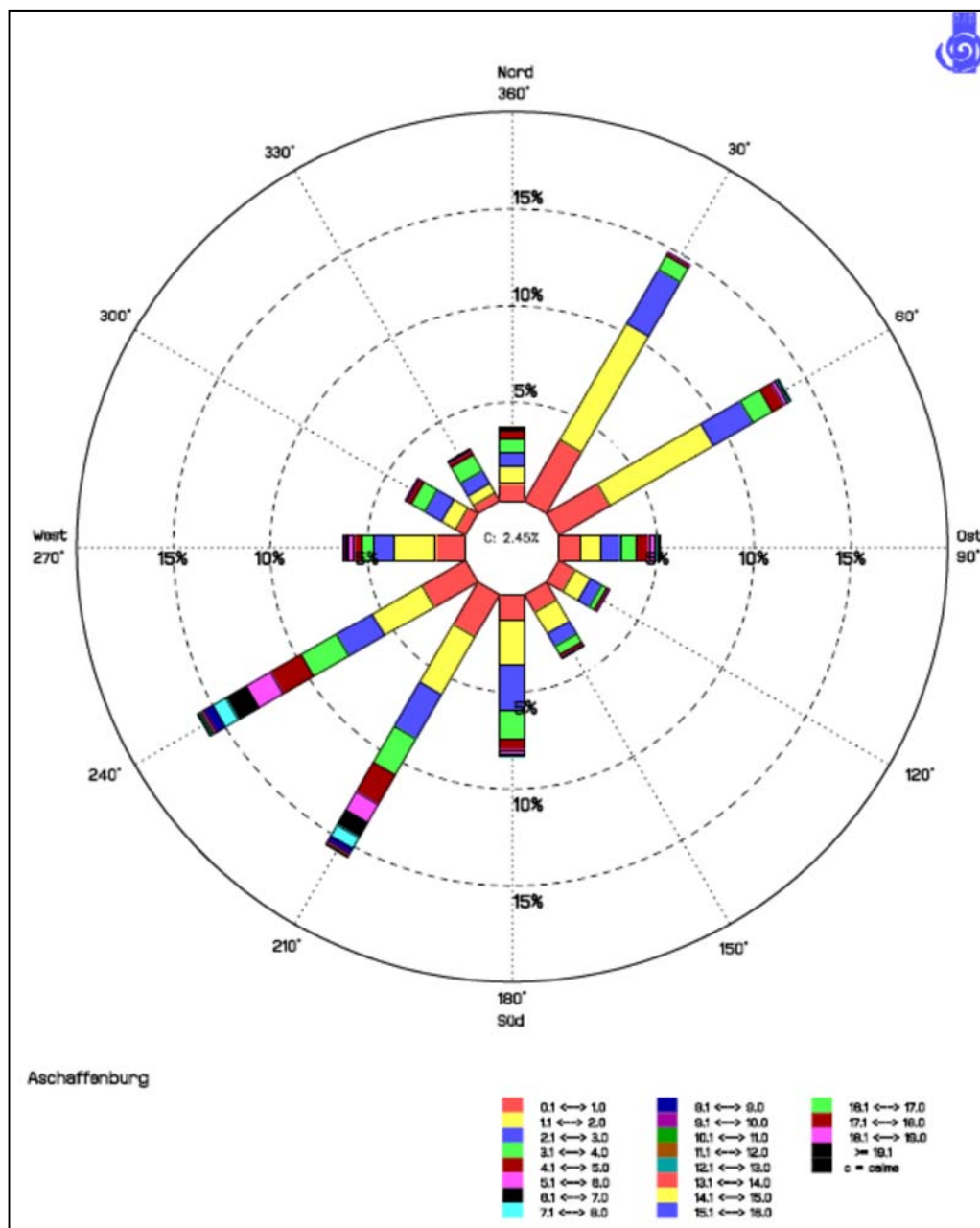


Abb. 05: Stärkewindrose der Windmessstation Aschaffenburg des LfU von 2004 aus (Deutscher Wetterdienst 2009)

Stadtklima

Die vorstehend aufgeführten Klimadaten beschreiben in erster Linie das Großklima der Region. Dieses erfährt durch die topographischen Bedingungen und durch Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit vielfältige Modifikationen. Insbesondere im Bereich der bebauten Stadt führen die anthropogenen Veränderungen der natürlichen Umwelt zur Ausprägung räumlich und zeitlich differenzierter, eigenständiger Kleinklimate, die allgemein unter dem Begriff „Stadtklima“ zusammengefasst werden (Bründel et al. 1986).

Für die Entstehung des Stadtklimas sind dabei von Bedeutung:

- hoher Versiegelungsgrad und geringer Vegetationsanteil, geringe Verdunstung, geringerer pflanzenverfügbarer Wasservorrat im Boden
- Bebauungsstruktur, erhöhte Oberflächenrauigkeit, Baukörper als Strömungshindernisse, Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland, Kanalisierung von Luftströmungen, Wirbelbildungen, Zug- und Böigkeiterscheinungen, Änderungen beim Strahlungsumsatz im bodennahen Bereich
- Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der künstlichen Oberflächen, Aufheizung, geringe nächtliche Abkühlung, thermische Turbulenzen, städtisches Wärmearchipel, thermische Belastungen, Hitzestress
- Emissionen von Luftbeimengungen und von Abwärme, lufthygienische Belastungen, Dunstglocke, reduzierte Einstrahlung und verringerte Abstrahlung

Die Eigenschaften der differenzierten Kleinklimate in der Stadt führen, vor allem bei austauscharmen und windschwachen Hochdruckwetterlagen, zu vielfältigen Belastungen der Menschen in der Stadt, und zwar hauptsächlich in den stark verdichteten Innenstadtbereichen sowie den Industriebezirken. Dazu zählen z. B. die Immissionsbelastung (Smogbildung) und die thermische Belastung (Hitzestress) im Sommer. Es ist dabei wesentlich, dass das Befinden der Menschen in der Stadt nicht nur von einzelnen Faktoren abhängt, sondern dass dieses vom komplexen Zusammenspiel der stadtklimatischen und weiteren Umweltfaktoren bestimmt wird.

Klimawandel

FRÜH et al. 2011 beschreiben ausführlich die Auswirkungen des Klimawandels im Zusammenhang mit der städtischen Wärmebelastung für Frankfurt am Main, das etwa 40 km von Aschaffenburg entfernt liegt:

„60-jährige Messungen des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt/Main belegen einen signifikanten Anstieg des Jahresmittels der Lufttemperatur von 0,35 °C pro Dekade. Die Anzahl der mittleren jährlichen Sommertage, das sind Tage an denen die Lufttemperatur 25 °C erreicht oder überschreitet, weist ebenfalls einen signifikanten Trend von 4,3 Tagen pro Dekade auf. Wenn dieser beobachtete Trend unverändert weiterginge, so wären für die Klimaperiode 2021 - 2050 durchschnittlich etwa 21 Sommertage pro Jahr mehr als in der Klimaperiode 1971 - 2000 zu erwarten. Eine zuverlässige Abschätzung muss jedoch die erwartete Änderung klimarelevanter Spurenstoffe berücksichtigen und daher auf den verfügbaren globalen und regionalen Klimaprojektionen basieren.

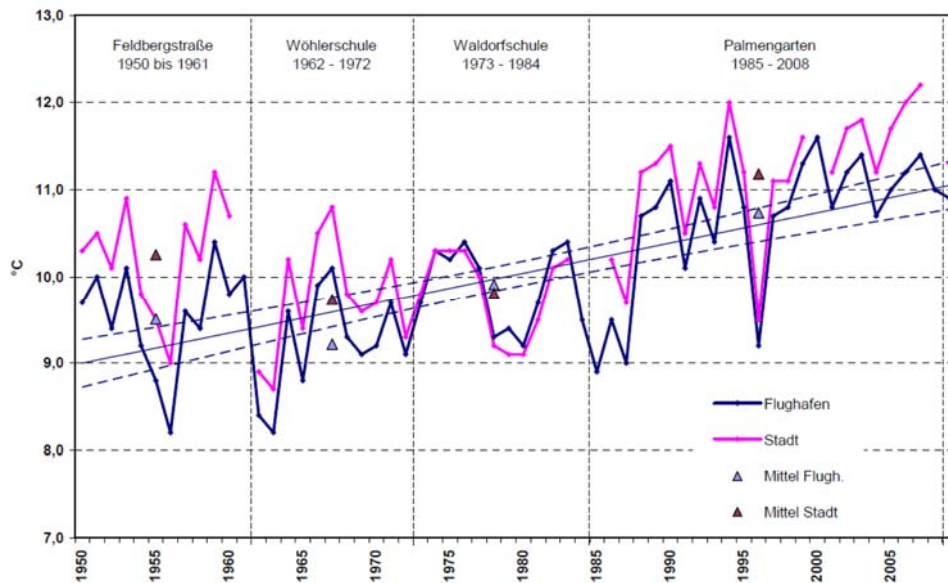


Abb. 06: Jahresmittel der Lufttemperatur für Flughafen Frankfurt/Main und Frankfurt/M.-Stadt (1950 - 2009). Die Jahresmittel der Flughafenstation sind mit einer linearen Trendlinie und deren 90% Konfidenzintervall versehen (Früh et al. 2011)

Die Studie zeigt, dass die Zunahme der Sommertage bis Mitte des Jahrhunderts sich nicht signifikant zwischen dicht und locker bebauten Stadtteilen unterscheidet. Die Wärmebelastung wird also gleichermaßen stark zunehmen und zukünftig auch dort am höchsten sein wo sie es heute schon ist. Die Unterschiede zwischen Stadt und Umland werden sich aber nicht wie befürchtet verschärfen. Aber die Wahrscheinlichkeit, dass Hitzesommer – wie beispielsweise im Jahr 2003 – häufiger auftreten werden, nimmt bis Mitte des Jahrhunderts zu.

Neben den Auswirkungen der regionalen Klimaänderungen auf die Stadt wurden auch die Auswirkungen bereits geplanter Veränderungen der Stadt untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Umwandlung von bebauten Flächen in Grünflächen die durch den Klimawandel erwartete Zunahme an Sommertagen und -abenden etwa halbieren würde. Umgekehrt kann eine Verdichtung der Bebauung die erwartete Zunahme an Sommertagen und -abenden nahezu verdoppeln. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen werden aber lokal sehr begrenzt sein. Um der erwarteten regionalen Klimaerwärmung im gesamten Stadtgebiet gegenzusteuern ist daher eine klimagünstige Gestaltung der Stadt in möglichst vielen Stadtbereichen notwendig. Parks und Grünanlagen nehmen unter zukünftigen Klimabedingungen somit in ihrer Bedeutung stark zu.“

3.2 Immissionssituation

Die Stadt Aschaffenburg hat auf freiwilliger Basis einen „Maßnahmenplan“ in Anlehnung an einen „Luftreinhalteplan“ nach § 47 BImSchG erstellt (Wyrwich 2006). In dem Verfahren der Planaufstellung wurden durch die Stadt Aschaffenburg insbesondere die verkehrlichen und gewerblichen Eingangsdaten der Ausbreitungsberechnung einer genauen Prüfung unterzogen und gegebenenfalls korrigiert. Des Weiteren wurden vorhandene Gutachten (Klimagutachten, Flechtenkartierung) zur Neubestimmung der Hintergrundbelastung mit einbezogen und Schadstoffeinträge durch das Kraftwerk Staudinger in Großkrotzenburg berücksichtigt.

Eine umfassende Analyse der lufthygienischen Situation in der Stadt Aschaffenburg lieferte der Endbericht des Projektbeirates Luftqualität von 2009 (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009).

Mit dem Projektbeirat zur Luftqualität sollte dem Thema „Verbesserung der Luftqualität“ umfassend und vor allen Dingen integriert über alle Belastungsarten und Handlungsfelder begegnet werden. Die Aufgabe des Projektbeirates war es, die Gegebenheiten der Aschaffener Atemluft umfassend aufzuarbeiten und die Einflussmöglichkeiten von Kommune, der örtlichen Wirtschaft und der Privathaushalte zur qualitativen Verbesserung der Luft abzuschätzen. Hieraus wurden Maßnahmenvorschläge zur Beratung und Beschlussfassung des Stadtrates entwickelt.

Der Endbericht des Projektbeirates (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009) erklärte Stickoxide (NO_x) und PM₁₀-Feinstaub als Leitparameter für weitere Luftreinhaltemaßnahmen. Die restlichen Luftschadstoffe wurden als nicht vorrangig betrachtet.

In Aschaffenburg werden durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) rund um die Uhr Luftschadstoffe gemessen: die Messstation des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern (LÜB) steht im Bussardweg (Strietwald). Bis 2009 gab es eine weitere Messstation in der Schweinheimer Straße (Höhe Brentanoschule, Innenstadt). Da die Flechten die Schadstoffbelastung über einen längeren Zeitraum integrieren, sollen hier die Komponenten Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, Feinstaub und Ozon an Hand von Trendanalysen betrachtet werden.

3.2.1 Schwefeldioxid

Die Schwefeldioxidkonzentrationen weisen seit den 1980er Jahren einen deutlichen Rückgang auf (Abb. 07 und Abb. 08). SO₂ ist damit aus lufthygienischer Sicht im Gegensatz zu früher zu einer eher unbedeutenden Komponente geworden. Der deutliche Rückgang der Belastung ist auf emissionsmindernde Maßnahmen in sämtlichen Sektoren, insbesondere aber im Bereich Kraft- und Heizwerke, zurückzuführen.

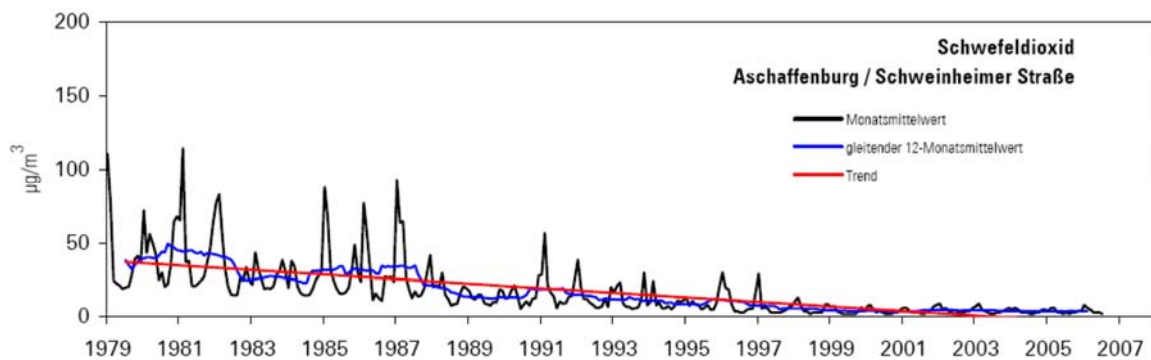


Abb. 07: Langzeitverlauf der SO₂-Konzentration in Aschaffenburg (LfU 2009)

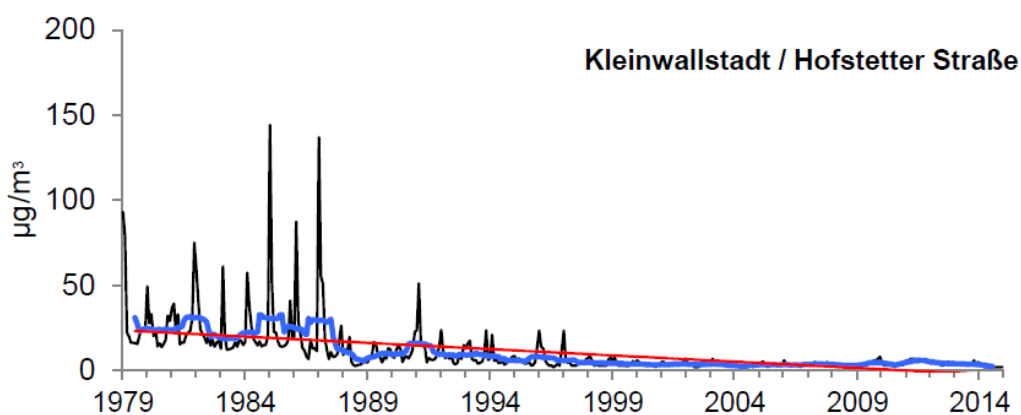


Abb. 08: Langzeitverlauf der SO₂-Konzentration in Kleinwallstadt (LfU 2015)

3.2.2 Kohlenmonoxid

Wie beim Schwefeldioxid konnte auch beim Kohlenmonoxid ein Rückgang der Belastung beobachtet werden. Kohlenmonoxid entsteht überwiegend bei der unvollständigen Verbrennung in Motoren und kleineren Feuerungsanlagen. Dementsprechend gelten als Hauptverursacher der Kohlenmonoxid-Immissionen der Kfz-Verkehr und der Hausbrand. Der Rückgang der Schadstoffbelastung ist trotz stagnierenden Verkehrsaufkommens in Aschaffenburg insbesondere auf die Verminderung der Emissionen im Verkehrsbereich und zum Teil auch auf die Umstellung kleinerer Feuerungsanlagen auf gasförmige und flüssige Brennstoffe zurückzuführen. Kritisch ist der Trend zu kleinen Kamin- und Holzöfen zu sehen, die einen vergleichsweise ungünstige Verbrennungsprozess haben und sowohl bei Kohlenmonoxid, als auch beim Feinstaub zu einer Verschlechterung der Immissionssituation beitragen können.

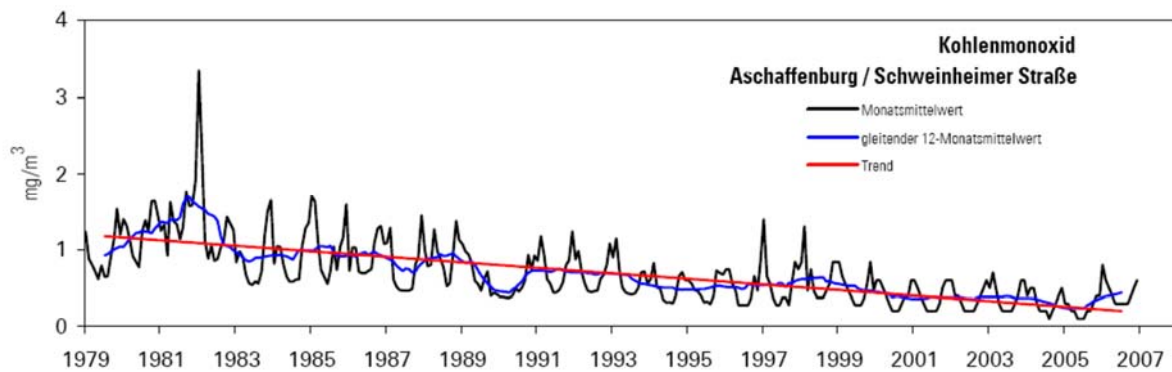


Abb. 09: Langzeitverlauf Kohlenmonoxid (CO) in Aschaffenburg (LfU 2009)

3.2.3 Stickstoffoxide

Stickstoffoxide entstehen bei allen Hochtemperaturprozessen, die unter Luftzufuhr ablaufen – insbesondere Verbrennungen – durch Oxidation des in der Luft und im Brennstoff enthaltenen Stickstoffes. Die Immissionen der Stickstoffoxide weisen an dem Messpunkt Bussardweg einen Trend zu geringfügig abnehmenden Konzentrationen auf. Bis 2007 nahmen die Stickstoffoxide am Messpunkt Schweinheimer Straße tendenziell leicht zu (LfU 2009).

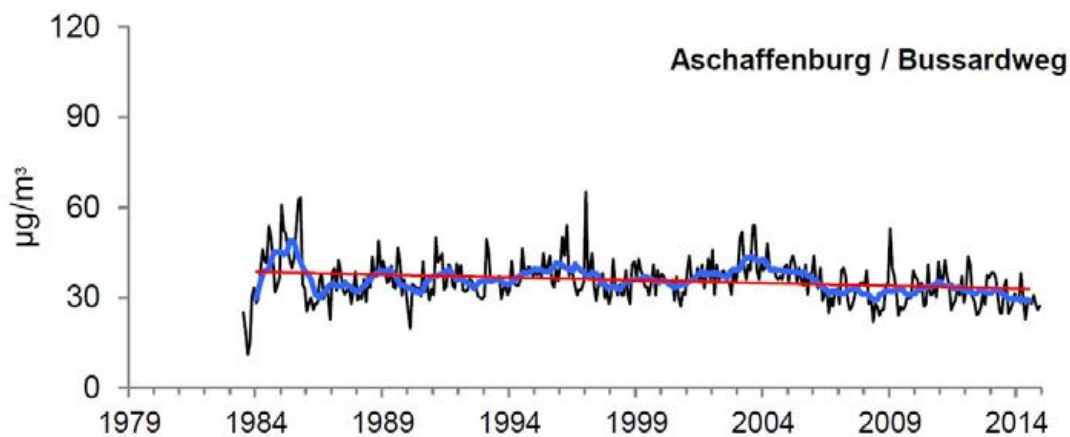


Abb. 10: Langzeitverlauf Stickstoffdioxid (NO₂) in Aschaffenburg (LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015)

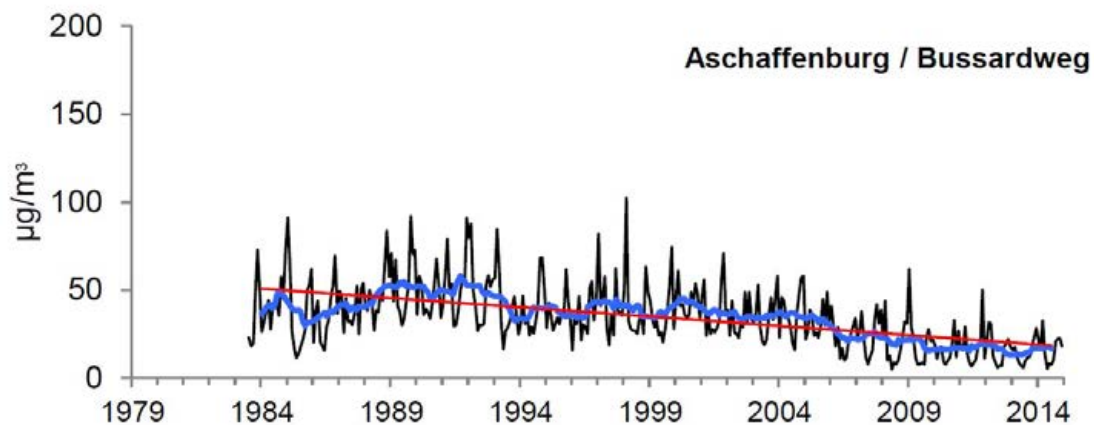


Abb. 11: Langzeitverlauf Stickstoffmonoxid (NO) in Aschaffenburg (LfU 2015)

In Prognoseberechnungen für insgesamt 65 Aschaffener Straßenabschnitte hat der TÜV Süddeutschland für die Jahre 2005 und 2010 festgestellt, dass es bei Feinstäuben und Stickstoffdioxid in einem Teil der Straßenabschnitte zu Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte kommen könnte (Precht und Wegehaupt 2003). Aus diesem Grund hat sich die Stadt Aschaffenburg dazu entschlossen, auf freiwilliger Basis einen „Maßnahmenplan“ zu erstellen, diese Vorgehensweise ist bisher in Bayern einmalig. Der Maßnahmenplan wurde in enger Zusammenarbeit zwischen der Stadt Aschaffenburg, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und der Regierung von Unterfranken erstellt und basiert auf dem Verfahren zur Aufstellung eines Luftreinhalteplanes (Wyrwich 2006).

