

# **Immissionsbezogene Flechtenkartierungen am Frankfurter Flughafen (1992 - 2007)**

von Prof. Dr. Ulrich Kirschbaum und Prof. Dr. Ute Windisch  
FH Gießen/Friedberg, Fachbereich KMUB, Wiesenstr. 14, 35390 Gießen

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>1 ZUSAMMENFASSUNG</b>	2
<b>2 EINLEITUNG</b>	3
<b>3 METHODEN</b>	5
3.1 Das Messnetz	5
3.2 Baumartenauswahl	6
3.3 Erfassung der Flechten	7
3.4 Berechnung und Bewertung der Luftgüte-Indizes	9
<b>4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b>	10
<b>5 LITERATURVERZEICHNIS</b>	17

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Jahr 2007 wurde in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/M. eine immissionsbezogene Flechtenkartierung nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 [VDI, 2005] durchgeführt. Flechten sind seit langem als empfindliche Bioindikatoren bekannt. Sie ermöglichen eine Aussage über die lufthygienische Situation eines Untersuchungsgebietes [Rabe & Beckelmann, 1987; Cislaghi & Nimis, 1997].

Die Umgebung des Flughafens war bereits 1992 im Rahmen einer Gesamtkartierung des Bundeslandes Hessen einer Flechtenkartierung unterzogen worden.

Wenngleich die Methodik der beiden Untersuchungen sich unterschied, konnten die Ergebnisse dennoch miteinander verglichen werden, weil sich die Resultate von 1992 an die Vorgaben der neuen VDI-Flechtenkartierungsrichtlinie weitgehend anpassen ließen.

Die Ergebnisse lassen sich, wie folgt, zusammenfassen:

- Bei den Flechten zeigte sich 1992, zum Zeitpunkt der ersten Untersuchung, auf Grund hoher allgemeiner Immissionsbelastung in weiten Teilen Hessens eine völlige Verarmung der Flechtenvegetation.
- Mit zunehmender Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse innerhalb des Untersuchungszeitraumes – hervorgerufen durch verminderte Immissionen – stieg die Artenzahl der Flechten wieder an.
- Kamen zunächst nur toxtolerante Arten zurück, so ist inzwischen auch eine Rekolonisation durch empfindliche Spezies zu beobachten.
- Der Vergleich der Flechtenvegetation zwischen 1992 und 2007 zeigt darüber hinaus einen deutlichen Anstieg von Arten, die durch eutrophierende Luftschadstoffe begünstigt werden.
- Ein Einfluss des Flughafens auf die Flechten des Untersuchungsgebietes ist nicht nachweisbar.

**Schlagerworte:** Immissionsbelastung, biologische Messverfahren, VDI-Richtlinie, Flechten, Flughafen Frankfurt



## 2 EINLEITUNG

Kartierungen der immissionsempfindlichen Flechten unter standardisierten Bedingungen aus der Vergangenheit finden sich selten. Selbst wenn solche Daten vorliegen, ist ein Vergleich mit aktuellen Untersuchungen dennoch schwierig, 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.

Für das Bundesland Hessen bestehen diese Probleme nicht, weil das gesamte Land Anfang der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts einer flächendeckenden Kartierung der Flechten unter dem Gesichtspunkt der Bewertung der lufthygienischen Situation unterzogen wurde; allerdings nach der alten VDI-Richtlinie 3799 Blatt 1 von 1995 [VDI, 1995].

Aufbauend auf dieser in der Bundesrepublik einzigartigen Situation – damals initiiert und finanziert von der Hessischen Landesanstalt für Umwelt [HLfU, 1995] – kann heute jede beliebige Fläche erneut kartiert und die Ergebnisse mit denen der alten Erhebung verglichen werden.

Auf der Basis dieser Überlegungen hat das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie eine immissionsbezogene Flechtenkartierung nach der aktuellen VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 [VDI, 2005] in Auftrag gegeben, die einerseits ein räumliches Bild der lufthygienischen Situation des Untersuchungsgebietes wiedergeben, zum anderen aber auch die zeitliche Entwicklung der Belastungssituation zwischen der ersten Kartierung (1992) und heute (2007), also 15 Jahre später, darstellen sollte. Flechten reagieren auf den Gesamtkomplex biologisch wirksamer Immissionen, wobei insbesondere säurebildende und eutrophierende Luftschadstoffe, sowie Stäube indiziert werden. Da die Flechtenkartierungsrichtlinie des VDI im Jahr 2005 aktualisiert wurde, mussten die Rohdaten von 1992 entsprechend den neuen Anforderungen angepasst werden.

