

# Umweltbewertung mit Hilfe von Flechtenkartierungen in Wetzlar und Gießen

Vergleich zwischen den Erhebungen von 1970, 1980, 1985, 1995, 2005, 2010 und 2015

von Dr. Ulrich Kirschbaum



Mehlige Astflechte (*Ramalina farinacea*)

Die Flechte ist eine sogenannte Referenzart. Sie hat sich in den letzten Jahren in Mitteleuropa infolge verbesserter Luftgüte deutlich ausgebreitet.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>S.</b>
<b>1 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>5</b>
<b>2 EINLEITUNG</b>	<b>6</b>
<b>3 METHODEN</b>	<b>6</b>
3.1 Das Messnetz	6
3.2 Baumartenauswahl	7
3.3 Erfassung der Flechten	8
3.4 Auswertung der immissionsbezogenen Flechtenkartierung	10
3.5 Bewertung der Ergebnisse	10
3.6 Bewertung der Flechten als Anzeiger des Klimawandels	11
3.7 Verwendung von Zeigerwerten	12
3.8 Bestimmung der Rinden-pH-Werte	13
<b>4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b>	<b>14</b>
4.1 Entwicklung der pH-Werte der Baumrinden	14
4.2 Aktueller Stand der lufthygienischen Situation von Wetzlar und Gießen	18
4.3 Zeitliche Entwicklung der lufthygienischen Situation von Wetzlar und Gießen	20
4.4 Entwicklungstendenzen einzelner Flechtenarten von 1985 bis 2015	28
4.5 Zeigerwerte	38
4.6 Flechten als Anzeiger des Klimawandels	47
<b>5 LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>56</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 01: Kartierte Baumarten für die Untersuchung 2015 .....	07
Abb. 02: Aufnahme­fläche für die Flechtenerhebungen der 70er Jahre; halber Stammumfang .....	08
Abb. 03: Aufnahmegitter für die Flechtenerhebungen nach VDI 3799, 1995 .....	09
Abb. 04: Aufnahmegitter für die Flechtenerhebungen nach VDI 3957, 13; 2005 .....	09
Abb. 05: Bewertungsmatrix zur Ermittlung der Luftgüte anhand der Kombination der Diversitätswerte der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger .....	10
Abb. 06: pH-Wertveränderungen an Linden in Wetzlar und Gießen (1970-2015) .....	14
Abb. 07: pH-Wertveränderungen an Pappeln in Wetzlar und Gießen (1985-2015) .....	14
Abb. 08: pH-Wertveränderungen an Apfelbäumen in Wetzlar und Gießen (1985-2015) .....	15
Abb. 09: Entwicklung der Schwefeldioxid­gehalte in Wetzlar/Gießen (Jahresmittelwerte) [HLNUG, 2016] .....	15
Abb. 10: Entwicklung der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen (Jahresmittelwerte) [HLNUG, 2016] .....	16
Abb. 11: Entwicklung und räumliche Verteilung der pH-Werte von Linden in Wetzlar (1985-2015) .....	17
Abb. 12: Entwicklung und räumliche Verteilung der pH-Werte von Linden in Gießen (1970-2015) .....	17
Abb. 13: Lufthygienische Situation von Wetzlar (2015, nach VDI-Richtlinie 3957, 13) .....	18
Abb. 14: Lufthygienische Situation von Gießen (2015, nach VDI-Richtlinie 3957, 13) .....	19
Abb. 15: Entwicklung der Artenzahlen in Wetzlar und Gießen zwischen 1970 und 2015 .....	20
Abb. 16: Entwicklung der Luftgüteindizes in Wetzlar (1970 – 2015) [nach VDI 3957, 13; 2005] .....	21
Abb. 17: Lufthygienische Situation in Wetzlar (1969) .....	22
Abb. 18: Lufthygienische Situation in Frankfurt am Main (1968) .....	22
Abb. 19: Entwicklung der Luftgüteindizes in Gießen (1970 – 2015) [nach VDI 3957, 13; 2005] .....	24
Abb. 20: Lufthygienische Situation in Gießen (1970) .....	25
Abb. 21: Entwicklung der Luftgüteklassen in Wetzlar (1985-2015) .....	26
Abb. 22: Entwicklung der Luftgüteklassen in Gießen, 1985-2015 .....	26
Abb. 23: Entwicklung der toxtoleranten und stark acidophytischen Flechte <i>Lecanora conizaeoides</i> .....	28
Abb. 24: Entwicklung der acidophytischen Flechte <i>Hypogymnia physodes</i> .....	29
Abb. 25: Entwicklung der neutrophytischen und eutrophierungstoleranten Flechte <i>Xanthoria parietina</i> .....	30
Abb. 26: Entwicklung der toxi- und eutrophierungstoleranten Flechten <i>Physcia adscendens/tenella</i> .....	31
Abb. 27: Entwicklung der nitrophilen und eutrophierungstoleranten Flechte <i>Phaeophyscia orbicularis</i> .....	32
Abb. 28: Entwicklung der Referenzart <i>Parmelia sulcata</i> (subneutrophytisch, mittelempfindlich) .....	33
Abb. 29: Entwicklung der Referenzart <i>Melanohalea exasperatula</i> (subneutrophytisch, mittelempfindlich) .....	34
Abb. 30: Entwicklung der Referenzarten <i>Melanelixia glabratula/subaurifera</i> (subneutrophytisch, empfindlich) .....	35
Abb. 31: Entwicklung der sehr empfindlichen Referenzart <i>Ramalina farinacea</i> .....	36
Abb. 32: Entwicklung der sehr empfindlichen Referenzart <i>Usnea spec.</i> .....	37
Abb. 33: Entwicklung der mittleren Reaktionszahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015) .....	38
Abb. 34: Entwicklung der mittleren Reaktionszahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015) .....	39
Abb. 35: Entwicklung der mittleren Nährstoffzahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015) .....	39
Abb. 36: Entwicklung der Stickstoffdioxidkonzentrationen in Wetzlar/Gießen [HLNUG, 2016] .....	40
Abb. 37: Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Hessens (Jahresmittelwerte auf der Basis von Stundenmittelwerten) [HLNUG, 2016] .....	41
Abb. 38: Entwicklung der Hintergrundkonzentrationen Ammoniak von in verschiedenen Gebieten Deutschlands (Depositionsmessungen) .....	41
Abb. 39: Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in Wetzlar (1985-2015) .....	42
Abb. 40: Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in Gießen (1985-2015) .....	42
Abb. 41: Entwicklung der mittleren Nährstoffzahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015) .....	43

Abb. 42: ca. 300 Jahre altes Exemplar von <i>Anaptychia ciliaris</i> (Gefranste Wimpernflechte) aus dem Gießener Raum (Herbarmaterial der fotografierten Flechten befindet sich in Oxford) .....	44
Abb. 43: ca. 300 Jahre altes Exemplar von <i>Lobaria pulmonaria</i> (Lungenflechte) aus dem Gießener Raum .....	45
Abb. 44: ca. 300 Jahre altes Exemplar von <i>Sticta sylvatica</i> (Wald-Grübchenflechte) aus dem Gießener Raum .....	45
Abb. 45: <i>Anaptychia ciliaris</i> (Gefranste Wimpernflechte) aus Wetzlar (2015) .....	46
Abb. 46: Einwanderung wärmeanzeigender Flechtenarten in Gießen/Wetzlar (1985 – 2015) .....	48
Abb. 47: Entwicklung der mittleren Temperaturzahlen in Wetzlar und Gießen, 1985 – 2015 .....	48
<u>Abb. 48</u> : Entwicklung der mittleren Temperaturzahlen im Bereich Gießen, 1720 – 2015 .....	49
Abb. 49: Entwicklung der Klimawandelzeiger in Wetzlar zwischen 1985 und 2015 .....	50
Abb. 50: Entwicklung der Klimawandelzeiger in Gießen zwischen 1985 und 2015 .....	51
Abb. 51: Räumliche Verteilung der Klimawandelzeiger in Gießen (2015) .....	52
Abb. 52: Langfristige Temperaturentwicklung am Flughafen Frankfurt/M. [pers. Mitt. Prof. Schönwiese] .....	53
Abb. 53: Temperaturentwicklung (Sommerhalbjahr) in Frankfurt/M. [SCHÖNWIESE & et al., 2006] .....	53
Abb. 54: Temperaturentwicklung (Winterhalbjahr) in Frankfurt/M. [SCHÖNWIESE & et al., 2006] .....	53
Abb. 55: Entwicklung der mittleren Feuchtezahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015) .....	54
<u>Abb. 56</u> : Entwicklung der mittleren Feuchtezahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015) .....	54
Abb. 57: Entwicklung des Klimaindexes in Gießen/Wetzlar (1970 – 2015) .....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl kartierter Messflächen in Wetzlar/Gießen (1985-2015) .....	06
Tabelle 2: Anzahl kartierter Bäume und mittlere Baumzahl in Wetzlar/Gießen (1985-2015) .....	07
Tabelle 3: Erläuterungen zur Bewertungsmatrix .....	11
Tabelle 4: Beispiele für die verbale Beschreibung des Luftgüteindexes .....	11
Tabelle 5: Beispielberechnung einer Messfläche mit sechs kartierten Bäumen .....	12
Tabelle 6: Entwicklung der mittleren Diversität (Häufigkeit) der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger in Wetzlar und Gießen (1985-2015) .....	25
Tabelle 7: Entwicklung der Flechtenvegetation an den Linden der Grundschule Wieseck (1985-2015) .	27

# 1 Zusammenfassung

Im Jahr 2015 wurden in den beiden mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen immissionsbezogene Flechtenkartierungen durchgeführt. Die Städte waren bereits 1970, 1980, 1985, 1995, 2005 und 2010 unter dem gleichen Aspekt auf ihren Flechtenbewuchs untersucht worden. Trotz etwas abgewandelter Untersuchungsmethoden im Verlauf des langen Erhebungszeitraumes von 45 Jahren, konnten die Ergebnisse ab 1985 dennoch direkt miteinander verglichen werden, weil sie sich an die Vorgaben der aktuellen VDI-Flechtenkartierungsrichtlinie anpassen ließen. Auch die noch früheren Untersuchungsergebnisse waren teilweise ebenfalls im Sinne der Richtlinie interpretierbar.

Parallel zur Flechtenkartierung waren 1970, 1985, 2005, 2010 und 2015 vergleichende Bestimmungen der pH-Werte an den Baumrinden der Flechtenbäume durchgeführt worden.

Die Ergebnisse lassen sich, wie folgt, zusammenfassen:

- In beiden Städten steigen die pH-Werte infolge sich verringernder SO<sub>2</sub>-Belastung seit Beginn der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts an und erreichen jetzt fast wieder Werte aus vorindustrieller Zeit.
- Der Anstieg hat sich auch zwischen 2010 und 2015 fortgesetzt – wenn auch mit verminderter Intensität.
- Die Erhöhung des pH-Wertes geschah in Wetzlar früher und bewegte sich auf höherem Niveau als in Gießen. Als Ursache dafür ist das Wetzlarer Zementwerk anzusehen, das Kalkstaub emittierte; dieser neutralisiert die sauren Niederschläge; die Zementproduktion wurde allerdings 2010 eingestellt.
- Mit der Verringerung der Staubemissionen Wetzlars durch emissionsmindernde Maßnahmen (z.B. Einbau von Filtern) innerhalb der letzten 45 Jahre glichen sich die pH-Werte in beiden Städten im Vergleichszeitraum immer mehr an.
- Bei den Flechten zeigte sich 1970, zum Zeitpunkt der ersten Untersuchung, aufgrund extrem hoher Immissionsbelastung eine völlige Verarmung der Flechtenvegetation, bis hin zu flechtenfreien Gebieten im industrialisierten Norden Wetzlars.
- Dass diese Flechtenarmut nicht natürlich war, beweisen Erhebungen aus vorindustrieller Zeit, die eine reichhaltige Lichenenflora für den mittelhessischen Raum beschreiben.
- Mit zunehmender Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse innerhalb des Untersuchungszeitraumes – hervorgerufen durch verminderte Immissionen (v.a. SO<sub>2</sub>) – steigt die Artenzahl der wieder zurückkehrenden Flechten an.
- Kamen zunächst nur toxtolerante Arten zurück, so ist inzwischen auch eine Rekolonisation durch empfindliche Spezies zu beobachten.
- Diese Entwicklung verlief in Wetzlar schneller und intensiver – als Folge der Neutralisation der sauren Schadgase durch den Kalkstaub. Der durch die Flechten angezeigte lufthygienische Vorsprung Wetzlars hat sich im letzten Jahrzehnt immer weiter verringert; für 2015 sind die Unterschiede kaum noch zu erkennen.
- Der Vergleich der Flechtenvegetation zwischen 1970 und 2015 zeigt darüber hinaus einen deutlichen Anstieg von Arten, die durch eutrophierende Luftschadstoffe begünstigt werden.
- Eine weitere Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse erscheint möglich: In sehr gering belasteten Gebieten Hessens (z.B. Rhön, Kellerwald) werden jüngst Rückeinwanderer beobachtet, die zu den sehr empfindlichen Flechtenarten gerechnet werden; einige davon konnten 2015 auch im Untersuchungsgebiet nachgewiesen werden.
- In der aktuellen Untersuchung wurden auch verstärkt Arten nachgewiesen, die als Wärmezeiger gelten. Dieser Befund tritt seit Beginn des neuen Jahrhunderts immer deutlicher zutage; als Ursache hierfür wird der Klimawandel angesehen.

**Schlagworte:** Immissionsbelastung, biologische Messverfahren, VDI-Richtlinie, Flechten, pH-Werte, Baumrinde, Diversität, Flechten als Zeiger des Klimawandels.

## 2 Einleitung

Es gibt nur wenige in die Vergangenheit zurückreichende Kartierungen der immissionsempfindlichen Flechten unter standardisierten Bedingungen. Vergleichende Bewertungen der lufthygienischen Situation längerer Zeiträume sind deshalb kaum möglich, weil in früheren Untersuchungen nach abweichenden Methoden vorgegangen wurde und die Umrechnung auf heutige (VDI-) Methoden daran scheitert, dass die Originaldaten von damals nicht mehr vorliegen.

Eine unter diesen Gesichtspunkten positive Ausnahme stellen die mittelhessischen Städte Gießen und Wetzlar dar: Sie wurden seit 1970 immer wieder in unregelmäßigen Zeitabständen kartiert und die originalen Erhebungsdaten der jeweiligen Untersuchungen waren noch vorhanden. Ab der Kartierung von 1985 sind sogar die Daten über die genaue Lage der damals kartierten Substrate (Bäume) verfügbar, so dass direkte Vergleiche des Bewuchses an den heute noch vorhandenen Exemplaren vorgenommen werden konnten.

Naturgemäß haben auch in unseren Untersuchungsgebieten nicht alle Erhebungen nach den gleichen Methoden stattgefunden. So wurden z.B. bei den ersten Kartierungen 1970 lediglich unterschieden, ob Krusten-, Blatt- oder Strauchflechten an den untersuchten Bäumen vorkamen [NAUMANN, 1969 und 1970]. Daher kann man hierbei lediglich über jene Areale etwas aussagen, in denen damals nur Krustenflechten (das war zu jener Zeit fast ausschließlich *Lecanora conizaeoides*, eine überaus säureertragende, toxtolerante Art) vorkamen: Das alleinige Vorkommen dieser Art signalisiert nach den Maßstäben der heutigen (VDI-) Interpretation eine extrem hohe Immissionsbelastung mit sauren Schadgasen – v.a. SO<sub>2</sub>. Neben der Erfassung der Flechtenvegetation wurden ab 1970 in Gießen und ab 1985 in Wetzlar auch Messungen des pH-Wertes an den Rinden der damals kartierten Bäume vorgenommen, so dass auch hier ein Vergleich mit unseren Untersuchungen von 2015 möglich war [SÄNGER, 1972; BIECKER, 1985; HANSEN, 1985].

Der vorliegende Bericht beschreibt die Entwicklung der Flechtenvegetation an freistehenden Laubbäumen und der Rinden-pH-Werte in beiden Städten im Zeitraum zwischen 1970 bis 2015. Die Auswertung der immissionsbezogenen Flechtendaten erfolgte nach der z.Z. gültigen Richtlinie VDI 3957, Blatt 13 [VDI, 2005]. Darüber hinaus wurden die Daten auch verwendet, um Aussagen über die Veränderung des Klimas in den beiden Städten zu machen [VDI, 2015].

## 3 Methoden

### 3.1 Das Messnetz

Über die Stadtgebiete von Wetzlar und Gießen wurde ein Raster mit Messflächen von 1 km Seitenlänge gelegt (siehe Abbildungen 13 und 14). In den Messflächen erfolgte die Untersuchung der Flechten an jeweils 6-12 geeigneten Bäumen. Tabelle 1 gibt die Anzahl der kartierten Flächen in den verschiedenen Untersuchungsjahren wieder. Im Jahr 2015 waren dies insgesamt 119. Von diesen wurden über die fünf Kartierungen zwischen 1985 und 2015 insgesamt 63 Messflächen in allen Erhebungsjahren erfasst (34 in Wetzlar, 29 in Gießen; siehe Abb. 16/19 – schwarz umrandete Raster). Zwecks besserer Vergleichbarkeit wird im vorliegenden Bericht v.a. auf die Ergebnisse dieser „Kernbereiche“ zurückgegriffen.

Tabelle 1: Anzahl kartierter Messflächen in Wetzlar/Gießen (1985-2015)

	1985	1995	2005	2010	2015
<b>Anzahl kartierter Messflächen in Wetzlar</b>	34	65	52	52	52
<b>Anzahl kartierter Messflächen in Gießen</b>	29	28	64	67	67

### 3.2 Baumartenauswahl

Bedingt durch die Festlegung der untersuchten Baumarten als Flechtenunterlagen in früheren Erhebungen, bestand bei der aktuellen Kartierung von 2015 nicht die Möglichkeit, sich an den in der aktuellen VDI-Richtlinie festgelegten Baumarten zu orientieren: Aus Gründen der Vergleichbarkeit sollten möglichst viele der früher untersuchten Bäume wieder erfasst werden.

Diese Festlegung erwies sich jedoch als unproblematisch, da die Mehrzahl der früher untersuchten Bäume in jene Kategorie der Richtlinie gehören, die unter natürlichen Verhältnissen subneutrale Rinden besitzen und daher gemeinsam kartiert werden dürfen (Ausnahmen: *Quercus spec.* und *Robinia pseudacacia*, beide sehr selten kartiert). Die prozentuale Aufteilung der Flechtenbäume ist in Abb. 1 wiedergegeben. Wie schon bei früheren Aufnahmen, wurde auch 2015 darauf geachtet, dass die Vorgaben der VDI-Richtlinie bzgl. der Eignung eines Baumes als Flechtenträger eingehalten wurden; d.h. schräg stehende, verletzte, durch Weidevieh abgescheuerte oder gespritzte Bäume wurden verworfen. Vergleicht man die Baumartenzusammensetzung über die Jahrzehnte, so ist ein Rückgang bei Pappel und Apfel (überaltert/gefällt) zugunsten von Ahorn und Esche (Neuanpflanzungen) festzustellen. Wie aus der Abbildung hervorgeht, beschränkten sich unsere Erhebungen auf wenige Baumarten; knapp 80% beziehen sich auf die vier Hauptbaumarten. Dies erweist sich im Sinn einer Standardisierung des Kartierungsverfahrens als außerordentlich günstig.

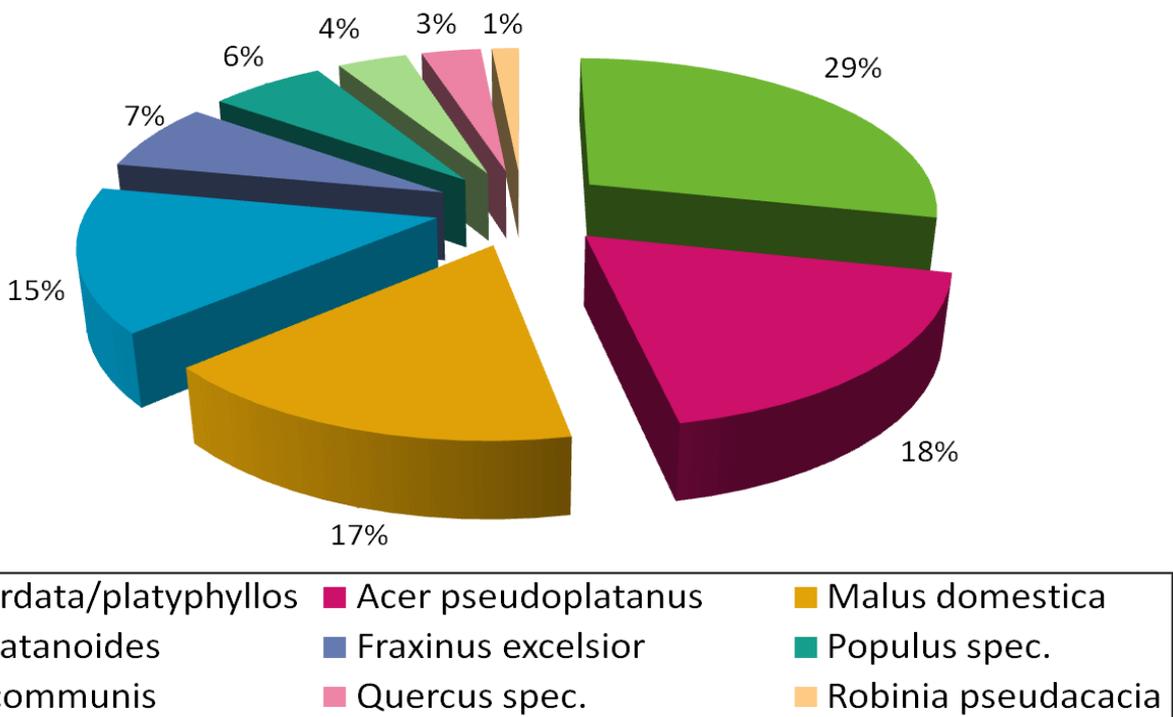


Abb. 1: Kartierte Baumarten für die Untersuchung 2015

Die Anzahl der in jedem Untersuchungszeitraum kartierten Bäume geht aus Tab. 2 hervor. Die hohe Anzahl untersuchter Bäume bei der Kartierung 1985 resultiert aus der Tatsache, dass 1985 die Größe der Messflächen wesentlich kleiner war als bei den späteren Erhebungen. Folglich wurden hier mehrere Kleinflächen zum heute gültigen Raster zusammengefasst. Seit 1995 bewegt sich die mittlere Anzahl kartierter Bäume pro Messfläche auf etwa gleichem Niveau; sie liegt im oberen Bereich der in der VDI-Richtlinie geforderten Zahl von 6-12 Bäumen.

Tabelle 2: Anzahl kartierter Bäume und mittlere Baumzahl in Wetzlar/Gießen (1985-2015)

	1985	1995	2005	2010	2015
<b>Anzahl kartierter Bäume</b>	1533	819	1127	1136	1118
<b>mittlere Anzahl kartierter Bäume pro Messfläche</b>	24	8,8	9,7	9,6	9,4

### 3.3 Erfassung der Flechten

Die Flechtenaufnahme erfolgte 2015 in beiden Städten in einem Messflächenraster von 1 km<sup>2</sup>. In jedem der Messflächen wurden 6-12 geeignete Bäume nach den Vorschriften der aktuellen Kartierungsrichtlinie des VDI auf ihren Flechtenbewuchs untersucht [VDI, 2005].

Das 1969-1972 eingesetzte Flechtenerhebungsverfahren unterschied sich insofern von den späteren, als bei ihnen der am stärksten mit Flechten bewachsene halbe Stammumfang freistehender Laubbäume von ca. 50 cm bis 200 cm über dem Erdboden auf ihren Flechtenbewuchs untersucht wurde (Abb. 2) [NAUMANN, 1969, 1970, WILHELMI, 1972]. Wegen dieser starken Abweichung von späteren Erhebungsmethoden war ein direkter Vergleich mit diesen nicht mehr möglich, zumal hierbei auch die Basisdaten der Kartierungen nicht mehr vorlagen.

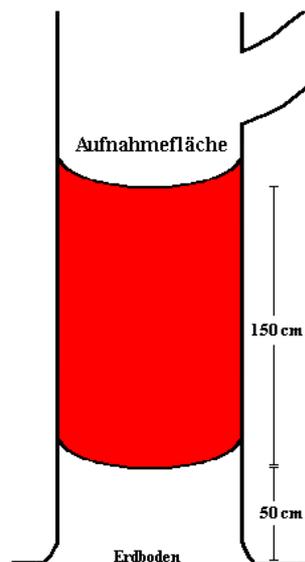


Abb. 2: Aufnahmefläche für die Flechtenerhebungen der 70er Jahre; halber Stammumfang

Daher wurden aus diesen Erhebungen lediglich jene Untersuchungsflächen kartografisch dargestellt, in denen sich keine Flechten gefunden hatten (Flechtenwüste → extrem hohe lufthygienische Belastung) bzw. nur die toxisch-tolerante Art *Lecanora conizaeoides*, deren Vorkommen ebenfalls sehr hohe Belastungen signalisiert. Ihr alleiniges Vorkommen (1970) in manchen Messflächen signalisiert eine sehr ungünstige lufthygienische Situation, die heute in Mitteleuropa nicht mehr auftritt (und daher in der aktuellen VDI-Richtlinie nicht mehr berücksichtigt wird).

Bei den Untersuchungen von 1980 bzw. 1985 [WEBER, 1980; BIECKER, 1986 und HANSEN, 1986] wurde dann bereits den Untersuchungsbäumen ein Aufnahmegitter angelegt, mit dessen Hilfe eine quantitative Erfassung (Frequenz) der vorkommenden Flechtenarten möglich war. Wegen des gegenüber dem heutigen Aufnahmegitter am Baum etwas unterschiedlichen Gitters, mussten die Werte auf die aktuelle Flechtenleiter (Abb. 3) umgerechnet werden.

Von der Flechtenkartierung von Weber (1980) existieren keine Basisdaten mehr, so dass diese Untersuchung nicht im Detail in den Gesamtvergleich mit einbezogen werden konnte.

Die Kartierungen aus dem Jahr 1995 benutzten ebenfalls ein nach unten verdoppeltes Aufnahmegitter; da hier aber die obere und untere Hälfte getrennt aufgenommen wurden, konnten durch Weglassung der Werte der unteren Leiterhälfte die Kartierungs-Vorgaben der aktuellen VDI-Richtlinie eingehalten werden [MARX, 1996; SCHIEK, 1996]. Seit 2005 wird die in Abb. 3 gezeigte Leiter zur Aufnahme der Flechten in Gießen und Wetzlar verwendet [siehe VDI 3957, 13 Anhang A; 2005].

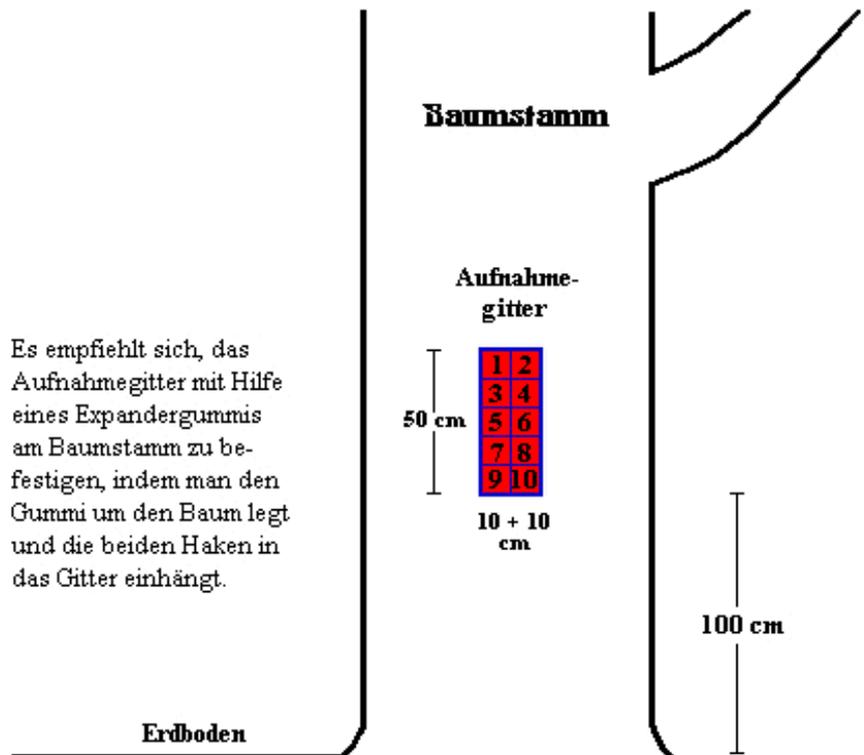


Abb. 3: Aufnahme-gitter für die Flechtenerhebungen nach VDI 3799, 1995

Die jüngst aktualisierte VDI-Richtlinie von 2005 schreibt zwar – in Anpassung an die europäische Flechtenkartierungsrichtlinie [ASTA et al., 2002] – ein erneut verändertes Aufnahme-gitter am Baumstamm vor (Abb. 4), jedoch wird für Untersuchungen aus früheren Jahren die Benutzung des in Abb. 3 dargestellten Gitters aus Vergleichsgründen erlaubt (hierfür gibt es eine angepasste Bewertungsmatrix, die in Abb. 5 wiedergegeben ist).

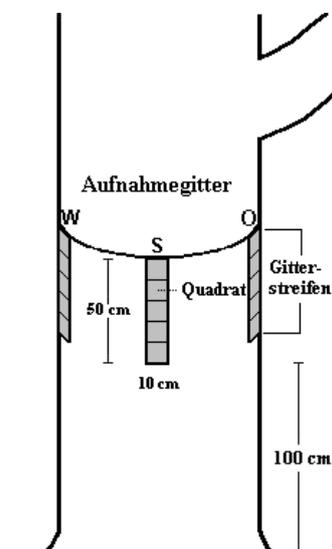


Abb. 4: Aufnahme-gitter für die Flechtenerhebungen nach VDI 3957, 13; 2005

Da die Anzahl der Messflächen der beiden Städte von Kartierung zu Kartierung etwas unterschiedlich war, werden bei der Darstellung der Ergebnisse einerseits die kompletten Untersuchungsgebiete beider aktueller Kartierungen von 2015 wiedergegeben. Andererseits werden beim zeitlichen Vergleich nur solche Messflächen dargestellt, die während des gesamten Untersuchungszeitraumes seit 1985 erfasst worden sind („Kernbereiche“).

Obwohl die Flechtenkartierungen von NAUMANN in den Jahren 1969 bzw. 1970 und die pH-Werterhebungen von SÄNGER erst 1971 erfolgten, werden sie der Einfachheit halber in diesem Bericht einheitlich dem Jahr 1970 zugeordnet.

### 3.4 Auswertung der immissionsbezogenen Flechtenkartierung (Bestimmung des Luftgüte-Indexes „LGI“ nach VDI 3957, 13; 2005)

In der Richtlinie wird der LGI anhand der Anzahl (Diversität) und der Häufigkeit (Frequenz) der vorkommenden Flechtenarten bestimmt; es wird bei diesem Verfahren die mit der Frequenz gewichtete Diversität (**Flechtendiversitätswert**) als Bewertungskriterium für die lufthygienische Situation innerhalb der Messfläche verwendet.

Auf Grund der Reduzierung der SO<sub>2</sub>-Belastung seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts haben sich die Flechten erholt. Im Wettbewerb um die zu besiedelnden Freiräume an den Bäumen hat sich in den letzten Jahren in weiten Teilen Mitteleuropas allerdings nicht eine „normale“, naturnahe Flechtenvegetation eingestellt, sondern – infolge der Auswirkungen luftgetragener Stickstoffverbindungen – eine von Eutrophierungszeigern dominierte, bei der die stickstoffmeidenden Arten weitgehend ausgegrenzt sind. Da Eutrophierung negative Auswirkungen auf die pflanzliche, pilzliche und tierische Artenvielfalt in Ökosystemen hat, wird das Auftreten eutrophierungstoleranter Flechten negativ bewertet. Aus diesem Grund werden die Diversitätswerte für die Eutrophierungszeiger und für die übrigen Arten (hier als Referenzarten bezeichnet) getrennt berechnet.

### 3.5 Bewertung der Ergebnisse

Die Bewertung einer Messfläche und damit ihr „Luftgüteindex“ ergibt sich aus der Kombination der Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger und der Referenzarten. Hierzu werden die Diversitätswerte der Referenzarten in der Bewertungsmatrix auf der Ordinate aufgetragen und die Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger auf der Abszisse. Die Bewertung des Quadrates, in das der Schnittpunkt der beiden Diversitätswerte einer Messfläche zu liegen kommt, wird für die Messfläche übernommen (s. Abb. 5). Im Beispiel einer fiktiven Messfläche „X“ mit einem Flechtendiversitätswert von 16,5 für die Referenzarten und von 10,7 für die Eutrophierungszeiger läge der Schnittpunkt dort, wo sich der magentafarbene Punkt befindet (die Messfläche würde also mit der Farbe Grün versehen).