Die Prognoseberechnungen Bei Stickstoffdioxid ist weiterhin in der Landingstraße eine Überschreitung des Jahresmittelwertes zu befürchten. Dies zeigen Ausbreitungsrechnungen mit den Verkehrszahlen des Verkehrsentwicklungsplanes der Stadt Aschaffenburg für den Prognosehorizont 2010.

Der Bericht des Projektbeirates Luftqualität (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009) macht deutlich, dass die lufthygienische Situation in der Stadt Aschaffenburg nur zu einem Teil durch die direkten Emissionen im Stadtgebiet bestimmt wird. Ein nicht unwesentlicher Anteil ist der regionalen Hintergrundbelastung geschuldet. Abb. 12 zeigt diese Entkopplung recht deutlich. Während die direkten NO_x -Emissionen aus dem Straßenverkehr seit 1990 stetig abnehmen, verzeichnet die LÜB Messstation an der Schweinheimer Straße keine signifikante Verbesserung der Stickoxidbelastung seit 1990, sondern sogar einen Spitzenwert der Immissionswerte im Zeitraum 1997 bis 1999. Im Jahr 2007 liegen die Immissionswerte noch immer auf dem Niveau von 1990 (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009).

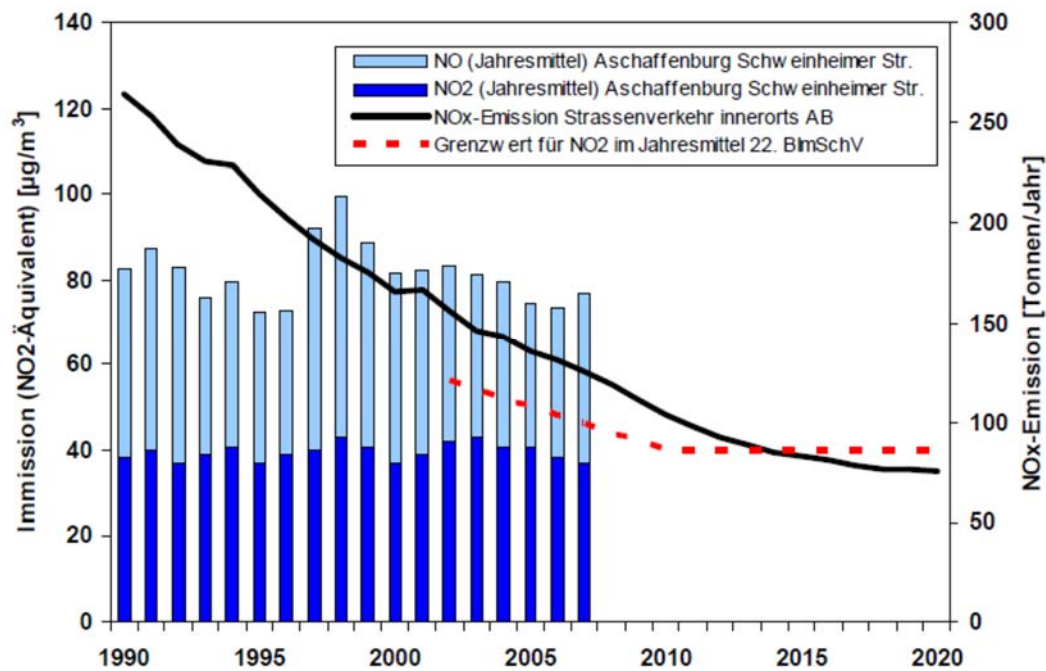


Abb. 12: Emissionen und Immissionen von Stickoxiden in Aschaffenburg (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009)

3.2.4 Ozon

Am Messpunkt Bussardweg nimmt die Ozonbelastung tendenziell zu. Dies steht in Zusammenhang mit der rückläufigen Stickstoffmonoxidbelastung. Es steht weniger Stickstoffmonoxid für einen Ozonabbau zur Verfügung.

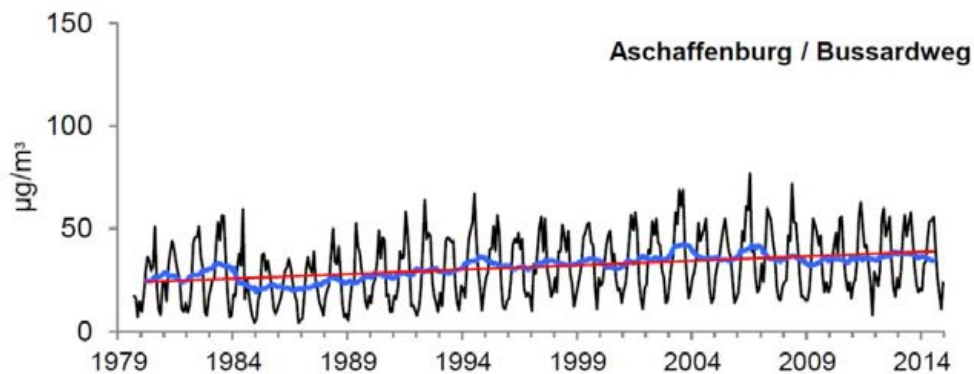


Abb. 13: Langzeitverlauf Ozon (O_3) in Aschaffenburg (LfU 2015)

3.2.5 Staub

Als Staub bezeichnet man feste Teilchen, die abhängig von ihrer Größe in Grob- und Feinstaub unterteilt werden. Als Feinstaub bezeichnet man Staub mit einer Partikelgröße unter $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}). Grobstäube schweben nur relativ kurze Zeit in der Luft, während Feinstäube auch über längere Zeit in der Atmosphäre verbleiben und über größere Strecken transportiert werden können. Staub kann sowohl aus natürlichen (z. B. durch Bodenerosion) oder aber auch aus anthropogenen Quellen, wie z. B. Feuerungs- oder Produktionsanlagen, stammen. Staub ist in Abhängigkeit von Größe und der ihm anhaftenden Stoffe unterschiedlich stark gesundheitsgefährdend. Wesentlichen Anteil am Feinstaub trägt Ruß (elementarer Kohlenstoff), der im Verdacht steht, Krebs zu erzeugen. Die Krebs erzeugende Wirkung geht von den Rußpartikeln und den daran anhaftenden Stoffen aus. Ruß entsteht bei unvollständiger Verbrennung. Die Menge an Grobstaub-Emissionen geht bundesweit stetig zurück, da Staubabscheider in diesen Größenbereichen besonders effektiv arbeiten. Dagegen ist die emittierte Feinstaubmenge nahezu gleich geblieben. Ein besonderes Augenmerk wird bei der Erforschung und Reduzierung auf die Feinstäube mit Partikelgrößen unter $1\text{ }\mu\text{m}$ gelegt, da ihr Anteil deutlich zugenommen hat und inzwischen gesichert ist, dass sie lungengängig sind (Umweltbundesamt 2016). Kritisch ist der Trend zu kleinen Kamin- und Holzöfen zu sehen, die einen vergleichsweise ungünstigen Verbrennungsprozess haben und sowohl bei Kohlenmonoxid, als auch beim Feinstaub zu einer Verschlechterung der Immissionssituation beitragen können.

Nach den Messungen des LfU werden die höchsten Gesamtstaub-Belastungen landesweit an den verkehrsreichen Messpunkten erreicht. Aktuell wird PM_{10} -Feinstaub in Aschaffenburg nicht mehr gemessen. Für die Feinstaubbelastung (PM_{10}) war die Tendenz für die Aschaffenburg Messpunkte bis 2007 rückläufig. Allerdings wird der EU-Grenzwert von $50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ an einigen Tagen überschritten.

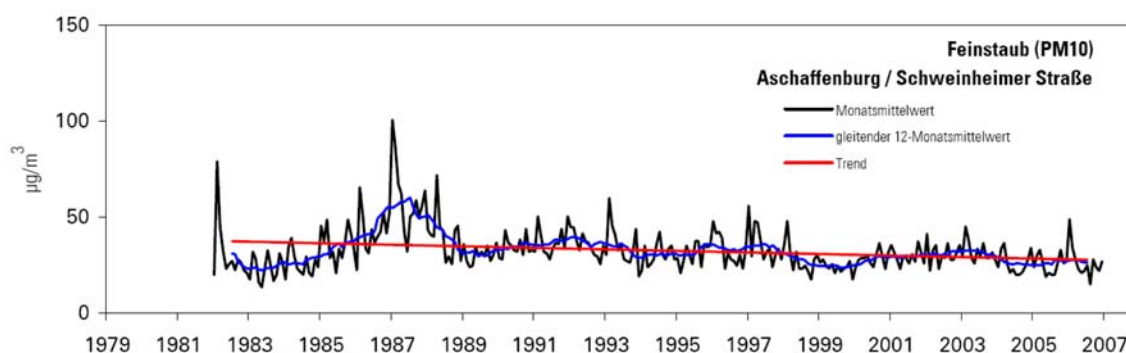


Abb. 14: Langzeitverlauf der Feinstaub (PM_{10})-Konzentration in Aschaffenburg/Schweinheimer Str. (LfU 2009)

An der Messstation Bussardweg wird aktuell nur die Feinstaubfraktion $\text{PM}_{2,5}$ gemessen. Die Jahresmittelwerte lagen in den Jahren 2013 – 2015 bei $13\text{--}15\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Für die Jahre 2015 bis 2019 ist ein Zielwert von $25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ als Jahresmittelwert gefordert (Umweltbundesamt). Folglich wurde der Zielwert in Aschaffenburg unterschritten. Die maximalen Tageswerte für $\text{PM}_{2,5}$ lagen zwischen 45 und $55\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Auch die rechnerische Ermittlung des PM_{10} für den gleichen Zeitraum bleibt mit $17\text{--}20\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ auch unter dem Grenzwert von $40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Schlett 2016).

Ähnlich wie für den Parameter Stickoxide zeigt der Bericht des Projektbeirates Luftqualität (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009), dass die Feinstaubbelastung nicht unwesentlich von überregionalen Einflüssen geprägt wird. Abb. 15 zeigt die Emissions-/ Immissionssituation für den Luftschadstoff Feinstaub PM_{10} . Auch hier wird offensichtlich, dass die deutliche Abnahme der PM_{10} Emissionen aus dem innerörtlichen Straßenverkehr in Aschaffenburg, die vornehmlich auf der Änderung der Emissionsfaktoren beruht, sich nicht im gleichen Maße in der Immissionssituation an den LÜB Messstellen innerhalb der Stadt Aschaffenburg wieder findet. Demnach müssen ein nicht zu vernachlässigender Teil der Immissionen einer regionalen Hintergrundbelastung anzurechnen sein.

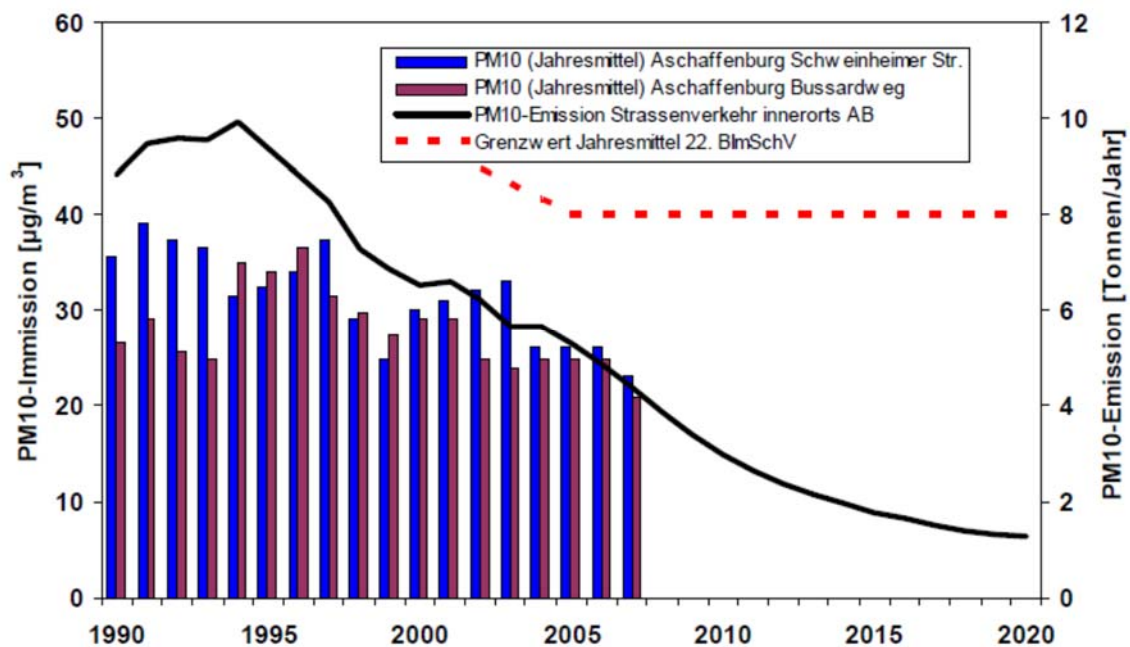


Abb. 15: Emissionen und Immissionen von Feinstaub in Aschaffenburg (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009)

4 FLECHTEN ALS BIOINDIKATOREN

4.1 Biologie

Die Flechte sieht aus wie ein einheitlicher Organismus, besteht aber aus mindestens zwei Individuen verschiedener Artzugehörigkeit: aus Alge und Pilz, die eine sehr enge Verflechtung miteinander eingegangen sind. Sie stehen hinsichtlich ihrer Ernährung in Wechselbeziehung. Die Alge betreibt Photosynthese und gibt die dabei gewonnenen Kohlehydrate an den Pilz ab. Sie wird quasi vom Pilz parasitiert. Der Pilz hingegen umgibt die Alge in der Regel mit Hyphen (Pilzfäden) und bildet einen Schutzmantel.

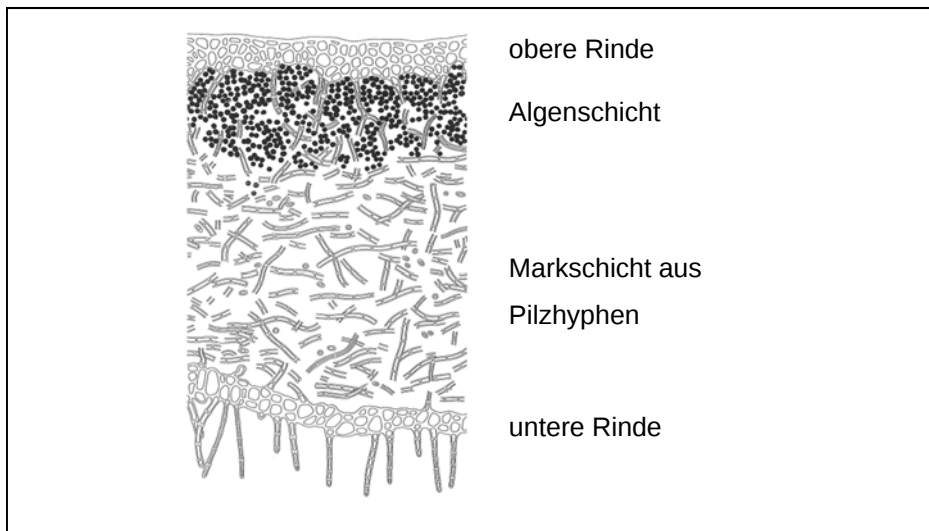


Abb. 16: Schematischer Querschnitt durch eine Blattflechte (Kirschbaum und Wirth 1995), ergänzt

Durch die vorliegende Lebensgemeinschaft können Flechten sich extreme Lebensräume erschließen. Diesem Vorteil steht jedoch eine hohe Empfindlichkeit auf Veränderungen der Umwelt durch den Menschen gegenüber.

4.2 Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen

Flechten sind empfindliche „Messorganismen“, die Umweltveränderungen anzeigen. Sie werden als Bioindikatoren für Luftverunreinigungen eingesetzt. Die hohe Empfindlichkeit der Flechten gegenüber Luftschadstoffen hat mehrere Ursachen:

- Das fein ausbalancierte Stoffwechselgeschehen zwischen Pilz und Alge ist störanfällig.
- Aufgrund der geringen Stoffwechselrate können entstandene Schädigungen nur bedingt regeneriert werden.
- Flechten besitzen keine Spaltöffnungen und können ihren Gasaustausch dadurch nicht regulieren. Sie haben keine schützende Wachsschicht (Cuticula), so dass Schadstoffe ungehindert und ungefiltert über die gesamte Oberfläche in den Flechtenkörper eindringen können.
- Einmal aufgenommene Schadstoffe können nicht wieder abgegeben werden, da Ausscheidungsorgane fehlen. Die Schadstoffe werden akkumuliert.
- Die Stoffwechselaktivität bleibt auch bei niedrigen Temperaturen aufrechterhalten. Phytotoxische Schadstoffe wirken daher auch im Winter, bei erhöhten Emissionen, auf die Flechten ein.

Die hohe Empfindlichkeit der Flechten gegenüber Luftverunreinigungen wurde schon sehr früh erkannt. Als NYLANDER 1866 die epiphytische (rindenbewohnende) Flechtenvegetation von Paris erfasste und die Untersuchung dreißig Jahre später wiederholte, stellte er einen starken Rückgang der Flechten fest, den er auf die Luftverschmutzung zurückführte (Nylander 1866).

Die folgende Abbildung (Abb. 17) veranschaulicht, wie sich der Flechtenbewuchs an Bäumen entsprechend der vorhandenen Luftgüte verändert. Bei sehr hoher Luftbelastung sind an Baumstämmen kaum Flechten zu finden. Unter hoher Belastung siedeln nur wenige Arten an den Stämmen, während bei gering belasteter Luft artenreiche Flechtenbestände vorherrschen.



 sehr hoch belastet  hoch belastet  mäßig belastet  gering belastet

Abb. 17: Flechtenbewuchs an Eschen in verschiedenen Luftgütezonen

Zu Zeiten hoher SO₂-Belastungen war die Wirkung der auf die Flechten einwirkenden SO₂-Konzentrationen der alles überlagernde Faktor. In zahlreichen Veröffentlichungen (z. B. Hawksworth und Rose 1970; Johnsen und Söchting 1973) wurden direkte Zusammenhänge zwischen SO₂-Jahresmittelwerten und dem Flechtenvorkommen hergestellt. SERNANDER prägte den Begriff „Flechtenwüste“, mit dem er das völlige Fehlen von Flechten in hoch belasteten Stadtzentren beschrieb (Sernander 1926).

Effektive Luftreinhaltungsmaßnahmen ab den 80er Jahren in Westdeutschland führten zu kontinuierlich sinkenden SO₂-Belastungen. Die positiven Folgen für die Flechtenvegetation wurden in zahlreichen Arbeiten beschrieben, so für das Land Hessen (Kirschbaum und Hanewald 2001), für das Ruhrgebiet (Stapper et al. 2000), für München (Vorbeck und Windisch 2001), Aschaffenburg (Vorbeck et al. 2009) sowie Gießen und Wetzlar (Kirschbaum et al. 2012).

In jüngster Zeit werden die Auswirkungen nährstoffanreichernder (eutrophierender) Luftschadstoffe – die bis dahin von den sauren Immissionen überdeckt worden waren – immer offensichtlicher: Die Flechtenarten, die an Bäumen mit natürlicherweise saurer Borke vorkommen (Acidophyten), nehmen kontinuierlich ab. Gleichzeitig findet eine drastische Erhöhung von Artenzahl und Frequenz sowohl der Neutrophyten (kommen auf Borken mit neutralem pH-Wert vor) als auch der Nitrophyten statt (zeigen übermäßigen Nährstoffeintrag an). Während die Zunahme der Neutrophyten bessere lufthygienische Bedingungen anzeigt, weist die Zunahme der Nitrophyten auf eine massive Erhöhung der Konzentration eutrophierend wirkender Immissionen hin. Die Umweltrelevanz liegt in den Veränderungen chemischer und biologischer Bodenparameter, die die Vegetation beeinflussen und zu Veränderungen stickstoffempfindlicher Ökosysteme führen können (Stroh und Djeradi 2004).

Die beschriebene Entwicklung machte eine Änderung der Flechtenkartierungsmethode erforderlich. In die Luftgütebewertung mittels der Flechtenkartierung nach der bis 2005 gültigen VDI-Richtlinie 3799 gingen noch alle Flechtenarten mit gleicher Wertung ein. Dies ist heute nicht mehr praktikabel, da die enormen Zuwächse der Eutrophierungszeiger fälschlicherweise zu hohen Luftgütewerten führen würden. Daher wurde die Methode der Flechtenkartierung durch den VDI an die neuen lufthygienischen Bedingungen adaptiert (VDI 3957 Blatt 13 2005).

4.3 Wirkungen verkehrsbedingter Immissionen

Emissionen von Luftschadstoffen aus dem Straßenverkehr liefern einen Beitrag zur Anreicherung der Luft und des Bodens mit Schadstoffen und pflanzenverfügbaren Nährstoffen. Entlang von Straßen werden höhere Stickstoffoxid- und Feinstaubkonzentrationen gemessen als im städtischen Hintergrund (Abb. 18).