Begründung für die Aktualisierung der Flechtenkartierungsrichtlinie:

Als vor etwa 30 Jahren beim VDI der Entwurf einer Flechtenkartierungsrichtlinie diskutiert wurde, lagen erste Berichte über Flechtensterben infolge von Luftverschmutzungen bereits mehr als ein Jahrhundert zurück [Nylander, 1866]. Im Verlauf des 19./20. Jahrhunderts wurden durch empirische Untersuchungen im Gelände, sowie Begasungsexperimente unter anderem die sauren Schadgase (damals v. a.  $\text{SO}_2$ ) als Ursache für das Verschwinden vieler Flechtenarten ausfindig gemacht. Deren Konzentration hatte seit Beginn der Industrialisierung in weiten Teilen Mitteleuropas stark zugenommen und vor allem solche Flechtenarten zurückgedrängt, die auf subneutrale bis neutrale pH-Werte ihrer Substrate (Baumrinden) angewiesen sind. Diese Flechtenarten werden als Subneutrophyten/Neutrophyten bezeichnet; viele von ihnen gelten gleichzeitig als Eutrophierungszeiger, da sie beim Vorhandensein luftgetragener Stickstoffverbindungen gefördert werden. Als die Konzentration saurer Schadgase in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts ihren Höhepunkt erreicht hatte, waren selbst so genannte Acidophyten unter den Flechten von ihren ursprünglichen Substraten – Baumrinden mit natürlicherweise niedrigen pH-Werten, wie Koniferen und Eichen – wegen deren starker Ansäuerung verdrängt worden und auf die normalerweise neutralen Rinden von Walnussbäumen, Eschen, Pappeln, Apfelbäumen etc. ausgewichen, weil deren pH-Werte infolge des „Sauren Regens“ so weit zurückgegangen waren, dass sie nun den Ansprüchen der Acidophyten genügten. Folgerichtig bezog sich die erste Kartierungsrichtlinie auf Bäume mit natürlicherweise neutralen Rinden, weil dort zwar auch keine Neutrophyten mehr vorkamen, zumindest aber die Acidophyten noch ein gewisses Auskommen fanden. Damals konnte man formulieren: In Gebieten mit starker  $\text{SO}_2$ -Belastung kamen selbst auf Pappeln und Walnussbäumen keine Flechten mehr vor („Flechtenwüste“, Diversität = 0); mit abnehmender Belastung fanden sich zunächst die säureertragenden Acidophyten wieder ein (Kampfzone), bei weiter abnehmender Belastung schließlich auch zusätzlich noch einige Subneutrophyten. Die immissionsempfindlichsten Arten der vorindustriellen Zeit galten in Mitteleuropa als weitgehend ausgestorben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen beschrieb die VDI-Richtlinie eine Methode zur Ermittlung eines Luftgütewertes mittels standardisierter Aufnahme der Artenzahl und Häufigkeit der vorkommenden Flechten: Je größer die Artenzahl und je höher deren Frequenz (Diversität), um so besser die Luftgüte.



Bedingt durch die Erfolge der Luftreinhaltepolitik in den achtziger Jahren nahmen nun zwar die sauren Schadgase kontinuierlich ab; dafür wurden die Auswirkungen eutrophierender Luftschadstoffe – die bis dahin von den sauren Immissionen überdeckt worden waren – immer offensichtlicher: Die Acidophyten nehmen seither kontinuierlich ab; dies wird aber überkompensiert durch eine drastische Erhöhung von Artenzahl und Frequenz der Neutrophyten/Eutrophierungszeiger (Abb. 1). Während die Zunahme der Neutrophyten auf bessere lufthygienische Bedingungen hinweist (und damit erwünscht ist), weist die Zunahme der Eutrophierungszeiger auf eine (unerwünschte) Erhöhung der Konzentrationen von eutrophierend wirkenden Immissionen hin.

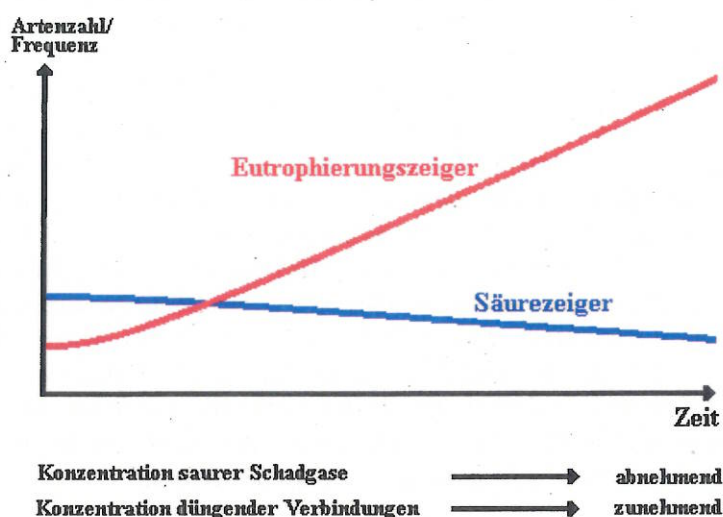


Abbildung 1: Immissionsbedingte Veränderungen in der Flechtenvegetation auf Baumrinden

In dieser Situation erwies sich folglich die Berechnung eines Indexes, der – wie in der Richtlinie VDI 3799, Blatt 1 [VDI, 1995] – lediglich auf der Aufsummierung aller Flechtenarten beruht, als nicht mehr zielführend für die Beurteilung der Immissionsbelastung, weil hohe Diversitätswerte nicht automatisch mit einer verringerten Immissionsbelastung einhergehen. Vielmehr ist es sinnvoll, den Anteil der Eutrophierungszeiger an der Erhöhung der Flechtendiversität (mit der Häufigkeit gewichtete Artenzahl) zu erfassen und bei der Bewertung der lufthygienischen Situation negativ zu belegen [VDI, 2005].