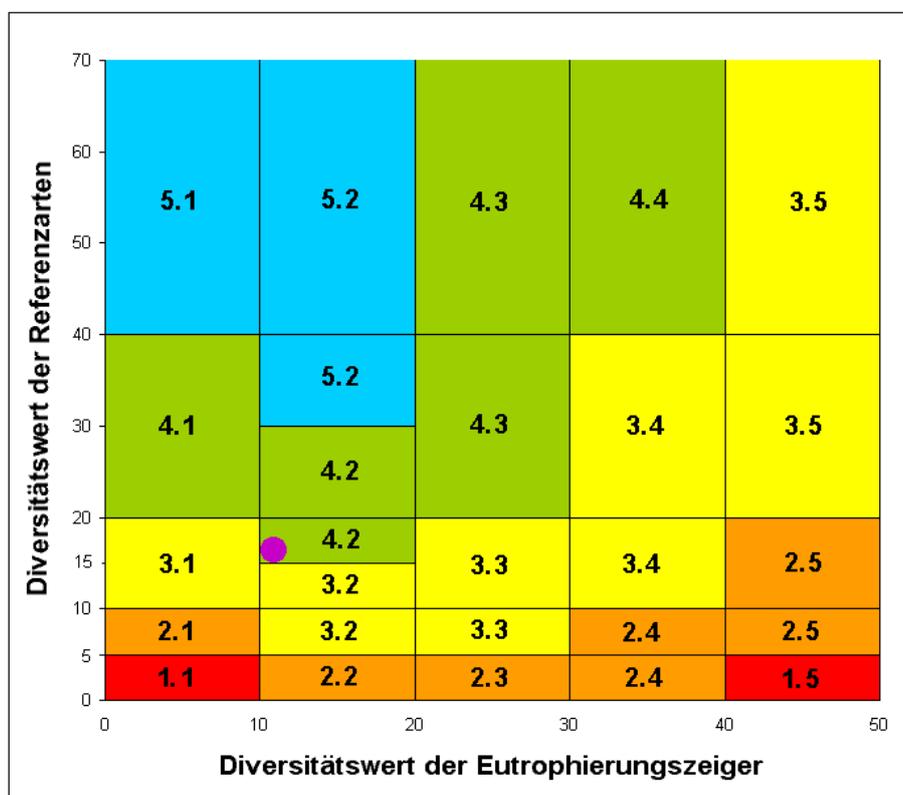


Abb. 5: Bewertungsmatrix zur Ermittlung der Luftgüte anhand der Kombination der Diversitätswerte der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger

In der Richtlinie wird die Luftgüte verbal mit „sehr hoch – hoch – mittel – gering – sehr gering“ bewertet, mit dem Luftgüteindex (LGI) beziffert und für die kartografische Darstellung mit einer Farbe belegt. Der Luftgüteindex setzt sich aus zwei Ziffern zusammen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die erste Ziffer des Indexes entspricht der Luftgüte und ist mit den Farben gekoppelt, die zweite Ziffer (hinter dem Punkt) symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern. Die verbale Bewertung des Luftgüteindexes ist in Tab. 3 zusammengestellt. Die verbale Beschreibung des Luftgüteindexes wird in Tab. 4 an einigen Beispielen erläutert.

Tabelle 3: Erläuterungen zur Bewertungsmatrix

Bewertung der Luftgüte ohne Berücksichtigung eutrophierender Luftschadstoffe		Bewertung eutrophierender Luftschadstoffe	
5	sehr hohe Luftgüte	1	sehr geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen
4	hohe Luftgüte	2	geringer Einfluss eutrophierender Verbindungen
3	mittlere Luftgüte	3	mittlerer Einfluss eutrophierender Verbindungen
2	geringe Luftgüte	4	starker Einfluss eutrophierender Verbindungen
1	sehr geringe Luftgüte	5	sehr starker Einfluss eutrophierender Verbindungen

Tabelle 4: Beispiele für die verbale Beschreibung des Luftgüteindexes

Luftgüteindex	Bewertung
Luftgüteindex 5.1	Sehr hohe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüteindex 4.2 (Messfläche „X“)	Hohe Luftgüte bei geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüteindex 1.5	Sehr geringe Luftgüte bei sehr starkem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüteindex 1.1	Sehr geringe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen

### 3.6 Bewertung der Flechten als Anzeiger des Klimawandels

Grundlage des Verfahrens ist die Erkenntnis, dass es unter den Flechten Arten gibt, die „atlantische“ Klimabedingungen bevorzugen (mild, ozeanisch, warm). Diese Arten kamen ursprünglich bevorzugt im südlichen und westlichen Europa vor, haben sich aber in den letzten Jahren auch in Deutschland ausgebreitet. Gleichzeitig war zu beobachten, dass Kühlezeiger seltener vorkommen bzw. sich in höhere (kältere) Lagen zurückgezogen haben. Beide Beobachtungen werden den veränderten klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa zugeschrieben. Daher wurde von der zuständigen VDI-Arbeitsgruppe eine neue Richtlinie erstellt, die die Wärmezeiger zur Ermittlung lokaler Klimaveränderungen benutzt; sie werden als „Klimawandelzeiger“ bezeichnet. Die Richtlinie liegt seit 2016 vor [VDI 3957, 20; 2016].

Im Gegensatz zum dort gemachten Vorschlag, wonach der gesamte Baumstamm nicht standardisierter „Klimabäume“ bis in 2 m Höhe über dem Boden nach Flechten abgesucht werden soll, wurden in unserem Fall allerdings lediglich die zur immissionsbezogenen Flechtenkartierung [VDI 3957, 13; 2005] erfassten, standardisierten, Bäume mit ihrem kleinen Messgitter (Abb. 3) bewertet. Dies ist nach den Vorgaben der Richtlinie zulässig, hat jedoch zur Folge, dass die hier dargestellten Ergebnisse zwar untereinander, nicht aber mit Resultaten von Kartierungen vergleichbar sind, die mit dem aktuellen Messgitter (s. Abb. 4) bzw. den „Klimabäumen“ ermittelt worden sind.

Zur Auswertung der Erhebungen wird der Diversitätswert der Klimawandelzeiger ( $FDW_{KWZ}$ ) berechnet. Der  $FDW_{KWZ}$  entspricht den mittleren Flechtenfrequenzen der Klimawandelzeiger pro Messfläche. Beispiel (Tab. 5): Beträgt der  $FDW_{KWZ}$  einer Messfläche 6, so sind an den Bäumen durchschnittlich sechs der zehn Messgitterfelder von einem Klimawandelzeiger bewachsen.

Tabelle 5: Beispielberechnung einer Messfläche mit sechs kartierten Bäumen (dargestellt sind nur die in den 60 Messgitterflächen gefundenen Klimawandelzeiger)

Messfl. 3478/5603	Gie	Straße Strahlenzentrum						Bearb. Wir				Dat. 9.6.15	
Baumnummer		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>gefundene Flechtenarten (Frequenz)</b>													
<i>Flavoparmelia caperata</i>			1										
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>					1								
<i>Melanohalea elegantula</i>					3								
<i>Punctelia borreri</i>					1		10						
<i>Punctelia jeckeri</i>		4	1	8	4	1							
<i>Punctelia subrudecta</i>		1			1								

Die Werte für die Häufigkeit der Klimawandelzeiger wurden auch für die zurückliegenden Kartierungen (1985-2010) ermittelt.

### 3.7 Verwendung von Zeigerwerten [WIRTH 2010]

Bei Erhebungen im Gelände hat sich gezeigt, dass jede Flechtenart bestimmte Ansprüche gegenüber abiotischen Umweltfaktoren besitzt (z.B. gegenüber dem Säure- oder Nährstoffgehalt ihres Wachstumssubstrates). Demzufolge bevorzugt sie ökologische Gegebenheiten, die diesen Ansprüchen genügen und meidet solche, die ihre diesbezüglichen Bedürfnisse nicht befriedigen. Im Umkehrschluss kann man aus dem Vorkommen einer Art mit spezifischen Umweltansprüchen das Vorhandensein und die Quantität eben dieser Faktoren ableiten; die Flechten wurden gewissermaßen auf jenen Faktor "geeicht", dessen Vorhandensein und Stärke sie anzeigen. Bei der Verwendung von Flechten als Zeiger für Umwelteigenschaften sollte man sich jedoch darüber im Klaren sein, dass ihr Aussagewert sich auf die durchschnittliche und langfristige Qualität und Quantität von Umweltparametern an den untersuchten Standorten bezieht und dass das Zusammenwirken mehrerer Umweltfaktoren das Ergebnis beeinflussen kann.

Zeigerwerte für Flechten gibt es für die arealkundlichen Faktoren Licht (L), Temperatur (T), Kontinentalität/Ozeanität (K), Feuchte (F), Reaktion (R) und Stickstoff (N). Hinzu kommt ein sogenannter Klima-Index [KIRSCHBAUM & WIRTH, 2010]: Hierbei werden die Zeigerwerte für Temperatur und Ozeanität miteinander kombiniert und somit die ökologischen Aussagen beider Parameter integriert. (Ozanisches Klima ist durch geringe Temperaturschwankungen, vergleichsweise hohe Wintertemperaturen und relativ hohe Niederschlagsmengen bzw. Feuchtigkeitswerte gekennzeichnet).

Das ökologische Verhalten wird bezüglich jedes Umweltfaktors nach einer neunstufigen Skala bewertet, wobei 1 das geringste und 9 das größte Ausmaß des betreffenden Faktors bedeutet.

Berechnet werden die mittleren Zeigerwerte entweder ungewichtet oder gewichtet. Bei ersterem Verfahren werden die Zeigerwerte aller in einem Untersuchungsgebiet (z.B. Wetzlar), zu einem Erhebungszeitraum (z.B. 2015) vorkommenden Flechtenarten addiert und dann durch deren Anzahl dividiert. Bei den gewichteten Zeigerwerten gehen noch quantitative Merkmale mit ein: Entweder wird die Anzahl bewachsener Bäume oder die Häufigkeit (Frequenz), mit der eine Art im Messgitter vorkommt, in die Berechnung mit einbezogen.

Unsere Berechnung erfolgte, wenn möglich, gewichtet (unter Einbeziehung bewachsener Bäume). Diese Werte sind genauer, weil hier ein quantitatives Merkmal mit einbezogen wird. War eine Gewichtung – v. a. bei Kartierungen vor 1995 – nicht möglich, mussten ungewichtete Zeigerwerte akzeptiert werden.

Bei der Darstellung der Zeigerweltergebnisse wurden jeweils nur diejenigen Messflächen mit einbezogen, die über den gesamten Zeitraum von 1970 bis 2015 durchgängig beprobt wurden. Damit soll sichergestellt werden, dass nicht eine Ausweitung der Messflächen in Stadtrandgebiete – wie dies seit 1995 sukzessive geschehen ist – das Ergebnis verfälscht.

### 3.8 Bestimmung der Rinden-pH-Werte

Die Bestimmung der Rinden-pH-Werte war 1972/1985/2005/2010 nach folgender Methode erfolgt [SÄNGER, 1972; BIECKER, 1986; HANSEN, 1986]:

- Bei jenen Bäumen eines Untersuchungsstandortes, an denen Flechten kartiert wurden, erfolgte die Entnahme der Rindenproben für die pH-Wertmessung (in der Regel Mischprobe aus ca. 10 Bäumen einer Art).
- Wurde mehr als eine Baumart kartiert, so erfolgte die Probenahme getrennt nach Baumarten.
- Die Proben wurden in 1 – 1,5 m Höhe, außerhalb des Flechtengitters, mit einem Messer entnommen.
- Die Dicke der Rindenstücke war < 3 mm.
- Die Rinde wurde bei Zimmertemperatur getrocknet und anschließend bei -20 °C aufbewahrt.
- Von den Rindenstücken wurden Staub, Algen und Flechten mit einer Bürste entfernt.
- Die Mischprobe eines Untersuchungsstandortes wurde in einer Mühle zerkleinert u. homogenisiert.
- Jeweils 2 g der pulverisierten Probe wurden mit 15 ml Aqua dest. versetzt u. über Nacht geschüttelt.
- Die pH-Wertmessung erfolgte mit einem pH-Meter.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden die Bestimmungen 2015 ebenfalls nach dieser Methode durchgeführt.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Entwicklung der pH-Werte der Baumrinden

Wegen der besseren Vergleichbarkeit der pH-Werte über die Jahre hinweg wurden in den folgenden Abbildungen nur solche Messflächen einbezogen, die über den gesamten Untersuchungszeitraum von 1970 (bzw. 1985) bis 2015 beprobt worden sind (häufig waren sogar die zur Mittelwertbildung herangezogenen Einzelbäume identisch).

Das Ergebnis lässt eine deutliche Erhöhung der pH-Werte bei allen hier dargestellten Baumarten und auch bei beiden Städten im Vergleich zwischen der ersten Erhebung und 2015 erkennen (siehe Abbildungen 6 - 8).

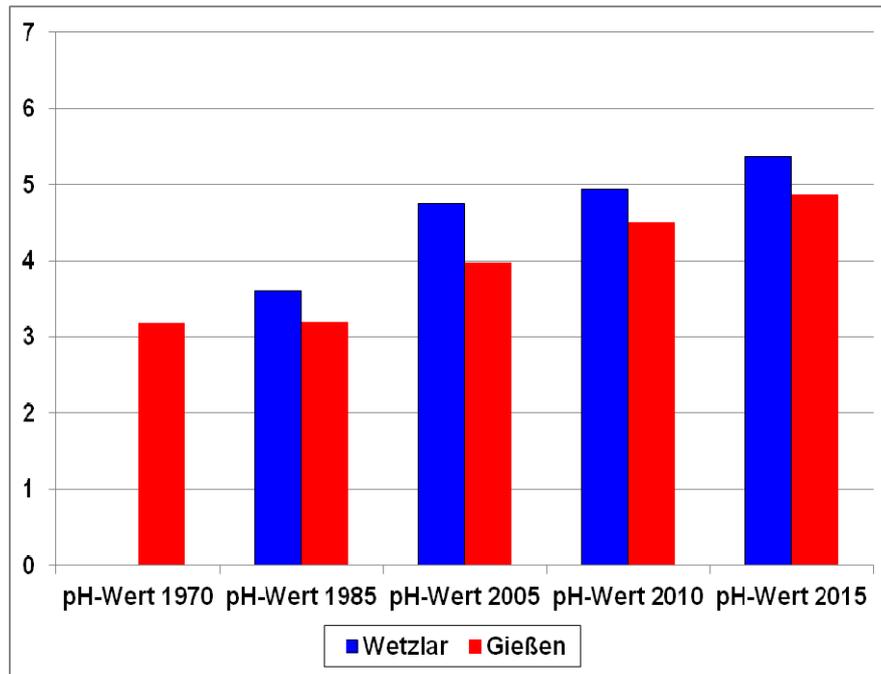


Abb. 6: pH-Wertveränderungen an Linden in Wetzlar und Gießen (1970-2015)

(Es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

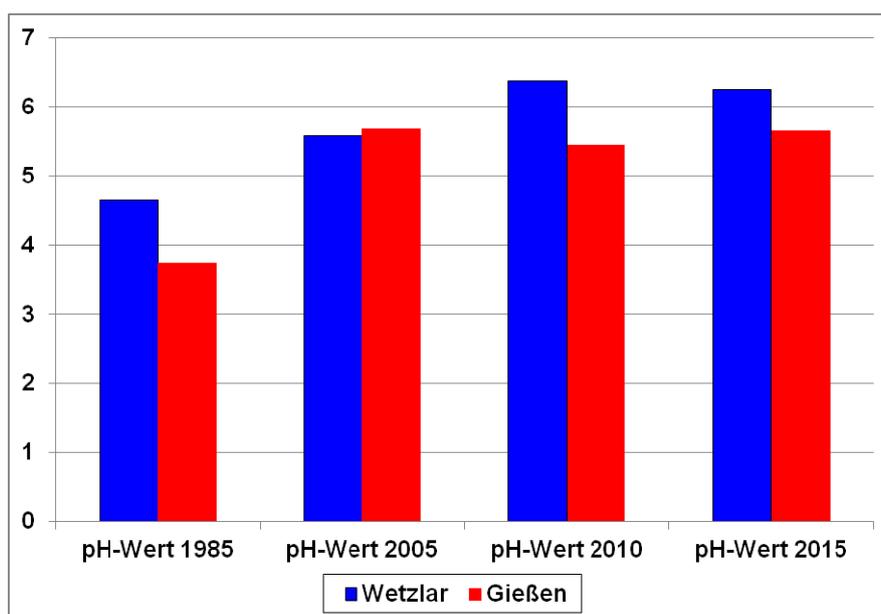
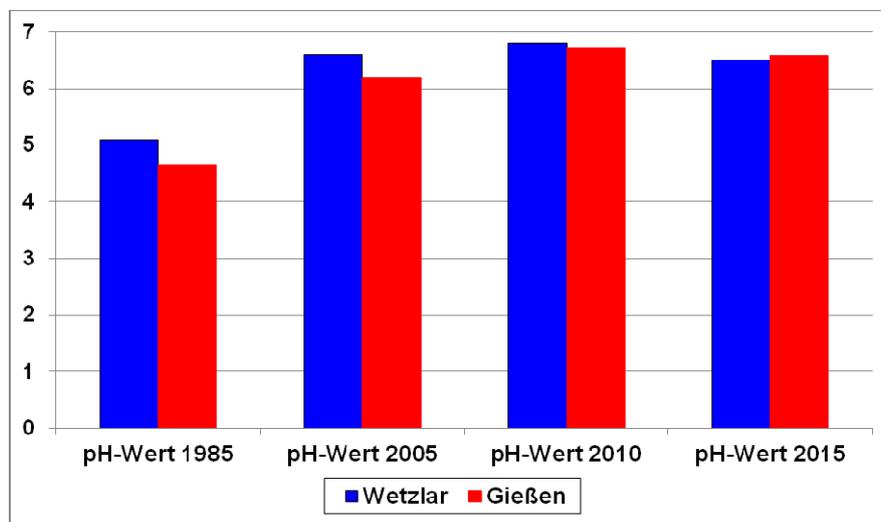


Abb. 7: pH-Wertveränderungen an Pappeln in Wetzlar und Gießen (1985-2015)

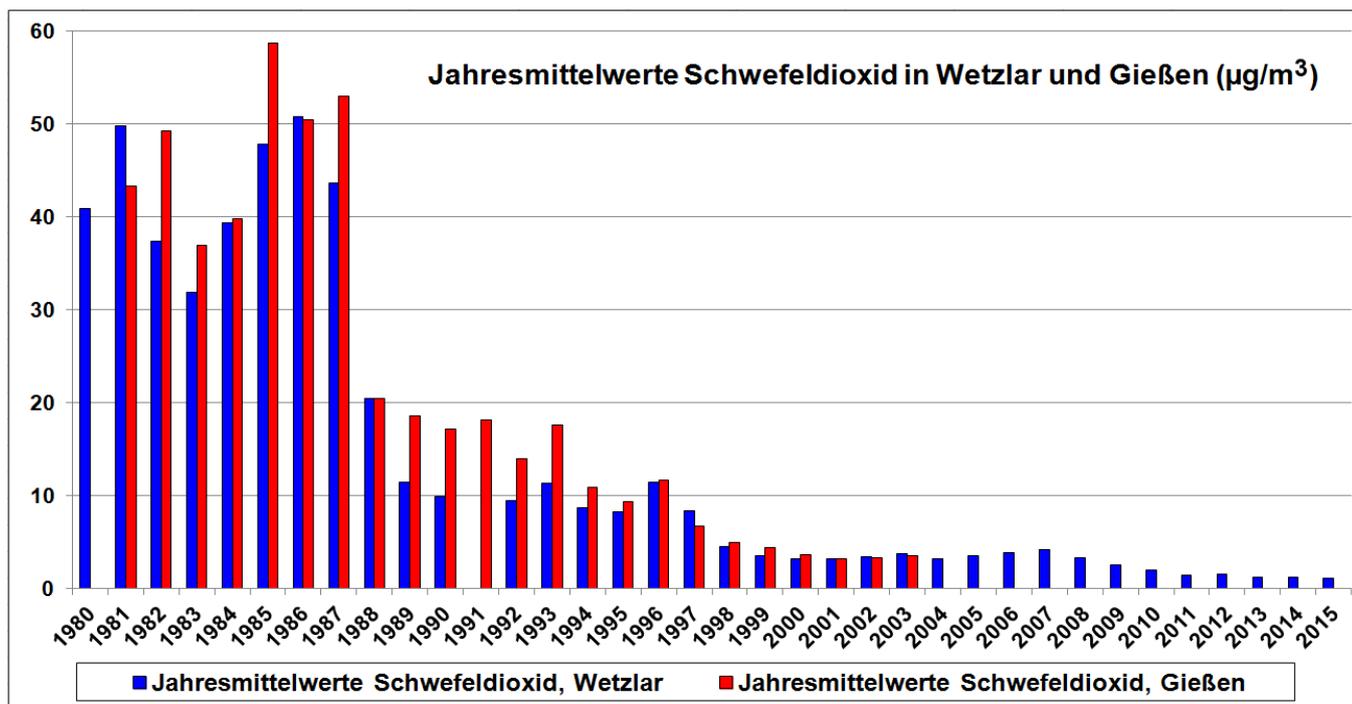
(Es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Unterschiedlich sind allerdings die Ausgangs-pH-Werte der verschiedenen Baumarten: Während die Linde – eine Baumart mit von Natur aus saurer Rinde – mit niedrigen pH-Werten startete, besaßen Pappeln und insbesondere Apfelbäume auch während der Hochzeit saurer Immissionen wegen ihrer besseren Pufferkapazität höhere pH-Werte. Dieser Abstand bleibt bis heute gewahrt, d.h. alle Baumarten haben sich annähernd in gleichem Ausmaß von der immissionsbedingten Versauerung erholt.



**Abb. 8:** pH-Wertveränderungen an Apfelbäumen in Wetzlar und Gießen (1985-2015)  
(Es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

In Gießen, wo bereits von 1970 pH-Wert-Messungen an Linden vorliegen, ist zu erkennen, dass der Anstieg zwischen 1970 und 1985 unbedeutend war; seit 1985 dagegen sind die pH-Werte deutlich höher geworden. Dieses Phänomen lässt sich gut mit der Entwicklung der Schwefeldioxidkonzentrationen erklären (siehe Abb. 9): Während die SO<sub>2</sub>-Werte bis 1987 hoch und annähernd konstant sind, fallen sie nach diesem Zeitpunkt aufgrund verstärkter technischer Maßnahmen zur Verminderung der Immissionsbelastung zunächst drastisch ab und haben sich seit 2000 auf einem sehr niedrigen Wert eingependelt.



**Abb. 9:** Entwicklung der Schwefeldioxidgehalte in Wetzlar/Gießen (Jahresmittelwerte) [HLNUG, 2016]

Seither hat der Niederschlag die Säuren aus den Rinden ausgewaschen, so dass fast wieder natürliche pH-Werte vorliegen. Dass der pH-Wert noch immer – wenn auch seit 2005 nur leicht – ansteigt, kann noch einen anderen Grund haben: Wie noch später auszuführen sein wird, sprechen die Entwicklungstendenzen bei den Flechten für einen Anstieg luftgetragener Stickstoffverbindungen (insbesondere  $\text{NH}_3$ ). Eine Erhöhung der Ammoniakkonzentration kann gleichzeitig zum Anstieg des pH-Wertes führen.

Bemerkenswert sind die unterschiedlichen Entwicklungen der Rinden-pH-Werte in Wetzlar und in Gießen: In Wetzlar war die Ansäuerung aller Baumarten trotz vergleichbarer  $\text{SO}_2$ -Immissionen 1985 deutlich geringer als in Gießen. Dieses Phänomen lässt sich mit einer Besonderheit in der Wetzlarer Immissions-situation erklären. Dort gibt es neben den sauren Immissionen seit jeher auch Kalkstaubemittenten im Norden der Stadt. Die Kalkstaubimmissionen waren in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts so heftig, dass Wäsche, die dort morgens aufgehängt wurde, mittags grau und bretthart war (eigene Erfahrungen des Autors). Die basischen Stäube haben selbst 1970 – bei gleichzeitig hoher Schwefeldioxidbelastung – die sauren Immissionen teilweise neutralisiert, was zu einer geringeren Ansäuerung der dortigen Baumrinden führte. So war es denn auch nicht verwunderlich, dass die ersten Neutrophyten zu diesem Zeitpunkt im NO Wetzlars, also im Lee des Emittenten, gefunden wurden (*Physcia tenella*, NAUMANN, 1970). In Gießen gibt es zwar erst seit 1987 Staubniederschlagswerte, jedoch darf aus den Messungen anderer hessischer Städte (z.B. Kassel [HLUG, 2010]) davon ausgegangen werden, dass die Werte 1970 deutlich unter denen Wetzlars lagen (wahrscheinlich unter  $200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{d})$  – und außerdem keinen Kalkstaub enthielten).

Nach Rückgang der sauren Schadgase und gleichzeitiger Verringerung der Kalkstaubimmissionen in Wetzlar durch den Einbau von Filtern bzw. Einstellung der Zementproduktion im Jahr 2010 (Abb. 10) haben sich die Verhältnisse zwischen beiden Städten 2015 angenähert – bei den Apfelbäumen war es bei der aktuellen Messung sogar so, dass Gießen erstmals höhere pH-Werte aufwies als Wetzlar (Abb. 8).

Da viele Flechten eine enge Substratbindung besitzen und diese sich insbesondere auch auf den pH-Wert bezieht, wird auf die hier geschilderten Entwicklungen der Säuregehalte der Baumrinden bei der Diskussion über die Ursachen der zeitlichen Veränderung des Flechtenbewuchses – und der unterschiedlichen Entwicklung in Wetzlar und Gießen – noch einzugehen sein.

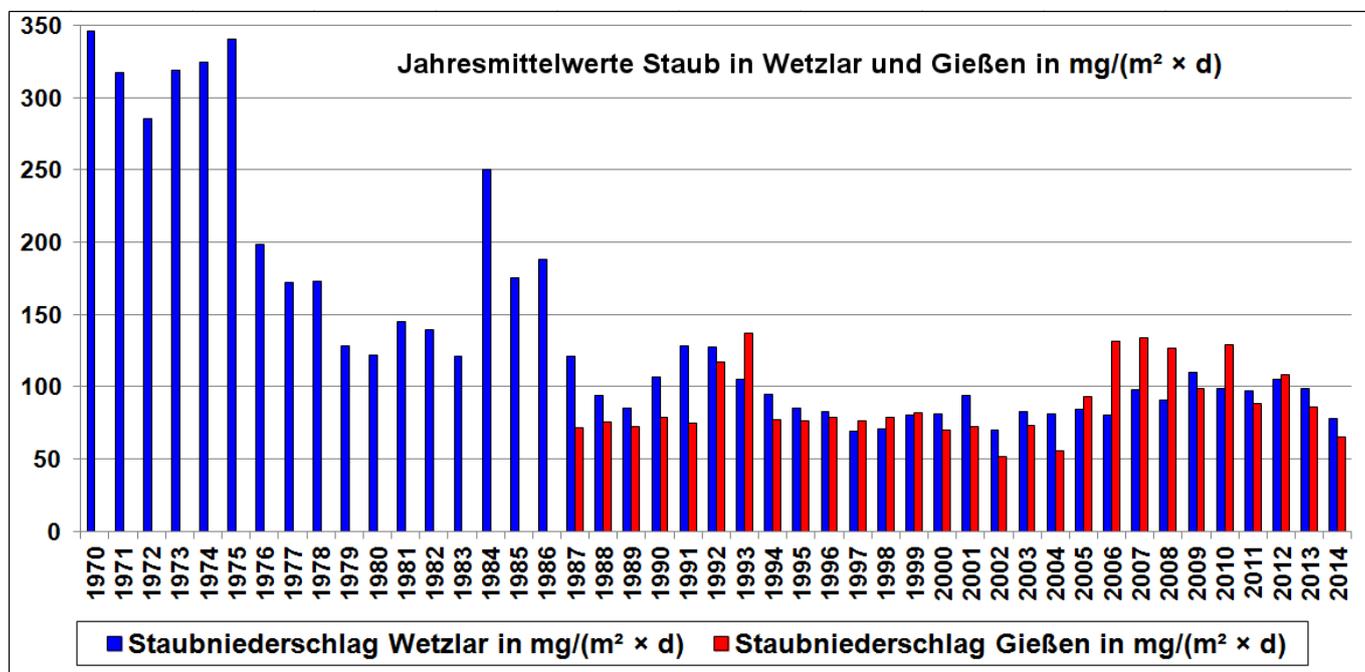
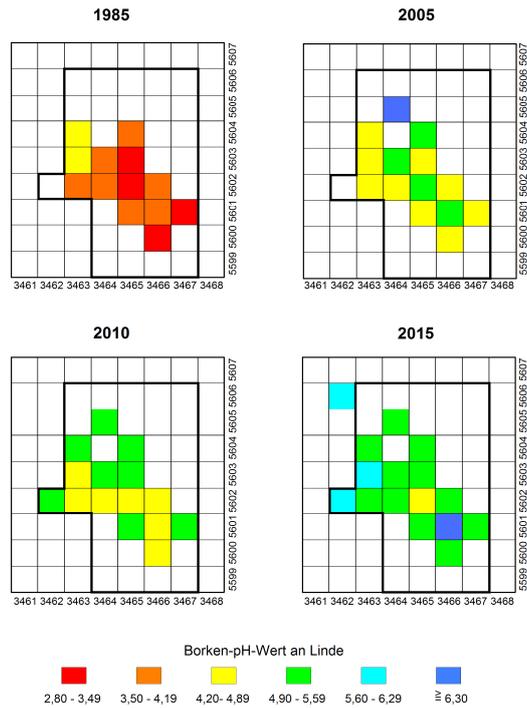


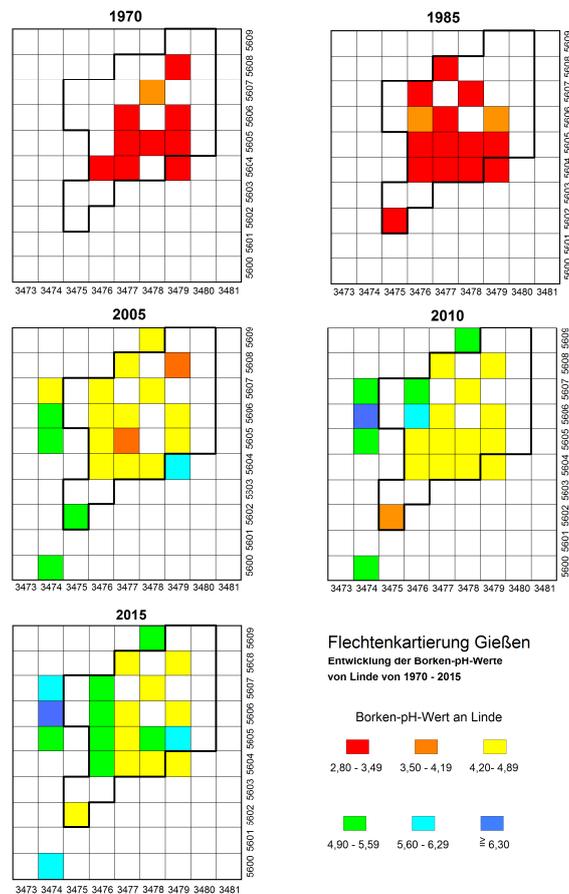
Abb. 10: Entwicklung der Staubdeposition in Wetzlar und Gießen (Jahresmittelwerte) [HLNUG, 2016]

Betrachtet man die räumliche Verteilung der pH-Werte an allen beprobten Linden (Abb. 11 und 12), so fällt in beiden Städten 1985 eine Tendenz zu etwas niedrigeren Werten in den Stadtzentren im Vergleich

zu den Stadträndern auf (Ursache: Versauerung durch Hausbrand). Diese Inhomogenität bleibt – wenn auch wenig deutlich – bestehen; gleichzeitig haben sich die pH-Werte überall deutlich erhöht.



**Abb. 11:** Entwicklung und räumliche Verteilung der pH-Werte von Linden in Wetzlar (1985-2015)



**Abb. 12:** Entwicklung und räumliche Verteilung der pH-Werte von Linden in Gießen (1970-2015) (schwarz umrandet: durchgängig beprobte Messflächen)

## 4.2 Aktueller Stand der lufthygienischen Situation von Wetzlar und Gießen

Unter dem Blickwinkel der aktuellen VDI-Richtlinie [VDI 3957, 13] ergibt sich für Wetzlar 2015 folgendes Bild (siehe Abb. 13): Vier Messflächen mit der Farbe Orange erhalten wegen der Anwesenheit von relativ vielen Eutrophierungszeigern eine Abstufung hin zu „geringer Luftgüte“. Sie befinden sich im Einflussbereich des Niedergirmes/Hermannsteiner Industriekomplexes, im Norden von Wetzlar. Lediglich die Messfläche im Bahnhofsbereich kann als innenstadtbelastet angesehen werden (was sich auch in der geringen Zahl von Eutrophierungszeigern manifestiert). Große Areale im Bereich der bebauten Stadt besitzen eine mittlere Luftqualität (Farbe Gelb). Daran schließt sich ein breiter, äußerer Gürtel von Messflächen an, deren lufthygienische Situation als gut anzusehen ist (Farbe Grün). Im Randbereich des Untersuchungsgebietes sind inzwischen vier Flächen der Farbe Blau (sehr hohe Luftgüte) zuzuordnen.