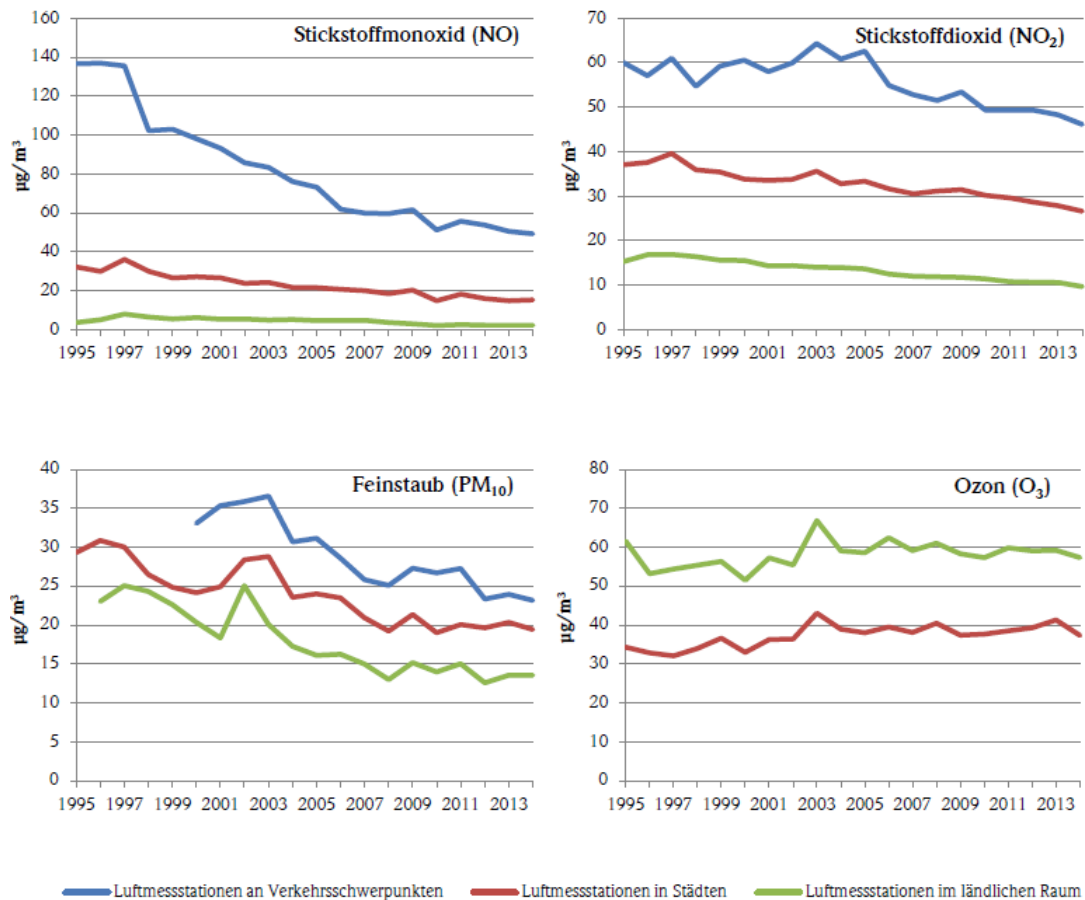


Abb. 18: Zeitreihen der Jahresmittelwerte von 1995 bis 2014 aller Luftmessstationen in Hessen; gemittelt wurden die Werte der Stationen gleichen Charakters (Verkehrsschwerpunkte, Städte, ländlicher Raum); (HLUG 2015)

4.3.1 Stickstoffverbindungen

Inwieweit verkehrsbedingte stickstoffhaltige Emissionen des Straßenverkehrs auf die Zusammensetzung der Flechten wirken, ist im Stadtklima-Biomonitoring-Projekt von WINDISCH zusammenfassend dargestellt (Windisch 2016):

„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 verkehrsnahe 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. 19). 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 Vergleichsstandorten ohne Verkehrseinfluss unter 1,5 % lag. (Windisch et al. 2016).“

Damit spielt in Städten der Straßenverkehr kleinräumig entlang der Verkehrsachsen als Emittent pflanzenverfügbaren Stickstoffs eine wichtige Rolle. Die chemischen Folgeprodukte aus dem Verkehr werden von den Flechten aufgenommen und haben einen düngenden Effekt.

4.3.2 Stäube

Nach ENDLICHER sind städtische 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.

Zu den Emittenten von Stäuben gehört der Straßenverkehr. Neben Stickstoffoxiden und anderen gasförmigen Emissionen werden Dieselruß und Staub von den Kraftfahrzeugen freigesetzt. Die Zusammensetzung und Größe der Staubteilchen ist variabel.

Eine Beeinflussung von Flechten durch Staub ist auf drei Wegen möglich:

1. Erhöhung des Borken-pH-Wertes:

Es ist davon auszugehen, dass städtischer Staub einen vergleichsweise hohen pH-Wert aufweist. An staubimprägnierten Bäumen ist mit einer Verschiebung des Artenspektrums hin zu den Neutrophyten zu rechnen.

2. Speicherung von Nährstoffen in Stäuben:

Wie oben erläutert kann der Anteil an Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat in

Feinstäuben hoch sein (bis zu 50 % nach einer Untersuchung von Dämmgen et al. (Dämmgen et al. 2010).

3. Akkumulation von Schwermetallen:

Schwermetalle aus Stäuben werden von Flechten akkumuliert. Zwischen der Konzentrationsabnahme vieler Schwermetalle in den Flechten und der Zunahme der Entfernung von der Emissionsquelle besteht eine lineare Beziehung (Nieboer et al. 1978; Richardson und Nieboer 1981). Die Toxizität der Schwermetalle gegenüber Flechten hängt von der Flechtenart, der Art und Konzentration des Metalls in der Flechte ab (Puckett 1976; Rao et al. 1977). Als toxisch wirksam werden Ag^+ , Cu^+ , Hg^+ bezeichnet, kaum toxisch wirksam sind K^+ und Sr^+ , zwischen den genannten Kategorien liegen Zn^{2+} , Ni^{2+} und Pb^{2+} (Nieboer et al. 1978) (Nieboer et al. 1978). Garty et al. konnten bereits nach einer 45-tägigen Exposition von Flechten an verkehrsbelasteten Straßen die Aufnahme von Schwermetallen, darunter Blei, in die Thalli messen (Garty et al. 1996).

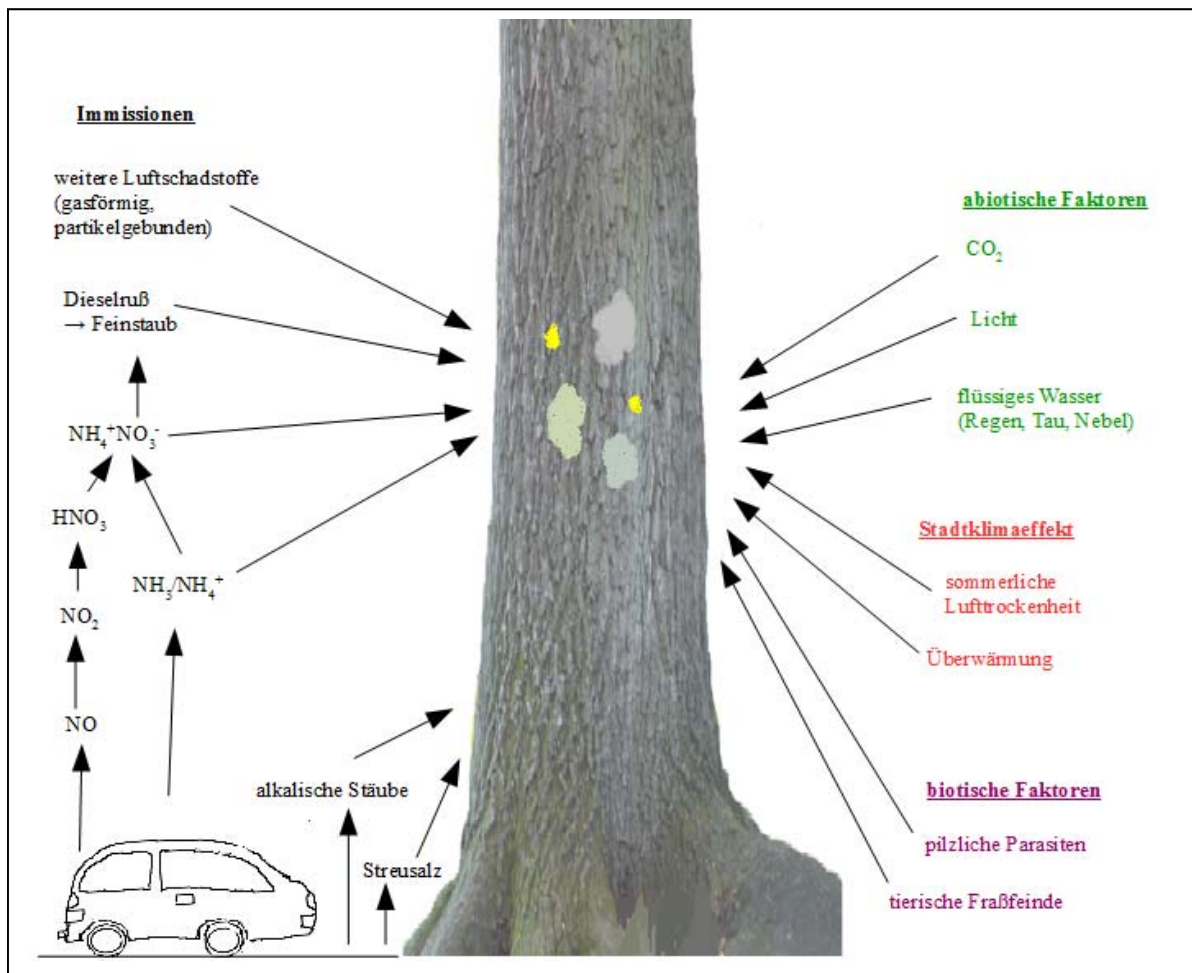


Abb. 19: Einflussfaktoren auf epiphytische Flechten in Städten

4.4 Bioindikation des Klimawandels

Seit etwa 10-15 Jahren wird in den westlicher gelegenen Bundesländern Deutschlands eine Ausbreitung oder sogar Neubesiedelung bestimmter Flechtenarten dokumentiert. Es handelt sich um Arten, die charakteristisch für milde, ozeanische oder warme Klimagebiete sind. Die Arten waren zuvor in Deutschland auf wenige klimatisch begünstigte Räume beschränkt oder überhaupt noch nicht bekannt. Ihre Arealerweiterung erfolgt von Westen und Süden her. Gleichzeitig kommen kühleanzeigende Flechtenarten seltener vor (VDI 3957 Blatt 20 2016; van Herk et al. 2002).

Als Erklärung für diese Arealverschiebungen wird die Veränderung des Klimas in den letzten Jahrzehnten angenommen (VDI 3957 Blatt 20 2016). Als ganzjährig aktive und wechselfeuchte Organismen sind Flechten sensitive Modell- und Frühwarnsysteme für klimatische Veränderungen. Dabei ist zu bedenken, dass klimatische Veränderungen sich auch im Winter vollziehen, wobei geringere winterliche Erwärmungen sich stärker auswirken können als entsprechende höhere im Sommer (IPCC Working Group 2013).

Aus den Erkenntnissen der letzten drei Jahrzehnte erstellte eine Arbeitsgruppe des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) eine Liste der „Klimawandelzeiger“ unter den Flechtenarten (vgl. Tab. 4). Neuere Arbeiten zeigen, dass diese Arten in landesweiten Flechtenkartierungen in Hessen zwischen den Jahren 2007 und 2012 (Windisch et al. 2014) und in Bayern zwischen 1996 und 2011 in den jeweils wärmeren Gebieten beider Länder deutlich häufiger wurden (Windisch et al. 2011). In Bayern wurden die epiphytischen Flechten am Mittelstamm von Bäumen nach einer standardisierten Methode des VDI aufgenommen. Untersucht wurden 25 Stellen in verschiedenen Naturräumen, Klimaregionen und Landesteilen Bayerns. Es wurde ein Klimawandelindex (KWI) berechnet und dargestellt (Abb. 20). Ein KWI von 1 bedeutet, dass durchschnittlich eine Klimawandelzeiger-Art pro Baum angetroffen wurde.

Die Region Untermain erwies sich im Landesvergleich als Region mit der stärksten Zunahme von Klimawandel anzeigenden Flechtenarten.

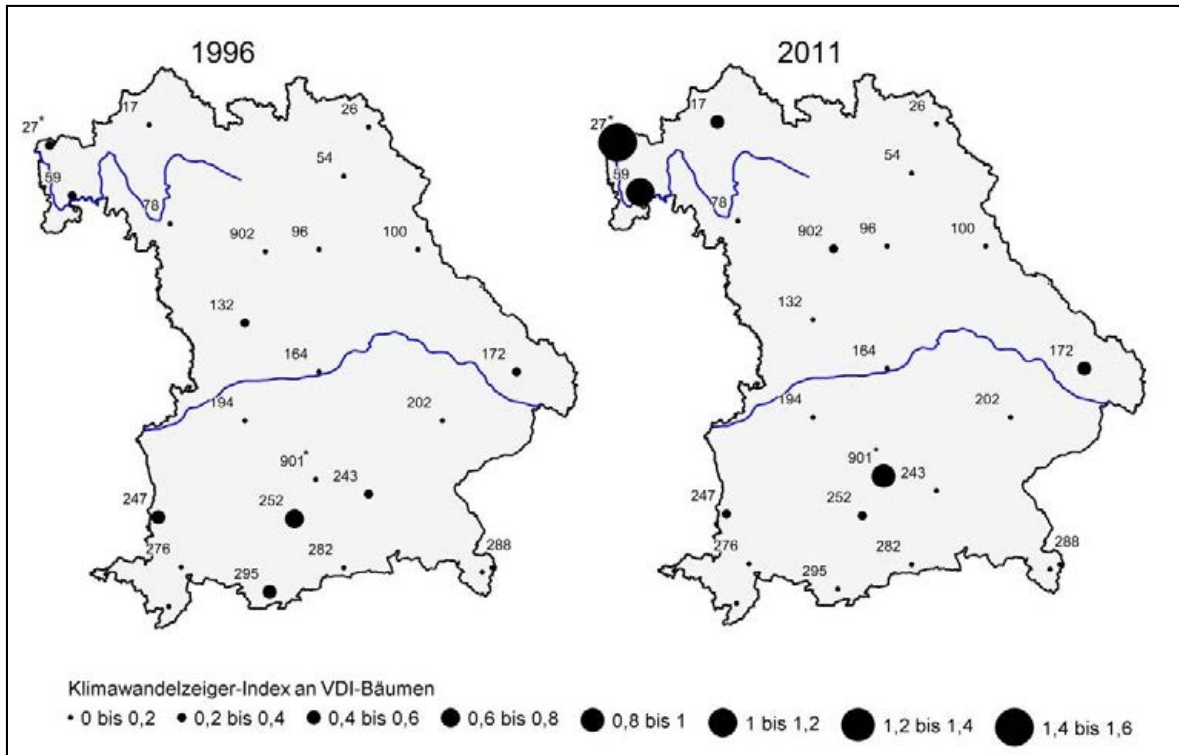


Abb. 20: Klimawandelzeigerindex (KWI) an 25 Messflächen des Untersuchungsgebietes Bayern im Jahr 1996 und 2011 (Zahlen in der Karte: Nummer der Messfläche; * signifikante Änderung, $p < 0,05$) Daten aus (Windisch et al. 2011), ergänzt in (VDI 3957 Blatt 20 2016)

Die Daten aus der langjährigen Dauerbeobachtung in Hessen liefern weitere Informationen zu Gebieten in räumlicher Nähe zu Aschaffenburg (Windisch et al. 2014). Eine Auswertung von Flechtendaten im Sinne des Klimawandel-Bio-monitorings erfolgte weitgehend der neuen VDI-Richtlinie (VDI 3957 Blatt 20 2016).

Die zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Klimawandelzeigern in den hessischen Untersuchungsgebieten ist in Abb. 21 dargestellt. Von 1992 bis 2007 konnten keine signifikanten Veränderungen in den Beständen der als Klimawandelzeiger ausgewiesenen Flechtenarten nachgewiesen werden. Dies änderte sich in den darauf folgenden fünf Jahren bis 2012: An allen Untersuchungsflächen wurden Klimawandelzeiger häufiger. Insbesondere in einem der wärmsten Gebiete Südhessens, am Frankfurter Flughafen, zeigte sich ein sprunghafter Anstieg dieser Arten. Dieser Anstieg zeigt an, dass in der Umgebung des Flughafens (z. B. Mörfelden-Walldorf, 50 km von Aschaffenburg) zunehmend Arten milder, ozeanischer oder warmer Klimagebiete gedeihen.

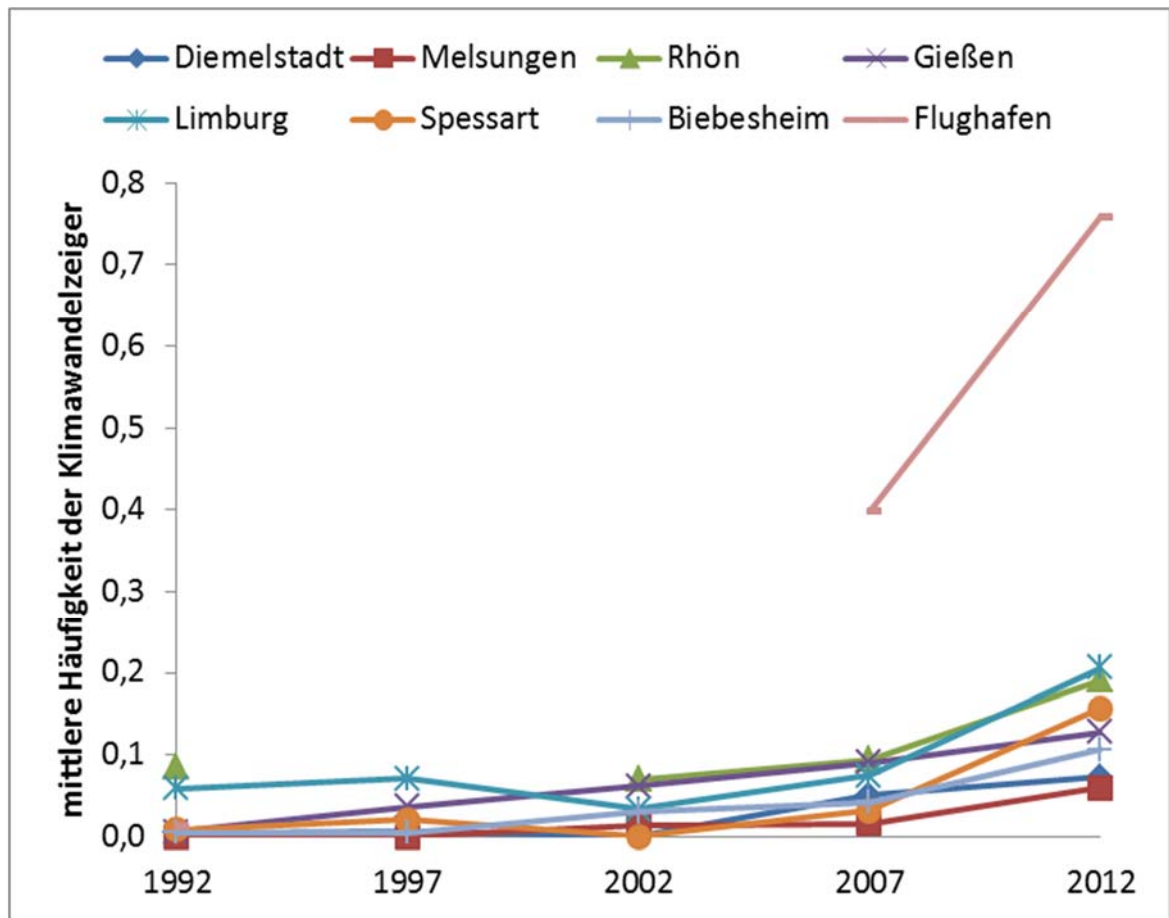


Abb. 21: Entwicklung der mittleren Häufigkeit der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) von 1992 – 2012 im Messgitter standardisierter Trägerbäume; die Untersuchungsfläche Flughafen wurde 1992 (Wert: 0,01), 2007 und 2012 kartiert; die DBF Rhön wurde 1997 nicht untersucht

Als Anwendungsbereiche des Klimawandel-Biomonitorings mit Flechten nennt die Richtlinie des VDI unter anderen (VDI 3957 Blatt 20 2016):

- „den Nachweis, die Bewertung und die Dokumentation von Wirkungen des Klimawandels auf die belebte Umwelt in einem konkreten lokalen oder regionalen Bereich
- die Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit kommunaler oder regionaler Behörden durch das Aufzeigen eines allgemeinen Bedarfs an klimaschonendem Verhalten und an Maßnahmen zum Klimaschutz“

5 METHODEN

5.1 Vergleichbarkeit der Daten aus den Erhebungen 1991 bis 2015

Die Stadt Aschaffenburg führt seit nunmehr 25 Jahren regelmäßige Luftgüteuntersuchungen mittels Flechtenkartierung durch. Aufgrund neuer methodischer Erkenntnisse und neuer Schadstoffzusammensetzung der Luft wechselten die gängigen Methoden in diesem Zeitraum zweimal. Es folgt eine Übersicht:

- **Flechtenkartierung 1991**
Erste Luftgüteuntersuchung durch WIEGEL ET AL. nach der LuGI-Methode (Wiegel et al. 1991).
- **Flechtenkartierung 1997**
Kartierungen durch RABE, ebenfalls nach der LuGI-Methode (Rabe 1997).
- **Flechtenkartierung 2002**
Untersuchung durch das BÜRO FRAXINUS GbR, nach der VDI-Richtlinie 3799 Blatt 1. Die Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure wurde 1995 veröffentlicht (Vorbeck und Windisch 2002b; VDI 3799 Blatt 1 1995).
- **Flechtenkartierung 2009**
Kartierung und Auswertung durch das BÜRO FRAXINUS GbR, nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, die 2005 erschienen war und bis heute gültig ist (Vorbeck et al. 2009; VDI 3957 Blatt 13 2005).

Die Rohdaten aus der nach beiden VDI-Richtlinien standardisierten Datenerhebung sind kompatibel. Daher können die Daten der Untersuchungen 2002, 2009 und 2015 gemeinsam ausgewertet werden. Die früher erhobenen Daten lassen sich in der vorliegenden Arbeit nicht auswerten, da die Rohdaten nicht vollständig vorliegen.