Neben der hier geschilderten wissenschaftlichen Begründung der Novellierung der Richtlinie, wurden auch methodische Veränderungen vorgenommen, die der Angleichung der deutschen Methode an eine europäische Flechtenkartierungsrichtlinie zum Nachweis von Immissionen dienen sollte [ASTA et al., 2002].

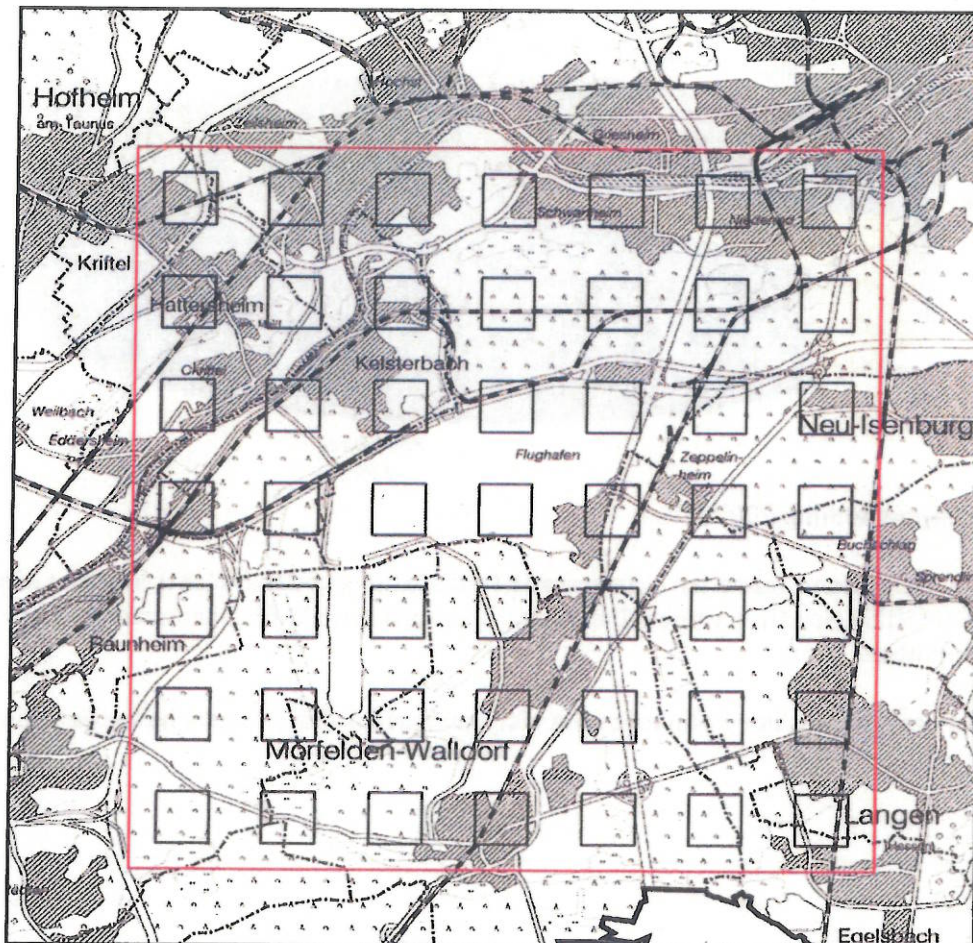
Der vorliegende Bericht beschreibt die Entwicklung der Flechtenvegetation im Umfeld des Frankfurter Flughafens an freistehenden Laubbäumen im Zeitraum zwischen 1992 bis 2007 unter lufthygienischen Gesichtspunkten sowie das jeweilige räumliche Verteilungsmuster der beiden Untersuchungszeiträume.



### 3 METHODEN

#### 3.1 Das Messnetz

Über das Untersuchungsgebiet wurde – wie bei den übrigen Flechtendauerbeobachtungsflächen (DBF) in Hessen – ein Raster von 1 km Seitenlänge gelegt (Abbildung 2). Während die übrigen hessischen DBF eine Fläche von 8 x 8 km mit maximal 25 Messflächen umfassen [Kirschbaum & Hanewald, 1998], wurde am Flughafen das Areal auf 14 x 14 km ausgeweitet, weil bei Voruntersuchungen im Gelände festzustellen war, dass hier – wegen der großen Waldgebiete – nicht genügend Messflächen mit freistehenden Laubbäumen auszuweisen waren.



rote Linie: Begrenzung des 14 x 14 km großen Untersuchungsgebietes  
schwarzes Gitter: 49 Messflächen á 1 km<sup>2</sup> Größe

**Abbildung 2:** Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes „Flughafen Frankfurt/Main“

In den 49 kartografisch ausgewiesenen Messflächen von jeweils 1 km<sup>2</sup> Größe erfolgte die Untersuchung der Flechten an jeweils 6-12 geeigneten Bäumen. Im Jahr 1992 waren 20 Messflächen kartiert worden, 2007 dagegen 24. Dies entspricht etwa der Hälfte der avisierten Untersuchungsflächen. Da sich in den restlichen nicht die Mindestanzahl geeigneter, freistehender Laubbäume fand, mussten sie verworfen werden (das gilt insbesondere für das Betriebsgelände des Flughafens, sowie für die angrenzenden Waldgebiete). Von den 24 aktuell untersuchten Messflächen war ein großer Teil (17) bereits 1992 kartiert worden, so dass der Vergleich der Ergebnisse auf einer breiten Basis gemeinsamer Flächen beruht [HLFU, 1995].