## Flechtenkartierung Wetzlar 2015 nach VDI 3957

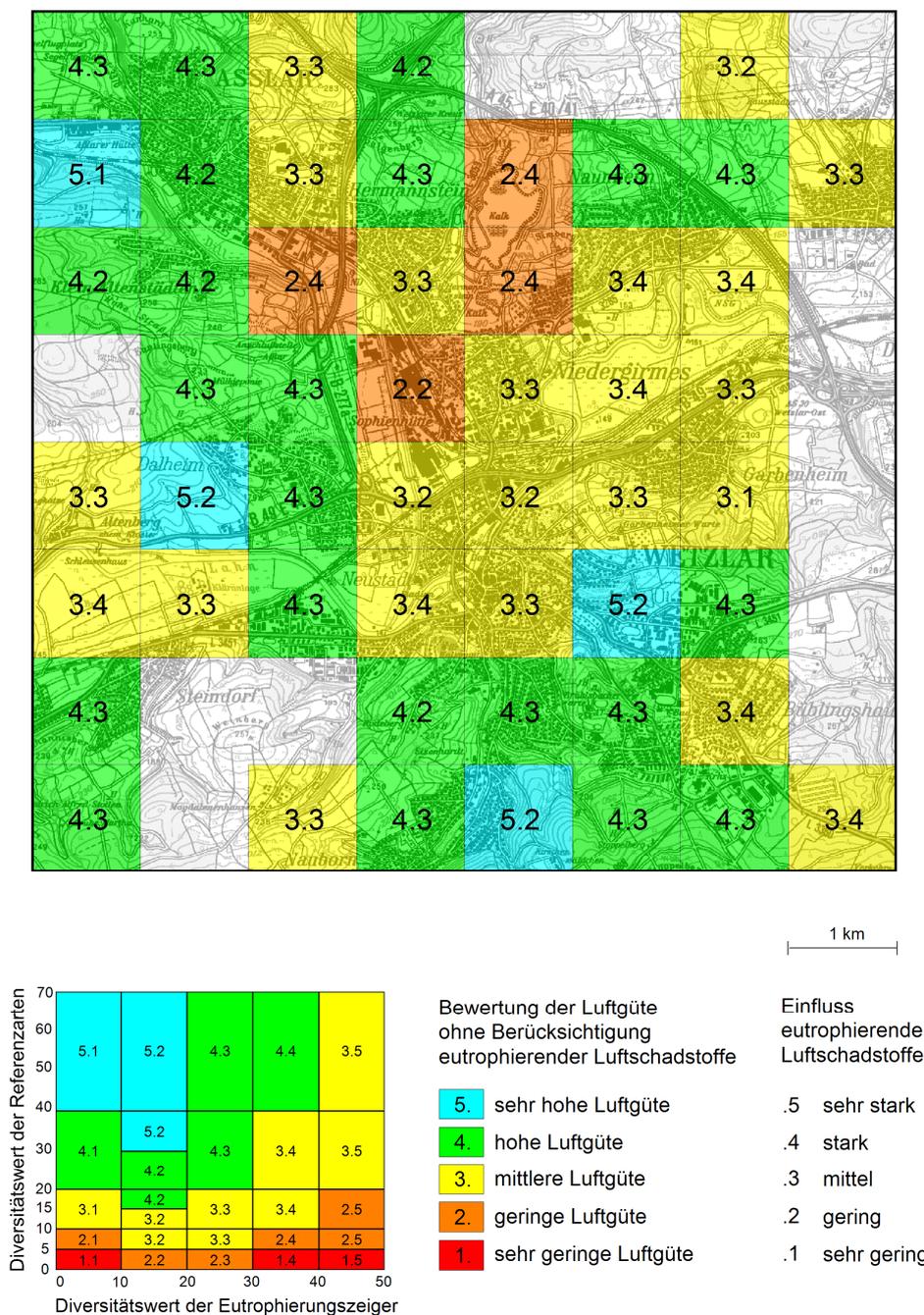


Abb. 13: Lufthygienische Situation von Wetzlar (2015, nach VDI-Richtlinie 3957, 13)

(Kartengrundlage TOP 50: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation)

In Gießen gibt es bereits seit 2010 keine Fläche mehr mit geringer Luftgüte (Orange). Im Stadtbereich überwiegt die Farbe Gelb (mittlere Luftgüte), jedoch sind auch hier – vor allem in den Randbezirken –

eine Vielzahl von Flächen mit hoher Luftgüte (Grün) zu verzeichnen. Die vier blauen Flächen sind ein erfreulicher Hinweis auf eine sich weiter verbessernde lufthygienische Situation in Gießen (Abb. 14).

## Flechtenkartierung Giessen 2015 nach VDI 3957

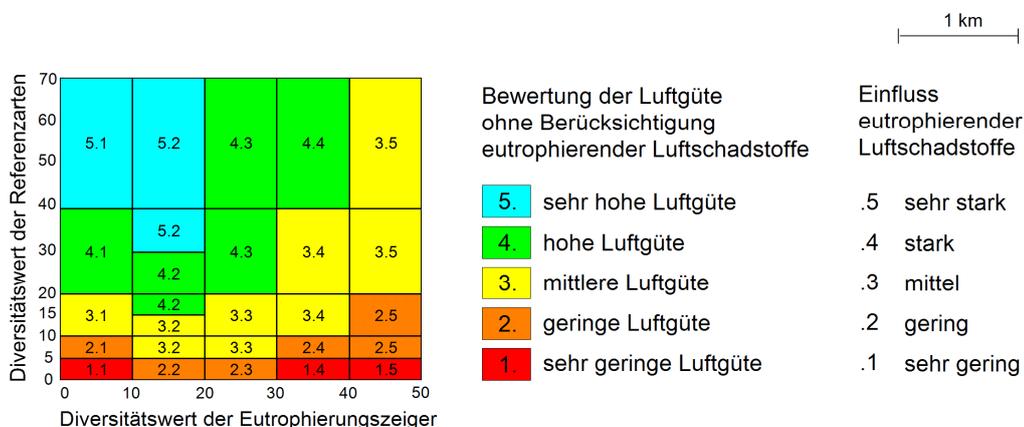
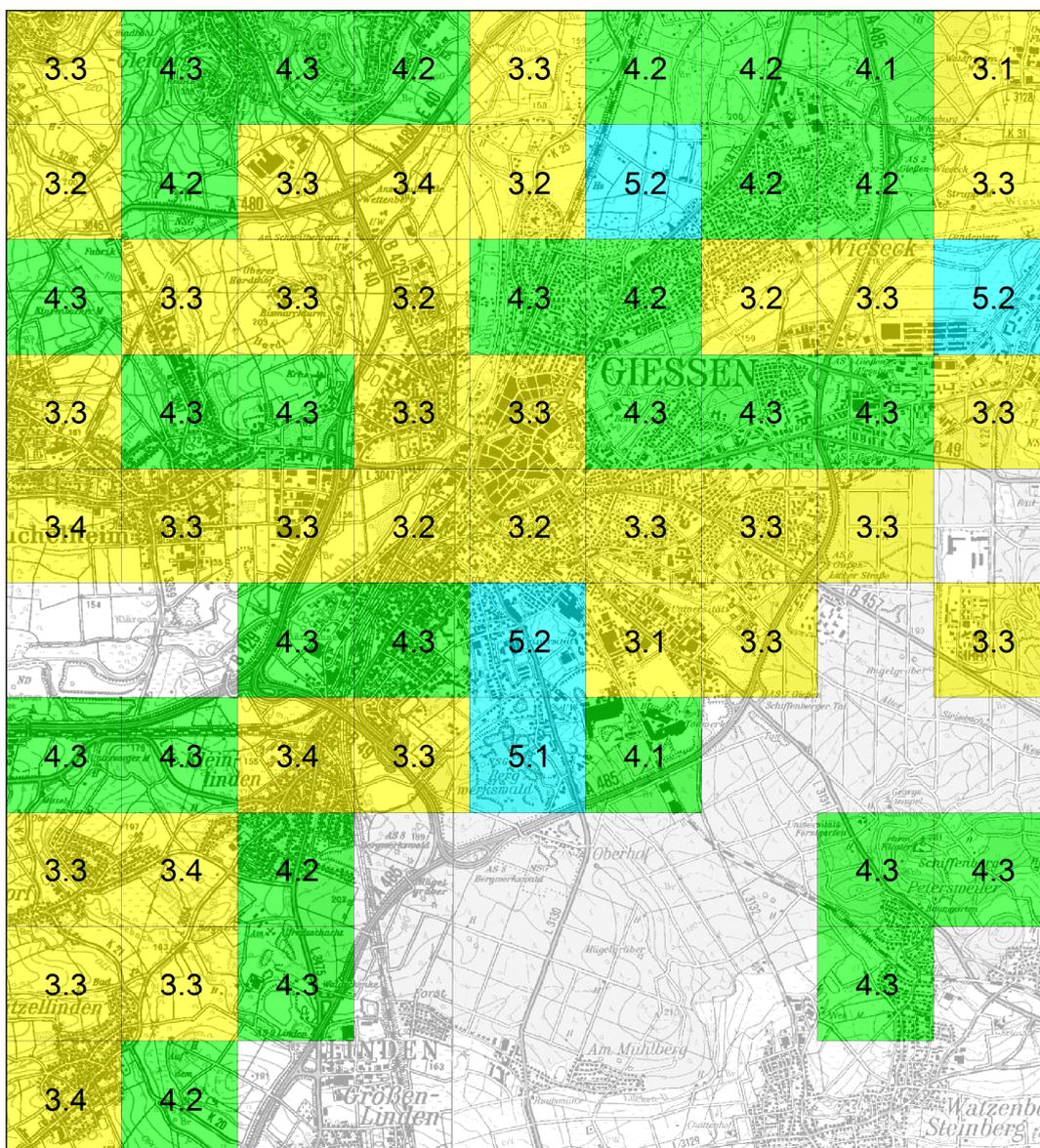
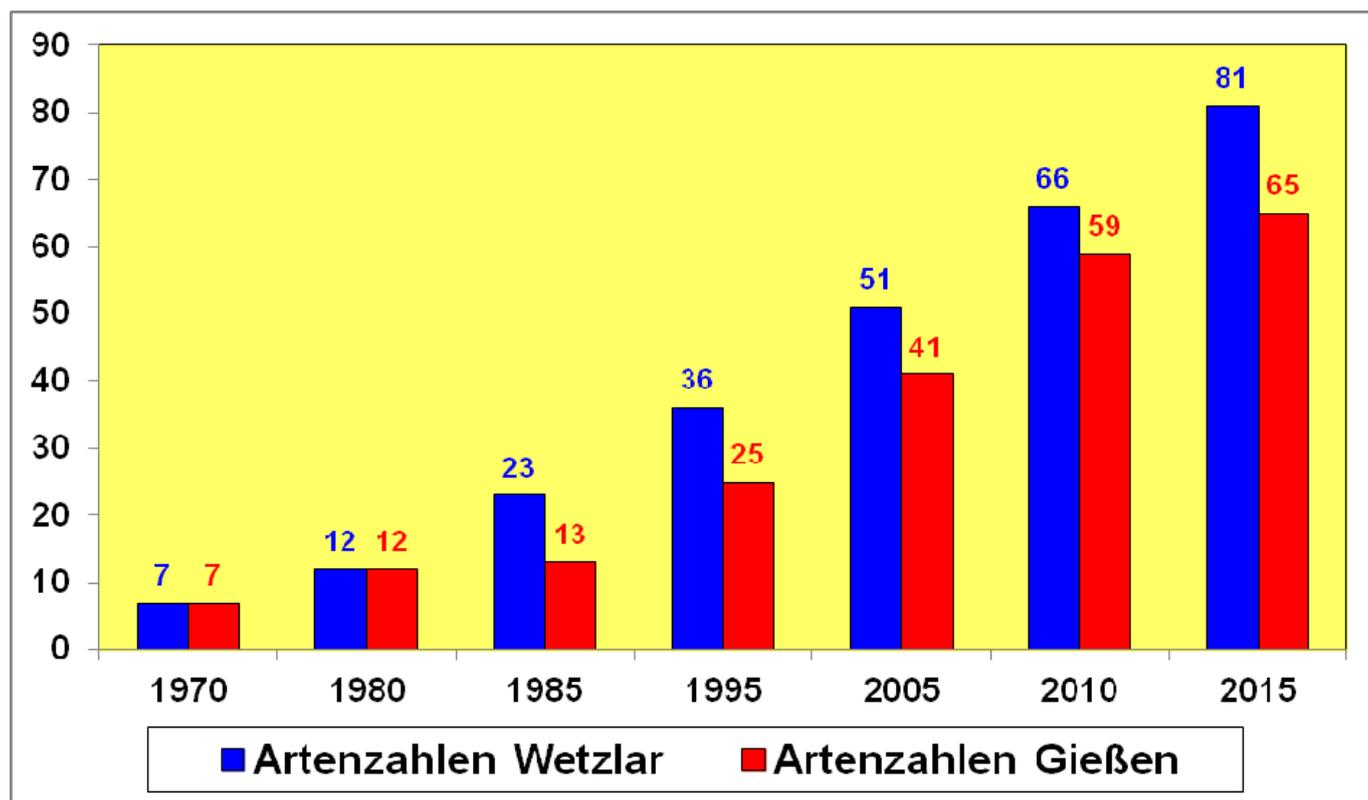


Abb. 14: Lufthygienische Situation von Gießen (2015, nach VDI-Richtlinie 3957, 13)

(Kartengrundlage TOP 50: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation)

### 4.3 Zeitliche Entwicklung der lufthygienischen Situation von Wetzlar und Gießen

Ein Vergleich der Flechten-Artenzahlen (Abb. 15) zeigt über den Zeitraum 1970 – 1980 – 1985 – 1995 – 2005 – 2010 – 2015 einen stetigen Anstieg [NAUMANN, 1969, 1970; WEBER, 1980; BIECKER, 1986; HANSEN, 1986; MARX, 1996; SCHIECK, 1996; KIRSCHBAUM et al., 1996; KIRSCHBAUM et al., 2006]. Die annähernde Verzehnfachung der Artenzahl ist ein erster Hinweis auf eine sich ständig verbessernde lufthygienische Situation während des gesamten Untersuchungszeitraumes. Kann (aus methodischen Gründen) bei den ersten beiden Untersuchungen nicht zwischen den Wetzlarer und Gießener Artenzahlen differenziert werden, so zeigt sich ab 1985 ein Unterschied zwischen der Wetzlarer und der Gießener Artenzahl. Das Ungleichgewicht zu Ungunsten Gießens bleibt bis 2015 erhalten. Dies drückt sich allerdings nicht in den Karten der lufthygienischen Situation beider Städte aus (Abb. 13/14). Gießen hat im Verlauf des untersuchten Zeitraumes bezüglich seiner Luftgüte den Rückstand gegenüber Wetzlar aufgeholt.



**Abb. 15:** Entwicklung der Artenzahlen in Wetzlar und Gießen zwischen 1970 und 2015 (es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Dank der eingangs erwähnten Tatsache, dass die alten Basisdaten früherer Kartierungen noch existierten bzw. wieder zugänglich gemacht werden konnten, waren Vergleiche mit diesen früheren Untersuchungen möglich. Es werden nur solche Messflächen verglichen, die in allen Untersuchungsjahren miterfasst wurden (dieser Bereich ist ab 1885 in den Karten mit einer schwarzen Linie umschlossen).

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung in **Wetzlar**: In der Zeit um 1970 war die Immissionsbelastung sowohl durch Schwefeldioxid als auch durch Kalkstäube so extrem hoch (Abb. 9, 10), dass im Bereich des Industriereviere im nördlichen Wetzlar überhaupt keine Flechten gefunden werden konnten; es existierte dort eine „Flechtenwüste“ [Abb. 17; NAUMANN, 1970]: Die Karten von 1970 sind – wegen andersartiger Methodik der Flechtenerfassung – farblich nicht direkt mit denen der späteren Erhebungen vergleichbar). Derartig ungünstige Verhältnisse waren allerdings auch in Frankfurt zu beobachten, wo die Flechtenwüste sich zu damaliger Zeit über wesentlich größere Flächen der Innenstadt erstreckte [Abb. 18; KIRSCHBAUM, 1969]. Im Anschluss an diese flechtenfreie Zone kam um 1970 fast im gesamten Wetzlarer Stadtgebiet nur *Lecanora conizaeoides* vor. Das alleinige Vorkommen dieser Flechte zeigt extrem hohe Belastungszustände an. Eine weitere Differenzierung der damaligen lufthygienischen Situation außerhalb der „*Lecanora conizaeoides*-Zone“ ist für diese erste Flechtenkartierung nicht möglich, weil 1970 nach einer andersartigen (stark vereinfachten) Methode kartiert worden war.

1985 überwiegen zwar noch die Farben Rot und Orange, es finden sich jedoch im Außenbereich des Untersuchungsgebietes auch schon Messflächen mit mittlerer und im NW sogar eine Fläche mit hoher Luftgüte: Die deutliche Verbesserung der lufthygienischen Situation ist unverkennbar; die mittlere Häufigkeit der Referenzarten liegt bei 7,8 (siehe Tab. 6). Es hat also eine Verbesserung von „extrem geringer Luftgüte“ über „sehr geringe Luftgüte“ zu „geringer Luftgüte“ stattgefunden (Abb. 5 und Tab. 3).

Zu diesem Zeitpunkt ist die Häufigkeit der Eutrophierungszeiger noch so gering, dass auf einen „sehr geringen Einfluss düngender Schadstoffe“ zu schließen ist (mittlere Diversität der Eutrophierungszeiger aller Messflächen: 6,0).

1995 findet sich lediglich im äußersten NW noch eine Fläche, die rot ist. Ansonsten überwiegen geringe bis mittlere Luftgüteverhältnisse; im Süden gibt es bereits zwei Flächen mit hohen Luftgüteindizes. Schwerpunkte der Belastung befinden sich noch immer im Bereich der Kernstadt bzw. des nördlich gelegenen Industriereviers. Insgesamt nimmt die mittlere Diversität der Referenzarten von 7,8 auf 9,7 zu – liegt aber noch immer im Bereich geringer Luftgüte. Die mittlere Diversität der Eutrophierungszeiger steigt von von 6,0 auf 9,8 an; die Belastung mit luftgetragenen Nährstoffen nimmt also ebenfalls zu.

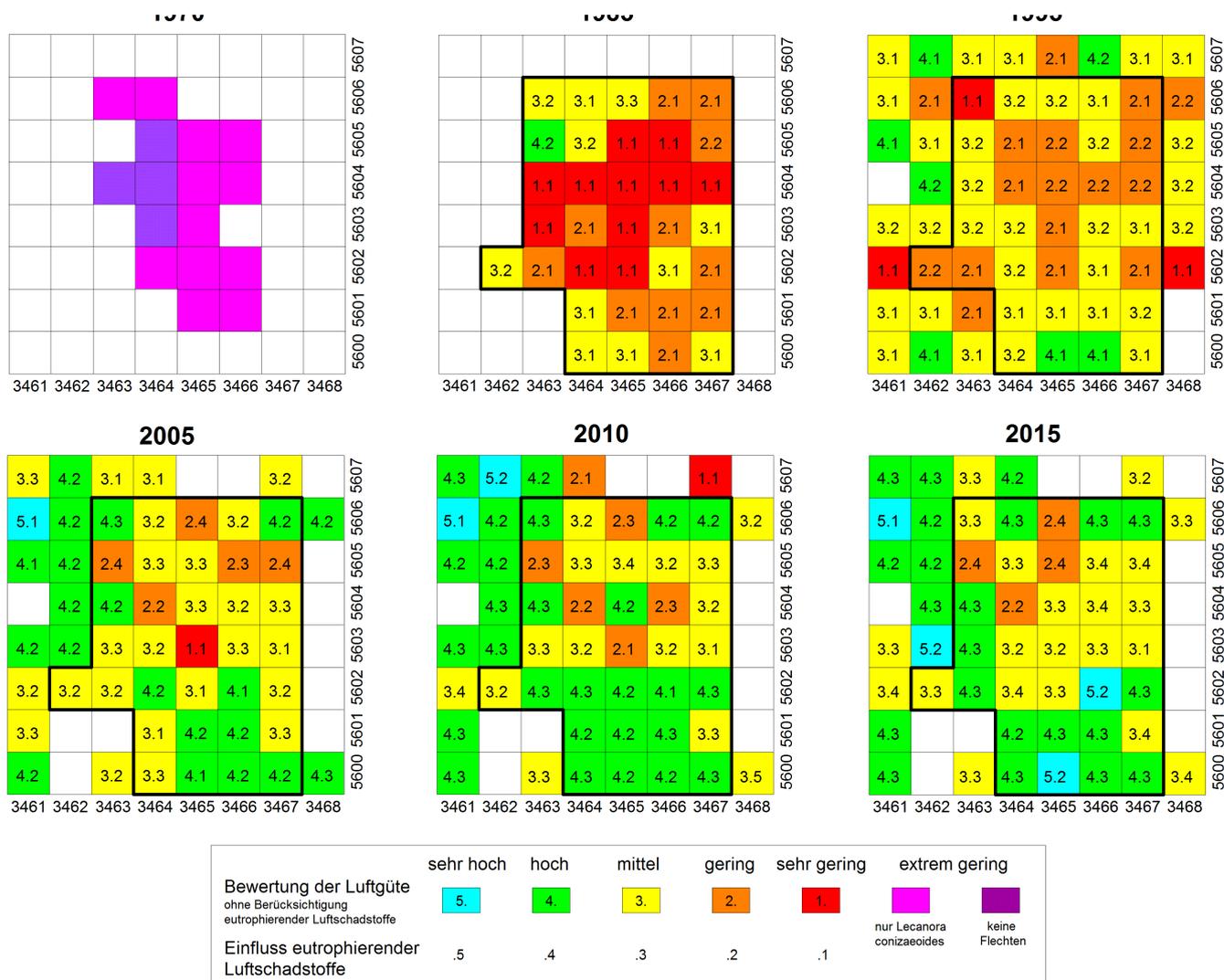


Abb. 16: Entwicklung der Luftgüteindizes in Wetzlar (1970 – 2015) [nach VDI 3957, 13; 2005]

2005 hat sich die Situation nochmals verbessert; bereits 10 Flächen im Kerngebiet sind der Farbe Grün zugeordnet, was auf eine hohe Luftgüte in diesen Bereichen hinweist. Im Durchschnitt besitzt das Wetzlarer Untersuchungsgebiet jetzt eine mittlere Luftgüte. Dem steht allerdings auch ein unverkennbarer Anstieg der Eutrophierungszeiger gegenüber (Tab. 6). Hohe Eutrophierungswerte finden sich verstärkt im Norden des Untersuchungsgebietes.

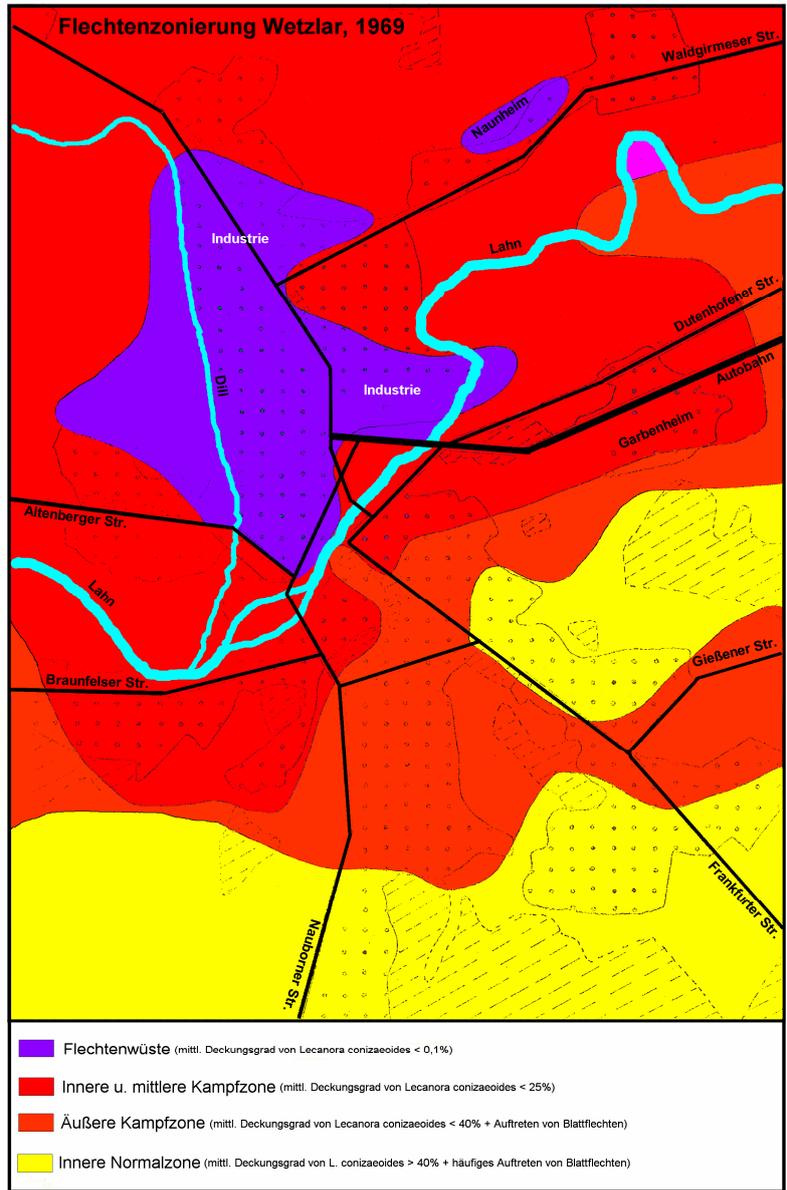


Abb. 17: Lufthygienische Situation in Wetzlar (1969)

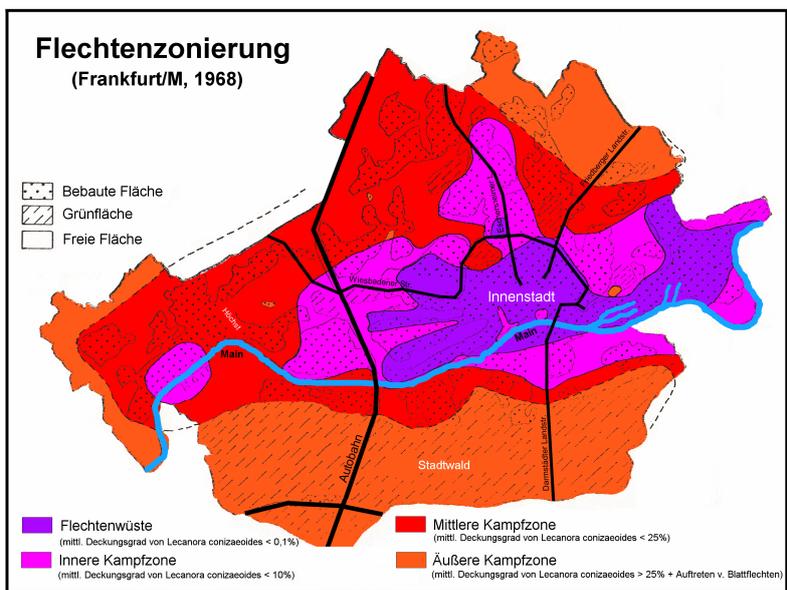


Abb. 18: Lufthygienische Situation in Frankfurt am Main (1968)

Im Untersuchungsjahr 2010 ist kein Areal mehr der Alarmstufe Rot zuzuordnen, dafür erhöht sich die Zahl von Messflächen mit dem LGI 4 (Grün) gegenüber 2005 von 10 auf 17, was bedeutet, dass jetzt die Hälfte der Kernmessflächen eine hohe Luftgüte aufweist. Der Eutrophierungswert steigt gegenüber 2005 nur maßvoll an (Tab. 6). Dies ist dahingehend zu interpretieren, dass weiterhin die Belastung mit eutrophierenden Luftschadstoffen in Wetzlar als gering einzustufen ist.

2015 ist die lufthygienische Situation erneut besser geworden: 13 Messflächen des durchgängig untersuchten Kernbereiches weisen einen LGI von 4 auf. Erstmals finden sich sogar zwei Flächen, die der höchsten Luftgütestufe (Blau) zuzuordnen sind; die Anzahl der orangefarbenen Flächen (LGI 2) hat sich gegenüber 2010 weiter verringert. Im Kernbereich ist die mittlere Diversität der Referenzarten auf 20,9 angestiegen (Tab. 6). Dies bedeutet: In Wetzlar hat sich 2015 in weiten Bereichen eine „hohe Luftgüte“ eingestellt. Hinsichtlich der Eutrophierungszeiger ist allerdings ebenfalls eine Zunahme zu verzeichnen (mittlere Eutrophierungswert: 24,6; Tab. 6); der Einfluss eutrophierender Verbindungen ist demzufolge als „mittel“ einzustufen.

Eine prinzipiell ähnliche Entwicklung wie in Wetzlar ist auch in **Gießen** zu erkennen; wenn auch auf zunächst niedrigerem Niveau (Abb. 19): Im Gegensatz zu Wetzlar und Frankfurt gibt es hier 1970 zwar keine flechtenfreien Messflächen, also keine „Flechtenwüste“ [Abb. 20; NAUMANN, 1969] ), große Teile des Untersuchungsgebietes werden aber lediglich von der toxitoleranten und acidophytischen *Lecanora conizaeoides* besiedelt (Farbe Magenta). Auffällig ist hier der sternförmige Verlauf der Flechtenzonierung entlang der Hauptausfallstraßen in Gießen. Dies dürfte einerseits der Verkehrsbelastung geschuldet sein, weist aber andererseits auch auf die positive lufthygienische Bedeutung von Frischluftschneisen hin: Bis heute ziehen diese Kaltluftkorridore bis an das Zentrum der Stadt heran (v.a. im Bereich der Wieseckau) und führen kühle, saubere Luft mit sich.

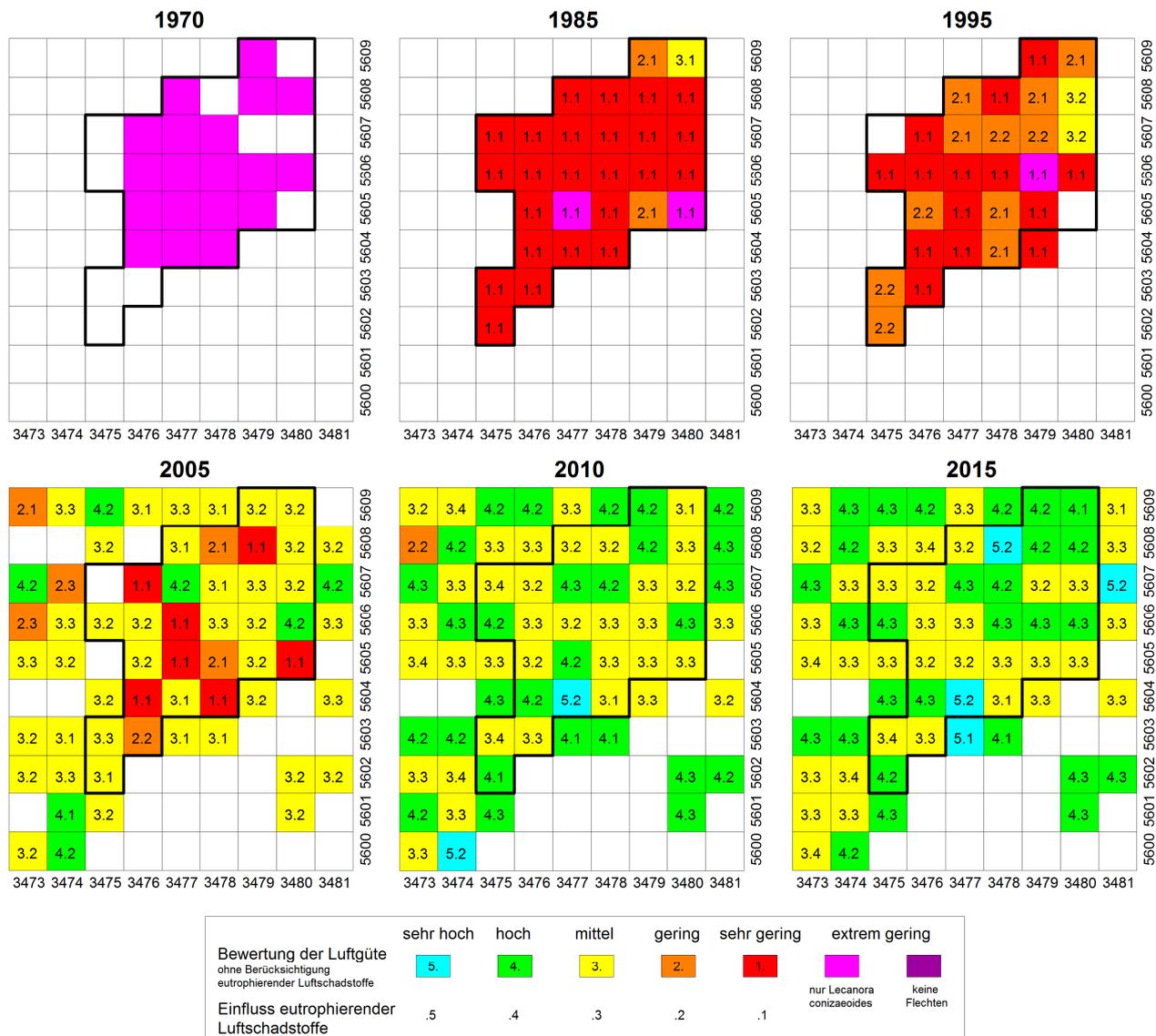
1985 haben sich die Verhältnisse deutlich verbessert, wenngleich noch immer zwei Flächen als extrem belastet anzusehen sind und auch nur zwei Messflächen der Farbe Orange und nur eine dem LGI 3 (Gelb) zuzuordnen sind. Die mittlere Diversität der Referenzarten liegt mit 2,1 deutlich unter dem entsprechenden Anfangswert in Wetzlar (7,8). Eutrophierungsanzeiger sind außerordentlich selten zu finden; die mittlere Häufigkeit der Eutrophierungszeiger liegt bei 0,7 – bei Wetzlar hingegen bei 6,0 (Tab. 6).

Die weitere Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse bis zum Jahr 1995 verläuft nicht so rasch und in so starkem Maß wie dies bei Wetzlar zu beobachten war. Andererseits bleibt auch die mittlere Häufigkeit der Eutrophierungszeiger bei einem niedrigeren Wert als bei Wetzlar (6,4 gegenüber 9,8; Tab. 6).

Im Jahr 2005 hat Gießen gegenüber Wetzlar aufgeholt: Knapp 65 % aller untersuchten Messflächen im Kernbereich sind nur noch mittel bis gering belastet (in Wetzlar sind dies zum gleichen Zeitpunkt etwa 80%). Der Wert für die mittlere Häufigkeit der Eutrophierungszeiger ist leicht gestiegen, bleibt aber weiter deutlich unter dem von Wetzlar.

2010 hat Gießen Wetzlar hinsichtlich seiner Luftgüte im Kernbereich des Untersuchungsgebietes eingeholt: Es existiert darin weder eine rote noch eine orangefarbene Messfläche. Die Verbesserung ist in Gießen wesentlich augenfälliger als in Wetzlar. Zwar liegt die Anzahl der Areale mit grüner Farbe noch hinter der von Wetzlar; dafür gibt es jedoch bereits eine Fläche im blauen Bereich „sehr hoher Luftgüte“. Nun hat sich auch die Häufigkeit der Referenzarten (zeigen günstige lufthygienische Verhältnisse an) beider Städte fast angeglichen (Gießen: 16,0, Wetzlar: 17,2; siehe Tab. 6). Beim Vergleich der Häufigkeit der Eutrophierungszeiger steht Gießen weiterhin besser da als Wetzlar (15,5 gegenüber 19,3).