Die Arten *Candelariella reflexa/xanthostigma* und *Physcia adscendens/tenella* wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit analog zu den alten Daten für die Berechnung des Luftgüteindex zu Gruppen zusammengefasst. Für alle Untersuchungsjahre wurden alle erfassten Flechtenarten in die Berechnung des Luftgüteindex mit einbezogen.

5.2 Luftgüteuntersuchung

Für die flächendeckende Erfassung der lufthygienischen Situation wurde die Methode der Flechtenkartierung nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 angewendet (VDI 3957 Blatt 13 2005). Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse sowohl auf Luftgütegradienten im Untersuchungsgebiet als auch auf die Wirkungen eutrophierender Luftverunreinigungen zu.

5.2.1 Messnetz

Da es ein Ziel der Arbeit ist, die langfristige lufthygienische Entwicklung darzustellen, wurden die Messflächen aus den letzten Kartierungen so weit wie möglich beibehalten. Waren es in den Voruntersuchungen noch 66 Messflächen, so wurde in der aktuellen Arbeit die Zahl der Messflächen auf 44 reduziert. Dabei sollten die Messflächen das Stadtgebiet möglichst vollständig abdecken und für eine möglichst große Fläche repräsentativ sein. Eine Karte der Messflächen befindet sich im Anhang.

Es wurden die Trägerbäume aus den Vorkartierungen erneut untersucht. Wenn sich bei den Geländearbeiten herausstellte, dass die Trägerbäume nicht mehr vorhanden oder mittlerweile nicht mehr geeignet waren, wurden wenn möglich nahe gelegene Ersatzbäume ausgewiesen. Die betreffenden Messflächen wurden mit dem Suffix „a“ bzw „b“ gekennzeichnet.

Für jede Messfläche wurde eine Lagebeschreibung der Trägerbäume angefertigt, damit die Bäume bei einer Folgekartierung wieder gefunden werden können. Pro Messfläche wurden 5-10 Trägerbäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht.

5.2.2 Trägerbäume

Um mit Hilfe der Flechtenvegetation den Faktor Luftverunreinigung so genau wie möglich bestimmen zu können, ist es nötig, alle anderen Einflussfaktoren so konstant wie möglich zu halten. Deshalb soll nur die Flechtenvegetation solcher Baumarten gemeinsam kartiert werden, die vergleichbare Borkeneigenschaften aufweisen. Die Baumarten werden deshalb entsprechend ihres Borken-pH-Wertes in Gruppen eingeteilt (Tab. 01). Bäume innerhalb einer Gruppe gelten als vergleichbar und können gemeinsam kartiert werden.

In der vorliegenden Kartierung wurden die Baumarten der Gruppe 1 gewählt. Die Baumartenverteilung zeigt Tab. 02.

Tab. 01: Baumartengruppen nach VDI 3957 Blatt 13, mit Baumumfang in cm (VDI 3957 Blatt 13 2005)

Gruppe 1 Baumrinden unter natürlichen Verhältnissen subneutral	Gruppe 2 Baumrinden unter natürlichen Verhältnissen +/- sauer
Spitzahorn (<i>Acer platanoides</i>) (70 bis 280)	Schwarz-Erle (<i>Alnus glutinosa</i>) (70 bis 280)
Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>) (70 bis 280)	Hänge-Birke (<i>Betula pendula</i>) (70 bis 280)
Ulme (<i>Ulmus spec.</i>) (70 bis 280)	Kirsche (<i>Prunus avium</i>) (70 bis 280)
Walnussbaum (<i>Juglans regia</i>) (70 bis 280)	Zwetschge (<i>Prunus domestica</i>) (70 bis 160)
Manna-Esche (<i>Fraxinus ornus</i>) (70 bis 280)	Stiel-Eiche (<i>Quercus robur</i>) (70 bis 280)
Hybrid-Pappel (<i>Populus x canadensis</i>) (70 bis 280)	Trauben-Eiche (<i>Quercus petraea</i>) (70 bis 280)
Bergahorn (<i>Acer pseudoplatanus</i>) (70 bis 280)	Birnbaum (<i>Pyrus communis</i>) (70 bis 160)
Apfelbaum (<i>Malus spec.</i>) (70 bis 160)	Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>) (70 bis 280)
Birnbaum (<i>Pyrus communis</i>) 70 bis 160)	Sommerlinde (<i>Tilia platyphyllos</i>) (70 bis 280)
Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>) (70 bis 280)	
Sommerlinde (<i>Tilia platyphyllos</i>) (70 bis 280)	

Tab. 02: Anteile der Baumarten an den kartierten Trägerbäumen an 44 Messflächen

Name	Wissensch. Name	Anzahl
Spitzahorn	<i>Acer platanoides</i>	126
Linde	<i>Tilia cordata/platyphyllos</i>	86
Bergahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>	18
Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	17
Pappel	<i>Populus spec.</i>	15
Apfelbaum	<i>Malus spec.</i>	8
Birnbaum	<i>Pyrus communis</i>	3
Sonstige		4

5.2.3 Erfassung der Flechten

Um die Daten mit denen der letzten Kartierungen vergleichen zu können, kam das auch damals verwendete Aufnahmegitter zum Einsatz (VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005).

Zur Erfassung der Flechten wurde das Gitter mit 10 Gitterfeldern (je 10 x 10 cm) an der am stärksten bewachsenen Stammseite angelegt (Abb. 22). Für jede vorgefundene Flechtenart wurde notiert, in wie vielen der 10 Felder des Gitters die Art vorkommt (Frequenz). War eine Identifikation der Flechten vor Ort nicht sicher möglich, wurden unter Schonung des Bestandes Proben genommen und im Labor bestimmt. Als Bestimmungsliteratur diente das Werk von Wirth et al (Wirth et al. 2013).

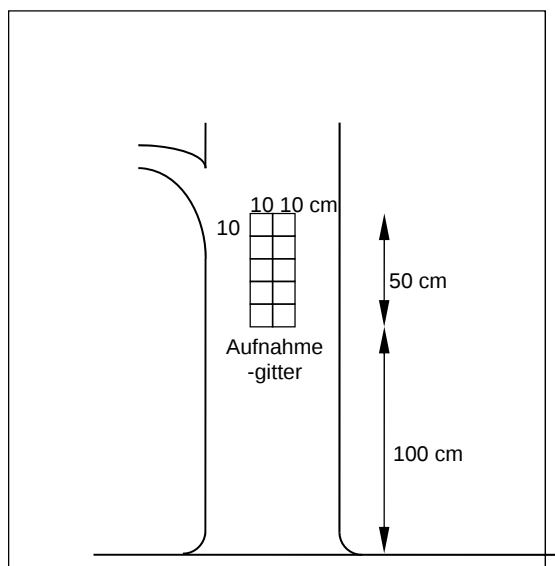


Abb. 22: Flechtaufnahmegitter am Baum (nach VDI 3957 Blatt 13, Anhang A) (VDI 3957 Blatt 13 2005)

5.2.4 Berechnung der Luftgüteindizes (LGI)

Das Datenmaterial wurde in eine EDV-Datenbank eingegeben. Aus der Anzahl der im Aufnahmegitter vorhandenen Arten und deren Häufigkeit wurden zunächst Flechten-Diversitätswerte (FDW) errechnet. Die FDW wurden für die Eutrophierung anzeigenden Arten (Eutrophierungszeiger) und für die übrigen Arten (Referenzarten) getrennt berechnet. Eutrophierungszeiger sind die in der folgenden Tabelle genannten Arten. Die Einschätzung der Arten als Eutrophierungszeiger basiert auf den Zeigerwerten für Flechten (Wirth 2001) um ökologische Kennzahlen für Flechten ergänzt wurde. In einer neunstufigen Skala werden dabei die Ansprüche der Arten gegenüber wichtigen ökologischen Faktoren wie Temperatur, Feuchte, Nährstoffangebot und pH-Wert ausgedrückt.

Tab. 03: Liste der Eutrophierungszeiger nach VDI-RICHTLINIE 3957 (ergänzt)(VDI 3957 Blatt 13 2005)

Flechtenart	N	
<i>Caloplaca citrina</i>	9	
<i>Caloplaca holocarpa</i>	7	
<i>Lecanora dispersa</i>	6	
<i>Lecanora hagenii</i>	6	
<i>Lecanora muralis</i>	8	
<i>Phaeophyscia nigricans</i>	7	Nährstoffzahl ELLENBERG (WIRTH 2001)
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	7	N = 5: „Rinde mineralreich oder mäßig mit nährstoffreichem Staub imprägniert“
<i>Physcia adscendens</i>	6	
<i>Physcia caesia</i>	8	N = 6: „zwischen 5 und 7“
<i>Physcia dubia</i>	7	N = 7: „nährstoffreiche Habitats, häufige Staubimprägnierung oder mäßige Düngung durch Tiere“
<i>Physcia tenella</i>	6	
<i>Physconia distorta</i>	6	
<i>Physconia grisea</i>	7	N = 8: „ausgeprägte Düngung durch Tiere, starke Staubbelastung tolerierend“
<i>Rinodina spec.</i>	6	
<i>Xanthoria candelaria</i>	7	N = 9: „extrem düngungstolerant“
<i>Xanthoria parietina</i>	6	
<i>Xanthoria polycarpa</i>	6	

Für die ermittelten FDW können in der Bewertungsmatrix (Abb. 23) die entsprechenden Luftgüteindizes (LGI), zum Beispiel „4.2“, ausgelesen werden. Für jede Messfläche wurde ein LGI ermittelt.

5.2.5 Bewertung der Luftgüteindizes (LGI)

Die Bewertung des LGI ist in Abb. 23 und Abb. 24 erläutert. Der Luftgüteindex repräsentiert die Belastung durch saure und eutrophierende Luftverunreinigungen. Der Index setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit einer Farbe gekoppelt, die zweite Ziffer symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern. Dabei wird die Luftgüte verbal mit „sehr hoch - hoch - mäßig - gering - sehr gering“ bewertet und mit der entsprechenden Farbe in der Luftgütekarte gekennzeichnet.

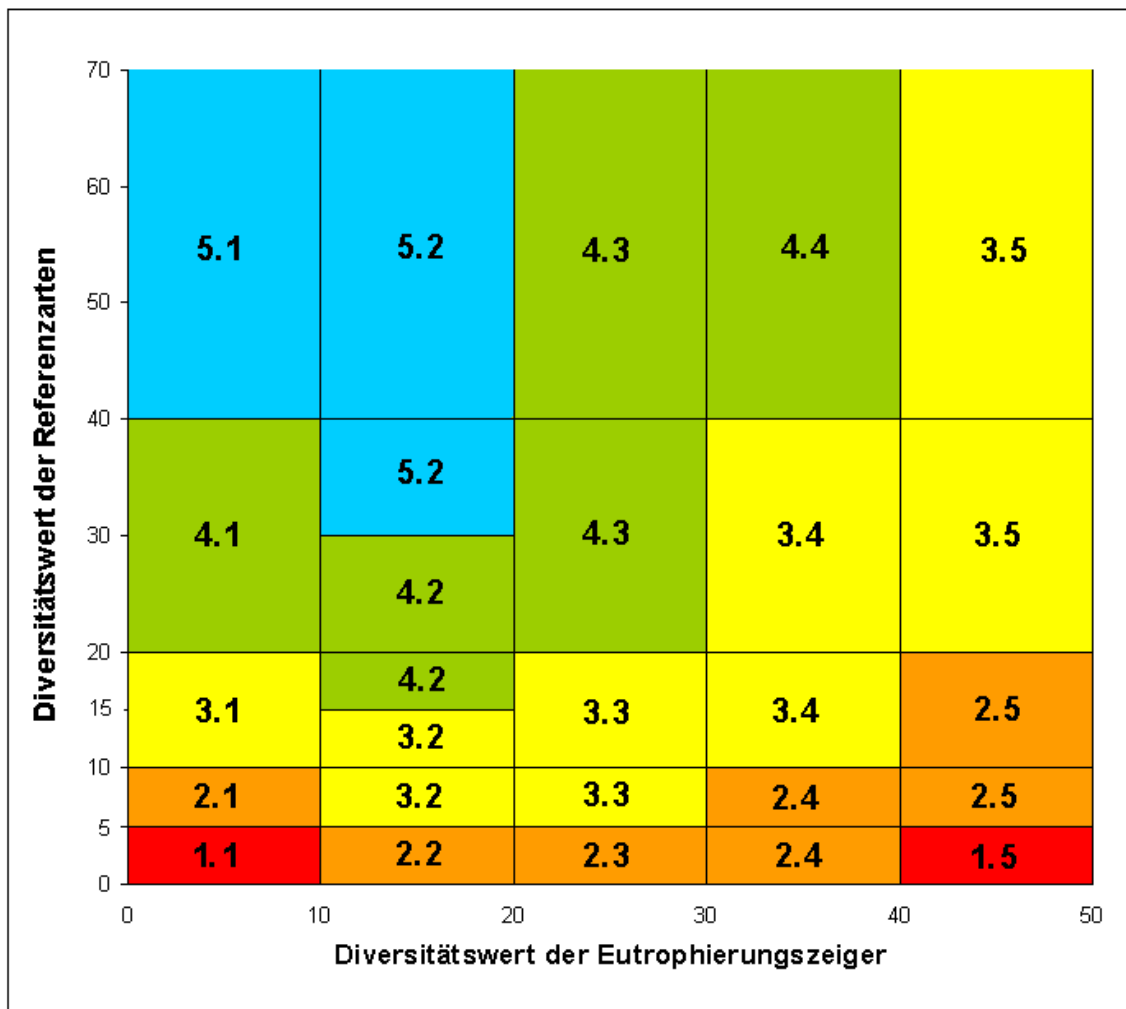


Abb. 23: Bewertungsmatrix zur Ermittlung des Luftgüteindexes anhand der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der übrigen Arten (Datenerhebung mit dem Aufnahmegerät der VDI 3799); aus: (VDI 3957 Blatt 13 2005)

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe			Bewertung eutrophierender Luftschadstoffe
5	sehr gute Luftgüte	5	sehr starker Einfluss eutrophierender Verbindungen
4	hohe Luftgüte	4	starker Einfluss eutrophierender Verbindungen
3	mittlere Luftgüte	3	mittlerer Einfluss eutrophierender Verbindungen
2	geringe Luftgüte	2	geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen
1	sehr geringe Luftgüte	1	sehr geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen
Folgende Beispiele erläutern die verbale Beschreibung des Luftgüteindex: • Luftgüteindex 1.1: Sehr geringe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen • Luftgüteindex 1.5: Sehr geringe Luftgüte bei sehr starkem Einfluss eutrophierender Verbindungen • Luftgüteindex 5.1: Sehr hohe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen.			

Abb. 24: Erläuterung zur Bewertungsmatrix

5.3 Klimawandel-Biomonitoring

Zum Klimawandel-Biomonitoring besteht seit 2016 erstmalig eine Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 3957 Blatt 20 2016). In der vorliegenden Arbeit wird die Richtlinie angewendet. Zur Berechnung der Ergebnisse werden die für das Luftgütemonitoring erhobenen Flechtendaten (Frequenz) verwendet. Bei den Frequenzwerten handelt es sich um quantitative Angaben.

Zunächst wird für jeden kartierten Baum ein Diversitätswert der Klimawandelzeiger ($FDW_{KWZ(B)}$) berechnet:

$$FDW_{KWZ(B)} = \text{Frequenzsumme aller Klimawandelzeiger eines Baumes}$$

Als Klimawandelzeiger gelten alle Arten, die in Tab. 4 aufgeführt sind.

Der Diversitätswert der Klimawandelzeiger einer Messfläche (j), abgekürzt $FDW_{KWZ(j)}$, ist das arithmetische Mittel des $FDW_{KWZ(B)}$ für sämtliche Bäume innerhalb der Messfläche:

$$FDW_{KWZ(j)} = (FDW_{KWZ(B1)} + FDW_{KWZ(B2)} + FDW_{KWZ(B3)} + \dots + FDW_{KWZ(Bn)}) / n$$

Die Anzahl der an der Messfläche untersuchten Bäume wird als n bezeichnet.

Verändert der FDW_{KWZ} sich im Laufe der Zeit signifikant, werden klimabedingte biologische Wirkungen angenommen.



Abb. 25: Der Klimawandelzeiger *Flavoparmelia caperata*

Tab. 4: Liste der Klimawandelzeiger (VDI 3957 Blatt 20 2016)

<i>Arthonia pruinata*</i>	<i>Nephroma laevigatum</i>
<i>Arthonia ruana</i>	<i>Opegrapha ochrocheila</i>
<i>Bacidina neosquamulosa</i>	<i>Opegrapha vermicellifera</i>
<i>Bactrospora dryina</i>	<i>Parmelina quercina</i>
<i>Coniocarpon cinnabarinum</i>	<i>Parmelia submontana</i>
<i>Collema fasciculare</i>	<i>Parmotrema perlatum</i>
<i>Degelia plumbea</i>	<i>Parmotrema pseudoreticulatum*</i>
<i>Diploicia canescens</i>	<i>Parmotrema reticulatum</i>
<i>Fellhanera bouteillei</i>	<i>Pertusaria hymenea</i>
<i>Flavoparmelia caperata</i>	<i>Pertusaria trachythallina</i>
<i>Flavoparmelia soledians</i>	<i>Phaeographis inusta</i>
<i>Fuscidea lightfootii*</i>	<i>Physcia tribacioides*</i>
<i>Graphis elegans*</i>	<i>Porina leptalea</i>
<i>Halecania viridescens</i>	<i>Punctelia borreri</i>
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>	<i>Punctelia jeckeri</i>
<i>Hypotrachyna laevigata</i>	<i>Punctelia subrudecta</i>
<i>Hypotrachyna revoluta</i>	<i>Pyrenula nitida</i>
<i>Lecanographa amylacea</i>	<i>Pyrenula nitidella</i>
<i>Lecanora hybocarpa*</i>	<i>Ropalospora viridis</i>
<i>Melanohalea elegantula</i>	<i>Schismatomma decolorans</i>
<i>Melanohalea laciniatula</i>	<i>Thelotrema lepadinum</i>
<i>Micarea adnata</i>	<i>Usnea florida</i>
<i>Micarea viridileprosa*</i>	

*Arten ohne Zeigerwert nach WIRTH (Wirth 2010)

6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die vorliegende Arbeit liefert Aussagen zur Entwicklung der Luftgüte und des Klimawandels in Aschaffenburg für 44 untersuchte Messflächen (Tab. 5).

Tab. 5: Statistische Daten des Projektes

Untersuchungsgebiet	Stadt Aschaffenburg
kartierte Baumartengruppe	Gruppe 1 Baumrinden unter natürlichen Verhältnissen subneutral
Anzahl der untersuchten Messflächen	44
Anzahl der kartierten Bäume	279
mittlere Anzahl kartierter Bäume pro Messfläche	6,34

6.1 Aktuelle Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13

Das zentrale Ergebnis der Flechtenkartierung ist die Luftgütekarte (S.37). Die Luftgütekarte stellt die klimatisch-lufthygienische Situation des Untersuchungsgebietes anhand der ermittelten Luftgüteindizes dar. Sie integriert die Immissionsbelastung und die lokalklimatischen Bedingungen vor Ort. Die Luftgütekarte stellt keine absoluten Werte dar, sondern verdeutlicht die Abstufung der Luftgüte innerhalb des Gebietes. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Flechtenvegetation mit einer zeitlichen Verzögerung von mindestens ca. 2-3 Jahren auf die Verbesserung der Immissionsverhältnisse reagiert. Eine Verschlechterung der Luftqualität wird dagegen unmittelbar angezeigt.

In der Luftgütekarte auf Seite 37 sind die Luftgüteindizes für die einzelnen Messflächen als farbige Punkte dargestellt. Die Messflächennummern können dem Anhang entnommen werden. Um ein flächendeckendes Bild der Immissionsbelastung zu erhalten, wurden die Luftgüteindizes für die gesamte Stadtfläche interpoliert und in der Luftgütekarte dargestellt.

Im Stadtgebiet ist die Spanne von geringer Luftgüte (orange) bis hin zu sehr hoher Luftgüte (blau) vertreten. Sehr geringe Luftgüte (rot) wurde nicht festgestellt. Geringe (orange) und mittlere Luftgüte (gelb) kommen vor allem in der Innenstadt und den Stadtteilen Nilkheim, Strietwald und Damm, sowie dem Westteil von Obernau vor. Die Stadtteile Schweinheim, der Ostteil von Obernau sowie der Ostteil der Kernstadt weisen eine hohe Luftgüte (grün) auf. Noch günstiger stellt sich die lufthygienische Situation in den etwas höher gelegenen unbebauten Gebieten nördlich und südlich sowie auch östlich Aschaffenburgs dar (blau).

Im bebauten Stadtgebiet wirkt sich eine hohe Dichte an Emittenten, insbesondere der Verkehr und der Hausbrand, ungünstig auf die Luftqualität aus.

Die Tallagen sind zudem durch Inversionswetterlagen belastet. Es wirkt sich weiterhin nachteilig aus, dass hier lokale Windsysteme meist nur bis an den Stadtrand wirksam sind. Diese werden durch die umgebende Bebauung weitgehend abgeschirmt. Zudem ist davon auszugehen, dass diese Messflächen mit ihrer hohen Bebauungsdichte und dem hohen Versiegelungsgrad typische Stadtklimaeffekte aufweisen. Die mikroklimatischen Faktoren wirken sowohl direkt als auch indirekt. So führt der verringerte Luftaustausch im Stadtzentrum zu einer Schadstoffanreicherung. Die Aufheizung durch Abwärme-Emissionen, verbunden mit geringer nächtlicher Abkühlung und reduziertem Taufall, sowie die verringerte relative Luftfeuchte stellen Umweltfaktoren dar, die sich zusätzlich zur Schadstoffbelastung ungünstig auf das Flechtenwachstum auswirken (Wiegel et al. 1991).

Wie schon 2009 weisen die Messflächen 29 und 61 eine geringe Luftgüte (orange) auf. Messfläche 29 ist der Parkplatz an der Suicardusstraße am Main. Dort wirken durch den unbefestigten Parkplatz hohe Staubkonzentrationen auf die Flechten ein. Messfläche 61 befindet sich in der Schillerstraße. In der dicht bebauten Straße kommt hohe Verkehrsbelastung mit ungünstigen Belüftungsverhältnissen zusammen.