### 3.2 Baumartenauswahl

Die VDI-Richtlinie macht sehr genaue Vorgaben bezüglich der Auswahl und Standardisierung der auf ihren Flechtenbewuchs zu untersuchenden Bäume: Sie müssen frei stehen, ähnliche Eigenschaften hinsichtlich ihres Borken-Chemismus und der Borkenstruktur aufweisen, sie müssen gerade gewachsen sein, dürfen nicht beschädigt oder vom Vieh abgescheuert oder mit Fungiziden gespritzt sein etc.. Diese strengen Vorgaben sollen verhindern, dass ein unterschiedlicher Flechtenbewuchs aus der Variabilität dieser Einflüsse – und nicht aus der unterschiedlichen lufthygienischen Situation – resultiert (Einengung der störenden Randfaktoren).

Die prozentuale Aufteilung der Flechtenbäume 2007 ist in Abb. 3 wiedergegeben.

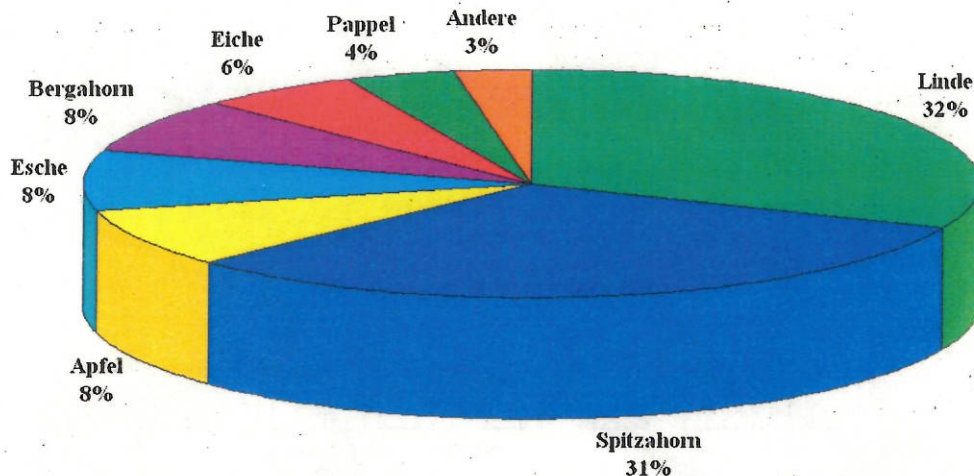


Abb. 3: Baumartenverteilung 2007 (%)

Von den hier aufgeführten Baumarten gehören alle (mit Ausnahme der Eichen) in jene Gruppe von Bäumen, die laut VDI-Richtlinie wegen ähnlicher Eigenschaften als Flechtenunterlage gemeinsam kartiert werden dürfen.

Das Artenspektrum untersuchter Baumarten hat sich im Verlauf des Untersuchungszeitraumes verändert (s. Abb. 4).