2015 haben sich die lufthygienischen Verhältnisse gänzlich zugunsten Gießens gewendet: Der prozentuale Anteil grüner und blauer Messflächen (hohe bis sehr hohe Luftgüte) beträgt in Gießen 48%, in Wetzlar 44%. In Gießen gehören die restlichen 52% der Flächen zur „mittleren Luftgüte“. In Wetzlar sind dies lediglich 44%; die restlichen 12% besitzen dort eine „geringe Luftgüte“ (vergl. Abb. 16 und 19).



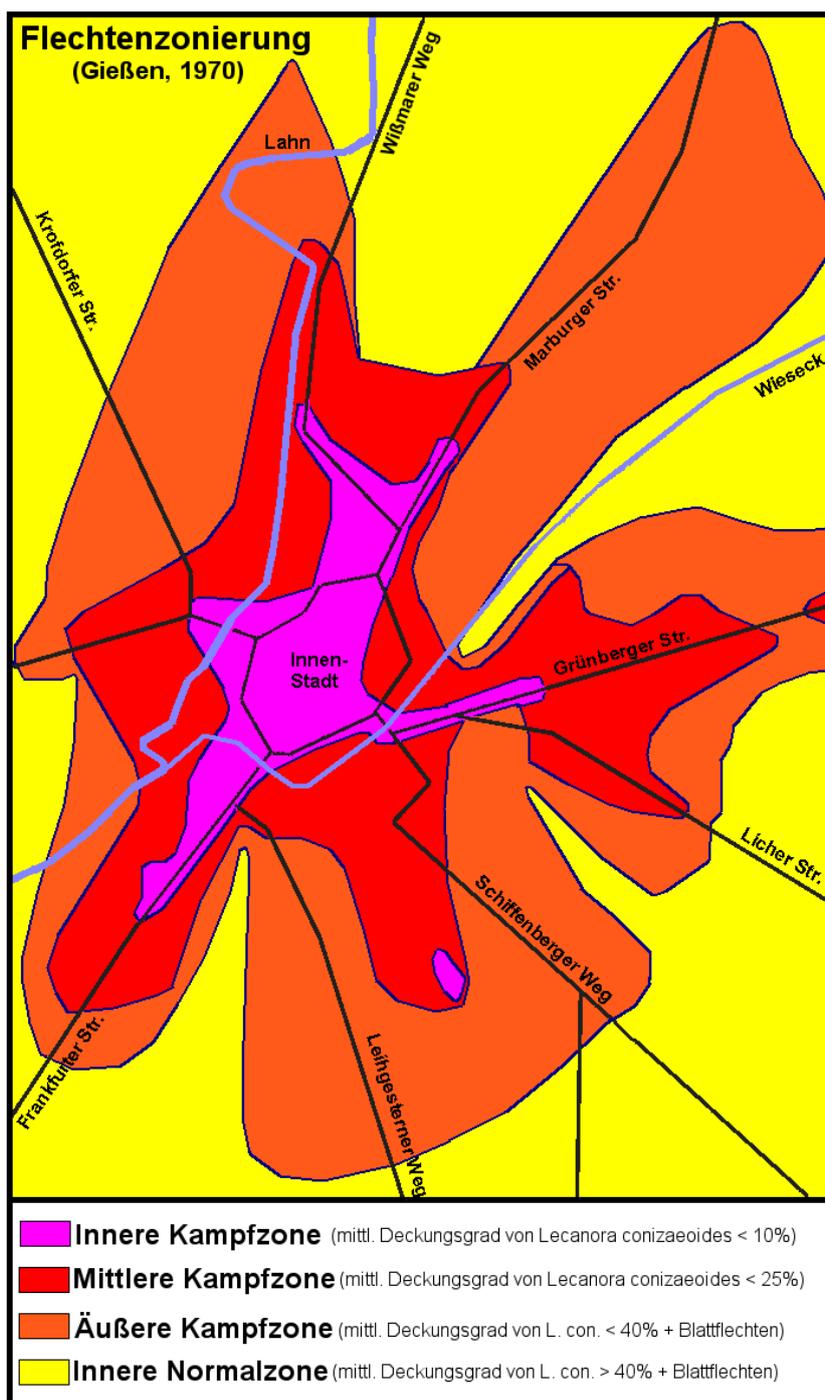
**Abb. 19:** Entwicklung der Luftgüteindizes in Gießen (1970 – 2015) [nach VDI 3957, 13; 2005]

In Tabelle 6 sind die Entwicklungen der Häufigkeit von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in den Kernarealen von Wetzlar und Gießen von 1985 bis 2015 zusammengefasst. Auch hier zeigt sich der anfängliche Vorsprung Wetzlars bei der Luftgüte im Vergleich zu Gießen. Deutlich wird allerdings auch, dass Gießen immer weiter aufholt, nachdem das Schwefeldioxid vergangener Jahre keine wesentliche Rolle bei den Luftverunreinigungen beider Städte mehr spielt (siehe auch Abb. 9) und somit der Vorteil, den Wetzlar ursprünglich wegen seines das SO<sub>2</sub> bindenden Kalkstaubes besaß, heute nicht mehr gegeben ist. Beide Städte haben hinsichtlich ihrer mittleren Luftgüte bis 2015 kräftig zugelegt. Annähernd gleichsinnig mit der Erhöhung der Luftgütwerte verläuft allerdings auch ein (unerwünschter) Anstieg der Eutrophierungszeiger in beiden Städten. Betrachtet man jedoch die Maximalwerte (von 2015), so lässt sich feststellen, dass die Verhältnisse in den beiden mittelhessischen Städten hinsichtlich der Überdüngungsgefahr durch luftgetragene Stickstoffverbindungen noch immer als gering bis mittel einzustufen sind.

**Tabelle 6:** Entwicklung der mittleren Diversität (Häufigkeit) der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger in Wetzlar und Gießen (1985-2015)

(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Untersuchungsjahr	Mittlere Diversität der Referenzarten, Wetzlar	Mittlere Diversität der Referenzarten, Gießen	Mittlere Diversität der Eutrophierungszeiger, Wetzlar	Mittlere Diversität der Eutrophierungszeiger, Gießen
1985	7,8	2,1	6,0	0,7
1995	9,7	8,2	9,8	6,4
2005	15,1	8,7	17,7	12,7
2010	17,2	16,0	19,3	15,5
2015	20,9	18,8	24,6	18,8



**Abb. 20:** Lufthygienische Situation in Gießen (1970)

Ein Vergleich der prozentualen Verteilung der fünf Luftgüteklassen in beiden Städten über den Erhebungszeitraum (Abb. 21/22) zeigt, dass Messflächen mit sehr geringer Luftgüte (Farbe Rot) kontinuierlich zurückgehen und bei der aktuellen Untersuchung im Kernbereich gar nicht mehr auftauchen. In Gießen gibt es seit 2010 auch keine Fläche mehr, die der Definition „geringe Luftgüte“ (Orange) zuzuordnen ist. Umgekehrt nimmt die Anzahl von Messflächen mit hoher Luftgüte zu. 2010 taucht sogar erstmals in Gießen eine blaue Fläche mit sehr hoher Luftgüte auf, 2015 sind es sowohl in Wetzlar, als auch in Gießen jeweils zwei.

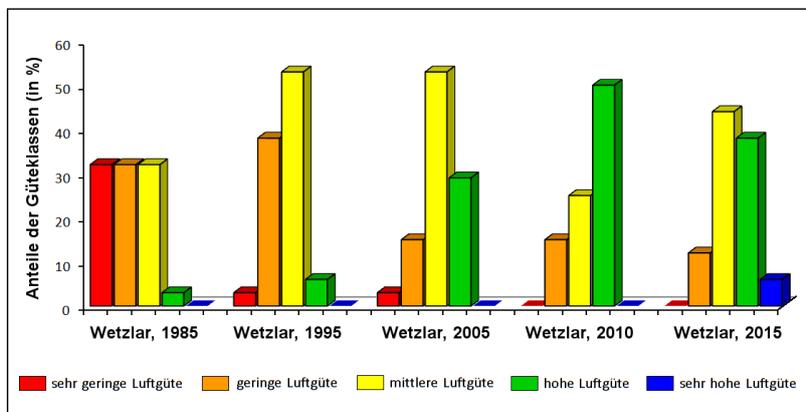


Abb. 21: Entwicklung der Luftgüteklassen in Wetzlar (1985-2015)

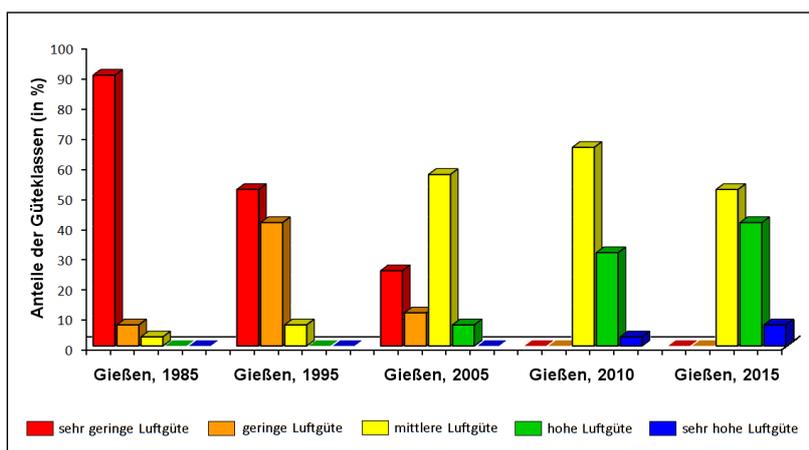


Abb. 22: Entwicklung der Luftgüteklassen in Gießen (1985-2015)

(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Eine Schwierigkeit bei der Interpretation von im Freiland erhobenen Daten ist stets die nicht optimale Standardisierbarkeit des Aufnahmeverfahrens. Im konkreten Fall der Flechtenkartierung manifestiert sich dieses Problem in der Tatsache, dass über lange Untersuchungszeiträume die untersuchten Substrate (Bäume) teilweise einem Wechsel unterliegen (z. B. Wegfall infolge Überalterung oder Fällen oder Beschattung des Stammes durch Büsche). In solchen Fällen muss nach Ersatzbäumen Ausschau gehalten werden. Diese sind oft nicht vorhanden oder – falls doch – wesentlich jünger als die ursprünglichen oder es handelt sich um andere Arten mit abweichenden Borkenstrukturen und Borkenchemismus. All diese Veränderungen können Einfluss auf das Flechtenartenspektrum bzw. die Häufigkeit ihres Vorkommens nehmen – und damit das Ergebnis beeinflussen. Um den Einwand zu entkräften, die Veränderungen der Luftgütwerte seien im Wesentlichen eine Folge von Substratänderungen, soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass in der Mehrzahl der Erhebungen die Untersuchungsbäume die gleichen geblieben sind. Am Beispiel einer Messfläche „Lindenbäume auf dem Hof der Grundschule in Gießen-Wieseck“ (3479/5608) soll nachgewiesen werden, dass – trotz identischer Substrate über den Untersuchungszeitraum 1985/2005/2010/2015 – die Flechtenzusammensetzung sich dennoch drastisch geändert hat (Tab. 7). Diese Veränderungen können also im konkreten Beispiel kaum etwas mit Veränderungen am Substrat zu tun haben, da in jedem Untersuchungsjahr exakt die gleichen Bäume kartiert worden sind.

Tab. 7: Entwicklung der Flechtenvegetation an den Linden der Grundschule Wieseck (1985-2015)

Flechtenart	Mittlere Frequenz 1985	Mittlere Frequenz 2005	Mittlere Frequenz 2010	Mittlere Frequenz 2015
<i>Amandinae punctata</i>		•	•	•
<i>Candelaria concolor</i>				•
<i>Candelariella reflexa/xanthost.</i>		•	•	•
<i>Evernia prunastri</i>		•	•	•
<i>Flavoparmelia caperata</i>		•	•	•
<i>Hypogymnia physodes</i>	•		•	
<i>Hypogymnia tubulosa</i>			•	
<i>Lecanora conizaeoides</i>	•	•		
<i>Lecanora expallens</i>			•	•
<i>Lecanora saligna</i>				•
<i>Lecania cyrtella</i>			•	•
<i>Lepraria incana</i>	•	•	•	•
<i>Melanelixia glabr./subaurifera</i>			•	•
<i>Melanohalea elegantula</i>				•
<i>Melanohalea exasperatula</i>		•	•	•
<i>Parmelia sulcata</i>		•	•	•
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>		•	•	•
<i>Physcia adscendens/tenella</i>		•	•	•
<i>Physcia dubia</i>		•	•	
<i>Punctelia jeckeri</i>			•	•
<i>Punctelia subrudecta</i>			•	
<i>Polycauliona candelaria</i>		•	•	•
<i>Xanthoria parietina</i>		•	•	•



Im Jahr 1985 gab es an den Bäumen lediglich drei acidophytische (säureertragende) Flechtenarten, wovon nur *Lecanora conizaeoides* an allen untersuchten Bäumen zu finden war; die beiden anderen Arten kamen jeweils nur an einer Linde vor. Diese Flechtenarmut war dem damals noch sehr hohen SO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert von ca. 60 µg/m<sup>3</sup> und einem damit verbundenen extrem niedrigen Rinden-pH-Wert von 3,3 geschuldet.

2005 ist die Artenzahl von ursprünglich 3 auf 13 angestiegen. Die anfangs häufige *Lecanora conizaeoides* ist stark zurückgegangen; die neu hinzu gekommenen Arten sind teilweise gegenüber Luftverunreinigungen empfindliche Arten. Zusätzlich treten verstärkt Eutrophierungszeiger und Subneutrophyten in Erscheinung. Die SO<sub>2</sub>-Werte haben sich seit 1985 drastisch reduziert (von knapp 60 auf ca. 5 µg/m<sup>3</sup>; abgeleitet aus dem Wetzlarer Wert) und beim pH-Wert hat eine Erhöhung auf 4,06 stattgefunden.

Innerhalb von nur fünf Jahren ist an dieser Beispiel-Messfläche die Artenzahl im Jahr 2010 auf 20 angestiegen; das entspricht gegenüber 2005 einer Steigerung von 54 %. Während die Schwefeldioxidkonzentration entweder gleich geblieben oder nur noch unbedeutend abgesunken ist, hat sich der pH-Wert nochmals um eine halbe Stufe auf 4,54 erhöht (die Verminderung der Rindenversauerung erfolgt langsam, durch Auswaschung und hinkt daher zeitlich der Verminderung des Säurebildners SO<sub>2</sub> hinterher).

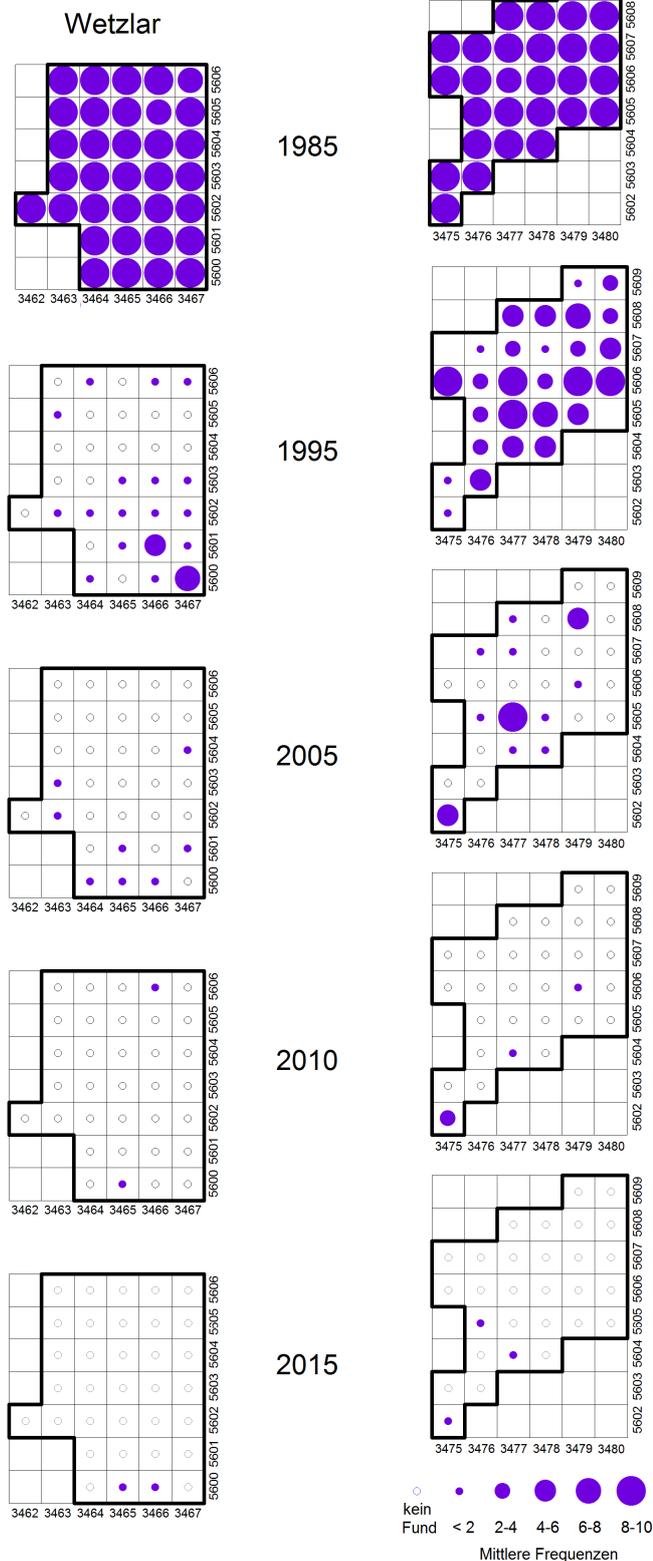
2015 ist die Artenzahl, im Vergleich zu 2010, annähernd konstant geblieben und auch der pH-Wert der Baumborke hat sich nicht weiter erhöht. Ob sich hiermit ein Ende der Entwicklung abzeichnet, werden spätere Untersuchungen zeigen.

Der Acidophyt *Lecanora conizaeoides* ist – wie in fast allen übrigen Gießener und Wetzlarer Messflächen – vollständig verschwunden. Dies muss als ein deutlicher Hinweis auf die für jene Art ungünstig gewordenen Lebensbedingungen interpretiert werden, hervorgerufen durch die abnehmende Versauerung und gleichzeitige Eutrophierung der Rindensubstrate. Die Erhöhung der Artenzahl geht nicht nur auf die nachlassende Wirkung des toxischen Schwefeldioxides zurück, sondern ist zum Teil auch eine Folge der Klimaerwärmung: Neuerdings finden sich in der Aufnahme fläche an den Bäumen mit *Flavoparmelia caperata*, *Punctelia jeckeri* und *Punctelia subrudecta* drei Wärmezeiger unter den Ankömmlingen.

#### 4.4 Entwicklungstendenzen einzelner Flechtenarten von 1985 bis 2015

Bei der Entwicklung einzelner Arten zwischen 1985 und 2015 ergaben sich einige charakteristische Unterschiede, die anhand typischer Beispiele dargestellt werden sollen. (Es werden nur jene Messflächen dargestellt, die seit 1985 durchgängig erfasst wurden → Kernareale der beiden Städte).

Verbreitung und Frequenz von *Lecanora conizaeoides*



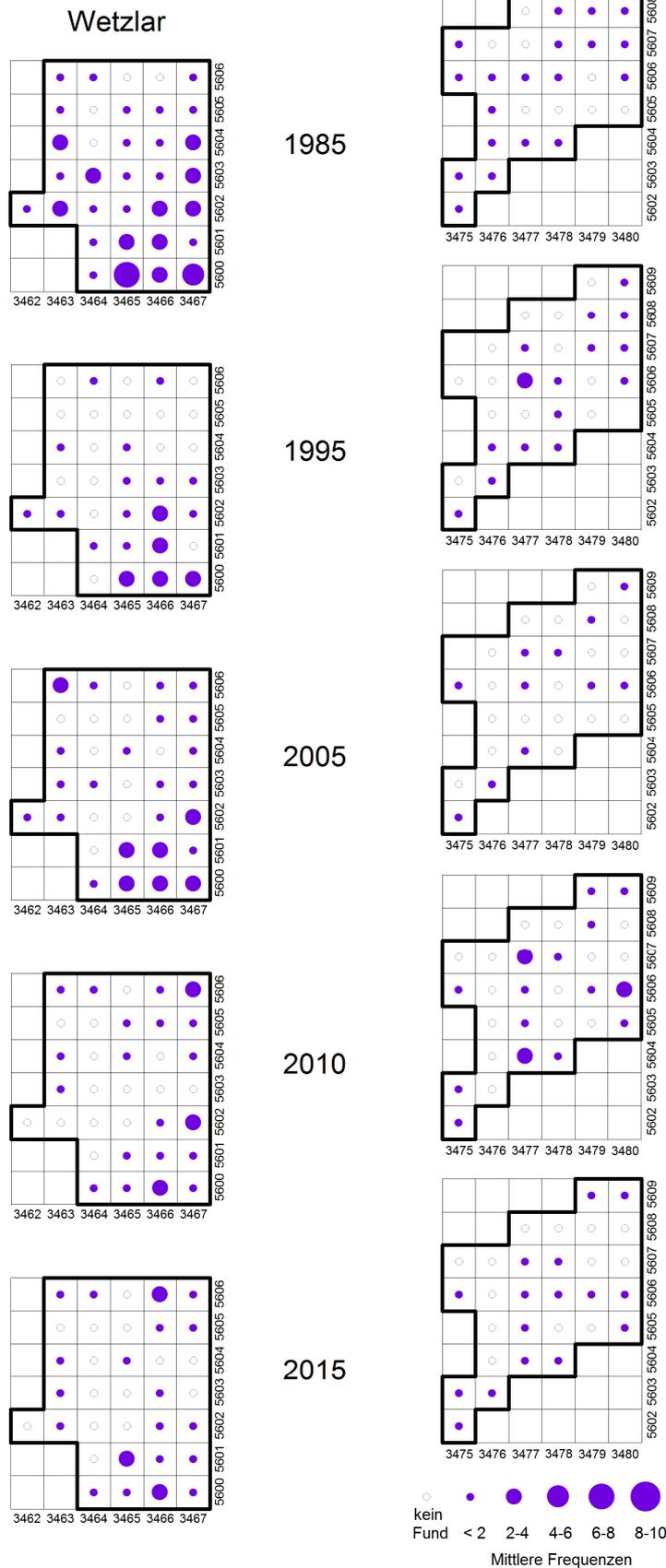
*Lecanora conizaeoides*  
(„Staubige Kuchenflechte“):



Diese toxitoleranteste und stark acidophytische Art zeigt den Rückgang saurer Immissionen (von denen sie offensichtlich profitierte) am deutlichsten auf. Sowohl in Wetzlar, wie auch in Gießen war sie zu Zeiten hoher  $\text{SO}_2$ -Belastung die häufigste – und zuweilen einzige – Flechtenart. Mit dem Rückgang des Schwefeldioxids, der in Wetzlar und Gießen annähernd gleichsinnig verlief, nahm sie 1995 ab; in Wetzlar jedoch wesentlich stärker als in Gießen. Im Jahr 2005 kann man sie in Wetzlar kaum noch finden und auch in Gießen ist der weitere Rückgang unverkennbar; 2010 ist sie weitgehend verschwunden und bleibt auch 2015 unbedeutend. Das Verhalten dieser Flechte korreliert sehr gut mit der Verminderung der  $\text{SO}_2$ -Konzentration im hier dargestellten Zeitraum (Abb. 9). Der stärkere Rückgang der Art in Wetzlar lässt sich folgendermaßen interpretieren: War 1985 die  $\text{SO}_2$ -Konzentration noch so stark, dass die basisch wirkenden Kalkstäube kaum mindernd auf die Versauerung der Baumrinden wirken konnten, so erhöhten sich danach mit dem Rückgang des sauren Schadgases in Wetzlar die pH-Werte schneller und intensiver als in Gießen, weil der Kalkstaub seine Wirkung nun besser entfalten konnte.

Abb. 23: Entwicklung der toxitoleranten und stark acidophytischen Flechte *Lecanora conizaeoides*

Verbreitung und Frequenz von *Hypogymnia physodes*



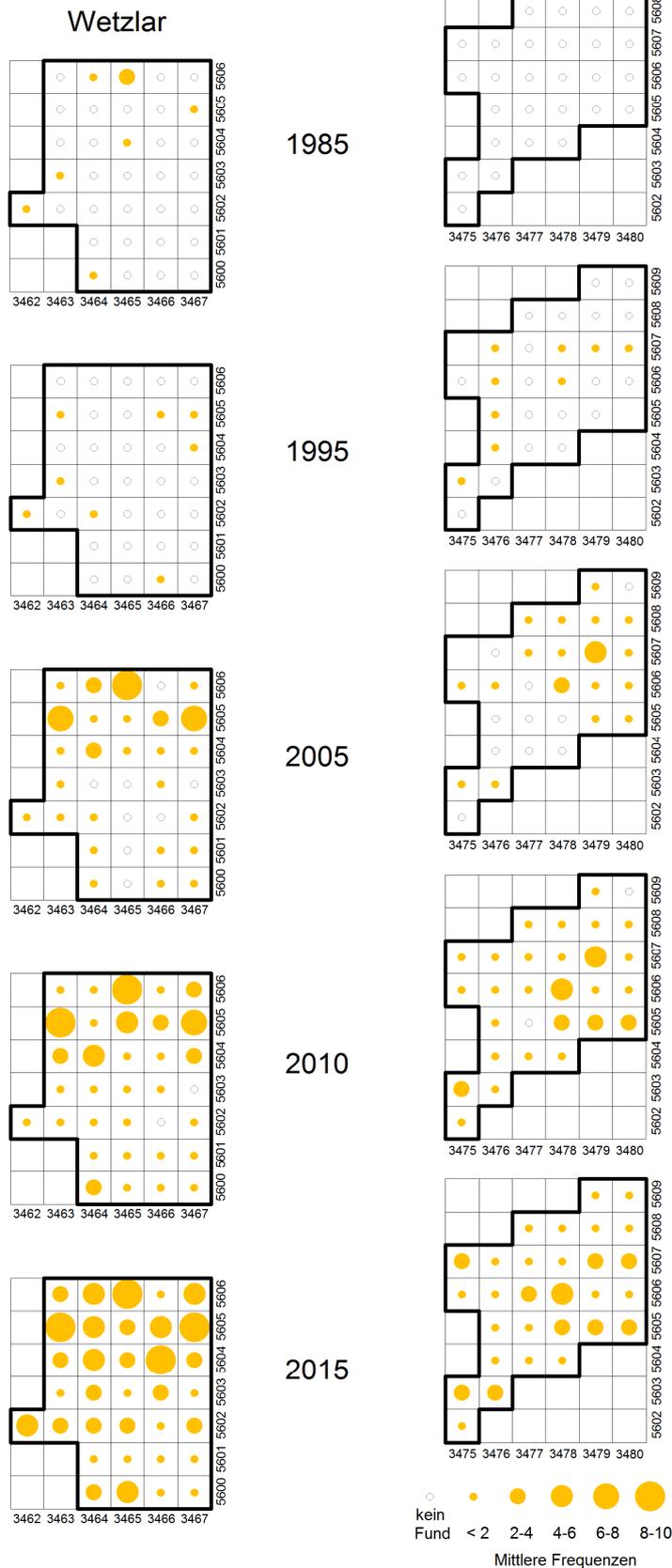
*Hypogymnia physodes*  
(„Gewöhnliche Blasenflechte“):



Diese Art ist ebenfalls ein – wenn auch nicht so strenger – Acidophyt wie *Lecanora conizaeoides*. Folgerichtig lässt sich auch bei ihr ein Rückgang in der Häufigkeit feststellen. Auffallend ist die räumliche Verteilung in Wetzlar: Während sie im stärker kalkstaubbelasteten Norden und Westen des Untersuchungsgebietes immer selten war, sagen ihr die etwas niedrigeren pH-Werte der Bäume im höher gelegenen Südteil der Stadt offenbar eher zu. Mit der Abnahme der SO<sub>2</sub>-Belastung und des Kalkstaubes infolge von verbesserten Filtertechniken schwächte sich dieses Phänomen immer weiter ab (siehe 2010/2015). In beiden Städten ist bei den beiden letzten Erhebungen hinsichtlich der Präsenz von *Hypogymnia physodes* eine gewisse Stabilisierung (allerdings auf niedrigem Niveau) zu beobachten.

Abb. 24: Entwicklung der acidophytischen Flechte *Hypogymnia physodes*

Verbreitung und Frequenz von *Xanthoria parietina*



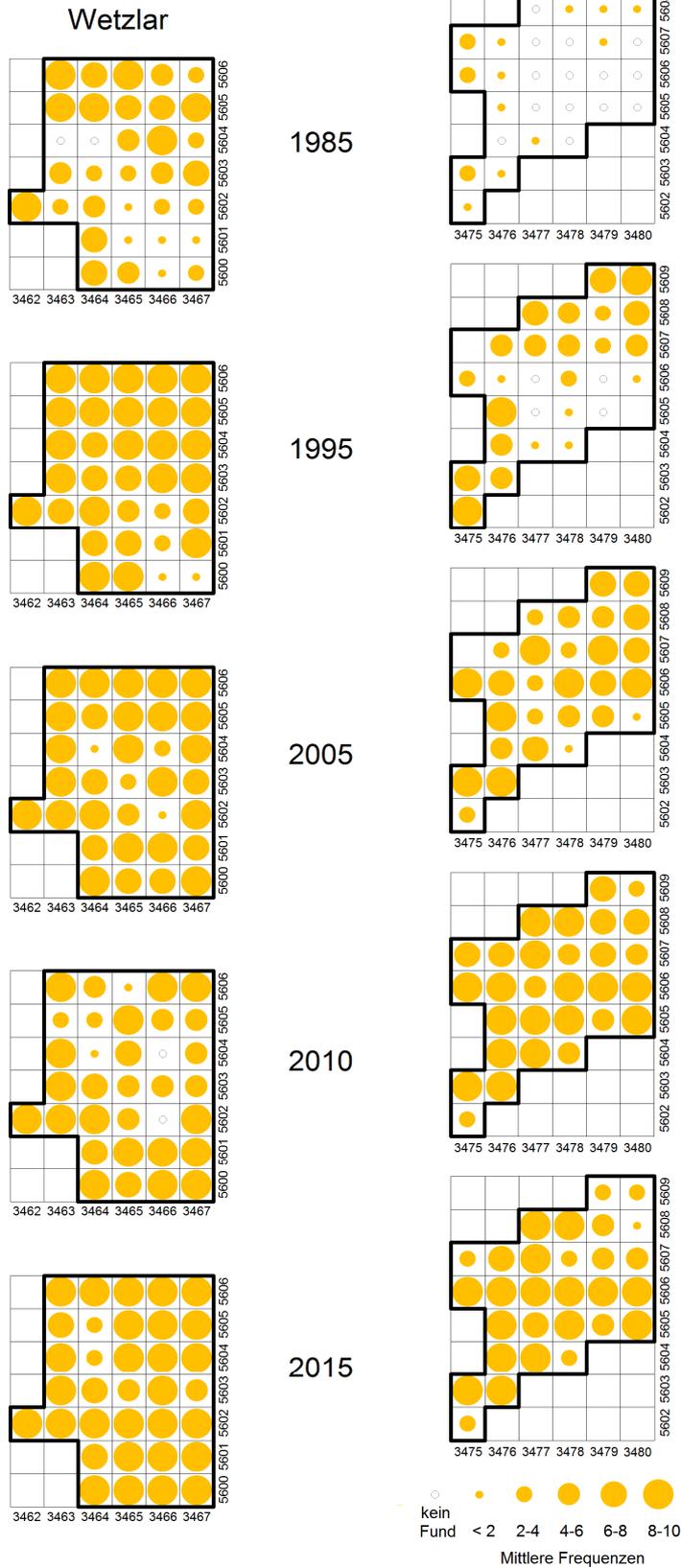
*Xanthoria parietina*  
(„Wand-Gelbflechte“):



Diese neutrophytische und eutrophierungstolerante Flechtenart kam 1985 wegen der sauren Schadgase in beiden Städten nur sehr kümmerlich entwickelt – und überwiegend im Randbereich beider Untersuchungsgebiete – vor. Die danach folgende Zunahme verlief zögerlich, was man u.a. daran erkennen kann, dass Messflächen, die 1985 besetzt waren, 1995 wieder aufgegeben wurden, was aber durch Neuansiedlung in anderen Rasterflächen kompensiert wurde. 2005 hat sie sich in vielen Messflächen etabliert und auch die Frequenz (Häufigkeit am Baum) nimmt deutlich zu. Ihre Vorliebe für höhere pH-Werte manifestiert sich wiederum in Wetzlar deutlich: Von Beginn der Untersuchung an bevorzugte sie den kalkstaubbeeinflussten Norden der Stadt; ihr Verbreitungsmuster ist komplementär zu dem der zuvor dargestellten Acidophyten *Hypogymnia physodes* und *Lecanora conizaeoides*. Sowohl für Wetzlar als auch besonders für Gießen ist ersichtlich, dass sie 2015 die Zahl von besiedelten Messflächen gegenüber 2010 nochmals erhöht hat (in beiden Städten kommt sie inzwischen in allen Messflächen vor). Auch eine nochmalige Zunahme ihrer Frequenz ist erkennbar.