Die Messflächen an den stark befahrenen Ausfallstraßen an der Würzburger Straße (Messfläche 64) und der Ludwigsallee (Messfläche 36) weisen eine mittlere Luftgüte (gelb) auf. Beide Messflächen sind verkehrsbedingt stärker belastet als die benachbarten Flächen im Osten der Stadt.

Luftgütekarte

Erhebung 2015 nach VDI 3957 Blatt 13

3.2 Luftgüteindex nach VDI 3957
24 Stationsnummer

Bewertung nach VDI 3957 Blatt 13

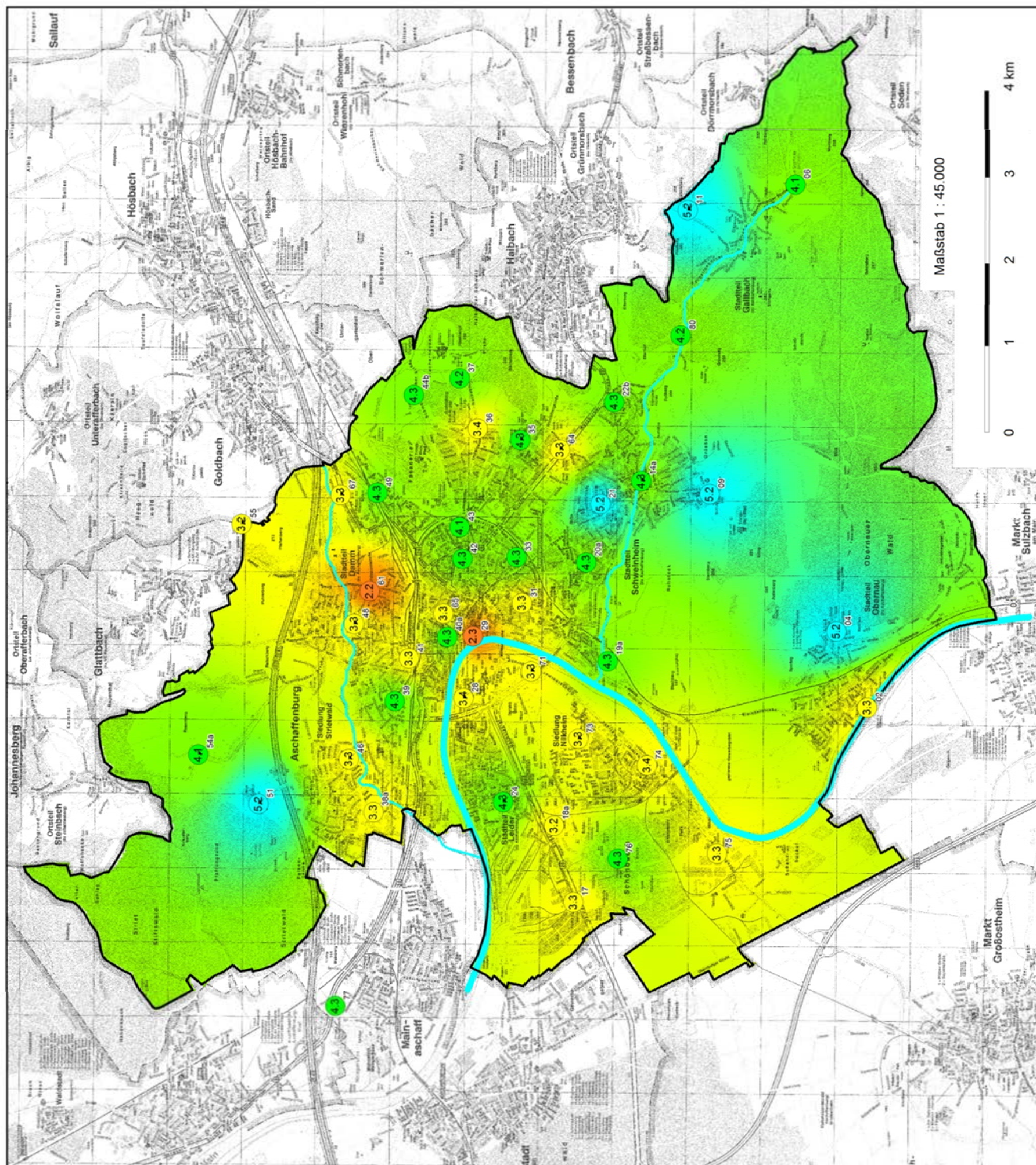
Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe	Einfluss eutrophierender Luftschadstoffe
5. sehr hohe Luftgüte	.5 sehr stark
4. hohe Luftgüte	.4 stark
3. mäßige Luftgüte	.3 mittel
2. geringe Luftgüte	.2 gering
1. sehr geringe Luftgüte	.1 sehr gering



Auftraggeber:
Stadt Aschaffenburg
Amt f. Umwelt- u. Verbraucherschutz



Bearbeitung:
Büro Fraxinus GbR
Dr. U. Windisch & A. Vorbeck



Vor allem im Innenstadtbereich wird deutlich, dass sich die Luftgüteindizes kleinräumig stark unterscheiden, was sowohl durch Immissionsgradienten als auch durch kleinräumig unterschiedliche kleinklimatische Bedingungen verursacht wird. Hohe Verkehrsdichte und ein hoher Versiegelungsgrad wirken sich unmittelbar negativ auf die Luftqualität aus. Dagegen haben größere Grünflächen einen positiven Effekt. Vegetationsbedeckte und unversiegelte Flächen sind an heißen Tagen aufgrund ihrer Evapotranspiration (Verdunstung) deutlich kühler und feuchter als vegetationsfreie und versiegelte Flächen. Sie wirken sich daher auf das Stadtklima positiv aus. Durch die höhere Luftfeuchte und den Auskämmeffekt der Gehölze sind bepflanzte Grünanlagen in der Lage, Stäube auszufiltern und zu binden. Diese Wirkung ist allerdings, je nach Größe der Grünfläche auf die engere Umgebung beschränkt.

Fast alle Messflächen im bebauten Bereich, die eine hohe Luftgüte (grün) aufweisen, befinden sich in Grünanlagen (39 Friedhof Damm, Linkstr., 40a Kapuzinerplatz, 42 Schöntal, 43 Großmutterwiese, 33 Brentanoplatz, 49 Österreicher Denkmal, 20a Blütenstr., 21 Friedhof Schweinheim). Bei den Messflächen 14a (Bahmergasse Schweinheim) und 22b (Schweinheim Schurzstraße) ist ein positiver Frischlufteinfluss aus der unmittelbaren Umgebung anzunehmen.

Lediglich die Messfläche 24 in Leider Augasse/Braunstr. weist keine größere Grünflächen in unmittelbarer Umgebung auf. Evtl. hat hier das angrenzende Hafengelände einen positiven Einfluss.

Im Nordwesten Aschaffenburgs liegt zwischen dem Strietwald und der Autobahn ein Bereich hoher Luftgüte. Eine großflächig hohe Luftgüte weist der Bereich südlich und östlich von Aschaffenburg von Obernau über Schweinheim nach Gailbach und Haibach auf.

Bereiche mit sehr hoher Luftgüte (blau) sind dort zu finden, wo am Ortsrand der positive Einfluss des umgebenden Waldes auf die Luftqualität wirksam ist. Dies ist vor allem nördlich der Autobahn (51), bei Gailbach (11) südlich Schweinheim (09) sowie im Osten Obernau (04) der Fall. Aber auch die exponierte Lage am Schweinheimer Friedhof (21) zeichnet sich durch eine sehr hohe Luftgüte aus.

6.2 Zeitliche Entwicklung der Luftgüte von 1997 bis 2015

In der Stadt Aschaffenburg wurden mittlerweile fünf immissionsbezogene Flechtenkartierungen durchgeführt. Die erste Erhebung fand 1991 statt (Wiegel et al. 1991). Als Vorgehensweise wurde die in Nordrhein-Westfalen entwickelte LuGI-Methode (LuGi = Luftgüte-Index) gewählt. In den Luftgüte-Index gehen Deckungsgrad, Vitalität und ein Empfindlichkeitswert ein.

Die zweite Kartierung liegt für das Jahr 1997 vor (Rabe 1997). Der LuGI wurde wieder ermittelt. Die Rohdaten dieser Arbeit sind zwar nicht verfügbar, jedoch fand auch eine Auswertung nach VDI-Richtlinie 3799 statt, so dass ein Vergleich zu den Folgekartierungen möglich ist. Hierbei wurde ein Luftgütewert (LGW) auf Basis der Flechtenfrequenz errechnet.

Auch 2002 wurde von Vorbeck & Windisch der Luftgütwert (LGW) nach VDI 3799 ermittelt. Die Entwicklung des Luftgütewertes von 1997 bis 2002 wird daher auf Grundlage dieser Methode dargestellt.

Seit 1995 liegt die VDI Richtlinie 3957 Blatt 13 vor. Die Flechtendaten von 2002, 2009 und 2015 wurden nach dieser Richtlinie ausgewertet. Die Daten von 1997 sind nicht nach VDI 3957 Blatt 13 auswertbar, da die Rohdaten nicht mehr vorhanden sind. Einen Überblick über die bisherigen Arbeiten gibt Tab. 06.

Tab. 06: Methoden der bisherigen Aschaffener Flechtenkartierungen

Jahr	Bericht/Bearbeitung	Methoden		
		LuGI	VDI 3799 Bl. 1	VDI 3957 Bl. 13
1991	Wiegel et al. 1991	x		
1997	Rabe 1997	x	x	
2002	Vorbeck & Windisch 2002b		x	x
2009	Vorbeck et al. 2009			x
2015	vorliegende Arbeit			x

6.2.1 Entwicklung der Luftgütewerte (LGW) von 1997 bis 2002

Die Entwicklung der Luftgüte von 1997 bis 2002 wird anhand VDI 3799 dargestellt und ist im Bericht zur Flechtenkartierung von 2002 (Vorbeck & Windisch 2002b) ausführlich beschrieben. Auf der folgenden Seite sind die Luftgütেকarten von 1997 und 2002 gegenübergestellt. Im Gutachten aus dem Jahr 2002 wird die Entwicklung wie folgt zusammengefasst:

„Die Luftgütewerte sind im Zeitraum von 1997 bis 2002 durchweg kräftig angestiegen. Messflächen mit verminderter Luftgüte existieren nicht mehr. Dabei ist ein „Aufholeffekt“ zu verzeichnen. Die Messflächen, die 1997 sehr niedrige Luftgütewerte hatten, haben eine größere Steigerung des Luftgütewertes erfahren als ehemals geringer belastete Messflächen. Es fällt auf, dass die Messflächen mit dem höchsten Anstieg der Luftgütewerte vor allem im Zentrum und im Osten der Stadt liegen.

Die starke Verminderung der Belastung in diesen Bereichen seit 1997 weist auf die Auswirkungen lokaler Immissionsminderungsmaßnahmen hin. Der flächenhafte Anstieg der Luftgütewerte im gesamten Stadtgebiet ist dagegen weitgehend auf überregionale Maßnahmen zurückzuführen.

Als wesentliche Ursache für die Verbesserung der Luftqualität lässt sich die massive Verminderung saurer Immissionen, insbesondere des Schwefeldioxids anführen. Diese Tatsache wird sowohl durch technische Messungen als auch durch die Veränderung des Flechtenartenspektrums bestätigt. Als Ursache für den Rückgang von Schwefeldioxidimmissionen sind sowohl bundesweite als auch lokale Bemühungen zu sehen.“ (Vorbeck & Windisch 2002b)

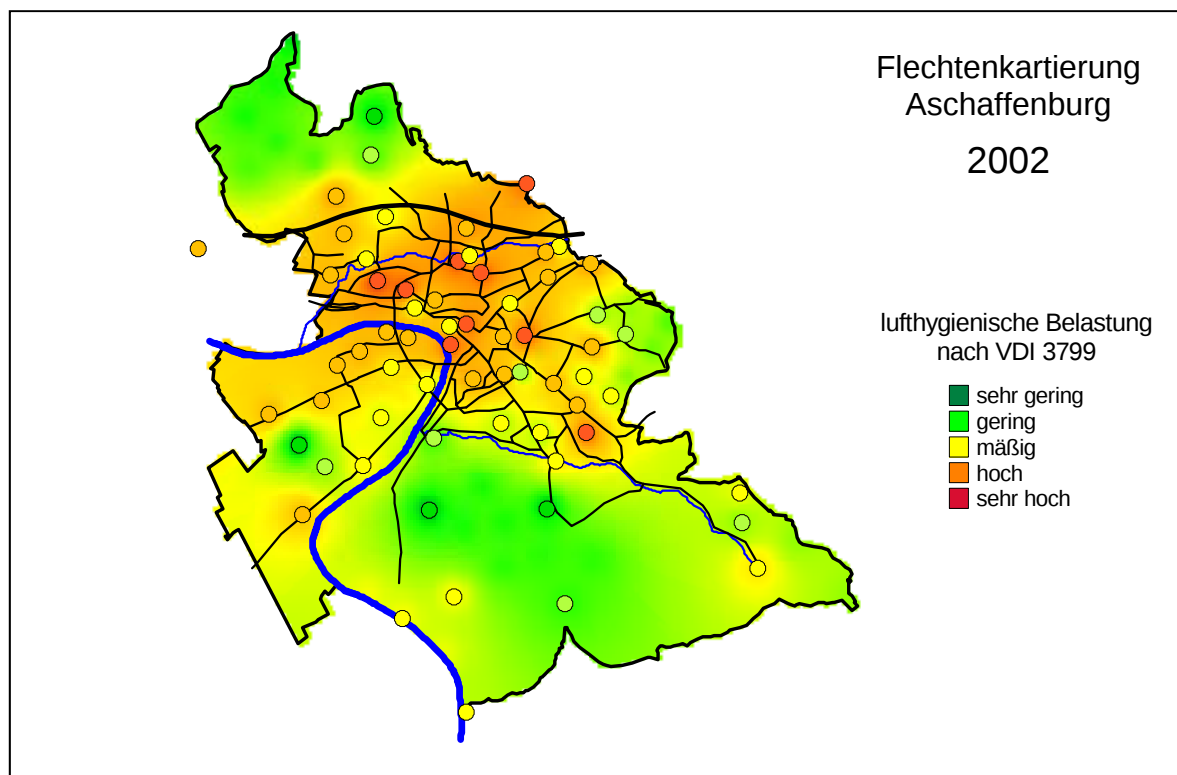
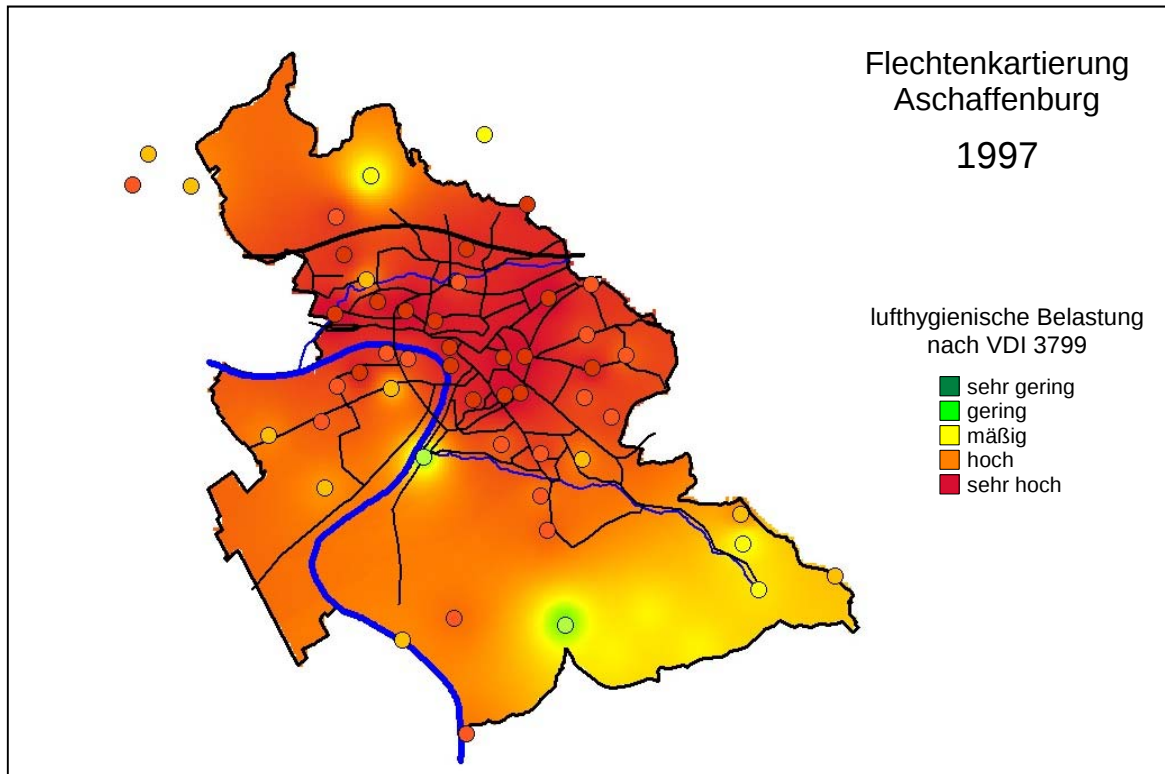


Abb. 26: Vergleich der Luftgütekarten nach VDI 3799 von 1997 und 2002; aus Vorbeck und Windisch (2002b)

6.2.2 Entwicklung der Luftgüteindizes (LGI) von 2002 bis 2009

Abb. 27 und Abb. 28 stellen die Luftgütekarten nach VDI 3957 von 2002 und 2009 dar. Es zeigte sich eine weitere Verbesserung der Luftqualität seit 2002. Allerdings war die Verbesserung bei weitem nicht so stark wie die von 1997 zu 2002.

Während sich von 1997 nach 2002 die Messflächen im Innenstadtbereich am deutlichsten verbessert haben, sind es zwischen 2002 und 2009 die Messflächen im bebauten Randbereich, die sich lufthygienisch verbessert haben.

Insgesamt haben sich an 23 Messflächen die Luftgüteindizes um eine Stufe verbessert, an zwei Messflächen sogar um zwei Stufen. Es handelt sich dabei um die beiden Dämmer Messflächen Linkstraße/Friedhof (39) und Michaelstraße (47). (Die Lage der Messflächen ist im Anhang dargestellt.). An 32 Messflächen blieben die Luftgüteindizes unverändert. Nur an vier Messflächen haben sie sich um eine Stufe verschlechtert. An den Messflächen Obernau/Mainufer (02) und Schönbusch (76) geht dies einher mit der Erhöhung des Indexwertes für Eutrophierung, so dass düngende Immissionen hier die Veränderung bewirkt haben könnten. Bei den Messflächen Rosenberg (78) und südlich Bischberg (63) kann der Wechsel der Aufnahmebäume zu Verschiebungen geführt haben.