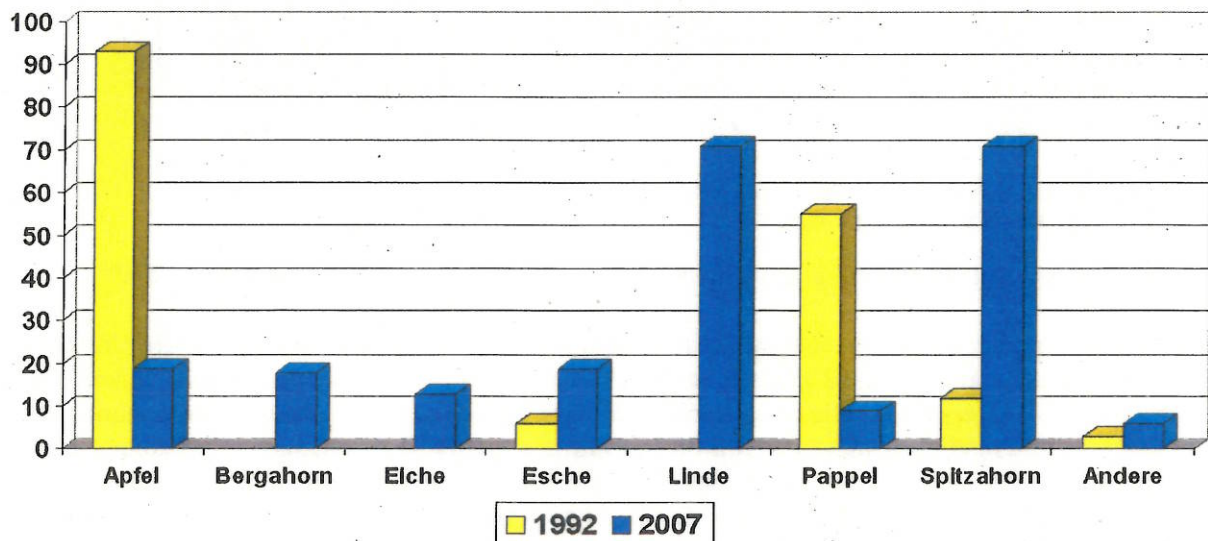


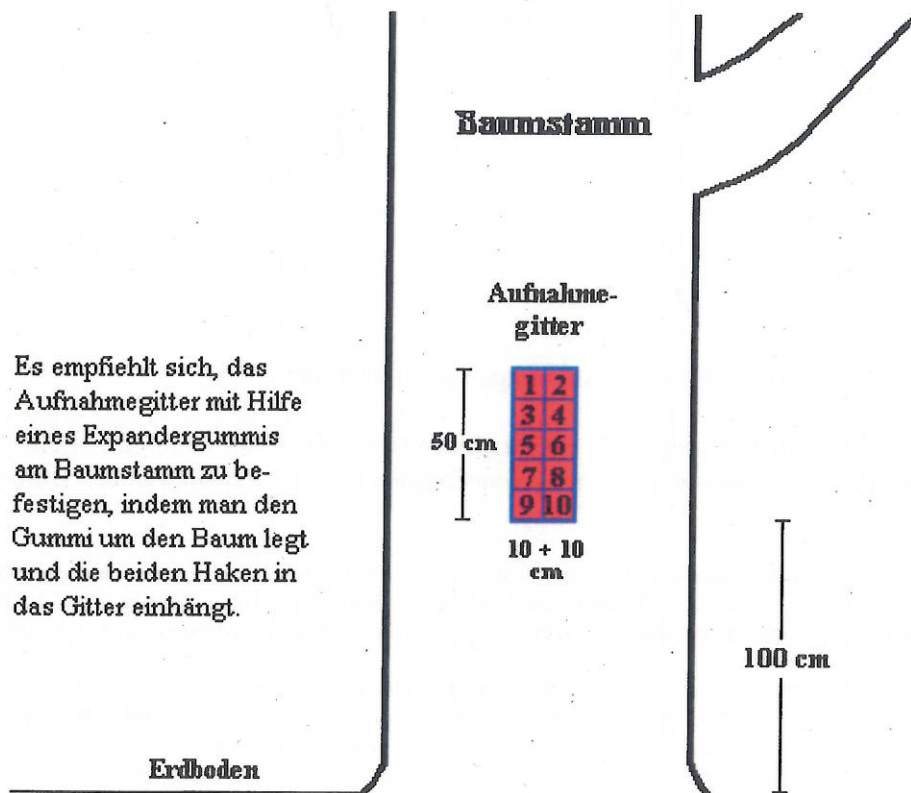
Abb. 4: Entwicklung der Zahl untersuchter Bäume (1992 – 2007)

War der Apfel 1992 der am häufigsten untersuchte Baum, so nehmen 2007 die Linde und der Spitzahorn die vorderen Plätze ein. Die Notwendigkeit einer Veränderung des Baumartenspektrums ergab sich einerseits aus der Tatsache, dass die 1992 noch reichlich vorhandenen Apfelbäume inzwischen wegen Überalterung weggefallen sind und neue Streuobstbestände kaum mehr angelegt werden. Andererseits sind durch die rege Siedlungstätigkeit im Vergleichszeitraum etliche der 1992 noch vorhandenen Bäume weggefallen. Die Richtlinie erlaubt aber eine Auswechslung von Untersuchungsbäumen innerhalb eines vorgegebenen Artenspektrums von Laubbäumen mit ähnlichen Wachstumsbedingungen für die zu untersuchenden Flechten.

Die Gesamtzahl kartierter Bäume hat sich von 169 (1992) auf 226 (2007) erhöht.

### 3.3 Erfassung der Flechten

Die Flechtenaufnahme erfolgte 1992 und 2007 nach der gleichen Methode: Jedem zu untersuchenden Baum wird ein Aufnahmegitter angelegt (Abb. 5).



**Abb. 5:** Aufnahmegitter für die Flechtenerhebungen nach VDI 3799, 1995

Das Gitter wird an der am stärksten mit Flechten bewachsenen Seite des Baumes so angelegt, dass sich seine Unterkante 100 cm über dem Erdboden befindet.

Die jüngst aktualisierte VDI-Richtlinie von 2005 schreibt zwar – in Anpassung an die europäische Flechtenkartierungsrichtlinie – ein verändertes Aufnahmegitter am Baumstamm vor (Abb. 6), jedoch wird für Untersuchungen aus früheren Jahren die Benutzung des in Abb. 5 dargestellten Gitters aus Vergleichsgründen erlaubt (hierfür gibt es eine angepasste Bewertungsmatrix, die in Abb. 7 wiedergegeben ist).