Abb. 25: Entwicklung der neutrophytischen und eutrophierungstoleranten Flechte *Xanthoria parietina*

Verbreitung und Frequenz von  
*Physcia tenella/adscendens*



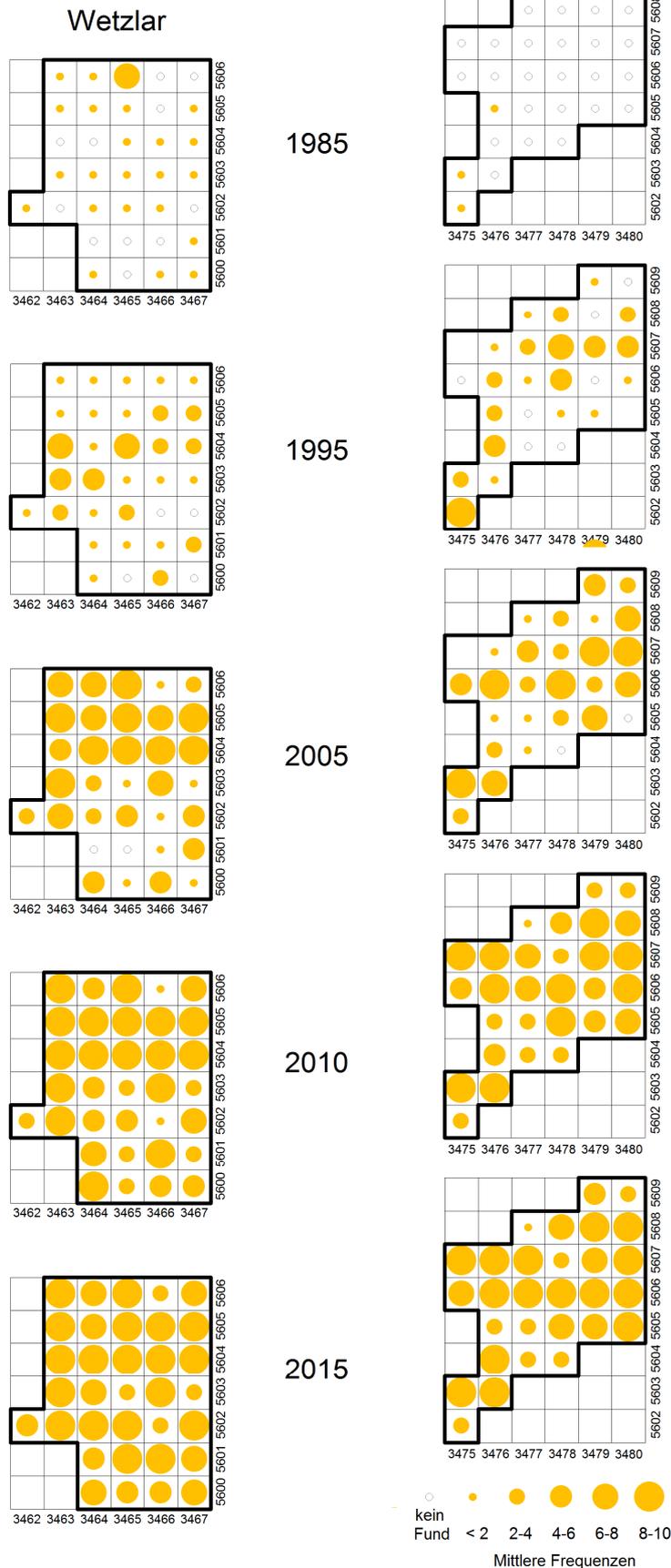
*Physcia tenella* (links)/*adscendens* (rechts)  
(„Zarte Schwielenflechte/Helm-Schwielenflechte“):



Die bei *X. parietina* beschriebenen Besonderheiten lassen sich bei den beiden relativ toxisch-toleranten Physchien noch deutlicher erkennen. Sie waren bereits 1985 in beiden Städten recht häufig in den Randbereichen vertreten (in Wetzlar wiederum verstärkt im Norden). Von diesem hohen Ausgangszustand ausgehend, haben sich beide Arten seither kontinuierlich ausgebreitet und finden sich heute in allen untersuchten Messflächen, teilweise bereits fruchtend – ein Zeichen hoher Vitalität. Offenbar hat dieses Artenpaar 2010 seine maximale Entfaltung überschritten: Zumindest in Wetzlar lässt sich nachweisen, dass sie in einigen Messflächen hinsichtlich ihrer Frequenz leicht rückläufige Tendenzen aufweist. Beim Kartieren am Baum hat man zuweilen den Eindruck, dass sie der Konkurrenz der noch eutrophierungstoleranteren *Phaeophyscia orbicularis* (siehe Abb. 27) weichen muss.

Abb. 26: Entwicklung der toxi- und eutrophierungstoleranten Flechten *Physcia adscendens/P. tenella*

Verbreitung und Frequenz von *Phaeophyscia orbicularis*



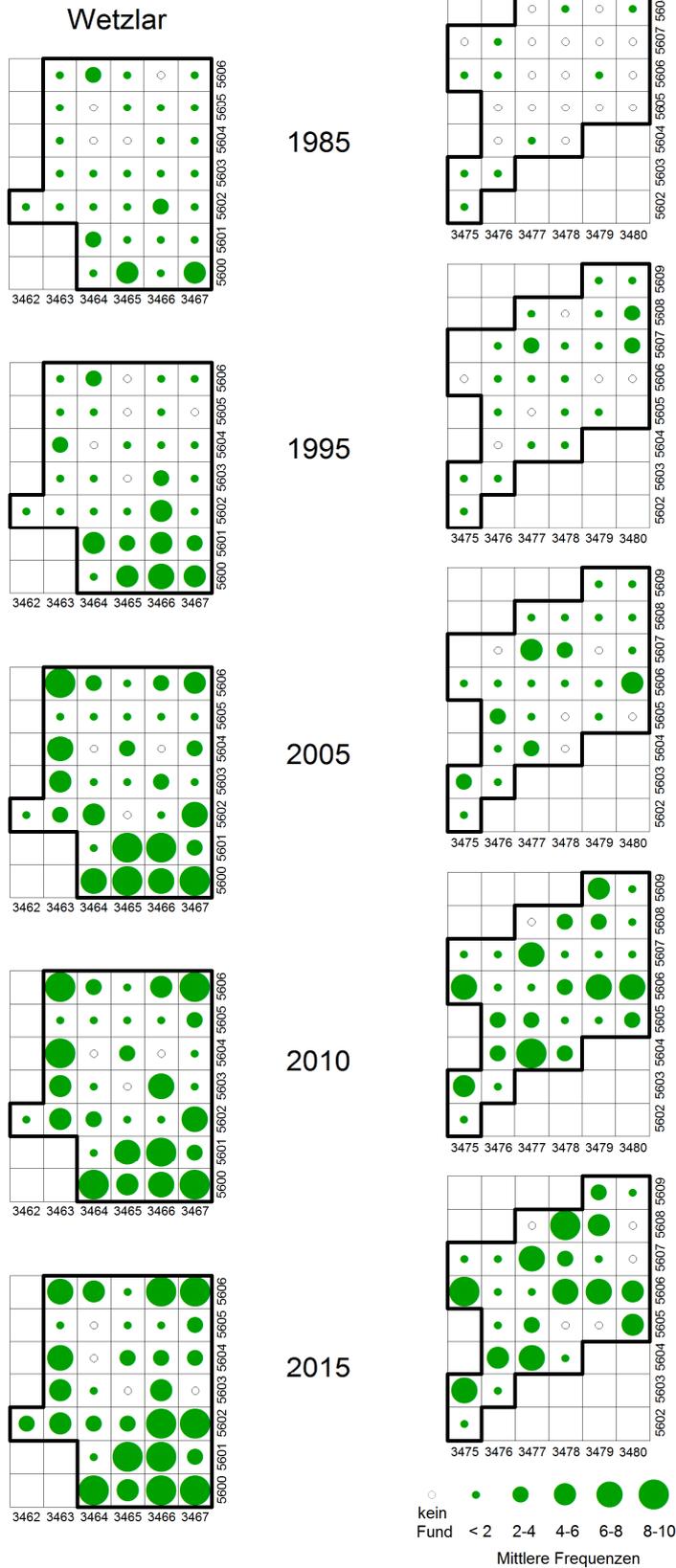
*Phaeophyscia orbicularis*  
(„Kreisförmige Schwielenflechte“):



Die nitrophile und eutrophierungstolerante Spezies war 1985 in beiden Städten zwar häufiger als *Xanthoria parietina*, kam aber wegen ihrer geringeren Toleranz gegenüber sauren Schadgasen nur mit niedriger Frequenz vor. Nach dem Rückgang des SO<sub>2</sub> und dem verstärkten Auftreten eutrophierender Stoffe konnte sie sich stark ausbreiten und verdrängt inzwischen – zusammen mit den beiden zuvor genannten Arten – teilweise Referenzarten von den Baumrinden, weil sie die Baumstämme im Untersuchungsbereich flächendeckend besiedelt. Wie bei den zuvor beschriebenen Eutrophierungszeigern ist 2010 in beiden Städten nochmals eine Zunahme sowohl hinsichtlich der besiedelten Messflächen als auch bezüglich ihrer Frequenz zu konstatieren. 2015 hat sie – weil bereits zuvor alle Messflächen besiedelt waren – lediglich in der Frequenz zugenommen. Offenbar ist sie (zusammen mit den beiden zuvor beschriebenen Physcien) jene Art, die vom Anstieg der Borken-pH-Werte und der eutrophierenden Luft-Fremdstoffe am stärksten profitiert.

Abb. 27: Entwicklung der nitrophilen und eutrophierungstoleranten Flechte *Phaeophyscia orbicularis*

Verbreitung und Frequenz von *Parmelia sulcata*



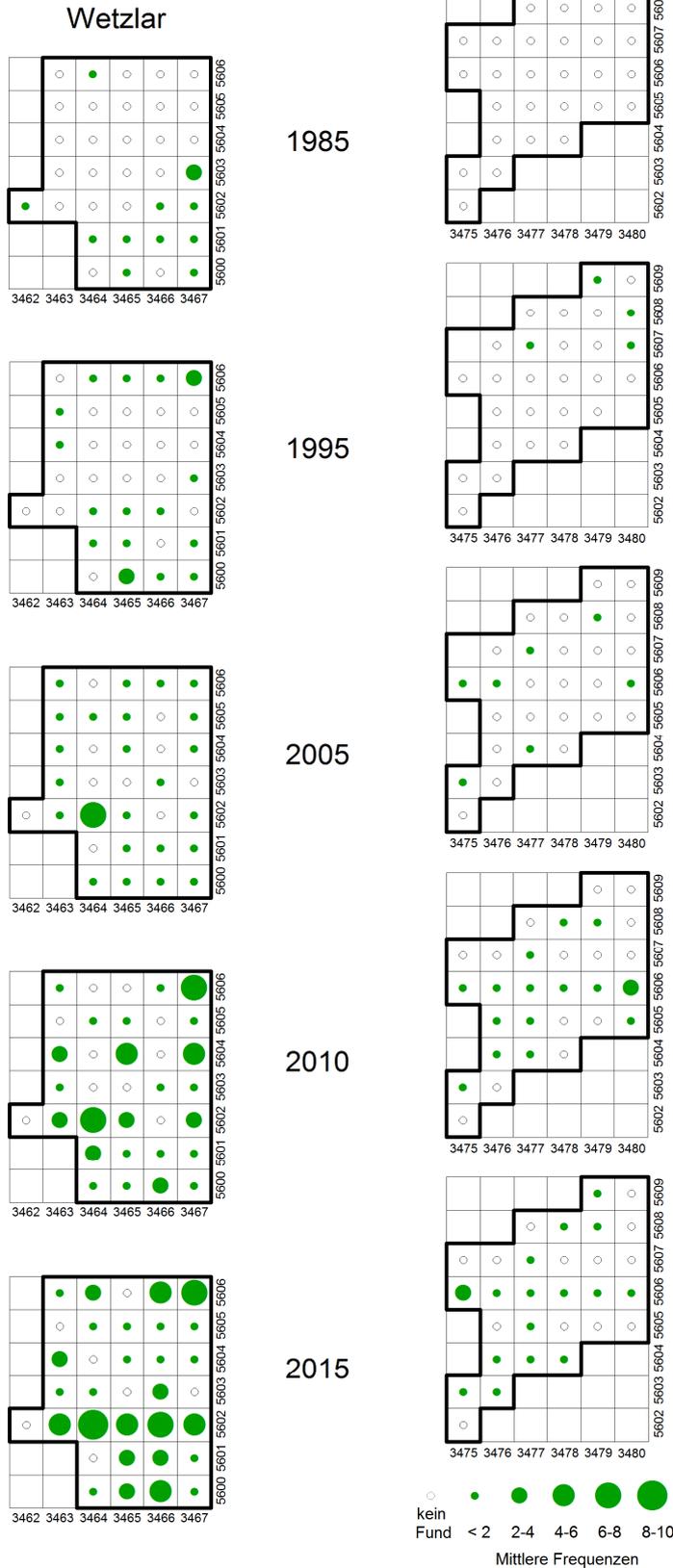
*Parmelia sulcata*  
(„Sulkatflechte“):



Wenngleich das Entwicklungsmuster der folgenden Arten dem der drei zuvor dargestellten auf den ersten Blick zu gleichen scheint, ergeben sich doch beim näheren Hinsehen Unterschiede. *P. sulcata* meidet deutlicher die Stadtzentren; dies ist v.a. in Wetzlar zu beobachten. In dieser Stadt sind die Existenzbedingungen für sie im Süden offenbar besser, woraus man acidophytische Merkmale ableiten könnte. Während aber die Acidophyten im Verlauf des Untersuchungszeitraumes mehr oder weniger deutlich zurückgehen (Abb. 23, 24), nimmt diese Art in beiden Städten zu. *P. sulcata* gehört zu jener artenreichen Flechtengruppe, die bezüglich des pH-Wertes ihrer Substrate mittlere Verhältnisse bevorzugt, eutrophierende Luftfremdstoffe nur mäßig verträgt und gegenüber sauren Immissionen ebenfalls eine mittlere Empfindlichkeit besitzt. Sie ist also ein typischer Vertreter der **Referenzarten**, deren Vorkommen günstige lufthygienische Bedingungen widerspiegelt.

Abb. 28: Entwicklung der Referenzart *Parmelia sulcata* (subneutrophytisch, mittelempfindlich)

Verbreitung und Frequenz von *Melanohalea exasperatula*



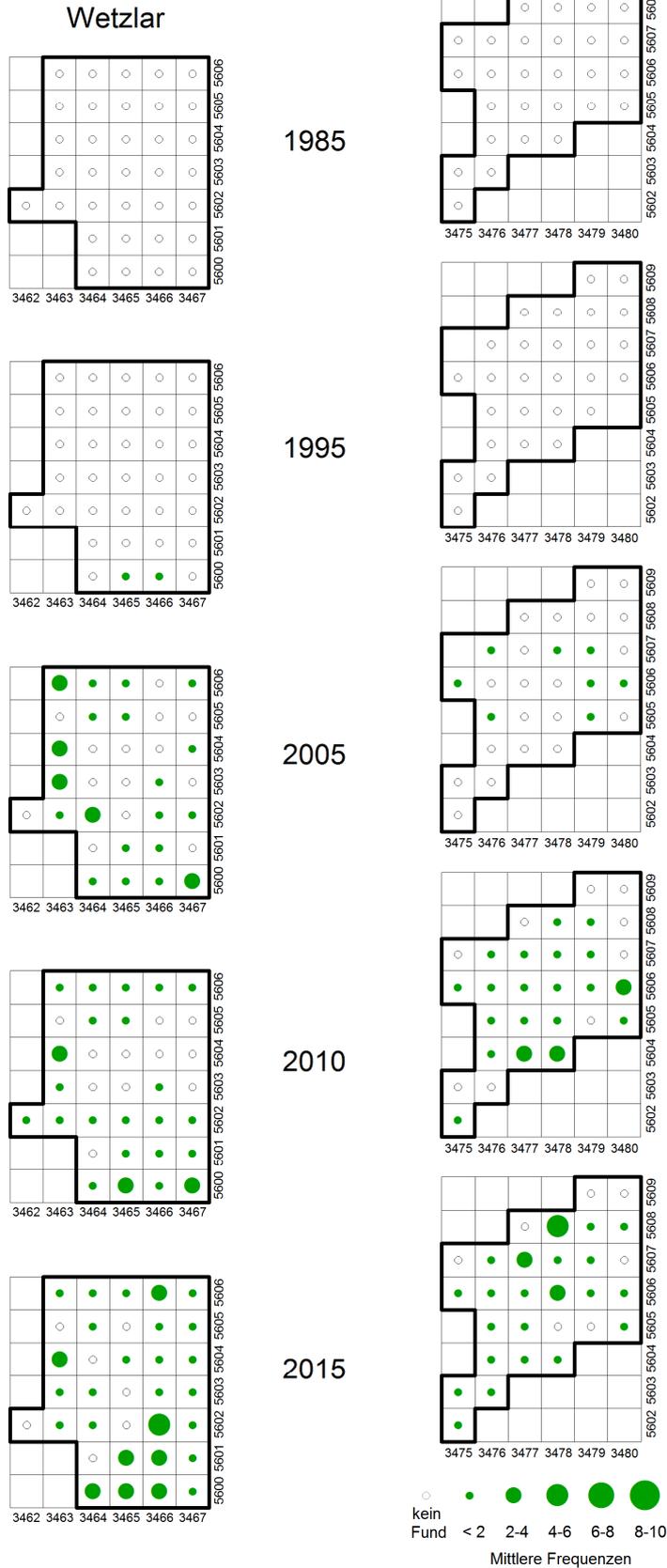
*Melanohalea exasperatula*  
(„Spatel-Braunflechte“):



Diese Referenzart zeigt ein ähnliches Verbreitungs- und zeitliches Entwicklungsmuster, wie die zuvor beschriebene *Parmelia sulcata*. In Wetzlar tritt sie bereits 1985 auf, allerdings mit geringer Frequenz und wiederum auf den Südtteil des Untersuchungsgebietes beschränkt. Ihre – im Vergleich zu *P. sulcata* – insgesamt geringere Häufigkeit in beiden Städten kann als Zeichen dafür gelten, dass die Art etwas empfindlicher gegenüber Luftverunreinigungen ist als die zuvor beschriebene Species. Dennoch findet sie offensichtlich in beiden Städten zunehmend Umweltbedingungen vor, die ihr zuzusagen; die Anzahl besiedelter Messflächen hat 2015 nochmals deutlich zugenommen.

Abb. 29: Entwicklung der Referenzart *Melanohalea exasperatula* (subneutrophytisch, mittelempfindlich)

Verbreitung und Frequenz von *Melanelixia glabratula/subaurifera*



*Melanelixia glabratula/M. subaurifera* („Samtige Braunflechte/Gold-Braunflechte“):

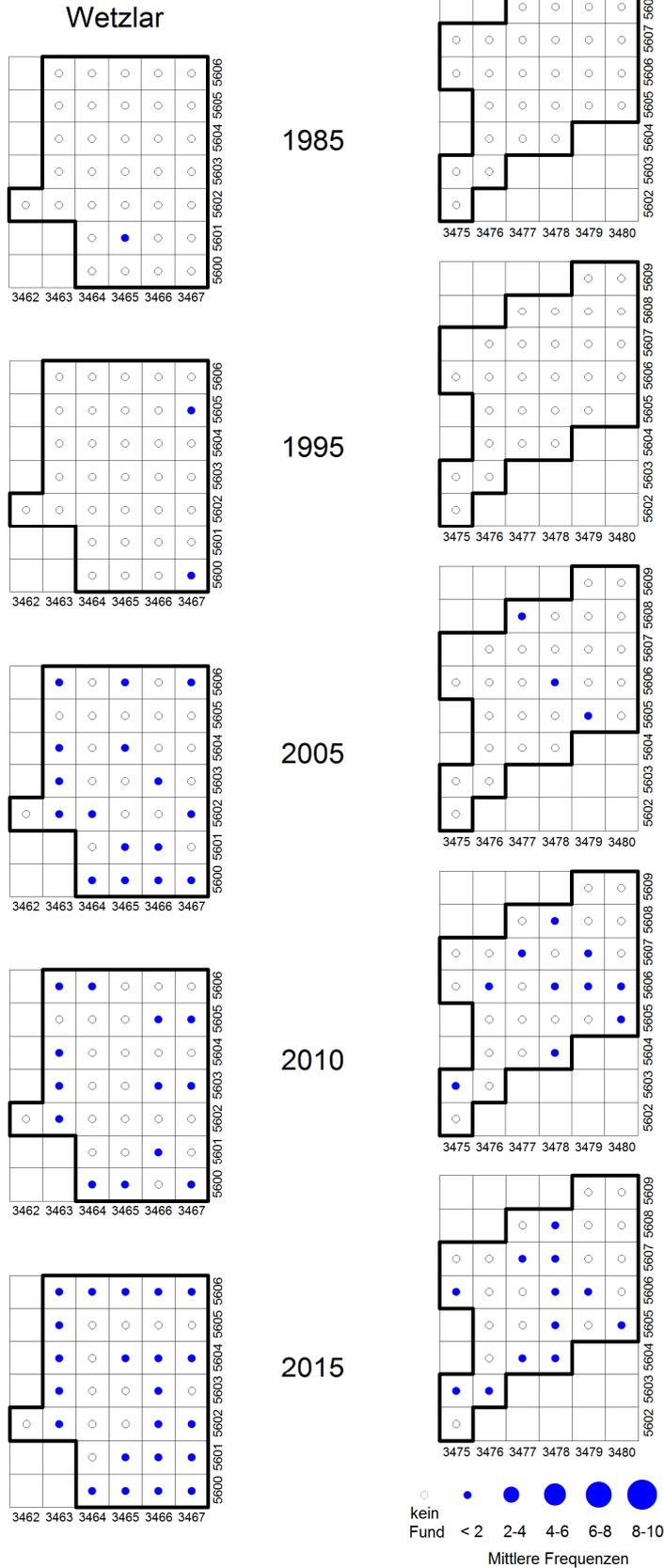


Beide Flechten gehören – wie die zuvor beschriebenen – zu den Referenzarten, sind aber noch etwas empfindlicher als diese: In Wetzlar treten sie spärlich erst ab 1995, in Gießen sogar erst ab 2005 in Erscheinung, erobern sich aber seither – wenn auch noch mit sehr geringer Frequenz (oft nur Einzelexemplare) – rasch viele Messflächen. Ebenso, wie viele andere der wieder zurückkehrenden Arten, war sie im Untersuchungsgebiet bereits in vorindustrieller Zeit heimisch [DILLENIUS, 1719], musste aber zwischenzeitlich den hohen Immissionsbelastungen des letzten Jahrhunderts weichen.

Flechtennamen, die sich während des Untersuchungszeitraumes geändert haben, werden hier – aus Vergleichsgründen – nicht umbenannt. (So heißt z.B. *Melanelixia glabratula* heute *Melanelixia fuliginosa*).

Abb. 30: Entwicklung der Referenzarten *Melanelixia glabratula/M. subaurifera* (subneutrophytisch, empfindlich)

Verbreitung und Frequenz von *Ramalina farinacea*



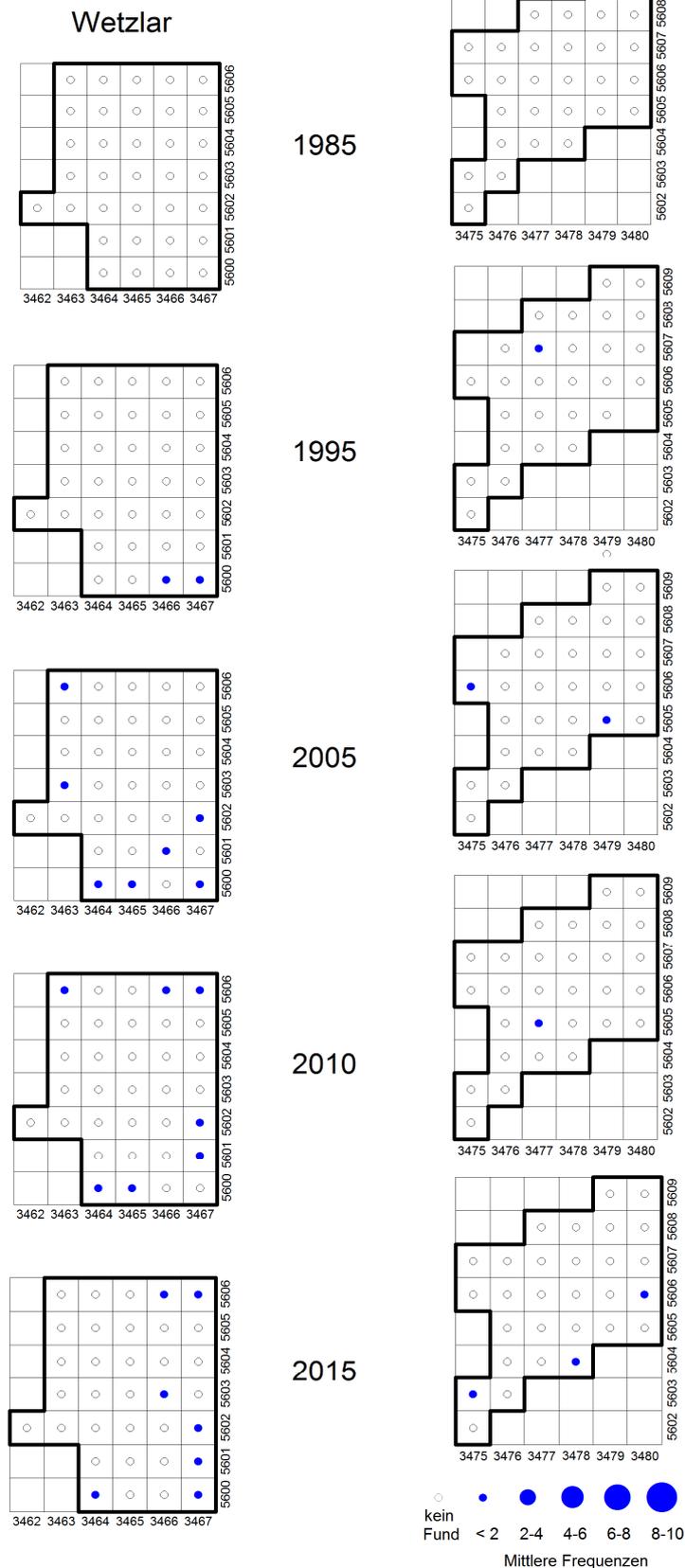
*Ramalina farinacea*  
(„Mehlige Astflechte“):



Einen noch höheren Luftreinheitsgrad zeigen die Vertreter der letzten Gruppe an. Sie hatten bis 1995 wegen der für sie zu starken Immissionsbelastung in Wetzlar wie in Gießen noch keine Existenzmöglichkeiten, besiedeln aber seither – wenn auch bisher nur mit wenigen Exemplaren – beide Städte. 2015 hat *R. farinacea* in beiden Städten neue Messflächen erobert. Sie ist ein typischer Vertreter dieser, hinsichtlich der Luftgüte, recht anspruchsvollen Referenzarten. *Ramalina farinacea* gehört zu den wenigen Strauchflechten, die bisher zurückgekehrt sind.

Abb. 31: Entwicklung der sehr empfindlichen Referenzart *Ramalina farinacea*

Verbreitung und Frequenz von *Usnea spec.*



*Usnea spec.* („Bartflechte“):



Hier ist eine Gruppe von Bartflechten zusammengefasst, die derartig empfindlich gegenüber Luftverunreinigungen sind, dass sie zunächst nur in einzelnen kümmer-exemplaren (und damit noch kaum bestimmbar) gefunden werden.

Anhand der Tatsache, dass sie immer wieder einmal in einer Messfläche auftauchen, bei der folgenden Kartierung jedoch dort wieder verschwunden sind und dafür in einer anderen auftauchen, lässt sich schließen, dass die lufthygienischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten Wetzlar und Gießen derzeit so beschaffen sind, dass sie für die Usneen noch knapp unter den Existenzmöglichkeiten liegen. Ähnliche Beobachtungen ließen sich vor einigen Jahren z.B. auch bei der Strauchflechte *Evernia prunastri* machen – heute ist diese Art im Spektrum der mittelhessischen Flechten fest verankert.

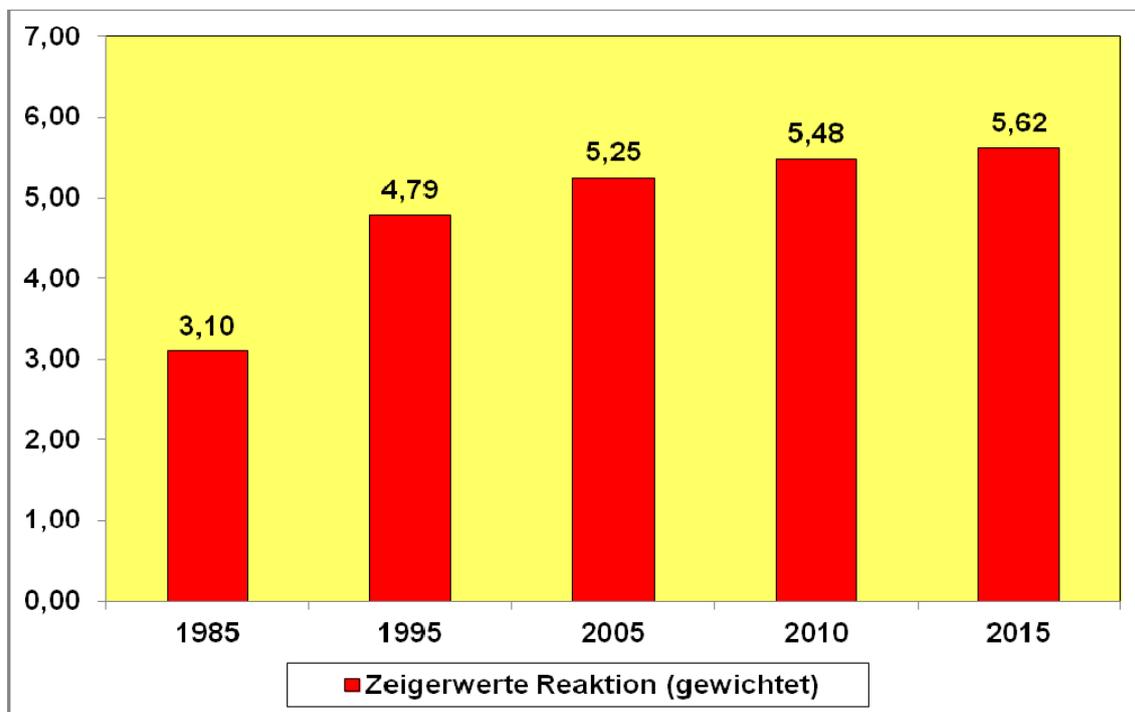
Es ist jedoch davon auszugehen, dass die *Usnea*-Arten bei der nächsten Erhebung dauerhaft vorkommen werden, sofern sich die lufthygienischen Verhältnisse weiter verbessern.

Da allerdings viele Vertreter der Gattung *Usnea* eher an kühl-feuchte Umgebungen angepasst sind, wäre es auch denkbar, dass sie – sofern sich der Klimawandel fortsetzt – aus diesem Grund Schwierigkeiten mit ihrer Ansiedelung bekommen; eine fortgesetzte Verringerung der Immissionsbelastung würde für sie dann nicht von Nutzen sein. Insofern ist die weitere Beobachtung dieser Gruppe von Flechten von besonderem Interesse.

Abb. 32: Entwicklung der sehr empfindlichen Referenzart *Usnea spec.*

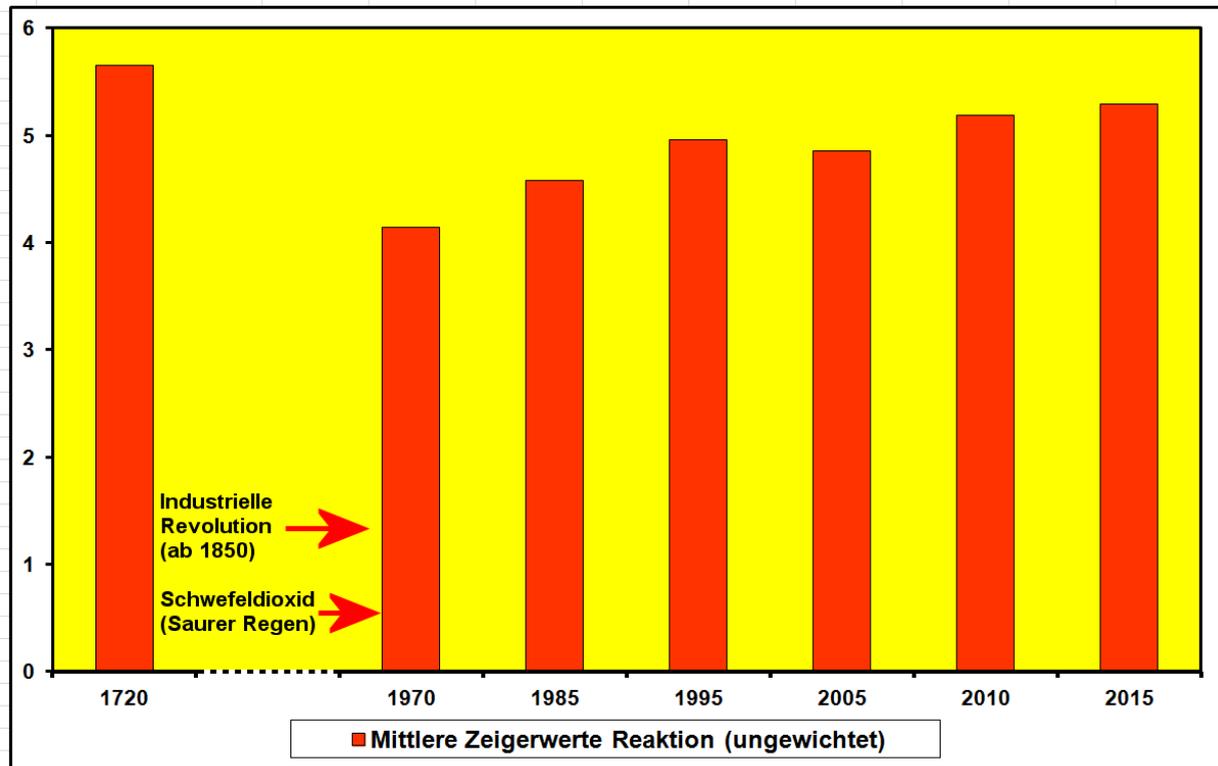
#### 4.5 Zeigerwerte [WIRTH, 2010]

Die Reaktionszahlen, die eine Aussage über den Säuregrad der von Flechten besiedelten Substrate ermöglichen, sind in Abbildung 33 dargestellt. Ein Anstieg von mehr als zwei Stufen in der neunstufigen Skala der Zeigerwerte ist ungewöhnlich und bedeutsam. Er lässt sich mit dem Anstieg der Rinden-pH-Werte erklären (Abb. 6-8). Wie aus den Abbildungen zu ersehen ist, sind die pH-Werte seit 1985 infolge der nachlassenden Versauerung allmählich fast wieder auf vorindustrielle Werte angestiegen und erlauben somit die Wiederansiedelung subneutrophytischer und neutrophytischer Flechtenarten. Wie die Reaktionszahlen belegen, erfolgte der stärkste Anstieg zwischen 1985 und 1995, was mit den kurz zuvor drastisch gesunkenen SO<sub>2</sub>-Konzentrationen zusammenhängt (siehe Abb. 9).