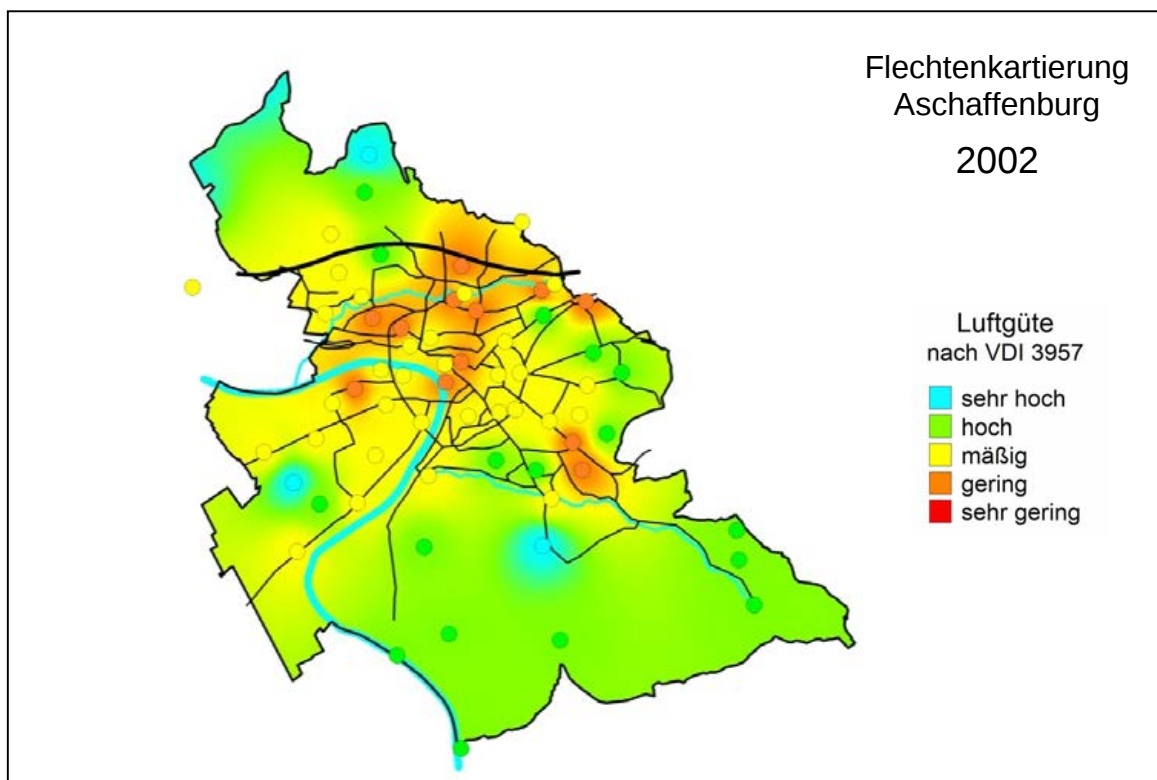


Abb. 27: Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13 von 2002

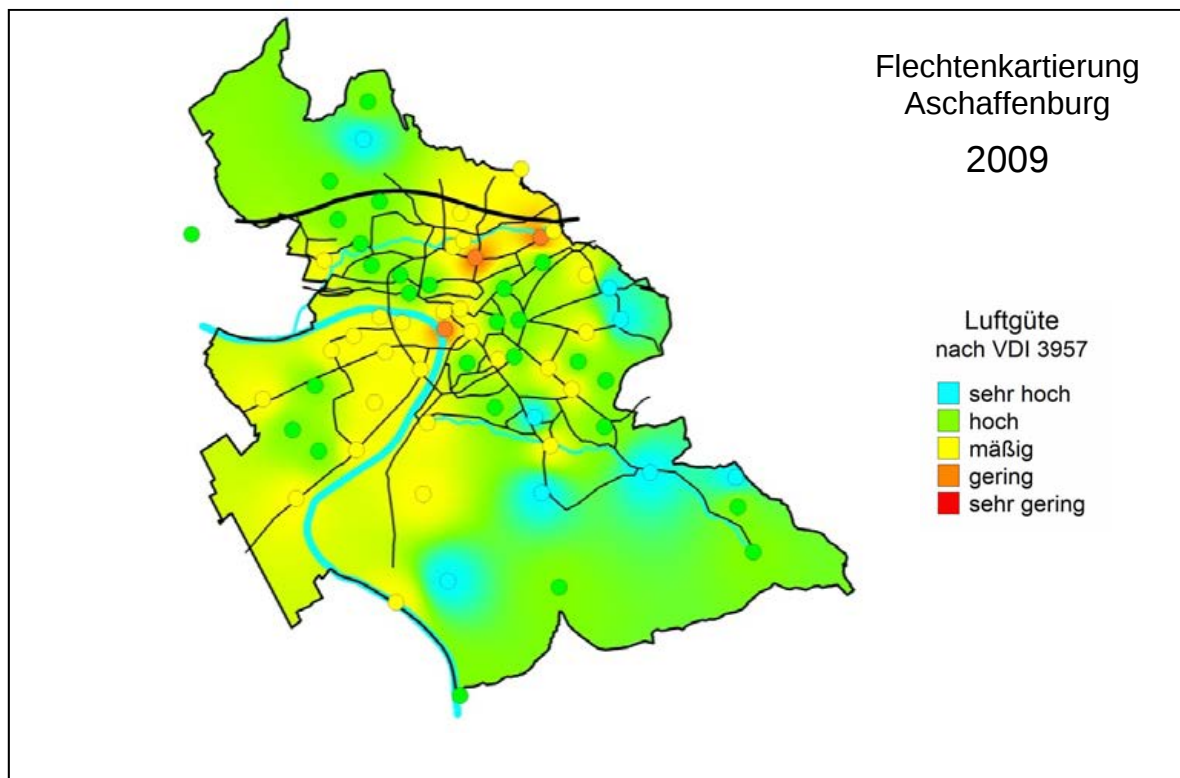


Abb. 28: Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13 von 2009

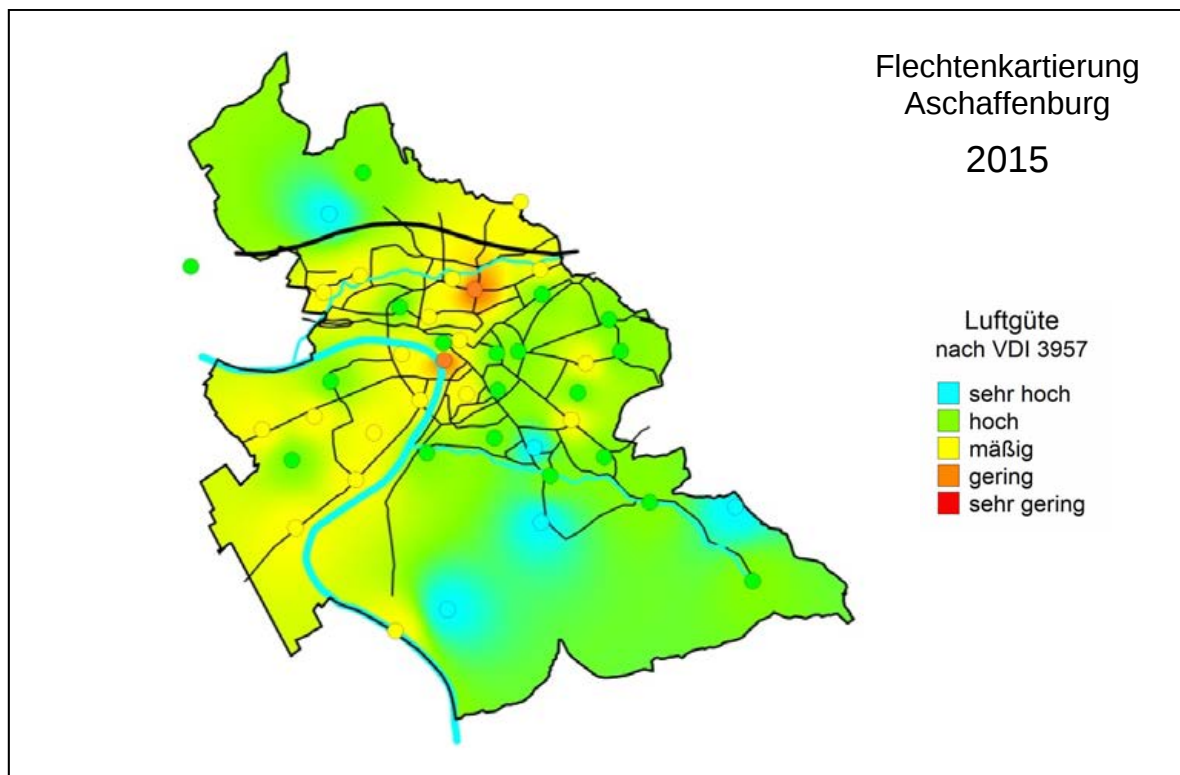


Abb. 29: Luftgütekarte nach VDI 3957 Blatt 13 von 2015

6.2.3 Entwicklung der Luftgüteindizes (LGI) von 2009 bis 2015

Der Vergleich der Luftgütekarten von 2009 und 2015 zeigt keine signifikanten Veränderungen der Luftqualität (Abb. 28, Abb. 29). Das Gesamtbild der lufthygienischen Belastung entspricht sich weitgehend. An 29 der 44 Messflächen ist der Luftgüteindex gleich geblieben. An acht Messflächen hat sich der Luftgüteindex um eine Stufe verschlechtert und an sieben um eine verbessert (Tab. 07 und Tab. 08).

Tab. 07: Bilanz der Veränderung der Indexwerte von 2009 bis 2015

Anzahl der Messflächen	Veränderung des Indexwertes Luftgüte von 2009 nach 2015	Anzahl der Messflächen	Veränderung des Indexwertes Eutrophierung von 2009 nach 15
8	-1	1	-1
29	+/- 0	29	+/- 0
7	+1	14	+1

Die folgende Tabelle listet alle kartierten Messflächen mit ihren Indexwerten und ihren Veränderungen gegenüber 2009 auf.

Tab. 08: Entwicklung der Luftgüteindizes von 2009 bis 2015 (Erklärung der Indizes am Ende der Tabelle)

Nr. Messfläche	Bezeichnung	2009			2015			Differenz 2015-09	
		Index	Index-wert Luftgüte	Index-wert Eutrophierung	Index	Index-wert Luftgüte	Index-wert Eutrophierung	Index-wert Luftgüte	Index-wert Eutrophierung
02	Obernau, Mainufer	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
04	Obernau, Bahnhofstr.	5.2	5	2	5.2	5	2	0	0
06	Gailbach, Dörmorsb. Str./Sodentalstr.	4.1	4	1	4.1	4	1	0	0
09	Schweinheim, Sportplätze am Steinweg	5.2	5	2	5.2	5	2	0	0
11	Gailbach, Findbergstr.	5.1	5	1	5.2	5	2	0	1
14a	Schweinheim, Bahmergasse/Hauptstr.	3.2	3	2	4.3	4	3	1	1
17	Leider, Darmstädter Str., Waldfriedhof	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
18a	Leider-Nilkheim, Schönbusch	4.2	4	2	3.2	3	2	-1	0
19a	Schweinheim, Sportplatz Eckertsmühle	3.3	3	3	4.3	4	3	1	0
20a	Schweinheim, Blütenstr.	4.3	4	3	4.3	4	3	0	0
21	Schweinheim, Gutwerkstr.	5.2	5	2	5.2	5	2	0	0
22b	Schweinheim, Schurzstr.	4.2	4	2	4.3	4	3	0	1
24	Leider, Ohmstr.	3.3	3	3	4.3	4	3	1	0
28	Leider, Stadtbadstr., an der Eissporthalle	3.3	3	3	3.4	3	4	0	1
29	Innenstadt, Parkplatz Suicardusstr.	2.3	2	3	2.3	2	3	0	0
31	Innenstadt, Lamprechtstr.	4.2	4	2	3.3	3	3	-1	1

		2009			2015			Differenz 2015-09	
Nr. Mess- fläche	Bezeichnung	Index	Index-wert Luftgüte	Index-wert Eutrophierung	Index	Index-wert Luftgüte	Index-wert Eutrophierung	Index-wert Luftgüte	Index-wert Eutrophierung
33	Innenstadt, Brentanostr.	3.3	3	3	4.3	4	3	1	0
35	AB – Ost, Bessenbacher Weg	4.3	4	3	4.3	4	3	0	0
36	AB – Ost, Ludwigsallee	3.4	3	4	3.4	3	4	0	0
37	AB – Ost, Am Krämersgrund	5.1	5	1	4.2	4	2	-1	1
38a	Strietwald, Maybachstr.	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
39	Damm, Linkstr. (Friedhof)	4.2	4	2	4.3	4	3	0	1
40a	Innenstadt, Kapuzinerplatz/Schloßplatz	3.3	3	3	4.3	4	3	1	0
41	Damm, Ottostr.	4.2	4	2	3.3	3	3	-1	1
42	Innenstadt, Park Schöntal	4.2	4	2	4.3	4	3	0	1
43	Innenstadt, Lindenallee	4.1	4	1	4.1	4	1	0	0
44b	AB – Ost, Schmerlenbacher Str.	5.2	5	2	4.3	4	3	-1	1
46	Strietwald, Adlerstr.	4.2	4	2	3.3	3	3	-1	1
48	Damm, Inselstr.	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
49	Österreicher Kolonie, Denkmalstr.	4.2	4	2	4.3	4	3	0	1
51	Strietwald, Konradstr. (Neuer Friedhof)	4.2	4	2	5.2	5	2	1	0
54a	Damm-Strietwald, Steinbacher Str.	5.1	5	1	4.1	4	1	-1	0
55	Grenzbereich Damm-Strietwald/Glattbach	3.2	3	2	3.2	3	2	0	0
61	Schillerstr.	2.2	2	2	2.2	2	2	0	0
64	AB - Ost, Würzburger Str., Mc Donalds	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
65	Weißburger Str./Friedrichstr.	3.2	3	2	3.3	3	3	0	1
67	Damm - Ost, Schönbornstr. Main-Echo	2.3	2	3	3.3	3	3	1	0
71	Nilkheim, Großosth. Str./Adenauer Brücke	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
73	Nilkheim, Ahornweg/Hibiskusweg	3.4	3	4	3.3	3	3	0	-1
74	Nilkheim, Großostheimer Str.	3.3	3	3	3.4	3	4	0	1
75	Nilkheim Gewerbegeb., Großostheimer Str.	3.3	3	3	3.3	3	3	0	0
76	Schönbusch	4.3	4	3	4.3	4	3	0	0
77	Mainaschaff, Auffahrt B8	4.3	4	3	4.3	4	3	0	0
80	Verbindungsstraße AB-Gailbach	5.2	5	2	4.2	4	2	-1	0

Indexwert Luftgüte	Bewertung der Luftgüte
1	sehr gering
2	gering
3	mäßig
4	hoch
5	sehr hoch

Indexwert Eutrophierung	Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen
1	sehr gering
2	gering
3	mäßig
4	stark
5	sehr stark

6.2.4 Entwicklung des Einflusses eutrophierender Verbindungen von 2009 bis 2015

Während sich bei der Luftgüte keine signifikanten Unterschiede zu der vorangegangenen Kartierung ergaben, hat sich der Einfluss eutrophierender Verbindungen bis 2015 erhöht. Von den 44 Messflächen weisen 29 keine Veränderung gegenüber 2009 auf. 14 Flächen zeigen einen um eine Stufe höheren Einfluss der eutrophierenden Verbindungen und nur eine Messfläche weist einen um einen Punkt niedrigeren Wert auf. Abb. 31 zeigt, dass die Zunahme des Einflusses eutrophierender Verbindungen im Wesentlichen auf den bebauten Bereich beschränkt ist.

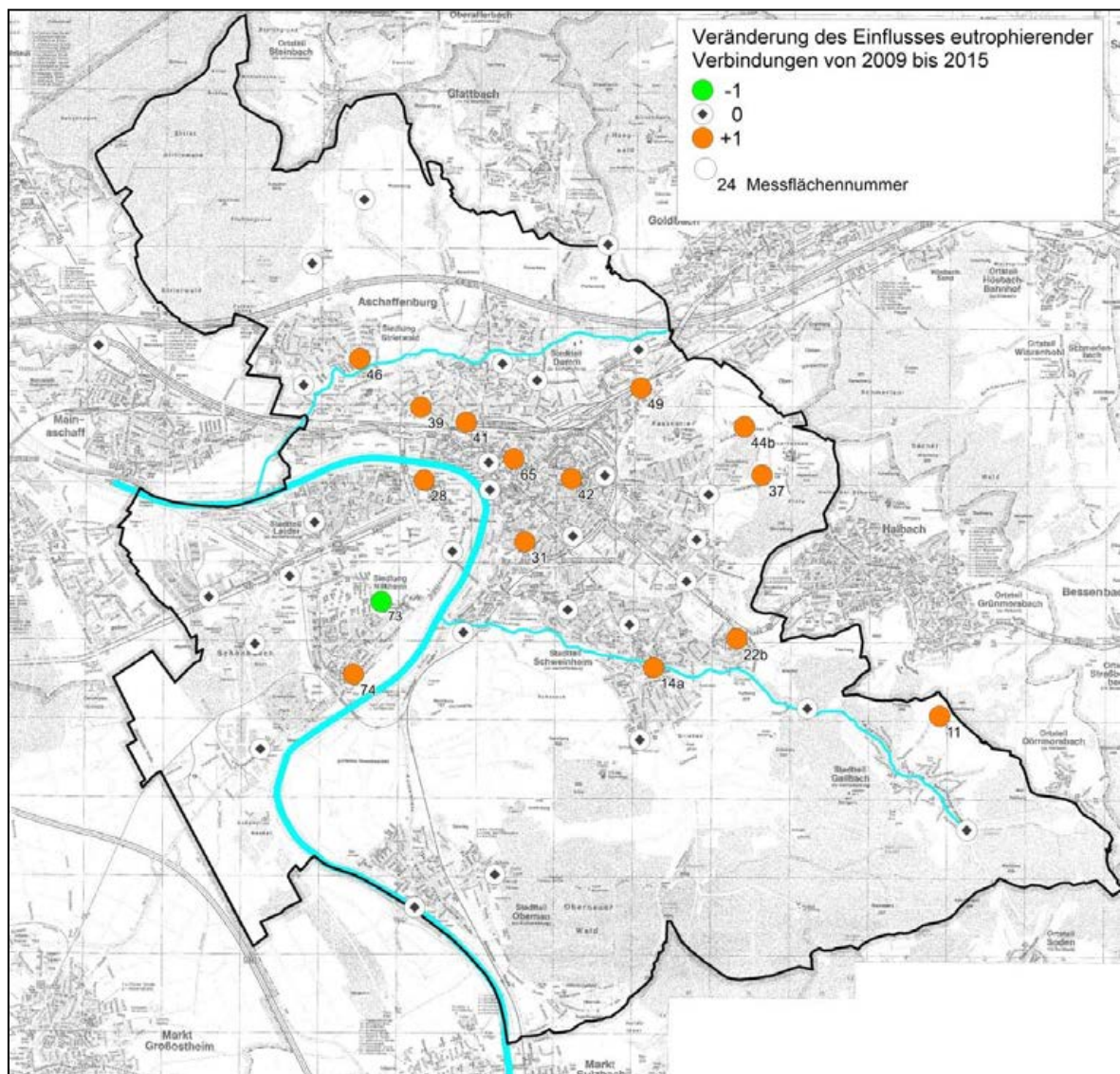


Abb. 31: Veränderung des Einflusses eutrophierender Verbindungen von 2009 bis 2015

Mit der Entwicklung der Immissionskonzentrationen der Schadstoffgruppen NO und NO₂ sowie Feinstaub – die sich in den letzten sechs Jahren nicht wesentlich verändert haben – ist die Zunahme der Eutrophierungszeiger nicht zu erklären. Die technisch gemessenen N-Verbindungen spielen für die Nährstoffversorgung der Flechten jedoch eine untergeordnete Rolle, denn der Stickstoff in NO und NO₂ ist nicht direkt pflanzen- bzw. flechtenverfügbar. Erst nach Oxidation zu Nitrat (NO₃) kann der Stickstoff als Nährstoff genutzt werden. Eine deutlich größere Rolle bei der Eutrophierung spielt die Ammoniakkonzentration in der Luft. Neben der Landwirtschaft tragen gerade in Städten mit ihrer Verkehrsverdichtung Drei-Wege-Katalysatoren der Kraftfahrzeuge zur Emission von Ammoniak bei. Für Aschaffenburg liegen keine Messungen der Ammoniakkonzentration vor.

Eine ähnliche scheinbare „Diskrepanz“ zwischen der Entwicklung der NO₂-Konzentrationen und der Zunahme von Eutrophierungszeigern zeigt eine aktuelle Flechtenkartierung in Gießen und Wetzlar (Kirschbaum 2016). Der Anstieg der Jahresmittelwerte für Ammoniak (NH₃) ist für die untersuchten, ausnahmslos ländlichen, Messstationen belegt (Abb. 32). Durch Ferntransport können die Abbauprodukte des Ammoniaks partikelgebunden weiträumig verfrachtet werden und tragen zu einer Hintergrundbelastung auch in den Städten bei.

Auch in Aschaffenburg kann eine steigende Hintergrundbelastung vermutet werden, die kleinräumig durch Straßenverkehrsemissionen verstärkt wird und auf die Flechten wirkt.

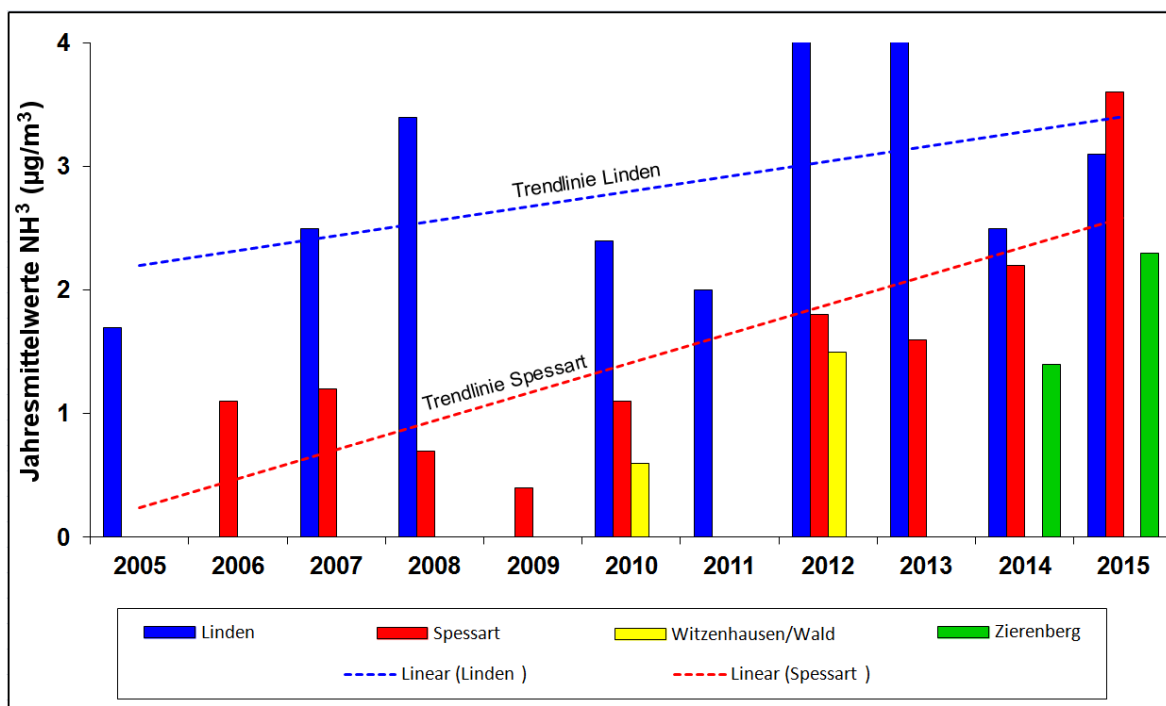


Abb. 32: Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Hessens (Jahresmittelwerte auf der Basis von Stundenmittelwerten) (HLNUG 2016; aus: Kirschbaum 2016)

6.3 Entwicklung der Flechtenbestände 1991 bis 2015

6.3.1 Entwicklung der Gesamtartenzahlen

Die Gesamtartenzahl stieg von 23 im Jahre 1991 auf aktuell etwa 90 Arten. Besonders rasch wuchsen die Artenzahlen im Zeitraum 2002 bis 2009. Diese eindrucksvolle positive Entwicklung hat nun wohl ihren Höhepunkt überschritten. Während 2009 an 66 Messflächen noch 92 Flechtenarten gefunden wurden, waren es 2015 an nur noch 44 Messflächen noch immerhin 87 Arten. Die Artenzahl ist also in einer vergleichbaren Größenordnung geblieben.

Tab. 09: Entwicklung der Artenzahlen

Jahr	Anzahl der Flechtenarten	Anzahl der Messflächen
1991	23	56
1997	29	55
2002	45	67
2009	92	66
2015	87	44

Die Zunahme der Artenzahl von 2002 bis 2009 hatte mehrere Ursachen:

- Der Hauptgrund war der weitere Rückgang der Schadstoffbelastung.
- Die neue VDI Richtlinie 3957 schreibt vor, jede vorkommende Art zu erfassen. In die VDI 3799 ist nur eine begrenzte Anzahl Arten eingegangen. Da in der Kartierung 2002 jedoch alle gefundenen Arten (ggf. als Beibeobachtung) aufgenommen wurden und jetzt ausgewertet werden konnten, ist die Differenz als unerheblich zu betrachten.
- Einige Arten wurden seit 2002 in mehrere Arten aufgesplittet.
z. B. *Parmelia subrudecta*
-> in *Punctelia subrudecta*, *Punctelia jeckeri*
Da *P. subrudecta* in 2002 noch relativ selten war, führt eine getrennte Aufnahme in 2009 zur Erhöhung der Artenzahl, nicht aber zur Verfälschung der Luftgüteindizes. Zudem tritt inzwischen vermehrt auch *Punctelia borreri* auf, die lange Zeit in Deutschland als ausgestorben galt.
- Einige Arten wurden 2002 als Artengruppen und 2009 getrennt erfasst: z.B. *Parmelia glabratula*
-> *Melanelixia glabratula* und *Melanelixia subaurifera*

Die Zunahme der Gesamtartenzahl von 1991 bis 2009 lässt den Schluss zu, dass sich die lufthygienische Situation in diesem Zeitraum deutlich verbessert hat.