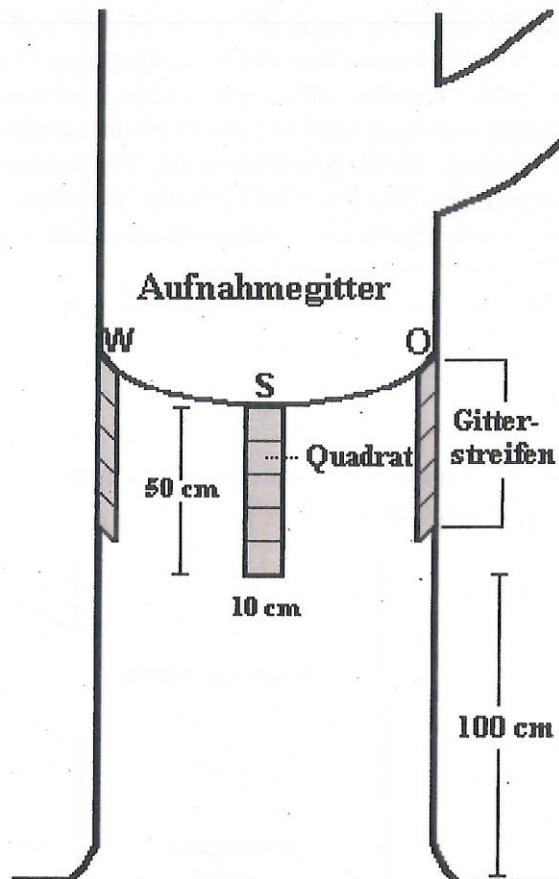


Abb. 6: Aufnahmegitter für die Flechtenerhebungen nach VDI 3957, 2005

Im Gitter wird ermittelt, in wie vielen der 10 quadratischen Teilflächen jede gefundene Flechtenart vorkommt (siehe Abb. 5: Erfassung der Flechten-Frequenz als Basiswert für die Berechnung der Luftgüte-Indizes).

Die Verwendung des alten Aufnahmegitters erlaubt zwar einen Vergleich mit früheren Untersuchungsergebnissen (was für die weit zurückreichenden hessischen Flechten-Erhebungen von Bedeutung ist), verbietet aber gleichzeitig einen Vergleich mit immissionsbezogenen Flechtenkartierungen aus anderen Gebieten Mitteleuropas, die mit dem neuen Aufnahmegitter erfolgt sind.

Während die aktuelle Richtlinie vorschreibt, alle vorkommenden Flechtenarten getrennt aufzunehmen, wurden in der alten Richtlinie bestimmte (schwer zu unterscheidende) Arten zu Gruppen zusammengefasst. Um den Vergleich zu 1992 zu ermöglichen, wurde mit den Erhebungen von 2007 in gleicher Weise verfahren.

Auch dieses Vorgehen hat zur Konsequenz, dass die Ergebnisse vom Frankfurter Flughafen nicht vollständig mit Untersuchungen aus anderen Bundesländern vergleichbar sind (sofern dort die hier in Artengruppen zusammengefassten Arten getrennt bewertet werden). Sollte ein solcher Vergleich gewünscht werden, müssten die Luftgüte-Indizes für 2007 neu berechnet werden.

Eine der 1992 vorkommenden Flechtenarten, *Lecanora conizaeoides*, musste nach der alten Richtlinie bei der Berechnung der Luftgütewerte wegen ihres atypischen Verhaltensmusters gegenüber den damals vorherrschenden sauren Immissionen weggelassen werden. Aus Vergleichsgründen wurde diese Vorgehensweise für 2007 beibehalten. Auch dadurch ist ein Vergleich mit aktuellen Kartierungen nach der neuen Richtlinie nicht möglich.

(Soweit den Verfassern bekannt ist, gibt es aus dem Jahr 2007 keine außerhessischen Kartierungen nach der neuen VDI-Richtlinie, so dass ein solcher Vergleich ohnehin nicht in Frage kommt).

Für den Vergleich mit den sieben übrigen hessischen Dauerbeobachtungsflächen gelten die oben genannten Einschränkungen nicht: Auch bei diesen wird die Erhebung von 2007/08 nach der gleichen Methode, wie am Flughafen ausgewertet. Der Vergleich der lufthygienischen Situation des Flughafens mit anderen hessischen Dauerbeobachtungsflächen ist allerdings nicht Gegenstand dieses Auftrages. Er wird jedoch Ende 2008/Anfang 2009 im Abschlussbericht für alle hessischen Flechtendauerbeobachtungsflächen nachzulesen sein.



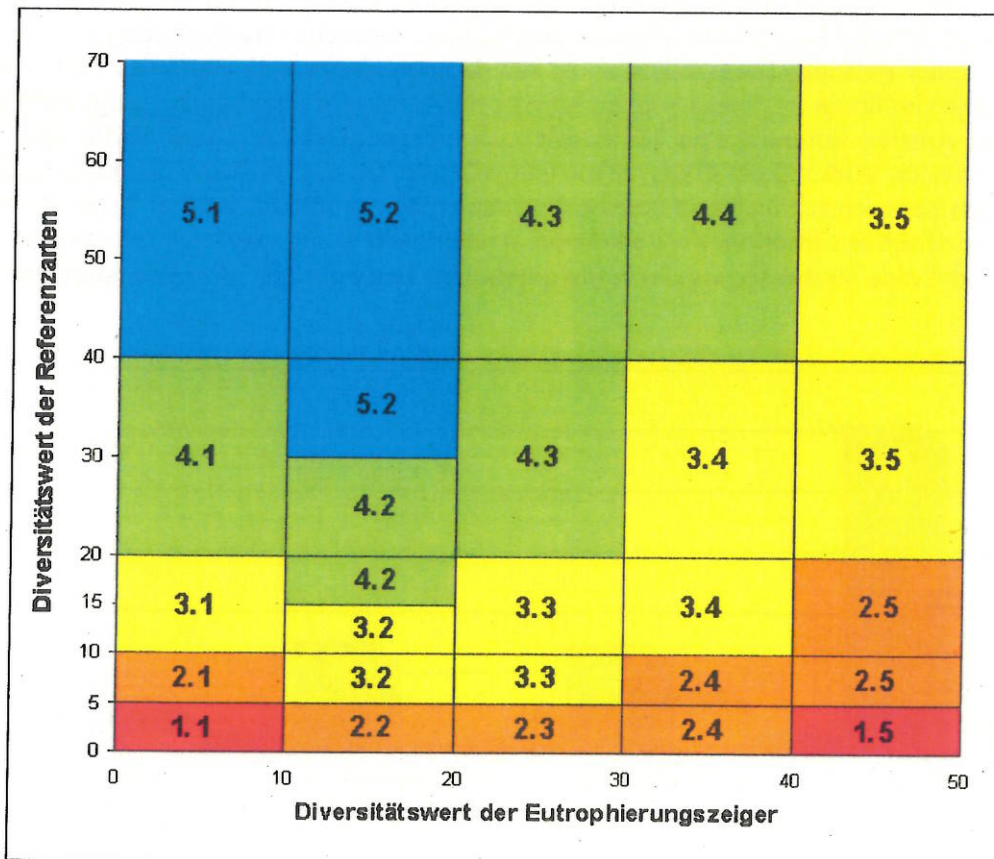
### 3.3 Berechnung und Bewertung der Luftgüte-Indizes