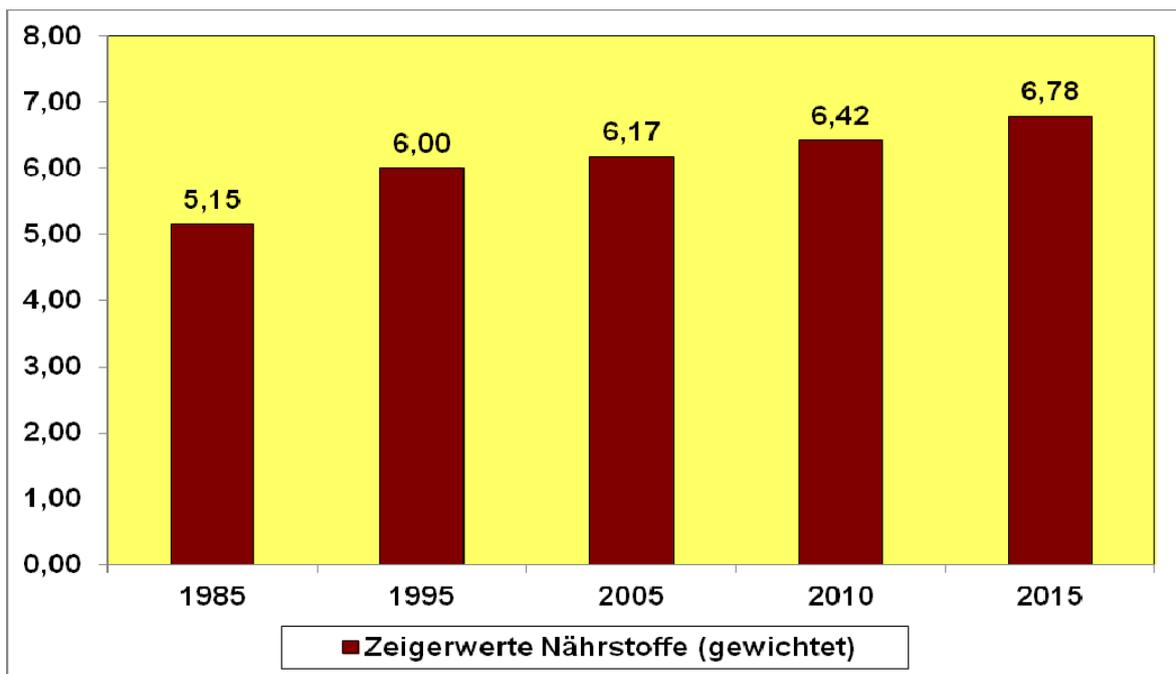
**Abb. 33:** Entwicklung der mittleren Reaktionszahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015) (es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Es ist bekannt, dass es aus dem Gießener Raum auch Flechtensammlungen aus sehr früher Zeit – vor 300 Jahren – gab [DILLENIIUS, 1719]. Deren Verbleib war lange unbekannt, er wurde aber vom Verfasser 2008 geklärt: Sie befinden sich in Großbritannien; allerdings sind die alten Flechtennamen heute nicht mehr verwendbar. In einem Herbarium der Universität Oxford konnten die Flechten jedoch eingesehen, fotografiert und bestimmt werden. Den epiphytischen Arten wurden die jeweiligen Zeigerwerte zugeordnet und daraus die mittleren Werte für Reaktion und Temperatur berechnet. Dabei konnten die Zeigerwerte nicht gewichtet werden, weil DILLENIIUS keine quantitativen Angaben zur Häufigkeit der gefundenen Arten gemacht hat. Auf die gleiche Weise wurden im Folgenden auch die ungewichteten Zeigerwerte der in Gießen seit 1970 gefundenen Flechtenarten berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 34 wiedergegeben. Es sollte nicht überinterpretiert werden, weil DILLENIIUS nicht in einem Aufnahmegitter unter standardisierten Vorgaben – und gewiss auch nicht systematisch – gesammelt hat. Jedoch zeigt sich anhand seiner Flechten, dass die Umgebung Gießens 1720 – also ca. 150 Jahre vor der industriellen Revolution – eine deutlich geringere Versauerung aufwies, als dies während des gesamten hier dargestellten Untersuchungszeitraumes von 1970 bis 2015 der Fall war. Besonders stark fällt das Absinken der mittleren Zeigerwerte von 1720 nach 1970 auf (er beträgt fast 1,5 Stufen), was auf die zu dieser Zeit sehr hohen Konzentrationen des toxischen Schwefeldioxids und anderer „saurer“ Schadgase zurückgeführt werden muss. Der allmähliche Anstieg der Zeigerwerte seit 1970 wurde bereits weiter oben beschrieben und begründet; noch immer ist jedoch der vorindustrielle Wert nicht wieder erreicht.



**Abb. 34:** Entwicklung der mittleren Reaktionszahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015)  
(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Aus Abb. 35 geht hervor, dass die Veränderungen in der Flechtenzusammensetzung auch auf eine höhere Belastung mit eutrophierenden Luftfremdstoffen zurückzuführen sein muss. Hierfür spricht ebenfalls die offenkundige Zunahme von Eutrophierungszeigern an fast allen Messflächen über den Untersuchungszeitraum (siehe z.B. die Abbildungen 25, 26 und 27). Als Eutrophierungszeiger werden Arten bezeichnet, die höhere Angebote von Ammonium und Nitrat zu akzeptieren vermögen. Solche Arten sind in der Lage, die für die Stickstoffassimilation benötigten Kohlenstoffverbindungen in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen [HAUG, 2010].



**Abb. 35:** Entwicklung der mittleren Nährstoffzahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015)  
(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Als Verursacher der angezeigten Eutrophierungserscheinungen kommen vor allem luftgetragene Stickstoffverbindungen in Frage. Deren Konzentrationen zeigen bei den technischen Messungen in Hessen für den in Frage kommenden Zeitraum jedoch keine wesentlichen Veränderungen; (Abb. 36; dies gilt auch für den Zeitraum von 1985 bis 2007). Ähnlich konstant sind die Stickstoffmonoxidkonzentrationen.

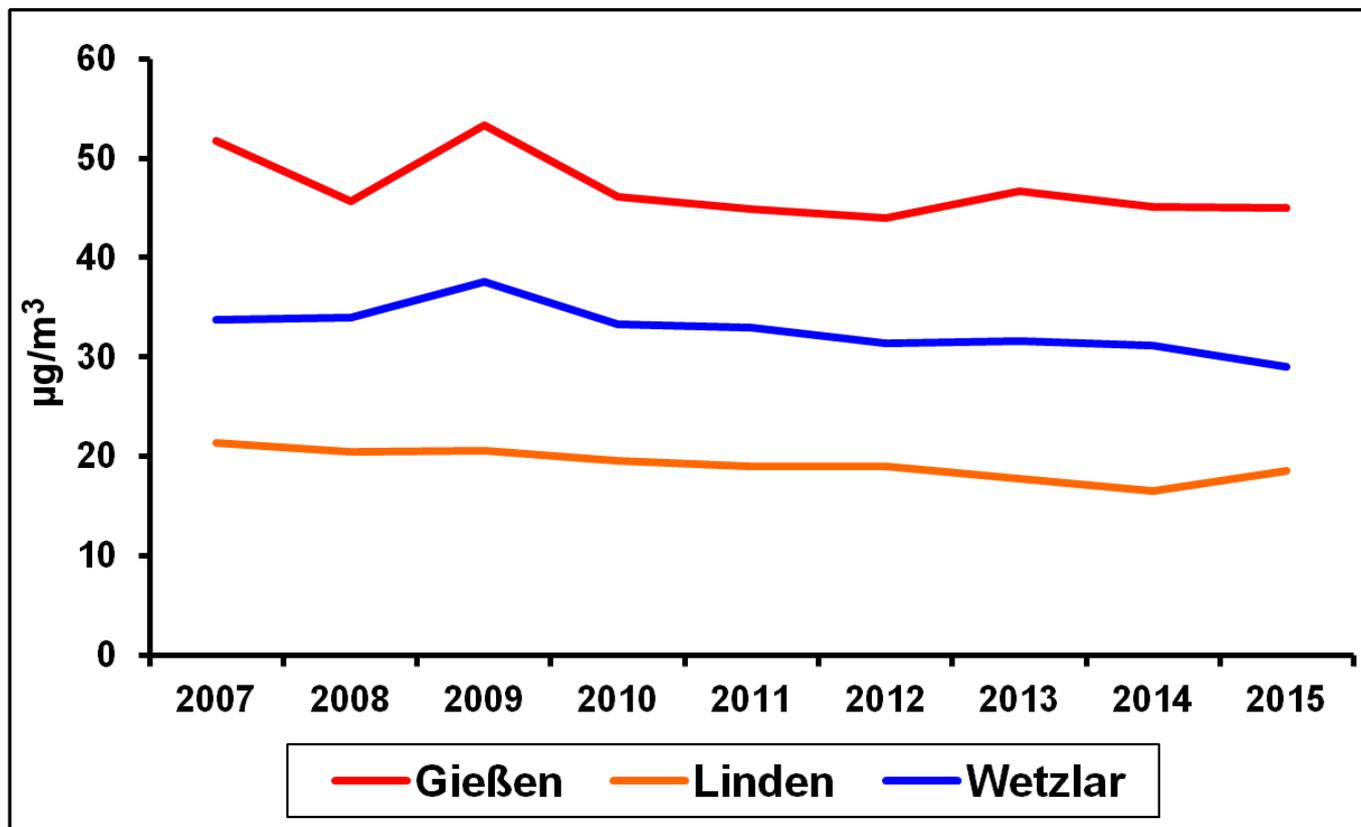


Abb. 36: Entwicklung der Stickstoffdioxidkonzentrationen in Wetzlar/Gießen [HLNUG, 2016]

Eine Erklärung für diesen scheinbaren Widerspruch findet sich in der Tatsache, dass die technisch gemessenen N-Verbindungen für die Existenz von Flechten ohne direkte Bedeutung sind. Bekanntlich metabolisieren Pflanzen (und Flechten) v.a.  $\text{NO}_3$  und  $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4$  [VAN DOBBEN, 1996; VAN DOBBEN et al., 1996; VAN HERK, 1999, 2002]. Diese Stickstoffverbindungen werden aber wegen messtechnischer Probleme in der Regel nicht erfasst. Die durch Ammoniak in Mitteleuropa emittierte Menge liegt etwa in der gleichen Größenordnung wie die Gesamtemission von  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ . Das Ammoniak entstammt hauptsächlich landwirtschaftlichen Quellen (Tierhaltung; Gülleausbringung). Es wird innerhalb weniger Stunden zu Ammonium oder Ammoniumsalzen abgebaut. Deshalb werden nur in unmittelbarer Nähe von Quellen erhöhte Ammoniakkonzentrationen gemessen. Die Abbauprodukte (Ammonium bzw. Ammoniumsalze) können dagegen als Aerosole über weite Strecken verfrachtet werden. Wegen des Transportes muss davon ausgegangen werden, dass diese Verbindungen flächendeckend vorhanden sind [LFU, 2004]. Während man bisher angenommen hat, dass die  $\text{NH}_3$ -Emission aus Autoabgasen eher unbedeutend ist, gehen neuere Untersuchungen von beträchtlichen Ammoniakkonzentrationen aus den Abgasen belegter, kalter oder gealterter Katalysatoren aus [PRESSEMITTEILUNG DER UNI BONN VOM 3.12.05]. Nach einer Studie des Büros für Technikfolgenabschätzung aus dem Jahr 2000 ergibt sich „im Durchschnitt durch den 3-Wege-Katalysator eine Erhöhung der Ammoniak-Emissionen um das 50-fache“ [siehe <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/1702/pdf/ab146-2.pdf>, S. 136]. Diese Feststellungen würden auch erklären, warum in den Städten – trotz fehlender landwirtschaftlicher Emissionen –, und dort vornehmlich in der Nähe stark befahrener Straßen, die N-Anreicherung in Flechten besonders hoch ist [STAPPER et al., 2005; VAN HERK, 2009; WINDISCH et al. 2016]. Weiterhin wird beschrieben, dass die Diversität nitrophytischer Flechten, von den Rändern der Straßen ausgehend, allmählich wieder abnimmt [VORBECK & WINDISCH, 2001]. All dies spricht für eine wesentliche Rol-

le des Ammoniaks (bzw. seiner Reaktionsproduktes Ammonium) bei den Wirkungen von N-Verbindungen auf Flechten (und Höhere Pflanzen) [HAUCK, 2010].

Seit Kurzem gibt es nun messtechnische Hinweise auf den Anstieg des Ammoniaks in Hessen (Abb. 37).

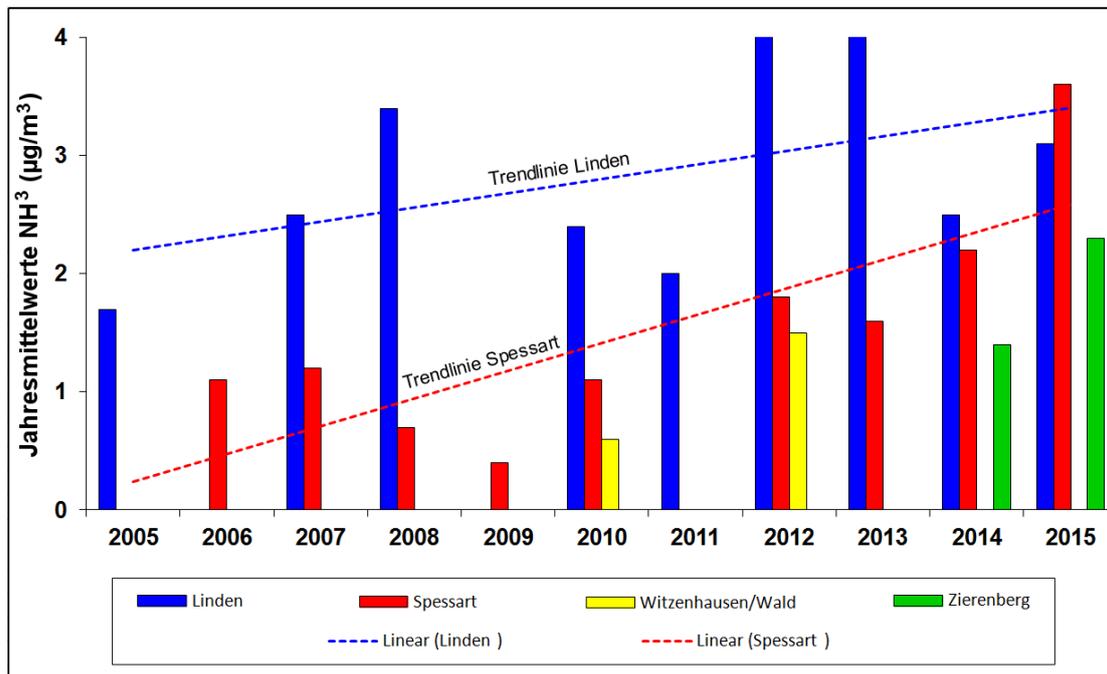


Abb. 37: Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Gebieten Hessens (Jahresmittelwerte auf der Basis von Stundenmittelwerten) [HLNUG, 2016]

Wie außerdem DÄMMGEN et al. nachweisen konnten, steigen die  $\text{NH}_3$ -Werte seit 1995 in verschiedenen Messstationen Deutschlands (darunter auch in Gießen-Linden) an [DÄMMGEN et al. 2013] (Abb. 38).

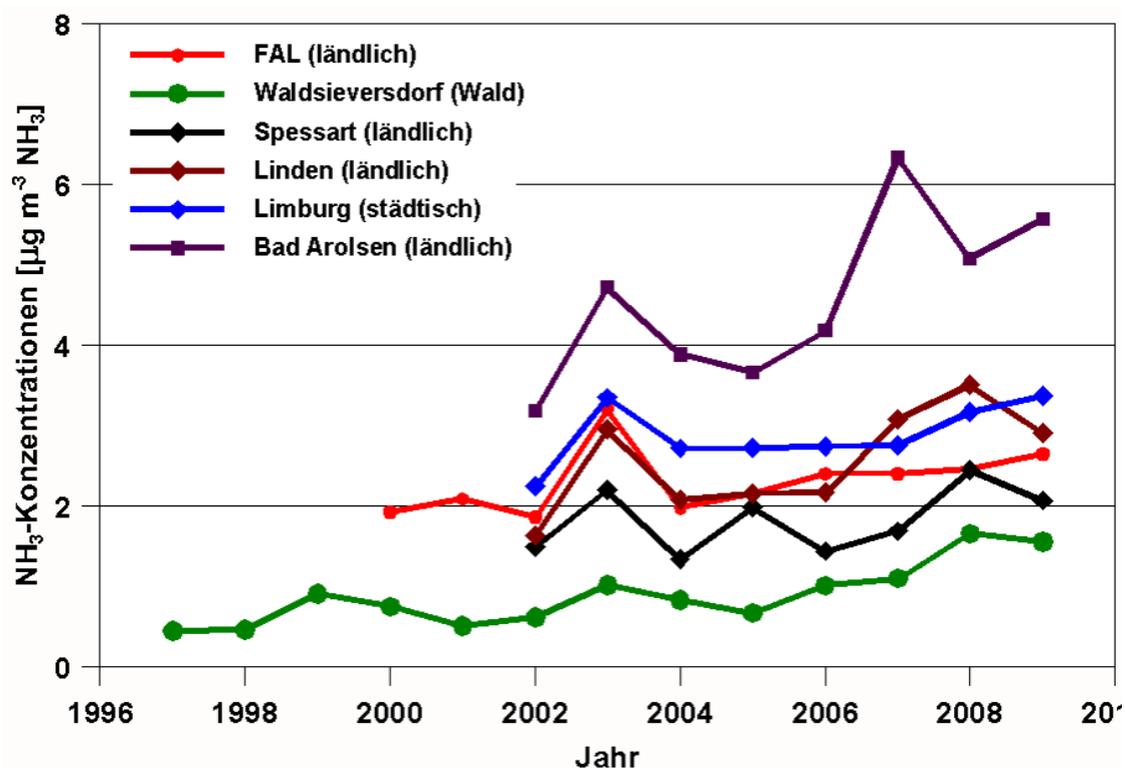


Abb. 38: Entwicklung der Hintergrundkonzentrationen von Ammoniak in verschiedenen Gebieten Deutschlands (Depositionsmessungen)

Diese Messergebnisse liefern eine plausible Erklärung für den oben gezeigten Anstieg der Nährstoffzeigerwerte (Abb. 35). Die Abbildung 39 und 40 lassen für beide Stadtgebiete einen Anstieg der Referenzarten erkennen, was für eine allgemeine Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse spricht. Der gleichzeitige – und sogar stärkere – Anstieg bei den Eutrophierungszeigern weist allerdings auch auf eine erhebliche Belastung mit Fremdstoffen mit düngender Wirkung hin.

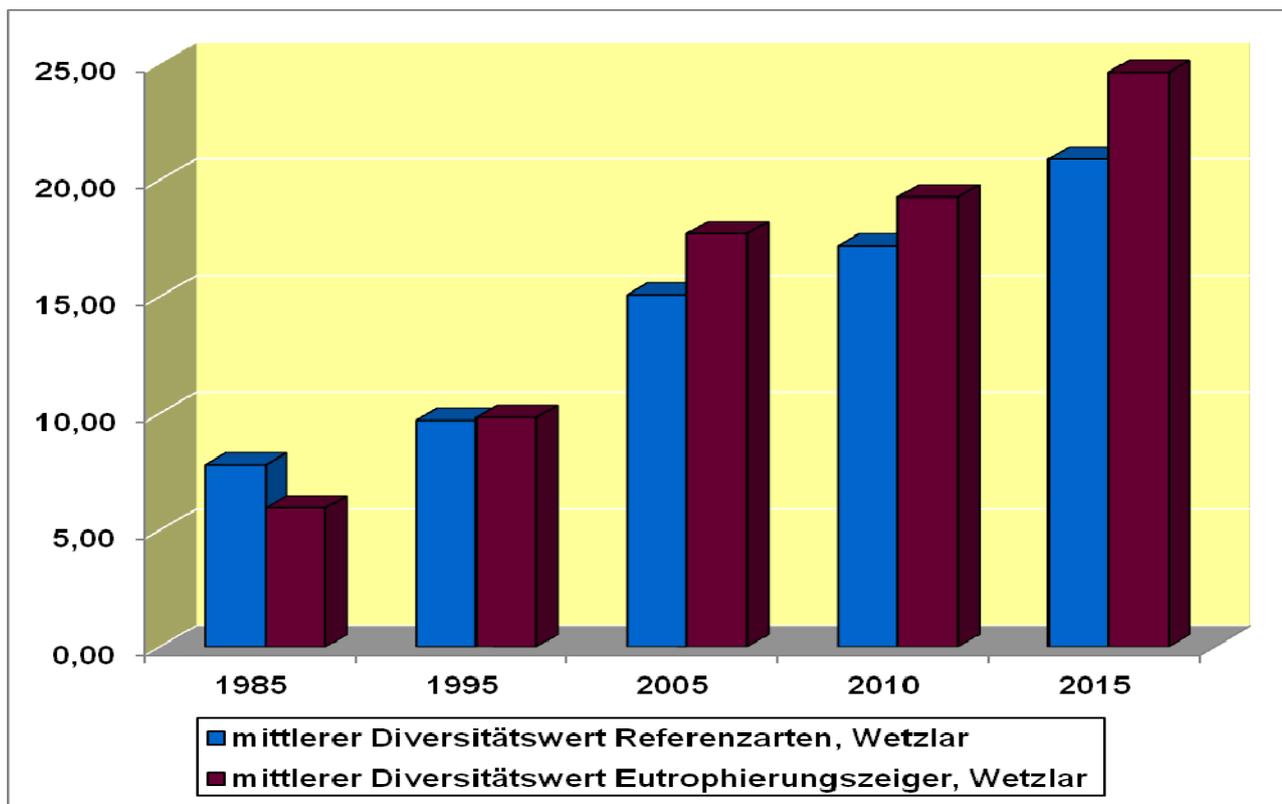


Abb. 39: Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in Wetzlar (1985-2015)

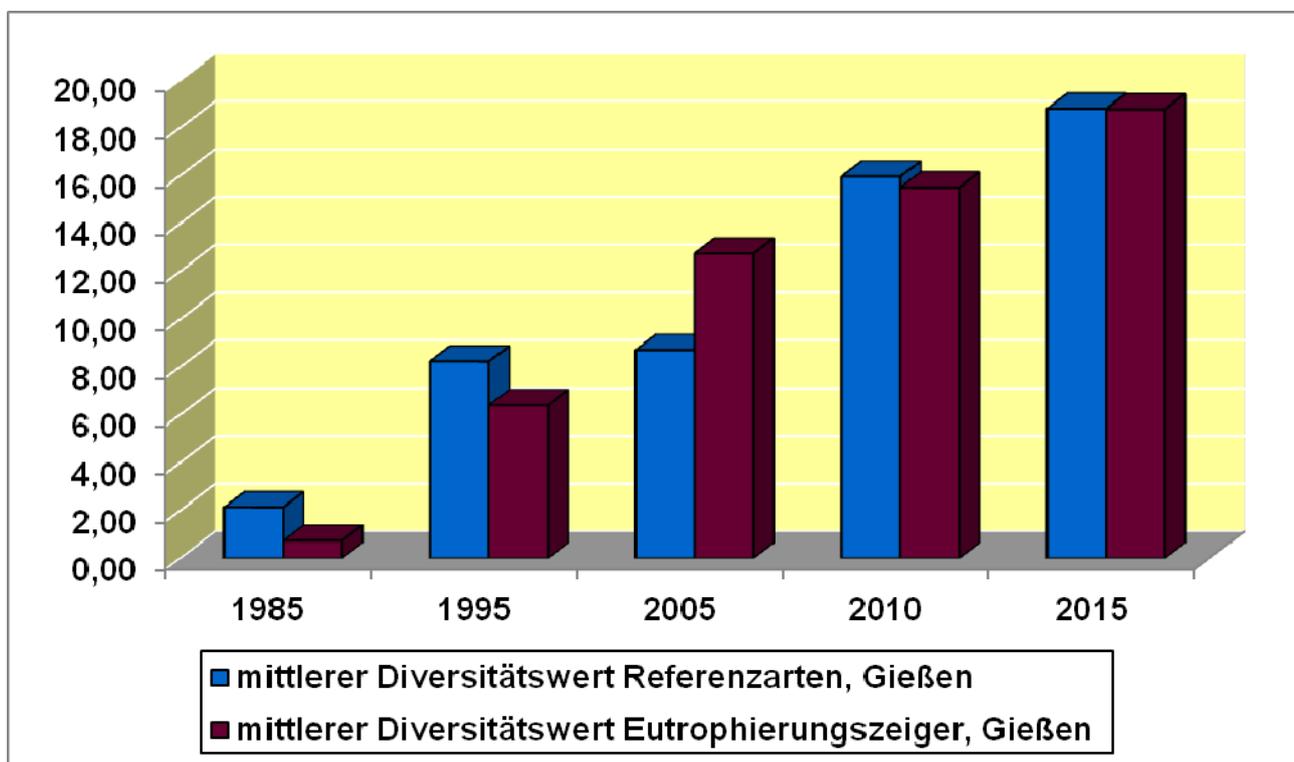
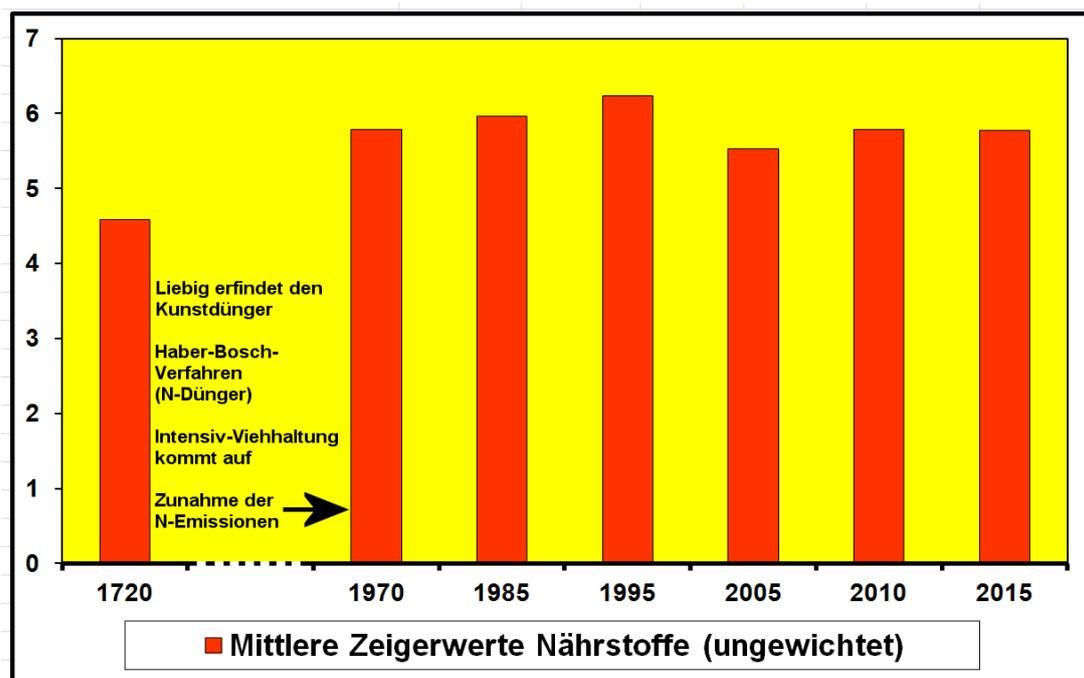


Abb. 40: Entwicklung von Referenzarten und Eutrophierungszeigern in Gießen (1985-2015)

Eutrophierende Wirkungen auf die Umwelt sind negativ zu bewerten: Nitrophile Arten dringen in Ökosysteme ein und verdrängen dort solche Pflanzen, die nährstoffarme Böden bevorzugen; eine Verringerung der Diversität innerhalb der Lebensgemeinschaften ist die Folge [EKL, 2005]. Des Weiteren kommt es zu Versauerungserscheinungen im Boden, wenn bei der Umwandlung von  $\text{NH}_4^+$  zu  $\text{NO}_3^-$  Protonen freigesetzt werden. Wenn auch andere Luftfremdstoffe ähnliche Wirkungen ausüben (z.B.  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$ ), so gilt doch Ammoniak als ein Hauptverursacher der Bodenversauerung (Beitrag ca. 40%). Eine Erniedrigung des pH-Wertes im Boden erhöht u.a. die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen und toxischen Metallkomplexen (Ionenaustausch), was wiederum die Eutrophierung ansteigen lässt und gleichzeitig – bei hohen Konzentrationen – zu toxischen Erscheinungen führen kann [LFU, 2004]. Im humiden mitteleuropäischen Klima, wird ein Teil der infolge der Versauerung mobilisierten Ionen ausgewaschen und dem Grundwasser zugeführt – und somit dem Pflanzenwachstum entzogen; gleichzeitig können auch toxische Ionen (z.B. Aluminium) in das Grundwasser gelangen. Andererseits führt eine erhöhte Stickstoffzufuhr bei Pflanzen zu übermäßigem Wachstum und – damit einhergehend – zu verminderter Trocken- und Frostresistenz sowie zu geringeren Abwehrkräften gegenüber Schaderregern.

Die aufgeführten Auswirkungen sind besonders in Wald-Ökosystemen problematisch. Wegen der natürlichen Pufferwirkung, die durch das Pflanzenwachstum (Einbau von N) und die Stickstoffanreicherung im Boden hervorgerufen werden, treten negative Folgen nur moderat und zeitlich verzögert auf. Dies führt dazu, dass der Handlungsbedarf erst mit großer Verspätung – und damit eventuell zu spät – erkennbar wird. Ist die Pufferkapazität der Wald-Ökosysteme erschöpft, so verlieren sie ihre Wirkung als Filter für Schadstoffe. Erhöhte Stickstoffwerte können auch (indirekt) klimawirksam sein, weil N bei der Oxidation des Methans eine Rolle spielt [MOHR et al., 2005]. Da die Mehrzahl der hessischen Wälder auf sauren und nährstoffarmen Böden stockt, haben die oben beschriebenen Wirkungen hier eine besonders große Bedeutung.

Abbildung 41 zeigt (mit den gleichen Einschränkungen, wie weiter oben beschrieben), dass die Belastung mit Stickstoffverbindungen vor 300 Jahren unter der des hier beschriebenen Untersuchungszeitraumes liegt. Vermutlich war sie auch damals schon leicht überhöht, weil Zugtiere ihre Fäkalien auf den Straßen fallen ließen, diese bei Trockenheit von nachfolgenden Fahrzeugen zu Staub zertreten/zerfahren und vom Wind verweht wurden. Das Diagramm zeigt für unseren Untersuchungszeitraum jedoch eine deutlich höhere Belastung (was sich wiederum in der höheren Anzahl von Eutrophierungszeigern unter den Flechten ausdrückt): Von den 24 epiphytischen Arten, die Dillenius 1720 aus dem Gießener Raum beschreibt, gelten lediglich vier als Eutropierungszeiger (17%) – 2015 gehören dagegen 22 % zu dieser Gruppe.



**Abb. 41:** Entwicklung der mittleren Nährstoffzahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015) (es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

## Zusammenfassung:

Unsere Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die pH-Wertmessungen von Baumrinden und die Resultate der Flechtenerhebungen über einen Zeitraum von 45 Jahren belegen die Verbesserung der lufthygienischen Situation in den beiden mittelhessischen Städten Wetzlar und Gießen; sie dürften repräsentativ für weite Teile des Bundeslandes Hessen (und darüber hinaus) sein.

Die Verminderung der Immissionen – v.a. im Bereich des Schwefeldioxids – wirkt sich positiv auf die Existenzmöglichkeiten der Flechten aus. Gleiches ist für die Gefährdungsrisiken bei Pflanzen, Tieren und Menschen zu erwarten; Flechten fungieren hier als Frühwarnsysteme [CISLAGHI & NIMIS, 1997]. Wie aus einem Vergleich mit der Flechtenvegetation aus vorindustrieller Zeit hervorgeht, wirken die Versauerung und weitere Luftfremdstoffe aber noch immer nach bzw. sind noch nicht vollständig beseitigt.

Der Reduzierung der „sauren“ Schadgase steht allerdings eine Erhöhung eutrophierend wirkender Luftschadstoffe gegenüber, die über dem Level von vor 300 Jahren liegt. Im Vergleich zu stark landwirtschaftlich orientierten Gebieten („Gülleürtel“ in Nordwestdeutschland und den Niederlanden) sind die Verhältnisse in Hessen jedoch noch nicht besorgniserregend: Hessischen Konzentrationen von maximal  $6 \mu\text{gNH}_3/\text{m}^3$  stehen in Teilen der Niederlande doppelt so hohe Werte gegenüber [VAN HERK, 2009] und auch in England wurden z. T. wesentlich höhere Ammoniakkonzentrationen gemessen [WOLSELEY et al., 2006]. Die Ausbreitung nitrophiler Arten ist dort folgerichtig wesentlich gravierender.

Dennoch sollte dem Problem weiterhin Beachtung geschenkt werden, um negative Auswirkungen auf schützenswerte Ökosysteme zu vermeiden.

Eine Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse in Mittelhessen ist möglich, wie Vergleiche mit weit zurückliegenden Flechtenkartierungen aufzeigen: DILLENIIUS beschreibt vor knapp 300 Jahren aus der Umgebung von Gießen Arten, die bis heute nicht zurückgekehrt sind (u.a. Vertreter der extrem immissionsempfindlichen Gattungen *Anaptychia*, *Lobaria* und *Sticta* (siehe Abbildungen 42, 43, 44) [DILLENIIUS, 1719]).