Die mehr oder weniger stagnierende Artenzahl aus den Jahren 2009 und 2015 decken sich mit den Aussagen aus dem Kapitel 6.2.3, dass sich die lufthygienische Situation in diesem Zeitraum nicht maßgeblich verändert hat.

6.3.2 Entwicklung des Artenspektrums

Die Auswertung des vorhandenen Flechtenartenspektrums bringt Erkenntnisse über die Zusammensetzung der indizierten Luftverunreinigungen. Man kann grundsätzlich acidophytische, neutrophytische und nitrophytische Flechtenarten unterscheiden. **Acidophytische Arten** bevorzugen Substrate mit niedrigem pH-Wert. Sie besiedeln natürlicherweise saure Borken, wie z. B. die der Eiche.

Neutrophytische Flechtenarten dagegen bevorzugen Substrate im neutralen bis leicht basischen pH-Bereich mit guter Nährstoffversorgung. Dies sind z. B. nährstoffreiche Rinden von Apfelbäumen und Pappeln. **Nitrophytische** Arten sind in überdüngtem Milieu mit hohem pH-Wert zu finden. Die natürlichen Borken-pH-Werte werden in vielfältiger Weise anthropogen modifiziert. Saure Immissionen, wie z. B. Schwefeldioxid, erniedrigen den Borken-pH-Wert, basische Stäube dagegen erhöhen ihn. Dadurch ergibt sich eine Verschiebung des Flechtenartenspektrums, die in Hinblick auf die Immissionssituation gedeutet werden kann.

Im Folgenden soll die zeitliche Entwicklung ausgewählter typischer Neutrophyten und Acidophyten genauer untersucht werden. Dazu wurden solche Messflächen herangezogen, die bei allen fünf Kartierungen untersucht worden waren. Typische Flechtenarten saurer und nährstoffarmer Baumborken sind *Lecanora conizaeoides* und *Hypogymnia physodes*. Dagegen werden höhere pH-Werte und Eutrophierung der Borke von *Phaeophyscia nigricans*, *Phaeophyscia orbicularis* und *Xanthoria parietina* bevorzugt.

Aus Tab. 10 ist ersichtlich, dass alle drei Nitrophyten-Arten sich seit 1991 deutlich ausgebreitet haben. Die Blattflechte *Phaeophyscia nigricans* (Abb. 33) besiedelt eutrophiertes, kalkhaltiges Gestein und staubimprägnierte Baumstämme (Wirth et al. 2013). In Aschaffenburg wurde *Phaeophyscia nigricans*, wie auch in München (Vorbeck und Windisch 2002a), ganz überwiegend auf Straßenbäumen mit hoher Verkehrsbelastung gefunden. Dabei hat *Phaeophyscia nigricans* sich zwar erst seit wenigen Jahren, dafür aber mit einer enormen Geschwindigkeit auf den Baumborken Aschaffenburgs ausgebreitet.

Die verwandte Art *Phaeophyscia orbicularis* (Abb. 33) ist mittlerweile die zweithäufigste Art an den untersuchten Bäumen und ist an jeder der 24 Vergleichsmessflächen zu finden. Sie gehört zu den eutrophierungstolerantesten einheimischen Blattflechten (Wirth et al. 2013). Auch der Eutrophierungszeiger *Xanthoria parietina* hat massiv zugenommen und fehlt nur an einer der betrachteten Messflächen. An einer ganzen Reihe von Messflächen wuchsen bis Mitte der 1990er Jahre noch keine der typischen Eutrophierungszeiger und Neutrophyten, während heute alle drei der ausgewählten Arten (und auch weitere Neutrophyten) hier offensichtlich gute Bedingungen finden. Als Ursachen kommen sowohl die Abnahme saurer Immissionen als auch die düngende Wirkung vermehrten Staubeintrags an die Trägerbäume und die aufsitzenden Flechten in Frage.



Abb. 33: Die stickstoffliebende Gewöhnliche Schwielenflechte (*Phaeophyscia orbicularis*)

Tab. 10: Vorkommen ausgewählter nitrophytischer (stickstoffliebender) Flechtenarten von 1991 bis 2015 (Auswertung der bei allen Kartierungen durchgängig untersuchten Messflächen)

	<i>Phaeophyscia nigricans</i>					<i>Phaeophyscia orbicularis</i>					<i>Xanthoria parietina</i>				
Mess- fläche	91	97	02	09	15	91	97	02	09	15	91	97	02	09	15
2				•	•		•	•	•	•			•	•	•
4			•				•	•	•	•				•	•
6									•	•				•	
9			•				•	•	•	•		•	•	•	•
11				•	•				•	•				•	•
17				•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•
21				•	•			•	•	•			•	•	•
24			•	•	•		•	•	•	•			•	•	•
28			•	•	•		•	•	•	•			•	•	•
29				•	•		•	•	•	•			•	•	•
31				•	•		•	•	•	•			•	•	•
33			•	•	•			•	•	•			•	•	•
35			•	•	•			•	•	•			•	•	•
36			•	•	•			•	•	•			•	•	•
37									•	•					•
39			•	•	•			•	•	•			•	•	•
41			•	•	•		•	•	•	•				•	•
42			•		•			•	•	•				•	•
43									•	•				•	•
46				•	•		•	•	•	•		•		•	•
48			•		•	•	•	•	•	•				•	•
49					•		•	•	•	•				•	•
51									•	•				•	•
55								•	•	•				•	•
Anz.	0	0	11	14	17	2	12	19	24	24	0	3	12	23	23

Die Krustenflechte *Lecanora conizaeoides* ist seit 1991 sehr stark zurückgegangen (Tab. 11). Die Art ist sehr tolerant gegenüber Ansäuerung der Baumrinne und gegenüber hohen sauren Schadstoffkonzentrationen (Wirth et al. 2013). Sie meidet nährstoffreichen Untergrund. 1991 war sie noch an fast allen hier betrachteten Vergleichs-Messflächen vorhanden. In der aktuellen Kartierung wurde sie nicht mehr erfasst. Der Rückgang der Art belegt die Verbesserung der lufthygienischen Situation in Aschaffenburg.

Als zweite Art wurde *Hypogymnia physodes* (Abb. 34) gewählt, eine acidophytische (säuretolerante) und häufige, aber eutrophierungsempfindliche Blattflechte (Wirth et al. 2013). Die Art hat sich von 1991 bis 2002 leicht ausgebreitet. Seitdem ist sie allerdings im Rückgang begriffen. *Hypogymnia physodes* hat anfangs vom Rückgang der sauren Schadgase profitiert. Mittlerweile hat sie durch die weitere Nährstoffanreicherungen aber ihr Optimum überschritten und nimmt wieder ab. Aktuell kommt sie nur noch an zwölf der 24 betrachteten Messflächen vor (Tab. 11)

Die Dauerbeobachtung von Flechten in Hessen zeigt den gleichen Trend (Windisch et al. 2014). Die Zunahme neutro- und nitrophytischer Arten und die gleichzeitige Abnahme acidophytischer Arten dokumentieren den Rückgang der sauren Immissionen, insbesondere des Schwefeldioxids. Die düngende Wirkung von Stickstoffoxiden, Ammoniak und Stäuben gewinnt dagegen an Einfluss auf die Flechtenvegetation.



Abb. 34: Die acidophytische Blasenflechte (*Hypogymnia physodes*)

Tab. 11: Vorkommen ausgewählter acidophytischer (säuretoleranter) Flechtenarten von 1991 bis 2015 (Auswertung der bei allen Kartierungen durchgängig untersuchten Messflächen)

Mess- fläche	<i>Lecanora conizaeoides</i>					<i>Hypogymnia physodes</i>				
	91	97	02	09	15	91	97	02	09	15
2	•	•	•			•	•	•	•	
4	•	•	•	•		•	•	•	•	•
6						•	•	•	•	•
9	•					•	•	•	•	•
11	•					•	•	•	•	•
17	•		•					•		
21	•	•	•			•	•	•	•	•
24	•	•				•	•	•	•	•
28	•	•				•	•	•	•	•
29	•	•				•	•			
31	•		•			•	•	•	•	
33	•	•				•		•		
35	•	•				•	•	•	•	•
36	•	•						•	•	•
37		•				•	•	•		
39	•	•	•	•						
41	•	•					•	•	•	
42	•	•	•					•	•	
43	•	•					•	•	•	•
46	•	•				•	•	•	•	
48	•	•				•			•	
49	•	•	•			•	•	•	•	•
51	•	•	•			•	•	•	•	•
55	•	•	•			•		•	•	
Anzahl	22	19	10	2	0	18	17	21	19	12

6.4 Biomonitoring des Klimawandels

Das Klimawandel-Biomonitoring nach der VDI-Richtlinie (VDI 3957 Blatt 20 2016) ermöglicht im Wesentlichen den Nachweis, die Bewertung und die Dokumentation von Wirkungen des Klimawandels auf die belebte Umwelt in einem konkreten lokalen oder regionalen Bereich. Es handelt sich hierbei also nicht um den Nachweis stadtklimatischer Effekte.

Das verstärkte Vorkommen von Klimawandelzeiger-Arten bedeutet, dass sich die Bedingungen für Arten milder, ozeanischer oder warmer Klimagebiete verbessert haben.

Rückblickend sollen auch die Jahre 1991 und 1997 beim Klimawandel-Biomonitoring einbezogen werden. Hier lagen keine quantitativen Grunddaten vor. Es konnte jedoch ermittelt werden, welche Klimawandelzeiger-Arten vorkamen und an wie vielen der kartierten Messflächen sie gefunden wurden. Zu Beginn der Zeitreihe im Jahr 1991 wurde mit *Punctelia subrudecta* nur eine Art kartiert. In jedem Kartierungsdurchgang wurden mehr Arten angetroffen, die zu den Klimawandelzeigern gehören (Tab. 12). Aktuell kommen in Aschaffenburg 12 dieser Arten vor.

Tab. 12: Vorkommen von Klimawandelzeigern an jeweils in allen Kartierungen untersuchten Messflächen in Aschaffenburg

Art	1991	1997	2002	2009	2015
<i>Bacidina neosquamulosa</i>					•
<i>Halecania viridescens</i>				•	•
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>				•	•
<i>Hypotrachyna revoluta</i>					•
<i>Flavoparmelia caperata</i>		•	•	•	•
<i>Flavoparmelia soledians</i>				•	•
<i>Melanohalea elegantula</i>				•	•
<i>Melanohalea laciniatula</i>				•	•
<i>Parmotrema perlatum</i>				•	•
<i>Punctelia borrieri</i>				•	•
<i>Punctelia jeckeri</i>				•	•
<i>Punctelia subrudecta</i>	•	•	•	•	•
Anzahl	1	2	2	10	12

Nicht nur die Anzahl der klimawandelzeigenden Arten hat sich erhöht. Die Arten sind im Stadtgebiet auch weiter verbreitet: Wurde 1991 nur an einer Messfläche mit *Punctelia subrudecta* ein Klimawandelzeiger angetroffen, so sind die Vorkommen deutlich bis 2015 angewachsen (Abb. 35).

Insbesondere in den fünf Jahren zwischen 1997 und 2002 fand eine deutliche Ausbreitung der betrachteten Arten statt. Diese hat sich in den Jahren zwischen 2009 und 2015 verlangsamt, allerdings kommen Klimawandelzeiger mittlerweile auch fast im gesamten Stadtgebiet vor.

Das bedeutet, dass sich die Bedingungen für Arten milder, ozeanischer oder warmer Klimagebiete in Aschaffenburg seit 1991 deutlich verbessert haben. Entsprechende Klimaveränderungen sind von Fröh et al. (2011) für die Region belegt (vgl. Kap. 3.1).

Die Zunahme der Klimawandelzeiger ist nicht regional begrenzt, sondern lässt sich, wie im Kapitel 4.4 beschrieben überregional nachweisen. Insbesondere in den westlicher gelegenen Bundesländern Deutschlands ist diese Entwicklung für die letzten 15 Jahre durch Flechtenkartierungen dokumentiert.

Die Region Untermain erwies sich im Landesvergleich sowohl in Hessen als auch in Bayern als Region mit der stärksten Zunahme von Klimawandel anzeigenden Flechtenarten (vgl. Kapitel 4.4) (Windisch et al. 2011; Windisch et al. 2014).

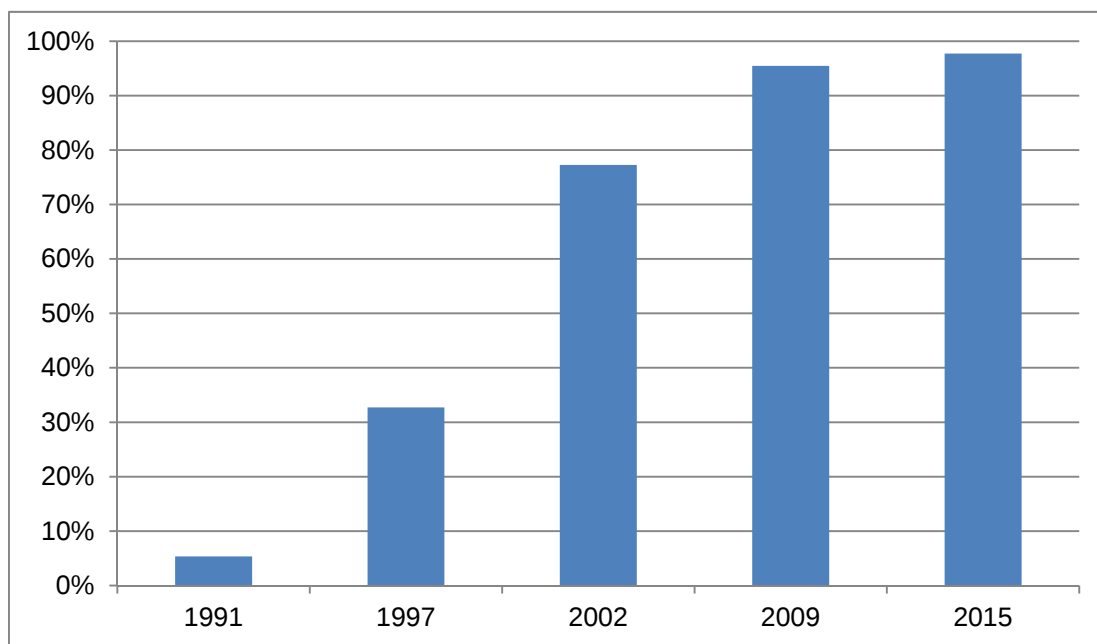


Abb. 35: Vorkommen von Klimawandelzeigern in % der kartierten Messflächen von 1991 bis 2015

Die räumliche Entwicklung des Klimawandel-Biomonitorings für Aschaffenburg sind in Abb. 36 bis Abb. 38 dargestellt. Die Diversitätswerte der Klimawandelzeiger sind nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 20, wie in Kapitel 5.3 erläutert, berechnet. Zum Beispiel bedeutet ein Diversitätswert der Klimawandelzeiger von 5, dass durchschnittlich in 5 von 10 untersuchten Messgitterquadraten jeweils ein Klimawandelzeiger angetroffen wurde. Je höher der Diversitätswert, desto besser sind die Bedingungen für Arten milder, ozeanischer oder warmer Klimagebiete.

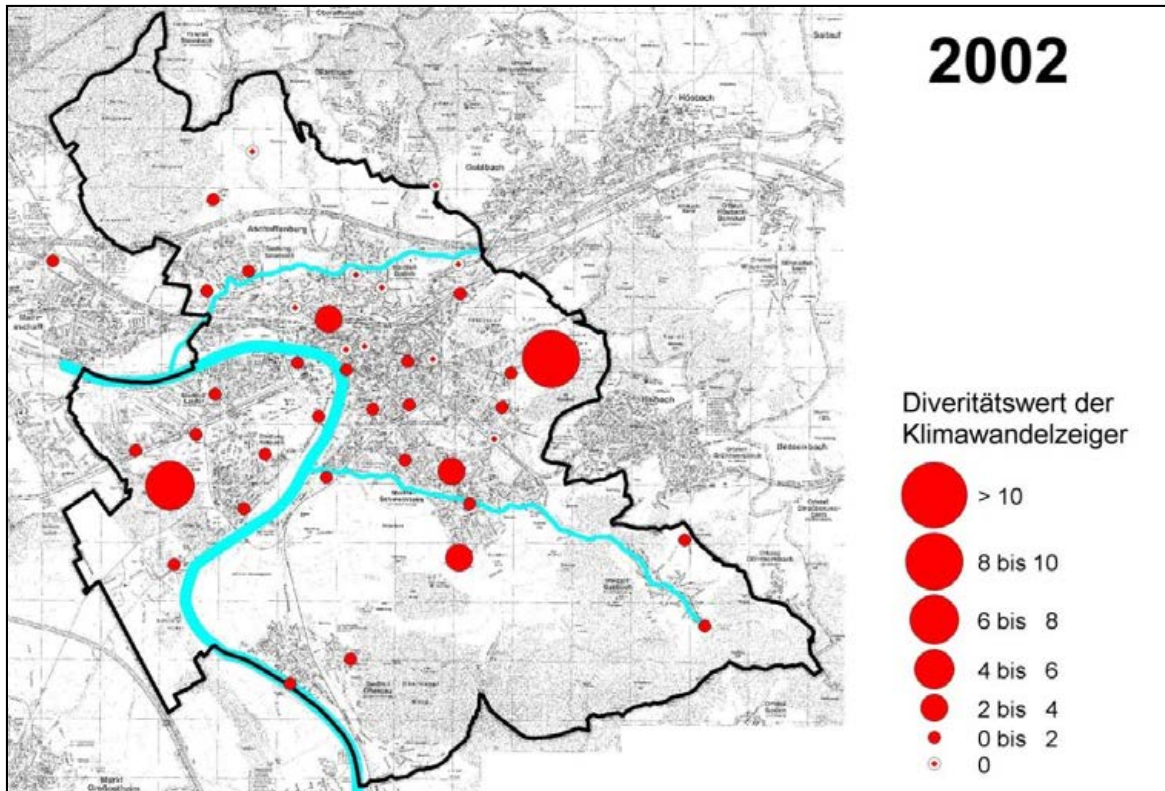
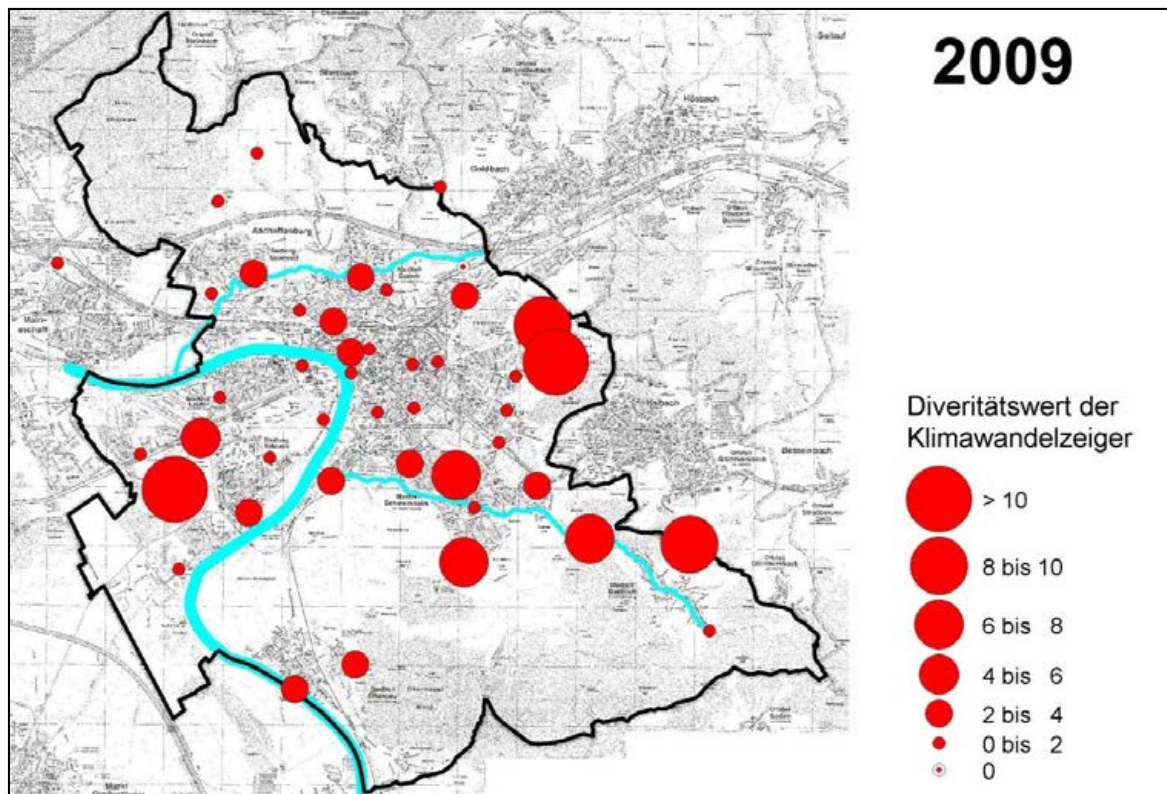
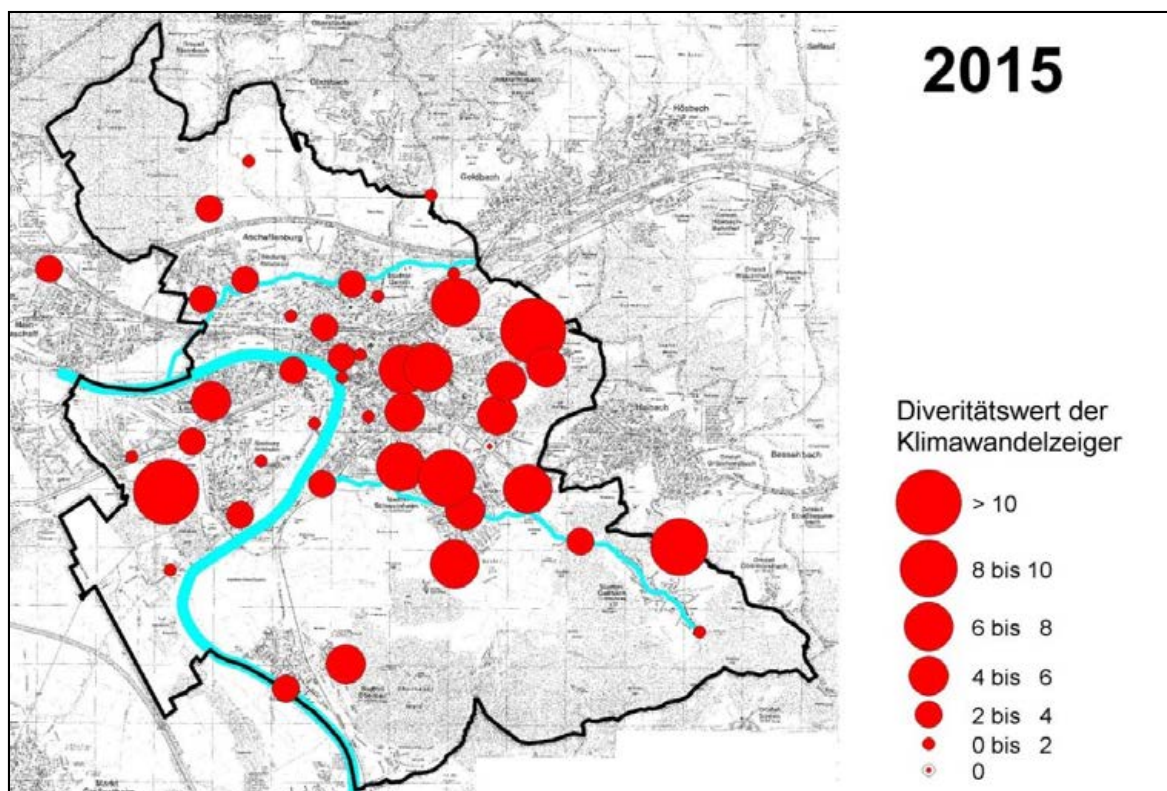


Abb. 36: Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) 2002

Die Karte von 2002 (Abb. 36) zeigt, dass ein Schwerpunkt von Klimawandelzeigern, d. h. wärmeliebenden Arten, westlich Nilkheim und im Osten und Südosten der Aschaffener Innenstadt vorlag. Im Stadtzentrum fanden sich diese Arten nur mit geringer Häufigkeit.