Dazu wurde eine Liste der Eutrophierungszeiger erstellt, denen die übrigen Arten (Referenzarten) als Anzeiger günstiger lufthygienischer Bedingungen gegenübergestellt werden. Die Diversität beider Gruppen wird an jeder Messfläche (ca. 10 Bäume) getrennt erfasst und bei der Auswertung getrennt bewertet (siehe Tabelle. 1):

**Tabelle 1:** Erläuterungen zur Bewertungsmatrix

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

Der Luftgüte-Index wird anhand einer Bewertungsmatrix ermittelt (siehe Abb. 7).



**Abb. 7:** Bewertungsmatrix zur Ermittlung der Luftgüte anhand der Kombination der Diversitätswerte der Referenzarten und der Eutrophierungszeiger.

Hierzu werden die Diversitätswerte der Referenz-Arten in der Bewertungsmatrix auf der Ordinate und die Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger auf der Abszisse aufgetragen. Die Bewertung des Quadrates, in dem der Schnittpunkt der beiden Diversitätswerte einer Messfläche zu liegen kommt, wird für die Messfläche übernommen und mit einer Farbe belegt.

Der Luftgüte-Index 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 symbolisiert das Vorkommen von Eutrophierungszeigern.

Die verbale Beschreibung des Luftgüte-Indexes wird in Tab. 2 an einigen Beispielen erläutert:

Tabelle 2: Verbale Beschreibung des Luftgüte-Indexes

Luftgüte-Index	Bewertung
Luftgüte-Index 1.1	Sehr geringe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüte-Index 1.5	Sehr geringe Luftgüte bei sehr starkem Einfluss eutrophierender Verbindungen
Luftgüte-Index 5.1	Sehr hohe Luftgüte bei sehr geringem Einfluss eutrophierender Verbindungen

## 4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Ein erster Hinweis auf Verbesserungen hinsichtlich der lufthygienischen Verhältnisse lässt sich aus einem Anstieg der Artenzahl ablesen. Diese hat sich im Untersuchungsgebiet Flughafen zwischen 1992 bis 2007 mehr als verdoppelt (siehe Abb. 8). Auch die mittlere Anzahl von Flechtenarten pro Messfläche ist im Vergleichszeitraum drastisch angestiegen. Betrachtet man allerdings die mittleren Diversitätswerte der Eutrophierungszeiger, so ist zu erkennen, dass ein Großteil des Zuwachses auf diese Arten zurückzuführen ist. Diese Steigerung ist kein Anlass zur Beruhigung, zeigt sie doch den unerwünschten Anstieg luftgetragener Nährstoffe (z.B. Ammoniak) an. Diese Stoffe sind wegen ihrer eutrophierenden Wirkung auf Ökosysteme unerwünscht. Da dieses Phänomen jedoch seit einiger Zeit in allen hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen auftritt, ist hier keine Zuordnung zu flughafenspezifischen Emissionen zu erkennen. Andererseits kann man auch erkennen, dass die Referenzarten, die eine Verbesserung der lufthygienischen Bedingungen anzeigen, stark zugenommen haben.