**Abb. 42:** ca. 300 Jahre altes Exemplar von *Anaptychia ciliaris* (Gefranste Wimpernflechte) aus dem Gießer Raum (Herbarmaterial der fotografierten Flechten befindet sich in Oxford)

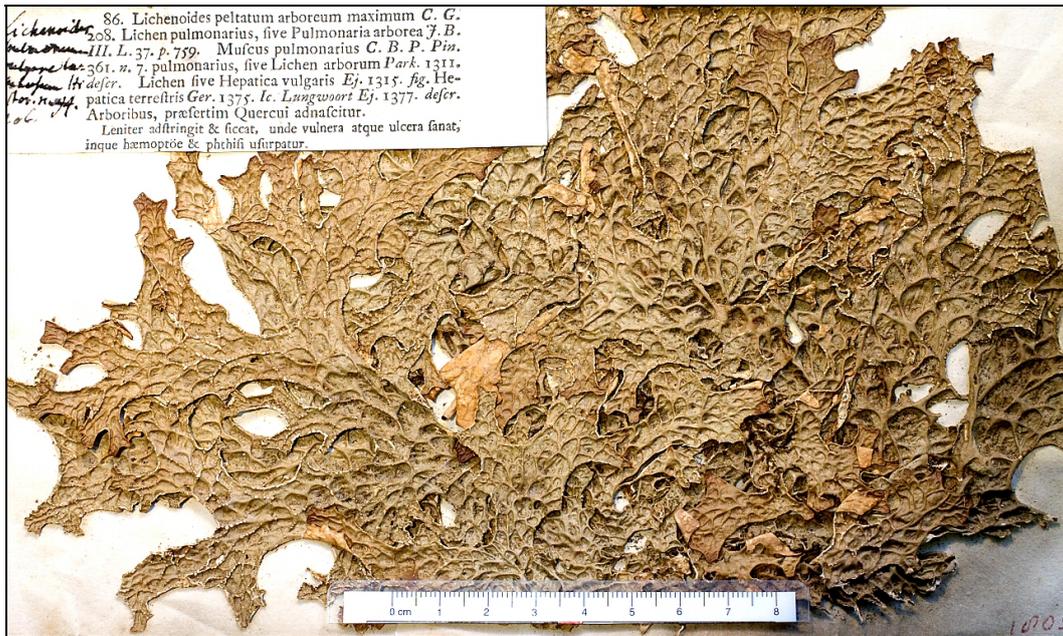


Abb. 43: ca. 300 Jahre altes Exemplar von *Lobaria pulmonaria* (Lungenflechte) aus dem Gießener Raum



Abb. 44: ca. 300 Jahre altes Exemplar von *Sticta sylvatica* (Wald-Grübchenflechte); Gießener Raum

ROCHLEDER & HELD berichten Mitte des 19. Jahrhunderts von „in den Wäldern der Umgebung von Gießen gesammelten Arten wie z.B. *Evernia prunastri*, *Usnea barbata*, *Ramalina fraxinea*, *Ramalina fastigiata*, *Pseudevernia furfuracea* und *Xanthoria parietina*, die dort in großer Menge die Stämme der Eichen, Birken, Fichten und Föhren überziehen“ [ROCHLEDER & HELD, 1843]. Von diesen, ebenfalls

z.T. sehr empfindlichen, Arten sind bisher lediglich *Evernia prunastri* und *Xanthoria parietina* zurückgekommen; den übrigen sagen offenbar die Umweltbedingungen in Mittelhessen z.Z. noch nicht zu. Derartige Beschreibungen aus der Zeit von vor ca. 150 Jahren lassen sich fast beliebig erweitern [siehe z.B. THEOBALD, 1858; BAUER, 1859; ZU SOLMS-LAUBACH, 1863; ULOTH, 1865; LORCH, 1896]. Immerhin wurde in Wetzlar bei der aktuellen Kartierung an einem der Dauerbeobachtungsbäume die seit 300 Jahren verschwundene *Anaptychia ciliaris* wiederentdeckt – wenn auch noch außerhalb des Aufnahmegeräts (Abb. 45). Dieser Fund belegt, dass weitere Anstrengungen zur Verbesserung der Luftgüte sinnvoll und erfolgversprechend sind ... die immissionsempfindlichen Flechten reagieren darauf.



Abb. 45: *Anaptychia ciliaris* (Gefranste Wimpernflechte) aus Wetzlar (2015)

Beobachtungen des zeitlichen Verlaufes der Flechtenentwicklung lassen über den gesamten Untersuchungszeitraum von 45 Jahren einen Anstieg der Artenzahlen und deren Häufigkeit erkennen – eine Stabilisierung des Artenspektrums ist bisher offenbar noch nicht eingetreten. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Wiederholungskartierungen in anderen Teilen Deutschlands [z.B. DE BRUYN et al., 2009; HEEMANN & STETZKA, 2010]. Es macht Sinn, diese – aus lufthygienischer Sicht – erfreuliche Entwicklung so lange weiter zu verfolgen, bis die Flechtenbiozöosen ihren vorindustriellen Reichtum wiedererlangt haben.

Besondere Aufmerksamkeit sollte der weiteren Entwicklung der luftgetragenen Stickstoffverbindungen geschenkt werden: Auf Grund der weiter wachsenden Weltbevölkerung (und der damit verbundenen Erhöhung der Nahrungsmittelproduktion) ist eine Verringerung der Stickstoffemissionen nicht zu erwarten, weil man hier – im Gegensatz zum  $\text{SO}_2$  – bisher nicht mit technischen Mitteln (z.B. Filter, Rauchgaswäsche) entgegen wirken kann [HAUCK, 2010].

Wirken sich geringe N-Gaben zunächst positiv auf Ökosystem aus, so sinkt die Diversität der Arten bei überhöhtem Angebot. Dieses Phänomen ist auch in Flechtengesellschaften zu beobachten [WOLSELEY et al., 2006]. Während bei den Höheren Pflanzen Schutzmechanismen (z.B. Cuticula) und ihre Ionenaufnahme über den (puffernden) Boden eine verzögerte und eher indirekte Reaktion auf Veränderungen in der Luftzusammensetzung erwarten lassen, ist die Antwort der wechselfeuchten, ganzjährig stoffwechselaktiven, Flechten viel unmittelbarer und eindeutiger; auch deshalb, weil diese Organismen ihre Nährstoffe ausschließlich über die Luft aufnehmen.

## 4.6 Flechten als Anzeiger des Klimawandels

Als Mitte des letzten Jahrhunderts – auf dem Höhepunkt des Flechtensterbens – verstärkt Flechtenkartierungen in Städten unter dem Aspekt der Immissionsbelastung durchgeführt wurden, kam es zu einem erbitterten wissenschaftlichen Streit, ob Luftverunreinigungen oder das Stadtklima für den Rückgang der Flechten verantwortlich seien. Unterstützt von KLEMENT [1956, 1958] und STEINER und SCHULZE-HORN [1955], die in Bonn Beziehungen zwischen Flechtenzonierungen und klimatischen Isolinien aufgezeigt hatten und als Verfechter der „Wüstentheorie“ galten, stellte RYDZAK auf dem Höhepunkt der Auseinandersetzungen die „Immissionstheorie“ als „ein Beispiel für eine kollektive wissenschaftliche Illusion“ dar [RYDZAK, 1959, S. 287]. Der Streit wurde damals zugunsten der Vertreter der Immissionstheorie entschieden, weil diese nachweisen konnten, dass es in der Umgebung isolierter Emittenten (ohne den mikroklimatischen Einfluss einer Stadt) ebenfalls zu einer totalen Schädigung der Flechtenvegetation kam. Außerdem war in der Zeit hoher Schwefeldioxidbelastung zu erkennen, dass in den (wärmeren und trockeneren) Städten keinesfalls die feuchtigkeitsbedürftigen Arten durch wärmeliebende und Trockenheit ertragende ersetzt wurden ... es gab praktisch – außer ganz wenigen toxitoleranten – überhaupt keine epiphytischen Flechten mehr. BARKMAN versöhnte [1958] die widerstreitenden Hypothesen, indem er postulierte, dass in Städten beide Faktoren gemeinsam wirken, in der offenen Landschaft hingegen die Luftverunreinigungen die ausschlaggebenden Ursachen seien. Heute gilt als gesichert, dass Flechten auf beide Faktoren reagieren. Es wird in Fachkreisen nicht mehr daran gezweifelt, dass sich der Klimawandel auf die Entwicklung und die Zusammensetzung der Flechtenvegetation auswirkt [siehe z.B. APTROOT & VAN HERK, 2007].

Verfolgt man die Veränderung der epiphytischen Flechtenvegetation über lange Zeiträume, so lässt sich erkennen, dass – neben dem Rückgang der Acidophyten (bevorzugen saure Substrate) und der gleichzeitigen Zunahme der Nitrophyten (bevorzugen nährstoffreiche Substrate) noch weitere Veränderungen in der Artenzusammensetzung stattfinden: Während Flechten, die an kühle Umweltbedingungen angepasst sind, zurückgehen (oder zumindest nicht zunehmen), treten in letzter Zeit verstärkt solche Arten in Erscheinung, die aus dem atlantisch geprägten Süd- und Westeuropa stammen. Als Wärmezeiger wurden hier Arten aufgenommen, die in der entsprechenden VDI-Richtlinie [VDI 3957, 20, 2016] als solche ausgewiesen wurden, bzw. Arten, die Temperaturzeigerwerte zwischen 7 bis 9 besitzen [WIRTH, 2010]. Ihre Anwesenheit weist auf ein insgesamt ausgeglicheneres Klima mit milden Wintern und dadurch erhöhten Jahresmitteltemperaturen und erhöhter Feuchtigkeit hin.

Diese Einwanderungstendenz war bei den Gesteinsflechten Hessens bereits bei einer früheren Untersuchung zu erkennen, wobei eine deutliche Beziehung zwischen gemessenen Temperaturen und dem Vorkommen wärmeliebender Flechten nachzuweisen waren [CEZANNE et al., 2008; KIRSCHBAUM & HANEWALD, 2009]. In den Niederlanden und in Nordwestdeutschland war ein solcher Wandel ebenfalls vor einigen Jahren auch bei den Rindenbewohnern (Epiphyten) ausgemacht worden [VAN HERK, 2009; DE BRUYN et al., 2009]; jetzt wird er auch in Mittelhessen immer deutlicher (siehe Abb. 46): Fand sich an den 1970, 1980 und 1985 untersuchten Bäumen noch kein einziger Wärmezeiger, so konnten 1995 erstmals zwei derartige Species nachgewiesen werden (*Punctelia jeckeri*/*P. subrudecta*).

2005 waren es bereits fünf Arten, die den Wärmezeigern zuzuordnen sind. Im Untersuchungsjahr 2010 – also innerhalb von nur 5 Jahren – hat sich ihre Anzahl auf 13 erhöht; 2015 ist ein weiterer Wärmezeiger hinzu gekommen. Darüber hinaus nimmt die Häufigkeit (Frequenz) der meisten Klimawandelzeiger im Verlauf des Untersuchungszeitraumes zu (siehe z.B. die schon seit Längerem vorhandenen *Punctelia jeckeri*/*Punctelia subrudecta*). Zu ähnlichen Resultaten kamen Untersuchungen in NRW, die ab 1995 eine Einwanderung wärmeliebender Flechtenarten konstatierten [STAPPER et al., 2011].

Die Anzahl bisher gefundener Wärmezeiger im Untersuchungsgebiet Gießen/Wetzlar erscheint zunächst relativ gering. Es sollte jedoch nicht übersehen werden, dass unsere Erhebung sich auf das kleine Aufnahmegitter der „Immissionsrichtlinie“ beschränkte (50 x 20 cm). Bei Untersuchungen in Bayern hat sich gezeigt, dass die Anzahl von Klimawandelzeigern an Bäumen, die nach der Klimarichtlinie ausgewählt waren, deutlich über jenen lag, die mit dem kleinen Aufnahmegitter gefunden werden konnten [WINDISCH & VORBECK, 2012]. (Nach der Klimarichtlinie wird der gesamte Stammumfang der Untersuchungsbäume von 50-200 cm untersucht).

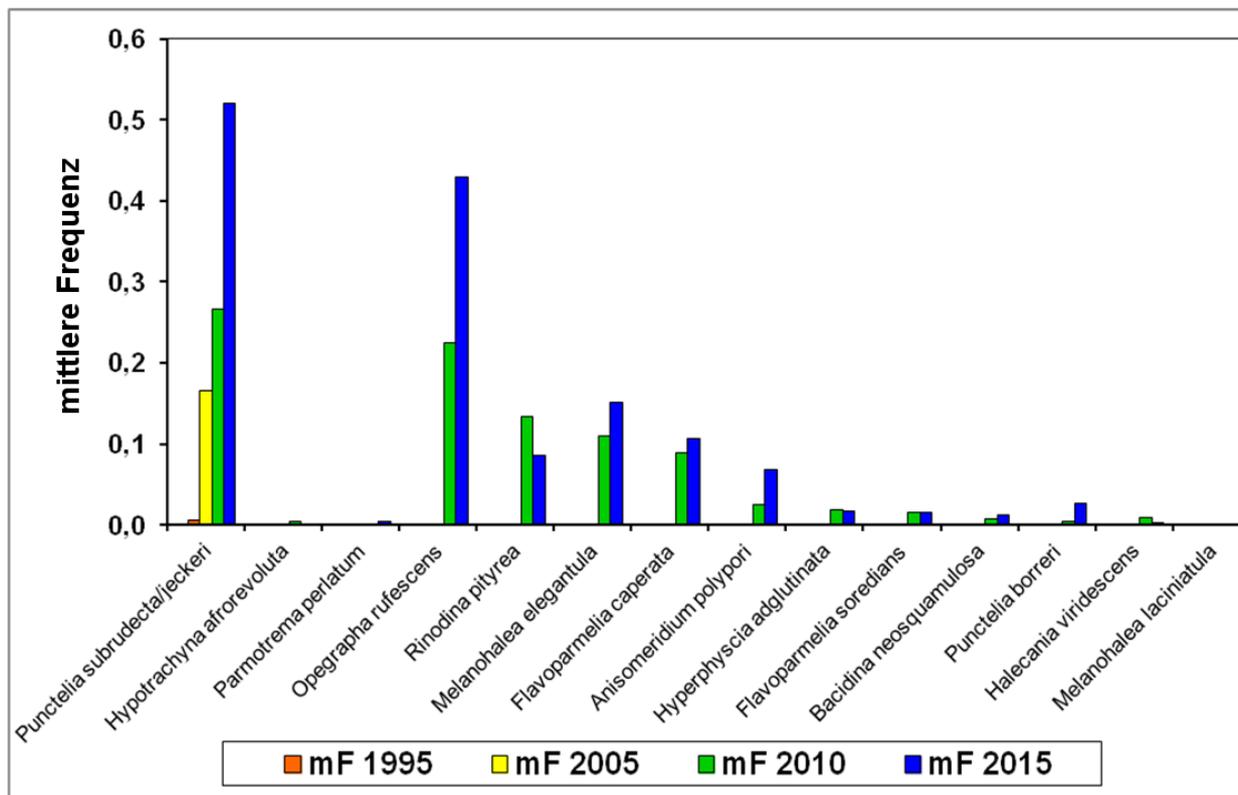


Abb. 46: Einwanderung wärmeanzeigender Flechtenarten in Gießen/Wetzlar (1995 – 2015)

Auch die Berechnungen der mittleren Zeigerwerte für Temperatur und Feuchte zeigen, dass die Flechten auf die veränderten klimatischen Verhältnisse reagieren: Der mittlere Zeigerwert für Temperatur hat sich innerhalb von 30 Jahren um eine halbe Einheit erhöht (Abb. 47).

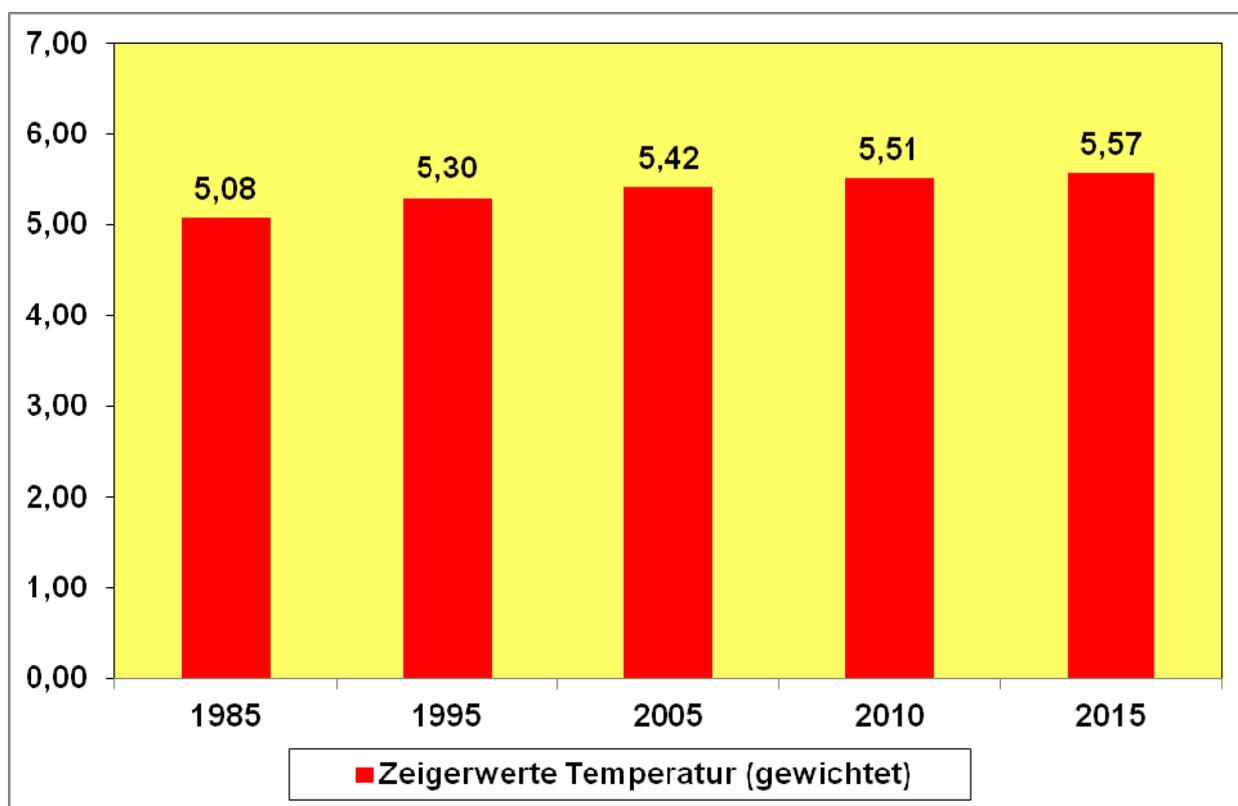


Abb. 47: Entwicklung der mittleren Temperaturzahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015) (es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Verfolgt man die Temperaturzeigerwerte über die letzten 300 Jahre, so ist der Trend ebenfalls eindeutig (Abb. 48): Bleiben die Werte zwischen 1720 und 2000 annähernd konstant, so ist danach ein Anstieg festzustellen.

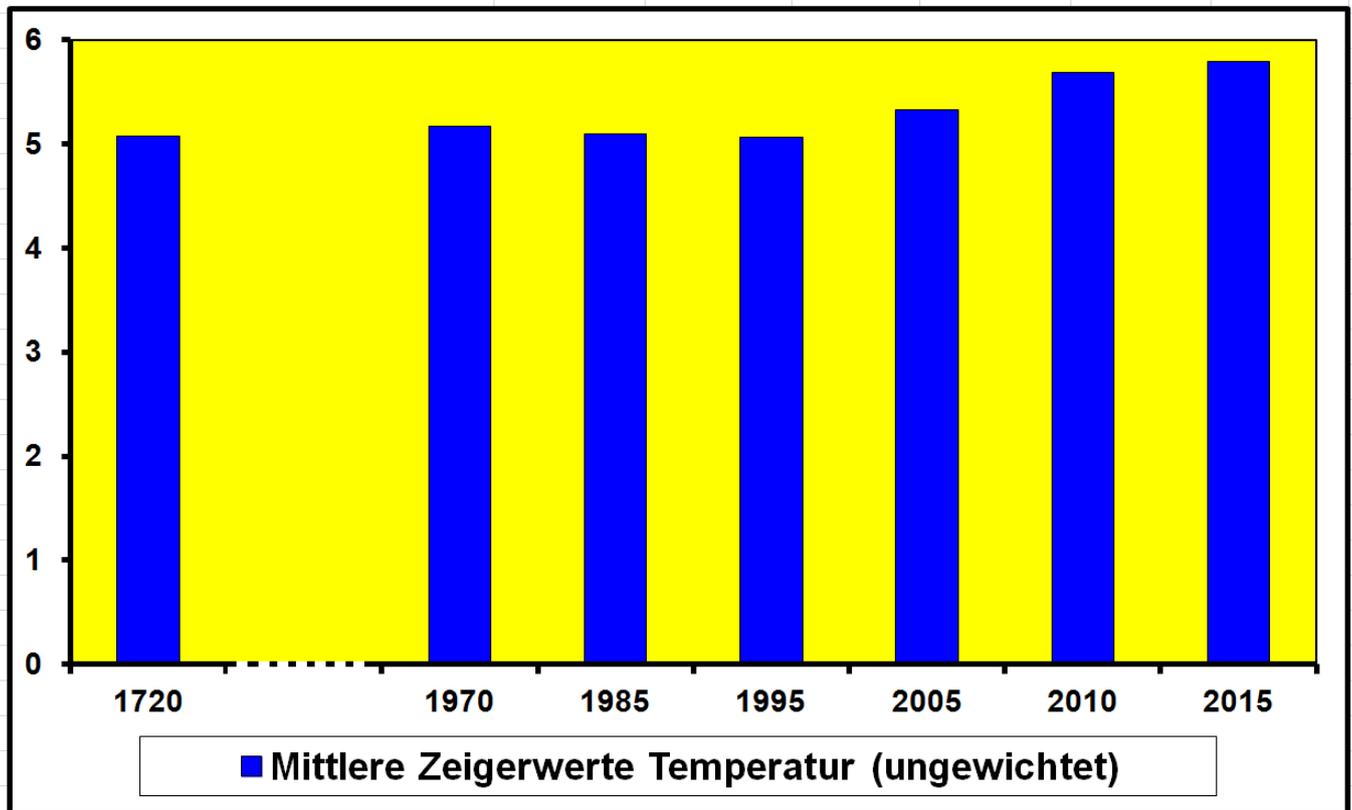


Abb. 48: Entwicklung der mittleren Temperaturzahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015)  
(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Wie aus den Abbildungen 49/50 zu ersehen ist, nimmt die Anzahl der Messflächen mit Wärmezeigern (Klimawandelzeiger) seit 1995 kontinuierlich zu. Gleichzeitig steigert sich auch ihre Häufigkeit innerhalb der bewachsenen Flächen – wenn auch auf insgesamt noch niedrigem Niveau. Letzterer Tatbestand ist nicht erstaunlich: Schließlich sind sie erst im vorigen Jahrzehnt in nennenswerter Artenzahl in Wetzlar und Gießen angekommen. Beim bekanntermaßen langsamen Wachstum von Flechten dauert es einige Jahre bis sie im Messgitter am Baum größere Flächen einzunehmen vermögen.

Wegen ihres erst kürzlichen Eintreffens lässt sich auch die eigentlich zu erwartende Häufung von Wärmezeigern in den Innenstädten noch nicht deutlich erkennen. Da es sich bei Wetzlar und Gießen um Mittelstädte handelt, ist die Ausbildung eines ausgeprägten Stadtklimas ohnehin weniger zu erwarten als in Großstädten, wie Frankfurt und Wiesbaden. In Gießen ist eine derartige Tendenz 2015 allerdings zu erahnen (Abb. 50): Im Kernbereich finden sich in allen Messflächen Wärmezeiger und auch ihre Häufigkeit (Diversität) ist dort am höchsten. In einer Bachelorarbeit, die sich mit der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung der Klimawandelzeiger aus der Gattung *Punctelia* (*P. borrieri*, *P. jeckeri*, *P. subrudecta*) in Gießen befasst, werden ganz ähnliche Resultate wiedergegeben [BECKER, 2014]. BECKER konnte 2014 im Stadtgebiet sogar erstmals *Punctelia borrieri* nachweisen, Es ist dies jene Art in der Gattung, die sowohl hinsichtlich ihrer Temperatur- als auch hinsichtlich ihrer Feuchtigkeitsansprüche über denen, der beiden anderen Gattungsvertreter liegt – sie ist also ein besonders deutlicher Klimawandelzeiger. (Der Baum, an dem sie gefunden wurde, ist zwar einer, der auch bei unserer Untersuchung kartiert wurde – sie fand sich jedoch außerhalb des Untersuchungsgitters).

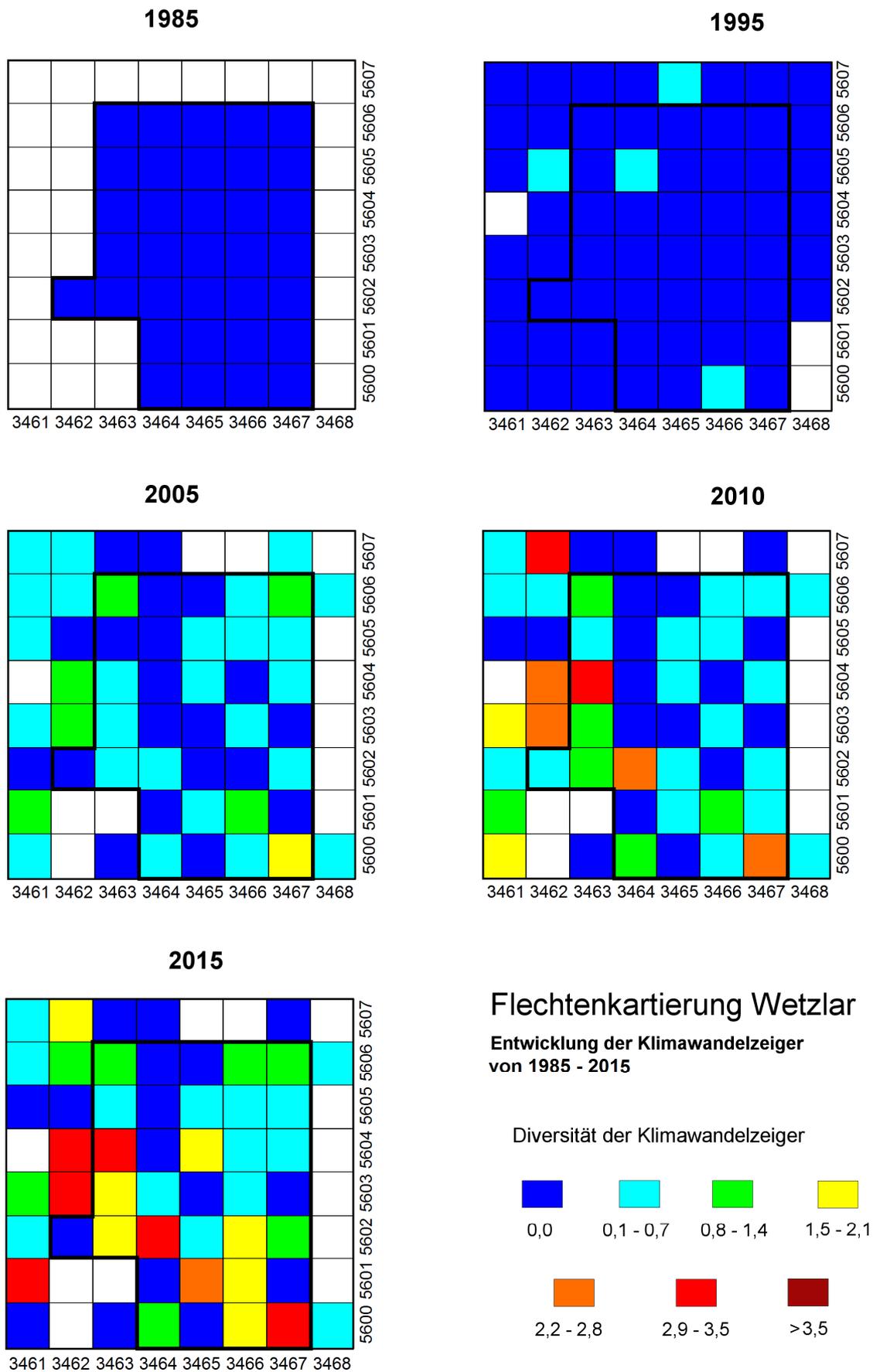


Abb. 49: Entwicklung der Klimawandelzeiger in Wetzlar zwischen 1985 und 2015

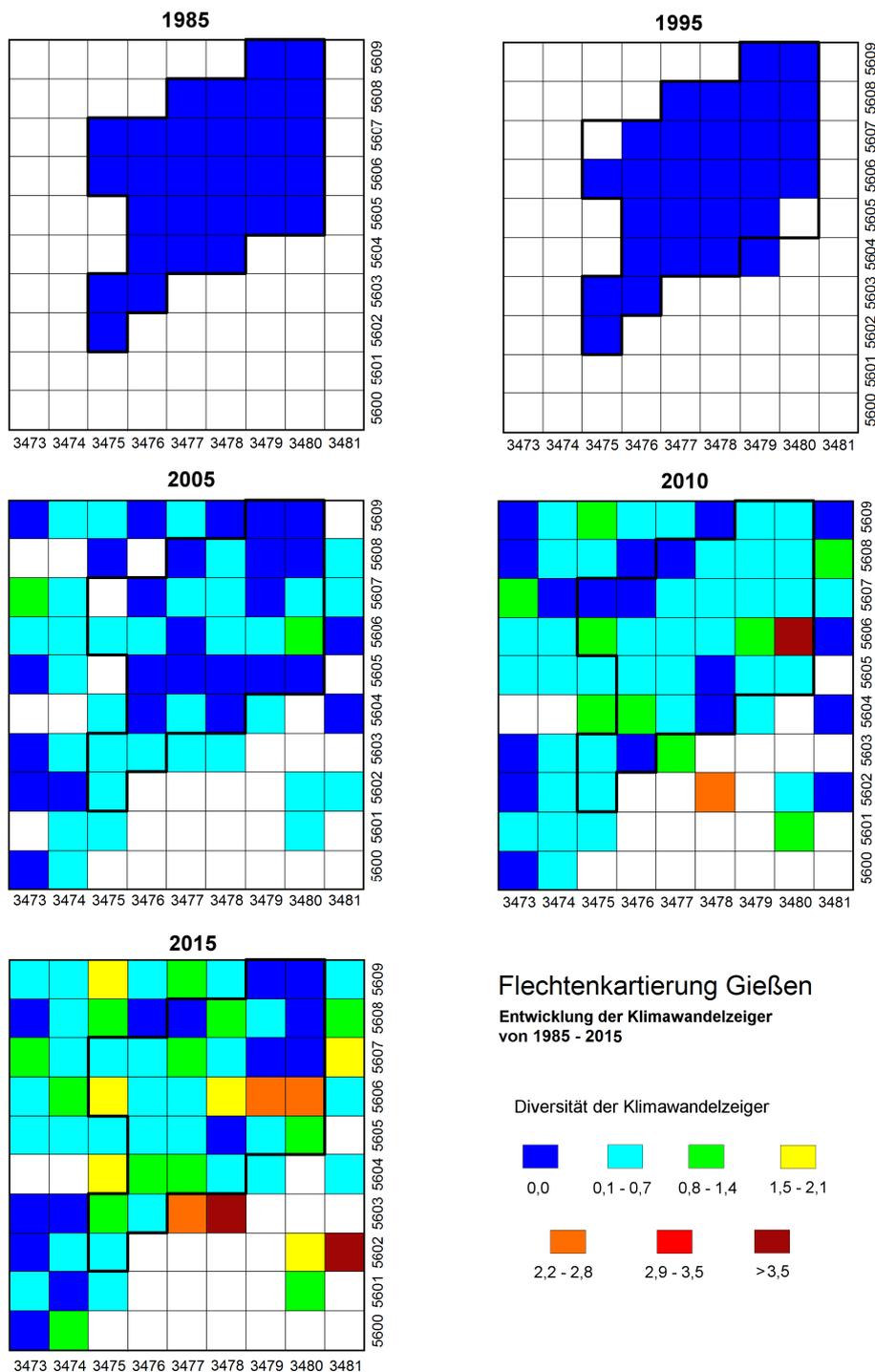


Abb. 50: Entwicklung der Klimawandelzeiger in Gießen zwischen 1985 und 2015

2014 wurde für die Stadt Gießen eine Klimafunktionskarte erstellt [GEONET, 2014]. Die darüber gelegte Darstellung der Häufigkeit der Klimawandelzeiger der aktuellen Flechtenkartierung offenbart die ange deutete Tendenz noch klarer (Abb. 51): Fundorte ohne Wärmezeiger beschränken sich auf Bereiche außerhalb des bebauten Stadtgebietes. Lediglich in den Kaltluftschneisen im NO (Wieseckau) und im SO (Klingelbach) ziehen sie sich in die Stadt hinein. Warum sich die Fundorte mit hohem Wärmezeigeranteil im SO und O finden, müssen Folgeuntersuchungen erklären. Erst wenn die Klimawandelzeiger sich endgültig etabliert haben und sich fortpflanzen, ist zu erwarten, dass sie sich noch „klimaanzeigender“ verhalten. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es noch weitgehend dem Zufall überlassen, wohin eine der seltenen Fortpflanzungseinheiten (Diasporen) mit dem Wind verdriftet wird und ob sie einen der von uns untersuchen Bäume trifft oder nicht.