Wenngleich sich in den Jahren 2009 und 2015 dieses Muster nicht wesentlich änderte, stieg die Häufigkeit der Klimawandelzeiger doch stetig und deutlich weiter an (Abb. 37 und Abb. 38). Offensichtlich werden ihre Ansprüche am Stadtrand von Aschaffenburg eher erfüllt als in der Innenstadt. Ein Grund für ihr Meiden des Stadtzentrums könnte die in Innenstädten allgemein trockenere Luft und höhere Immissionsbelastung sein. 2015 lässt sich eine Zunahme der Klimawandelzeiger in der östlichen Innenstadt feststellen (Messflächen 33, 42, 43). Ein Grund dafür könnte die günstigere lufthygienische Situation in diesem Bereich sein.

Auch in einer neueren Studie zum Stadtklima-Biomonitoring wurde gefunden, dass feuchtebedürftige Flechtenarten die Stadtzentren meiden. Es handelt sich um einen Vergleich zwischen Aschaffenburg, Gießen und Wetzlar (Windisch 2016). Zu den Stadtzentren meidenden Arten gehören großlappige Blattflechten, aber auch die ökologische Gruppe der Strauchflechten (Abb. 39). Mögliche Ursache dafür ist, dass die Wasserversorgung dieser besonders feuchtebedürftigen Flechten, z. B. durch morgendlichen Taufall, in stark versiegelten Innenstadtbezirken nicht ausreicht (Windisch 2016). Die meisten Klimawandelzeiger sind großlappige Blattflechten. Damit spielen gerade die weniger versiegelten Stadtrandbezirke eine besondere Rolle für das lokale bzw. regionale Klimawandel-Monitoring.

Abb. 37: Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) 2009Abb. 38: Diversitätswert der Klimawandelzeiger (FDW_{KWZ}) 2015

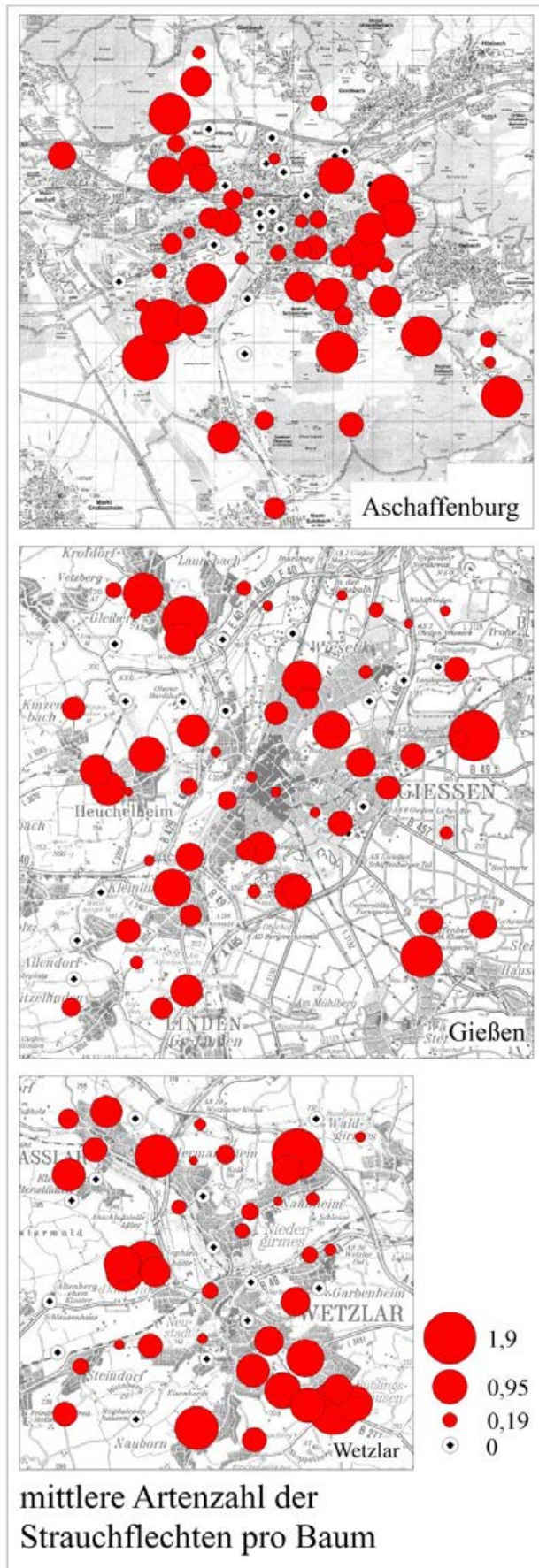


Abb. 39: Mittlere Artenzahl der Strauchflechten pro Baum an Messflächen in Aschaffenburg, Gießen und Wetzlar; aus: (Windisch 2016); Daten aus (Vorbeck et al. 2009) und (Kirschbaum 2016)

7 MASSNAHMENEMPFEHLUNGEN

7.1 Verbesserung der Emissions- und Immissionssituation

Nach den Ergebnissen der Flechtenkartierung sollte in Zukunft ein besonderes Augenmerk auf die Reduktion der Stickoxide und des Feinstaubes gelegt werden. Dies deckt sich mit den Aussagen des Maßnahmenplans zur langfristigen Einhaltung der Immissionsgrenzwerte der 22. BImSchV in der Stadt Aschaffenburg (Wyrwich 2006). Auch der Projektbeirat Luftqualität erklärt Stickoxide (NO_x) und PM₁₀-Feinstaub als Leitparameter für weitere Luftreinhaltemaßnahmen (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009).

In beiden Arbeiten werden Möglichkeiten aufgezeigt die Immissionssituation langfristig zu verbessern. Einer der wichtigsten Ansatzpunkte ist hier der Kfz-Verkehr. Eine sukzessive Umsetzung des Maßnahmenplanes wird empfohlen.

7.2 Verbesserung der stadtklimatischen Verhältnisse

Früh et al. (2011) zeigen, dass durch die globale Klimaerwärmung auch die Belastung in den Innenstädten zunehmen wird: "Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Umwandlung von bebauten Flächen in Grünflächen die durch den Klimawandel erwartete Zunahme an Sommertagen und -abenden etwa halbieren würde. Umgekehrt kann eine Verdichtung der Bebauung die erwartete Zunahme an Sommertagen und -abenden nahezu verdoppeln. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen werden aber lokal sehr begrenzt sein. Um der erwarteten regionalen Klimaerwärmung im gesamten Stadtgebiet gegenzusteuern ist daher eine klimagünstige Gestaltung der Stadt in möglichst vielen Stadtbereichen notwendig. Parks und Grünanlagen nehmen unter zukünftigen Klimabedingungen somit in ihrer Bedeutung stark zu."

Umfangreiche Hinweise zur „klimagerechten Gestaltung von Städten gibt die Städtebauliche Klimafibel (Reuter & Kapp 2012).

Wesentliche Elemente sind:

- Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen
 - Landschafts- und Grünordnungsplan
 - Maßzahlen zur Beschreibung der "grünen" Nutzung
 - Vermeidung der Bodenversiegelung durch Grün- und Wasserflächen
 - Dachbegrünung
 - Fassadenbegrünung

- Sicherung des lokalen Luftaustausches
 - Kaltluftentstehung
 - Frischluftzufuhr
 - Grünzüge
 - Günstige Siedlungs- und Bebauungsformen
- Planungsbezogene Stadtklimauntersuchungen

7.3 Überregionales Engagement für Emissionsreduktion und Klimaschutz

Der Bericht des Projektbeirates Luftqualität (Institut für Energie- und Umweltforschung 2009) macht deutlich, dass die lufthygienische Situation in der Stadt Aschaffenburg nur zu einem Teil durch die direkten Emissionen im Stadtgebiet bestimmt wird. Ein nicht unwesentlicher Anteil ist der regionalen Hintergrundbelastung geschuldet. Daher ist ein überregionales Engagement für die Reduktion von Emissionen nötig.

Auch beim Klimaschutz bedarf es über die lokalen Handlungsfelder hinaus einen Einsatz für den globalen Klimaschutz.

8 LITERATURVERZEICHNIS

Bründel, W.; Mayer, H.; Baumgartner, A. (1986): Stadtklima Bayern. Abschlussbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“. In: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien Nr. 43.

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.

Deutscher Wetterdienst (2009): Qualifizierte Prüfung (QPR) der Übertragbarkeit einer Ausbreitungszeitreihe (AKTerm) nach TA Luft 2002 auf einem Standort in 63739 Aschaffenburg. Amtliches Gutachten im Auftrag der Stadt Aschaffenburg.

Dreiser, Ch.; Samimi, C. (2000): Klimagutachten der Stadt Aschaffenburg. mit Klimafunktionskarte. Unveröff. Gutachten im Auftrag der Stadt Aschaffenburg.

Endlicher, W. (2012): Einführung in die Stadtökologie. Von der Stadtgeographie zur Stadtökologie. Stuttgart: UTB.

Frahm, J.-P. (2006): Der Einfluss von Ammoniak auf Stickstoff liebende Flechten in verkehrsbelasteten Gebieten. In: *Immissionsschutz* (4), S. 164–167.

Früh, B.; Koßmann, M.; Roos, M. (2011) Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Hrsg.: Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2011. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237)

Garty, J.; Kauppi, M.; Kauppi, A. (1996): Accumulation of airborne elements from vehicles in transplanted lichens in urban sites. In: *Journal of Environmental Quality* 25(2) (2), S. 265–272.

Hawksworth, D.L; Rose, F. (1970): Qualitative scale for estimating sulfur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. In: *Nature* 227, S. 145–148.

Herzig, R.; Liebendörfer, L.; Urech, M. (1987): Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung in der Schweiz: Methoden-Evaluation und Eichung mit wichtigen Luftschadstoffen. In: *VDI-Berichte* 609, S. 619–639.

HLUG (2015): Lufthygienischer Jahresbericht 2014. Teil 1: Kontinuierliche Messungen. Wiesbaden.

HLNUG (2016): Immissions- und Klimadaten aus dem Fundus des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.

Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) (2009): Fachliche Begleitung des Projektbeirates Luftqualität in der Stadt. Bericht im Auftrag der Stadt Aschaffenburg. Heidelberg.

IPCC Working Group (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

Johnsen, I.; Söchting, U. (1973): Influence of Air Pollution on the Epiphytic Lichen Vegetation and Bark Properties of Deciduous Trees in the Copenhagen Area. In: *Oikos* 24, S. 344–351.

Kirschbaum, U. (2016): Umweltbewertung mit Hilfe von Flechtenkartierungen in Wetzlar und Gießen. Vergleich zwischen den Erhebungen von 1970, 1980, 1985, 1995, 2005, 2010 und 2015. In Vorbereitung.

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.; Hanewald, K. (2001): Veränderungen des Flechtenbewuchses in den hessischen Dauerbeobachtungsflächen Melsungen und Limburg zwischen 1997 und 1999. In: *Angewandte Botanik* 75, S. 20–30.

Kirschbaum, U.; Wirth, V. (1995): Flechten erkennen - Luftgüte bestimmen. Stuttgart: Ulmer.

LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009): Langfristige Entwicklung der Schadstoffbelastung an den bayerischen LÜB-Messstationen. Langzeitverläufe. Publikation des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz.

LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015): Langfristige Entwicklung der Schadstoffbelastung an den bayerischen LÜB-Messstationen. Langzeitverläufe für NO: Publikation des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz.

Nieboer, E.; Richardson, D. H. S.; Tomassini, F. D (1978): Mineral Uptake and Release by Lichens: An Overview. In: *The Bryologist* 81(2), S. 226–246.

Nylander, W. (1866): Les Lichens des Jardins du Luxembourg. In: *Bull. Soc. Bot. France* 13, S. 364–371.

Prechtel, F.; Wegehaupt, T. (2003): Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz zum Vollzug von § 40 Abs. 2 BImSchG und der 23. BImSchV in der Stadt Aschaffenburg. Hg. v. Stadt Aschaffenburg.

Puckett, K. J. (1976): The effect of heavy metals on some aspects of lichen physiology. In: *Can. J. Bot.* 54, S. 2695–2703.

Rabe, R. (1997): Ermittlung der Luftqualität in Aschaffenburg mit Flechten als Bioindikatoren. Hg. v. unveröff. Gutachten im Auftrag der Stadt Aschaffenburg.

Rabe, R.; Beckelmann, U. (1987): Zusammenhänge zwischen der durch Flechten angezeigten Gesamtverunreinigung der Luft und Gesundheitsbeeinträchtigungen beim Menschen. In: *VDI-Berichte* 609, S. 729–753.

Rao, D.N; Robitaille, G.; Leblanc, F. (1977): Influence of heavy metal pollution on lichens and bryophytes. In: *J. Hattori Bot. Lab.* 42, S. 213–239.

Reuter U. & Kapp R. (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hg. v. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg.

- Richardson, D. H. S; Nieboer, E. (1981): Lichens and pollution monitoring. In: *Endeavour*, S. 127–133.
- Sernander, R. (1926): Stockholms natur. Almqvist.
- Schlett, D. (2016): Mitarbeiter im Amt für Umwelt- und Verbraucherschutz der Stadt Aschaffenburg, mündl..
- Stapper, N. J; Franzen, I.; Gohrbandt, S.; Frahm J.-P. (2000): Moose und Flechten kehren ins Ruhrgebiet zurück. In: *LÖBF-Mitteilungen*, S. 12–21.
- Stroh, K.; Djeradi, B. (2004): Ammoniak und Ammonium. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.
- Umweltbundesamt: Feinstaub. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/lufts Schadstoffe/feinstaub>, zuletzt geprüft am 26.06.2016.
- Umweltbundesamt: Staub - allgemein. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/luft/lufts Schadstoffe/staub>, zuletzt geprüft am 26.06.2016.
- Umweltbundesamt (2005): Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM). Hg. v. UBA. Berlin.
- van Herk, C. M.; Aptroot, A.; van Dobben, H.F. (2002): Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. In: *Lichenologist* 34 (2), S. 141–154.
- VDI 3799 Blatt 1 (1995): Messen von Immissionswirkungen. Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten; Flechtenkartierung zur Ermittlung des Lüftgütwertes (LGW). In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft* 1, S. 1–24.
- VDI 3957 Blatt 13 (2005): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. In: *VDI/DIN Handbuch Reinhaltung der Luft*.
- VDI 3957 Blatt 20 (2016): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. In: *VDI/DIN Handbuch Reinhaltung der Luft*.
- Vorbeck, A.; Windisch, U. (2001): Flechtenkartierung München. Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.
- Vorbeck, A.; Windisch, U. (2002a): Flechtenkartierung München - Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. In: *Materialien des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)*.
- Vorbeck, A.; Windisch, U. (2002b): Immissionsbezogene Flechtenkartierung Aschaffenburg unter besonderer Berücksichtigung des Straßenverkehrs. Wiederholungsuntersuchung 2002. Unveröff. Gutachten der Stadt Aschaffenburg.

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.

Wiegel, H.; Bremer, G.; Paus, S. (1991): Ermittlung der Luftqualität in Aschaffenburg mit Flechten als Bioindikatoren.

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

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

Windisch, U.; 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.; Eichler, M.; Cezanne, R. (2011): Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme mittels Flechtenkartierung in Bayern. Aktualisierte Version vom Januar 2012: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.). Online verfügbar unter http://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=STMUG&DIR=stmug&ACTIONxSETVAL%28index.htm,APGxNODENR:750,USERxBODYURL:artdtl.htm,AARTxNR:lfu_all_00098%29=X.

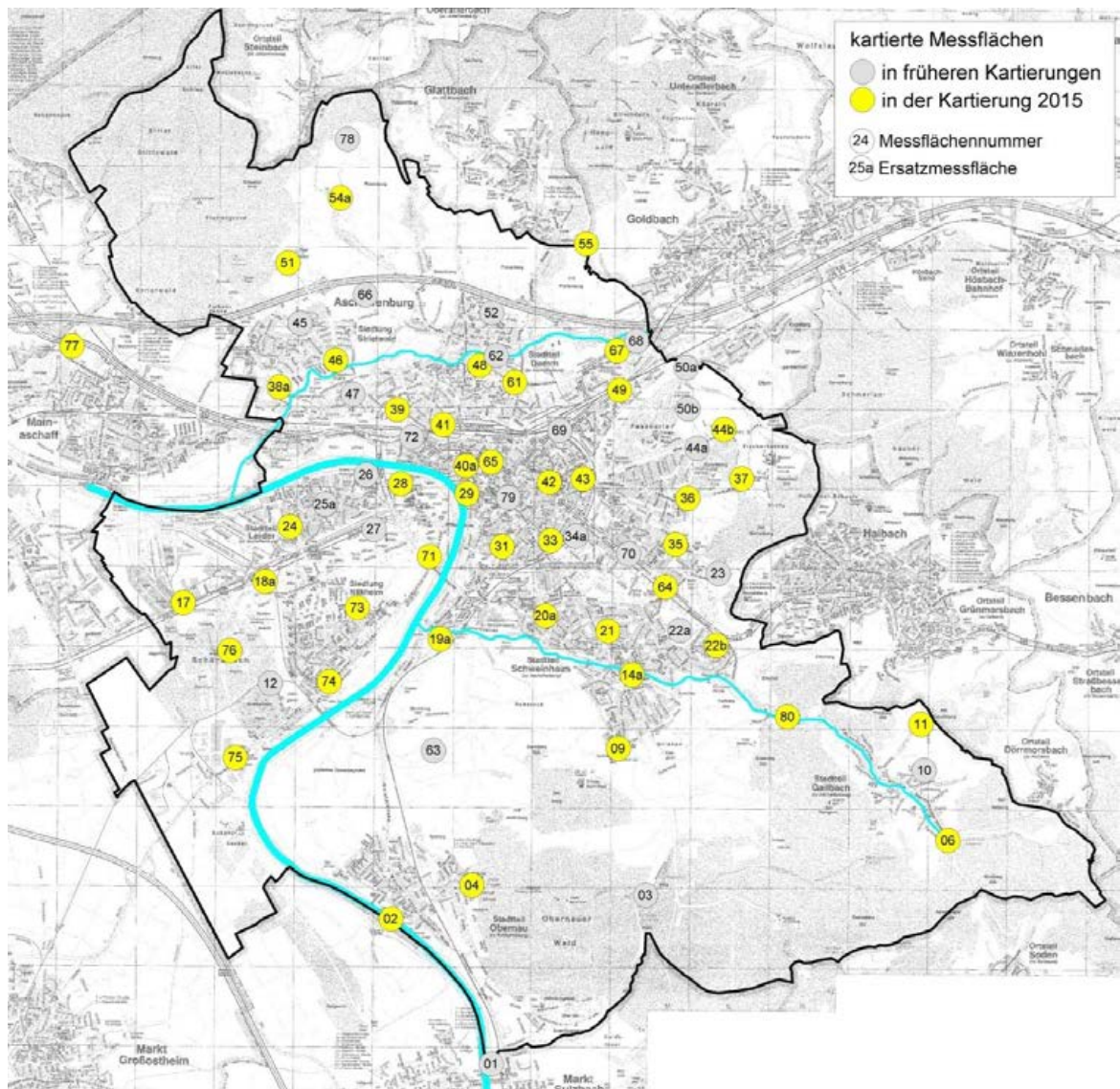
Wirth, V. (2001): Zeigerwerte von Flechten. In: *Scripta Geobotanica* 18, S. 221–243.

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

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

Wyrwich, C. (2006): Maßnahmenplan zur langfristigen Einhaltung der Immissionsgrenzwerte der 22. BImSchV in der Stadt Aschaffenburg. Hg. v. Regierung von Unterfranken.

Anhang 1 : Übersicht der kartierten Messflächen



Anhang 2 : Daten CD

Text:

Flechten_AB_2015.pdf

ESRI shape:

Flechten_2015_point.dbf

Flechten_2015_point.shx

Flechten_2015_point.shp

Intergraph:

Flechten_2015.DGN

Karten A3:

Luftgütekarte_2015_A3.jpg

Luftgütekarte_2015_A3.pdf