# Flechtenkartierung Gießen 2015

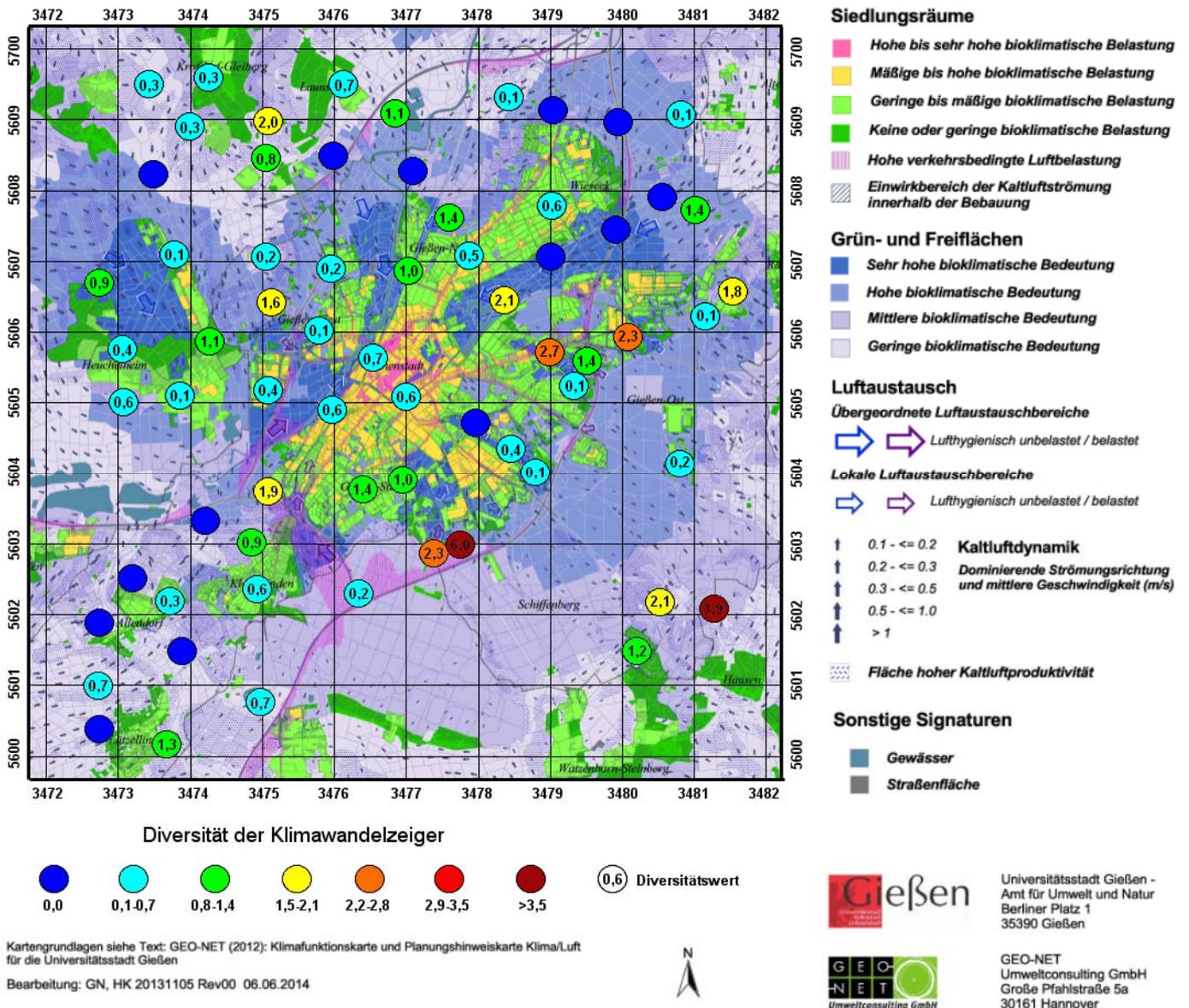
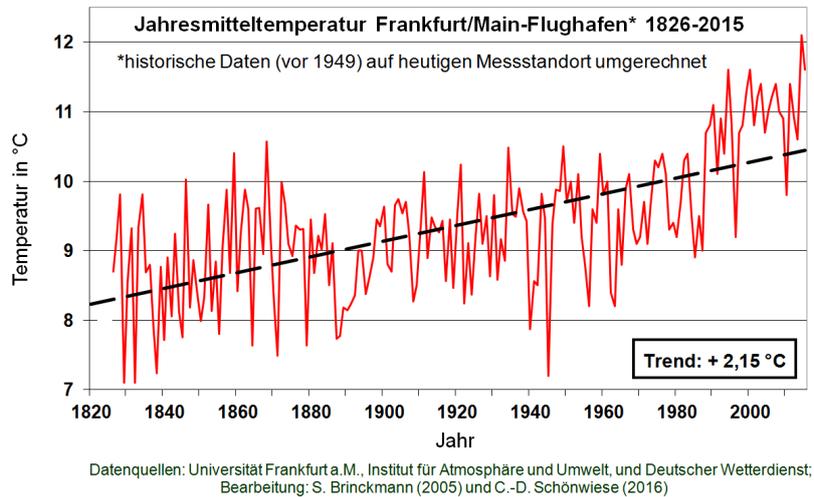


Abb. 51: Räumliche Verteilung der Klimawandelzeiger in Gießen (2015)  
 (KLIMAFUNKTIONS- UND PLANUNGSHINWEISKARTE KLIMA/LUFT der UNIVERSITÄTSSTADT GIEßEN, GEONET, 2014)

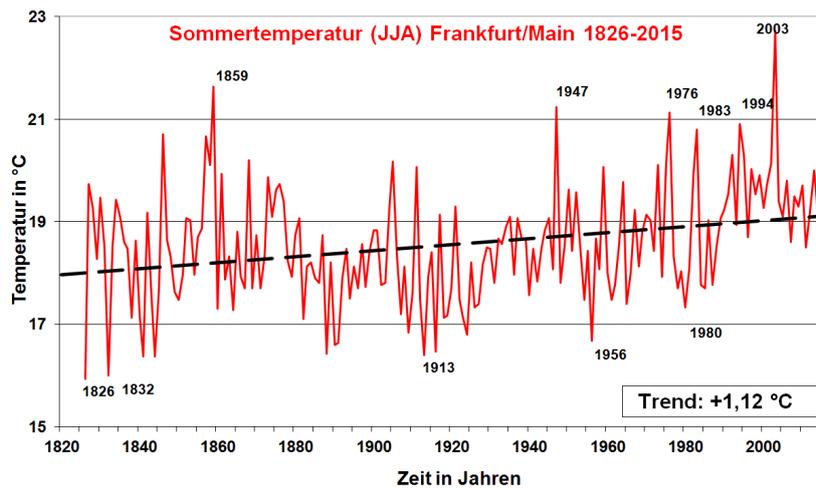
Die Zunahme der Klimawandelzeiger in beiden Städten steht im Einklang mit dem Anstieg der Temperaturen (siehe Abb. 52). Zwischen 1820 und 2015 ist ein deutlicher Anstieg der Jahresmittelwerte um mehr als 2 °C zu verzeichnen; während des Untersuchungszeitraumes von 1970 – 2015 ist die Jahresmitteltemperatur am Frankfurter Flughafen um ein halbes Grad angestiegen. Diese Tendenz dürfte für die beiden hier untersuchten mittelhessischen Städte ebenfalls Gültigkeit besitzen.

Die Erhöhung erscheint gering, führt aber zu signifikanten Veränderungen in der Vegetationsperiode von Wild- und Nutzpflanzen: In Hessen hat sich die winterliche Vegetationsruhe in letzter Zeit um ca. 8 Tage verkürzt, der Beginn der Vegetationszeit hat sich im Mittel um 15 Tage nach vorn verschoben [STREITFERT & GRÜNHAGE, 2010]. Die Folgen dieses Klimawechsels auf die Vegetation und Tierwelt sind nicht vollständig absehbar. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die im zeitigen Frühjahr gehäuft auftretenden Spätfröste zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden führen können. Des Weiteren ist absehbar, dass bei uns bisher unbekannte Schädlinge (v.a. Insekten) einwandern und Wachstum oder Erträge in der Land- und Forstwirtschaft gefährden. Auch der Mensch kann durch einwandernde Krankheitserreger, die auf ein wärmeres Klima angewiesen sind, gefährdet werden [GEBHARDT et al., 2010].

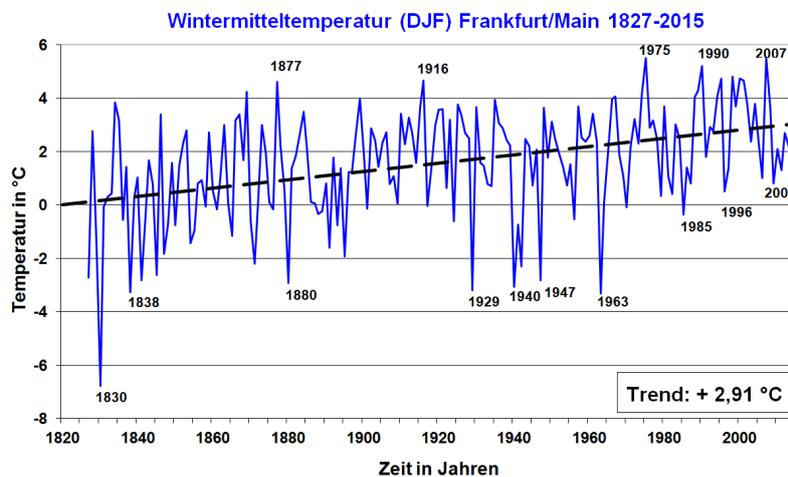


**Abb. 52:** Langfristige Temperaturentwicklung am Flughafen Frankfurt/M. [pers. Mitt. Prof. Schönwiese]

Wie aus den Abb. 53 und 54 zu ersehen ist, macht sich der Klimawandel insbesondere durch mildere Winter bemerkbar. Dieser Umstand fördert die atlantischen, stärker ozeanisch geprägten, Flechtenarten in besonderem Maße: Nach der Liebig'schen Minimum-Regel begrenzt der im Minimum vorhandene Faktor das Wachstum. Wenn neuerdings die Frostperioden im Durchschnitt kürzer und weniger scharf ausfallen, haben auch Arten aus Südwesteuropa oder dem makaronesischen Klimabereich eine Chance, bei uns zu überleben.

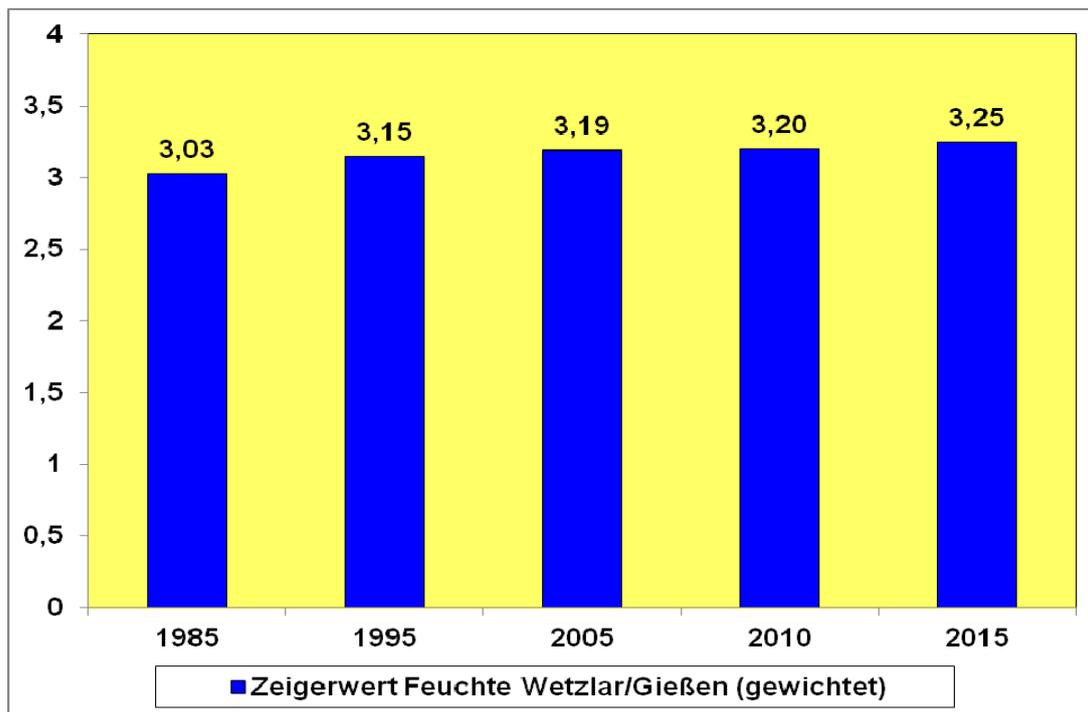


**Abb. 53:** Temperaturentwicklung (Sommerhalbjahr) in Frankfurt/M. [SCHÖNWIESE & et al., 2006]



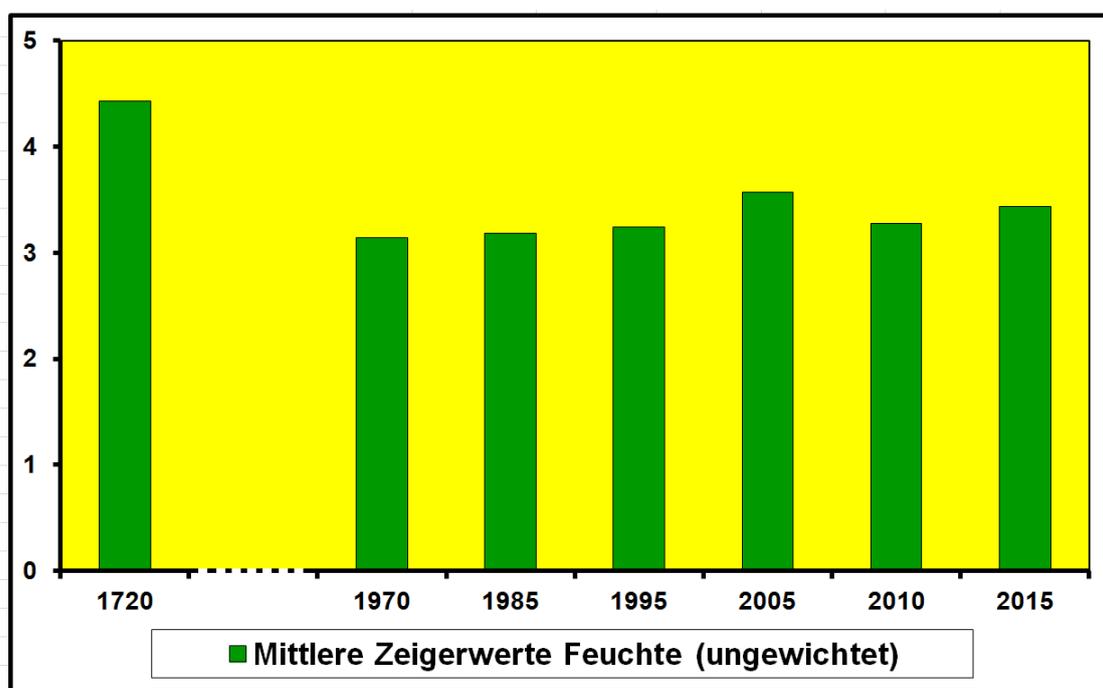
**Abb. 55:** Temperaturentwicklung (Winterhalbjahr) in Frankfurt/M. [SCHÖNWIESE & et al., 2006]

Weiterhin ist festzustellen, dass die Niederschläge in Hessen in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben – wiederum verstärkt im Winter [SCHÖNWIESE et al., 2006]. Auch dieser Trend spiegelt sich in den mittleren Zeigerwerten der Flechten wieder. Abb. 55 lässt einen (wenn auch nur leichten) Anstieg der Zeigerwerte für die Feuchte erkennen.



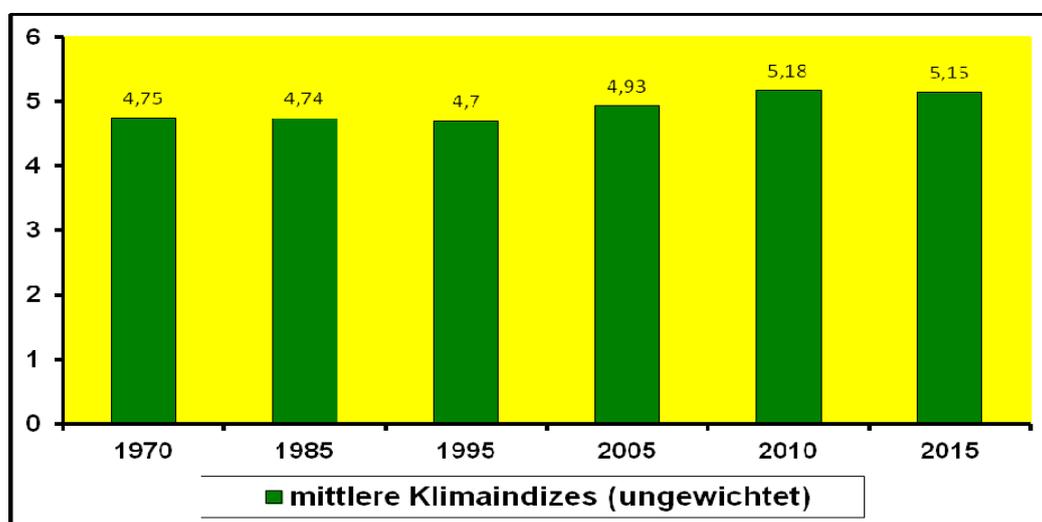
**Abb. 55:** Entwicklung der mittleren Feuchtezahlen in Wetzlar und Gießen (1985 – 2015)  
(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Aus Abb. 56 geht hervor, dass vor 300 Jahren der Niederschlag bzw. die Luftfeuchtigkeit über jener des Untersuchungszeitraumes gelegen haben muss. Ob dies eine Folge erhöhter Niederschlagstätigkeit oder höherer Luftfeuchte (wegen niedrigerer Temperaturen) war, lässt sich aus den Flechtendaten nicht erklären.



**Abb. 56:** Entwicklung der mittleren Feuchtezahlen im Bereich Gießen (1720 – 2015)  
(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

KIRSCHBAUM & WIRTH [2010] haben zur Bewertung des Klimawandels einen zusätzlichen Index, den Klimaindex „KI“ eingeführt. Er ist ein Kombinationswert aus der Temperatur- und der Ozeanitätszahl (letztere ist komplementär zum Kontinentalitätswert) und integriert somit die ökologischen Aussagen von Temperatur und Ozeanität. Die Klimawerte einer Messfläche werden gemittelt und daraus ein Klimaindex (KI) errechnet. Da die Wärmezeiger zurzeit noch relativ selten und auch mit geringer Frequenz an den Bäumen vorkommen, wurde bei der Berechnung des KI auf eine Wichtung der gefundenen Flechten – entsprechend der Häufigkeit ihres Vorkommens – verzichtet. (Wegen ihrer geringen Häufigkeit würden ihre Werte durch die hohe Frequenz der „Allerweltsarten“ in einem gewichteten Index nicht zur Geltung kommen). Außerdem konnte auf diese Weise auch ein Index für 1970 berechnet werden, was beim gewichteten aus methodischen Gründen nicht möglich gewesen wäre. Wie aus Abb. 57 zu ersehen ist, nimmt auch der Klima-Index über den fünfundvierzigjährigen Untersuchungszeitraum zu. Hieraus lässt sich eine Tendenz zu einem insgesamt „atlantischeren“ Klima mit ausgeglicheneren Durchschnittstemperaturen und Niederschlägen ablesen. Bemerkenswert ist, dass der Anstieg im Wesentlichen nicht durch solche Arten hervorgerufen wird, die gleichzeitig Wärme- als auch Eutrophierungszeiger sind; es handelt sich also offenbar hierbei nicht um einen Synergieeffekt zwischen Erhöhung der luftgetragenen Stickstoffverbindungen und dem Klimawandel, wie das von manchen Autoren angedacht wurde [VAN HERK et al. 2002, JOHN, 2007].



**Abb. 57:** Entwicklung des Klimaindexes in Gießen/Wetzlar (1970 – 2015)  
(es gingen nur solche Messflächen in die Berechnung ein, die durchgängig beprobt wurden)

Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass die oben geschilderten Ergebnisse lediglich aus dem kleinen Aufnahmegeritter der immissionsbezogenen Flechtenkartierung nach VDI 3957, 13 stammen. Würde man den gesamten Stammbereich bis in 2 m Höhe untersuchen und die Erhebungen auch auf andere (und nicht standardisierte) Bäume ausweiten – wie es die Klimarichtlinie [VDI 3957, 20, 2016] vorsieht – so würden die hier aufgezeigten Trends noch wesentlich deutlicher ausfallen. Dies geht aus unseren Beobachtungen vor Ort eindeutig hervor (siehe z.B. das Auffinden von *Anaptychia ciliaris* an einem Untersuchungsbaum in Wetzlar – allerdings außerhalb des Aufnahmegeritters (Abb. 45)).

#### Zusammenfassung:

Von den Flechten werden beide Klimatrends (höhere Temperaturen und Niederschläge) erfasst: Im Gegensatz zu Höheren Pflanzen ist ihr Stoffwechsel nicht auf die Vegetationsperiode beschränkt. Wegen der im Winter höheren Luftfeuchtigkeit sind diese wechselfeuchten Organismen im Winterhalbjahr sogar besonders stoffwechselaktiv (zumal sie auch noch bei sehr niedrigen Temperaturen Photosynthese zu betreiben vermögen). Sie integrieren in ihre Reaktion auf den Klimawandel also nicht nur die Einflüsse der Vegetationsperiode (wie viele Höhere Pflanzen), sondern auch das im Hinblick auf die Fragestellung besonders bedeutsame Winterhalbjahr. Insofern sind sie besonders gut dazu geeignet, als Frühwarnsysteme für den oben beschriebenen Klimawandel zu fungieren.

## 5 Literaturverzeichnis

- Aptroot, A. & C.M. van Herk (2007): Further evidence of the effects of global warming on lichens, particularly those with Trentepohlia phycobionts. – *Environmental Pollution* **146**: 293-298.
- Asta, J., W. Erhardt, M. Ferretti, F. Fornasier, U. Kirschbaum, P. L. Nimis, O. W. Purvis, S. Pirintsos, C. Scheidegger, C. van Haluwyn & V. Wirth. (2002). Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality. – In: Nimis, P. L. et al. (eds.): *Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens*. NATO Science Series, IV, vol. 7. Kluwer, Dordrecht, 273 - 279.
- Barkman, J.J. (1958): *Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes*. – Assen (Holland): 628 S.
- Bauer, P.M. (1859): Übersicht der in dem Großherzogthum Hessen beobachteten Flechten. – *Berichte der Oberhess. Ges. Natur- & Heilkunde*, 13 - 26.
- Becker, P. (2014): Kartierung der klimawandelanzeigenden Flechtenarten der Gattung *Punctelia* und Darstellung der zeitlichen Entwicklung seit 1985 in Gießen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Mittelhessen, FB Life Science Engineering.
- Biecker, S. (1986): Flechtenkartierung im Raum Wetzlar. – Diplomarbeit, Universität Gießen.
- Cezanne, R., M. Eichler, U. Kirschbaum & U. Windisch (2008): Flechten als Anzeiger des Klimawandels. – *Sauteria* **15**: 159–174.
- Cislaghi, C., and P. L. Nimis (1997): Lichens, air pollution and lung cancer. – *Nature* **387**: 463 - 464.
- Dämmgen, U., J. Matschullat, F. Zimmermann, M. Strogies, L. Grünhage, B. Scheler & J. Conrad (2013): Emission reduction effects on bulk and wet-only deposition in Germany – evidence from long-term observations. – *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* **73**, (7/8): 330-339.
- De Bruyn, U. H.-W. Linders & K. Mohr (2009): Epiphytische Flechten im Wandel von Immissionen und Klima - Ergebnisse einer Vergleichskartierung 1989/2007 in Nordwestdeutschland. – *Umweltwiss. Schadst. Forsch* **21**:63–75
- Dillenius, J. J. (1719): *Catalogus plantarum sponte circa Gissam nascentium cum appendice*. – 240 & 174 S.; Frankfurt/M.
- EKL (2005): Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. – Statusbericht der eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, Ed.), Schriftenreihe Umwelt Nr. 384, Bern. 168 S.
- Franzen-Reuter, I. & Stapper, N.J. (2003): Nachweis eutrophierender Luftverunreinigungen in NRW - Landesweite Kartierung epiphytischer Flechten und Moose. – *LÖBF-Mitteilungen* **1/2003**: 76 - 78.
- Gebhardt, H., U. Rammert, W. Schröder & H. Wolf (2010): Klima-Biomonitoring: Nachweis des Klimawandels und dessen Folgen für die belebte Umwelt. – *Umweltwiss. Schadst. Forsch.* **22**: 7 - 19
- GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2014): Bericht zur Klimafunktionskarte und Planungshinweiskarte Klima/Luft für die Universitätsstadt Gießen. Analyse der klima- und immissionsökologischen Funktionen im Stadtgebiet von Gießen und deren planungsrelevante Inwertsetzung im Rahmen einer vorsorgeorientierten Umweltplanung. Hg. v. Stadt Gießen.
- Hansen, H. (1986): Flechtenkartierung im Raum Gießen. – Diplomarbeit, Universität Gießen.
- Hauck, M. (2010): Ammonium and nitrate tolerance in lichens. – *Environmental Pollut.* **158**: 1127 - 1133.
- Heemann, S. & K.M. Stetzka (2010): Die sauren Zeiten sind vorbei – Ergebnisse der immissionsbezogenen Flechtenkartierung Dresdens und Veränderungen der Flechtendiversität. – *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* **70** (4): 141 - 146.
- HLUG (1994): Bericht über Staubbiederschlagsmessungen im Land Hessen von 1985 - 1992. – Schriftenreihe der Hess. Landesanstalt für Umwelt: Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, H. 175, 249 S.
- HLNUG (2016): Immissions- und Klimadaten aus dem Fundus des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.  
<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/1702/pdf/ab146-2.pdf>, S. 136.
- John, V. (2007:) Stickstoff und Wärme-Synergieeffekte oder gegenseitige Verschleierung der Wirkung auf Flechten. *VDI-KRdL Schriftenreihe* **37**: 109 -118.
- Kirschbaum, U. (1969): Auswirkung stadteigener Faktoren auf die Verbreitung von Flechten und Algen im Raum Frankfurt. – Staatsexamensarbeit, Universität Gießen .

- Kirschbaum, U., A. Marx & J. E. Schieck (1996): Beurteilung der lufthygienischen Situation Gießens und Wetzlars mittels epiphytischer Flechten. – *Angew. Bot.* **70**: 78 - 96.
- Kirschbaum, U., U. Windisch, A. Vorbeck & K. Hanewald (2006): Mapping lichen diversity in Wetzlar and Giessen as indicator of air quality. (Comparison between the surveys of 1970, 1985, 1995 and 2005). – *Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft* **66** (6): 272 - 280.
- Kirschbaum, U. & K. Hanewald (2009): Flechten als Anzeiger der Luftgüte und des Klimawandels. – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden, 47 S.
- Kirschbaum, U. & V. Wirth (2010): Flechten erkennen – Umweltgüte bewerten. – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden, 204 S.
- Klement, O. (1956): Zur Flechtenflorula des Kölner Domes. – *Decheniana* **109**, 87-90.
- Klement, O. (1958): Die Flechtenvegetation der Stadt Hannover. – *Beiträge zur Naturkunde Niedersachsens*, **Jgg. 11**, 56-60.
- LFU (2004): Ammoniak und Ammonium. – Umweltberatung in Bayern. – Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.
- Lorch, W. (1896): Übersicht der bisher in der Umgebung von Marburg (Hessen) beobachteten Flechten. – *Jb. Naturw. Ver. Elberfeld* **8**: 1 - 24.
- Marx, A. (1996): Immissionsbezogene Flechtenkartierung im Raum Wetzlar. – Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Biologie zur ersten Staatsprüfung an Gymnasien. Universität Gießen.
- K. Mohr, H. Meesenburg, B. Horváth, K.J. Meiwes, S. Schaaf, U. Dämmgen (2005): Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkungen auf Waldökosysteme. – Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Förderkennzeichen (UFOPLAN) 200 88 213, 122 S.
- Naumann, C. (1969): Die Rindenepiphyten im Stadtgebiet von Gießen in ihrer Abhängigkeit von stadtbedingten Faktoren. – *Wiss. Hausarbeit für die Staatsprüfung für das Lehramt an Grund-, Haupt- und Realschulen*, Univ. Gießen.
- Naumann, C. (1970): Die Verbreitung von rindenbewohnenden Flechten und Algen im Raum Wetzlar und ihre Expositionsabhängigkeit. – *Wiss. Hausarbeit für die Staatsprüfung für das Lehramt an Grund-, Haupt- und Realschulen (Erweiterungsprüfung)*, Univ. Gießen.
- Rochleder, F. & W. Heldt (1843): Untersuchungen einiger Flechtenarten. – *Annalen der Chemie und Pharmacie* **XLVIII**: 1 - 18.
- Rydzak, J. (1959): Influence of small towns on the lichen Vegetation. VII. Discussion and general conclusions. In: *Ann. Univ. Marie-Curie Sklodowska* **13c**, 275-323.
- Sänger, K. (1972): Flechtenwachstum und pH-Wert von Baumrinden. – *Wiss. Hausarbeit für die Staatsprüfung für das Lehramt an Grund-, Haupt- und Realschulen (Erweiterungsprüfung)*, Univ. Gießen.
- Schieck, J. E. (1996): Immissionsbezogene Flechtenkartierung von Gießen, 1995. – *Diplomarbeit im Fachbereich KMUB, Fachhochschule Gießen*.
- Schönwiese, C.-D., T. Staeger, H. Steiner & S. Brinckmann (2006): Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901 bis 2003. – Abschlussbericht zum INKLIM-Forschungsvorhaben Nr. 2004.090353876-3 im Auftrag der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie (HLUG), Inst. für Atmosphäre und Umwelt der Univ. Frankfurt/Main.
- Stapper, N. J., I. Franzen-Reuter, J. P. Frahm (2005): Stickstoffgehalte in der Blattflechte *Parmelia sulcata* als Indikator atmosphärischer Stickstoffeinträge in einer Großstadt am Beispiel Düsseldorf. – *Immissionsschutz* **3** (05): 84 - 89.
- Stapper, N.J., I. Franzen-Reuter & J.P. Frahm (2011): Epiphytische Flechten als Wirkungsindikatoren für Klimaveränderungen im Raum Düsseldorf. – *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **4**: 173-178.
- Steiner, M & D. Schulze-Horn (1955): Über die Verbreitung und Expositionsabhängigkeit der Rindenepiphyten im Stadtgebiet von Bonn. – *Decheniana*, **108**: 1-16.
- Streitfert, A. & L. Grünhage (2010): Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. – *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* **70** (4): 129 - 134.
- Theobald, G. (1858): Die Flechten der Wetterau. – *Naturhistorische Abhandlungen aus dem Gebiete der Wetterau*. Hanau: 313 - 390.
- Uloth, W. (1865): Beiträge zur Kryptogamenflora der Wetterau. – *Berichte der oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde* **11**: 93 - 97.

- Van Dobben, H. F. (1996): Decline and recovery of epiphytic lichens in an agricultural area in The Netherlands (1900-1988). – *Nova Hedwigia* **62** (3-4): 477 - 485.
- Van Dobben, H. F. & A. J. De Bakker, (1996): Re-mapping epiphytic lichen biodiversity in the Netherlands: effects of decreasing SO<sub>2</sub> and increasing NH<sub>3</sub>. – *Acta Botanica Neerlandica* **45**, 55-71.
- Van Herk, C. M. (1999): Mapping of ammonia pollution with epiphytic lichens in the Netherlands. – *Lichenologist* **31**: 9 - 20.
- Epiphytes on wayside trees as an indicator of eutrophication in the Netherlands. – In: Nimis, P.L. et al. (eds.): *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*. NATO Science Series, IV, vol. 7. Kluwer, Dordrecht, pp. 285 - 289.
- Van Herk, C.M. (2009): Climate change and ammonia from cars as notable recent factors influencing epiphytic lichens in Zeeland, Netherlands. – *Bibliotheca Lichenologica* **99**: 205 - 244.
- Van Herk CM., A. Aptroot, HF. van Dobben (2002): Long-time monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. – *Lichenologist* **34**:141 - 154.
- VDI 3799, Blatt 1 (1995): Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten: Flechtenkartierung. – VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a, Beuth-Verlag, Berlin.
- VDI 3957 Blatt 13 (2005): Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation): Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für die Luftgüte. – Beuth-Verlag, Berlin.
- VDI-Richtlinie 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. – Beuth-Verlag, Berlin.
- Vorbeck, A. & U. Windisch (2001) : Flechtenkartierung München. Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. – Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). Materialien für Umwelt und Entwicklung 173. München, 174 S.
- Webb, J., Menzi, H., Pain, B. F., Misselbrook, T. H., Dämmgen, U., Hendriks, H. & Döhler, H. (2005) Managing ammonia emissions from livestock production in Europe. – *Environmental Pollution* **135**: 399 - 406.
- Weber, W. (1980): Flechten als Bioindikatoren zur Bewertung der lufthygienischen Situation der Stadt Lahn. – Diplomarbeit, Univ. Gießen.
- Windisch, U. & A. Vorbeck (2012): Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf biotische Systeme in Bayern mittels Flechtenkartierung. – Abschlussbericht des Bayer. Landesamtes für Umwelt, 89 S.
- Windisch, U., A. Pungin & T. Meckel (2016): Wirkungen von Verkehrsbelastungen auf die Flechtendiversität sowie den Stickstoff- und Chlorophyllgehalt von *Parmelia sulcata* in Hessen. – *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **76** (4): 128 - 135.
- Wilhelmi, D. (1972): Flechten als Indikatoren der Immissionsbelastung der Stadt Wetzlar. – Staatsexamensarbeit, Univ. Gießen.
- Wirth, V. (2010): Ökologische Zeigerwerte von Flechten – erweiterte und aktualisierte Fassung. – *Herzogia* **23** (2): 229 - 248.
- Wolseley, P.A., James, P.W., Theobald, M.R. & Sutton, M.A. (2006): Detecting changes in atmospheric lichen communities at sites affected by atmospheric ammonia from agricultural sources. – *Lichenologist* **38**: 161 - 176.
- Zu Solms-Laubach, R. (1863): Verzeichniß der von mir in der Gegend von Braunfels und Laubach gesammelten und bestimmten Lichenen. – *Ber. Oberhess. Ges. Natur- & Heilk.* **10**: 66 - 71.