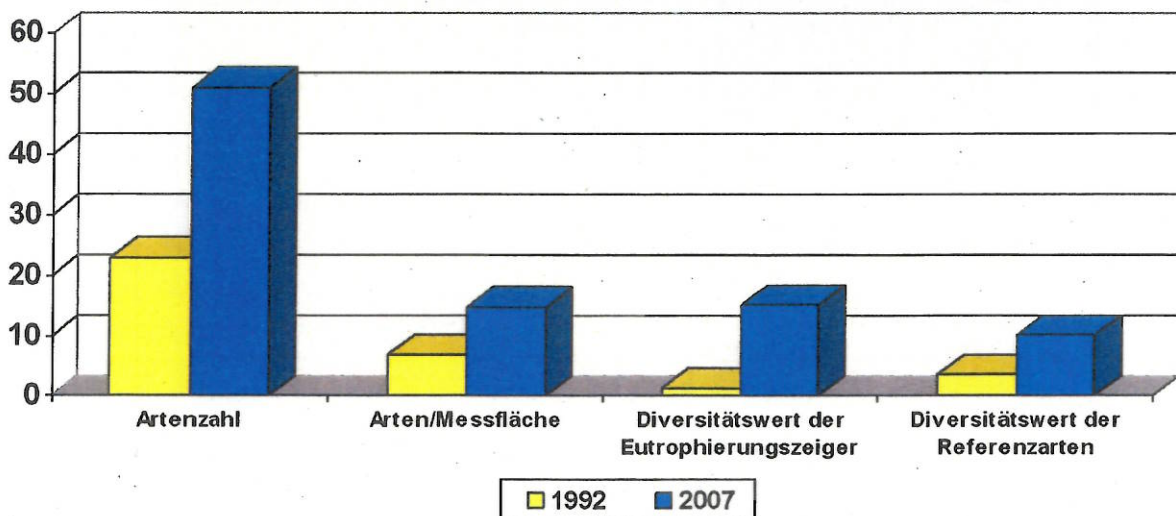
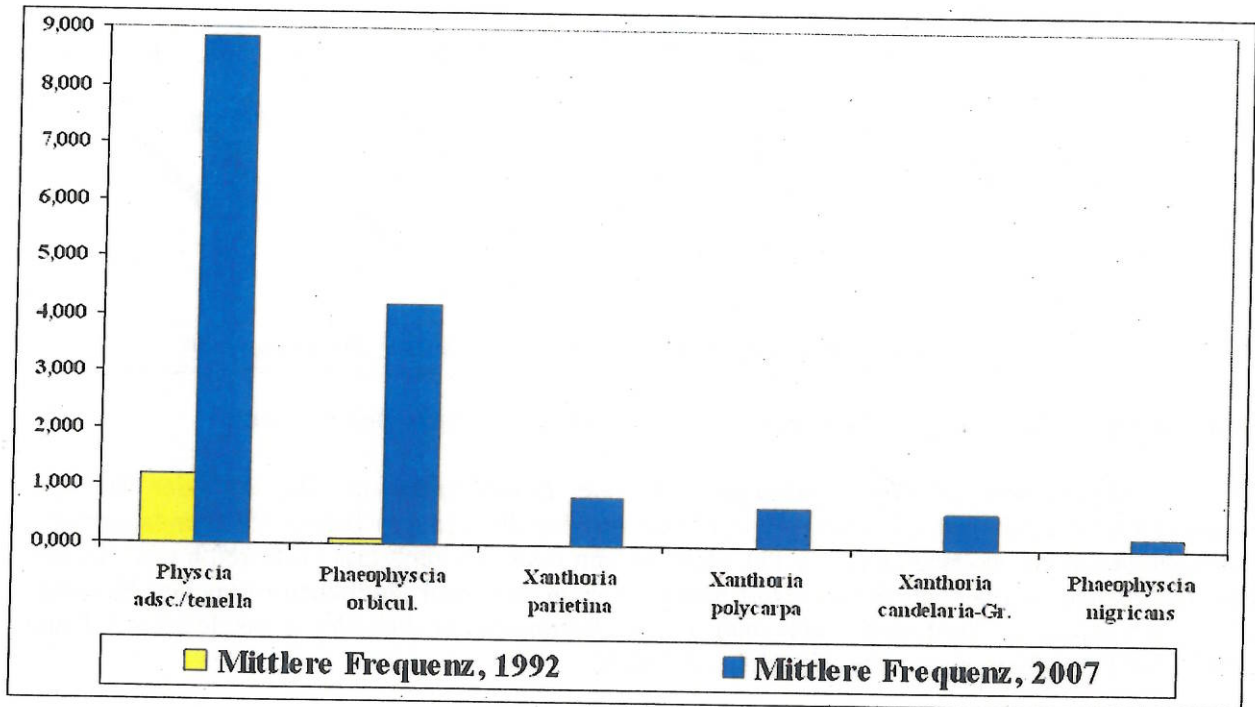


Abb. 8: Entwicklung von Artenzahl, mittlerer Artenzahl/Messfläche, Diversitätswerten von Eutrophierungszeigern und Referenzarten.



Ein Vergleich der Entwicklung einzelner Flechtenarten zwischen 1992 und 2007, lässt erkennen, dass alle Eutrophierungszeiger stark zugenommen haben (Abb. 9): War z.B. *Phaeophyscia orbicularis* 1992 im Untersuchungsgebiet fast nicht existent, so kommt sie heute mit einer Frequenz von 4,2 vor; d.h. sie ist in 42% aller untersuchten Aufnahmegitterflächen von 10 x 10 cm gefunden worden. Andere Arten, wie z.B. die *Xanthorien* gab es vor 15 Jahren an den Bäumen im Untersuchungsgebiet noch gar nicht, heute dagegen fallen sie an den Baumborken wegen ihrer auffallend gelben Farbe selbst flechtenkundlichen Laien überall ins Auge. Wie bereits erwähnt, ist dieser Trend auf verstärkte Einwirkungen eutrophierender Substanzen (z.B. luftgetragener Stickstoffverbindungen) zurückzuführen [Van Dobben & De Bakker, 1996; Van Herk, 1999 und 2002; Vorbeck & Windisch, 2001; Franzen-Reuter & Stapper, 2003; John, 2007].



**Abbildung 9:** Entwicklung der Frequenz der häufiger vorkommenden Eutrophierungszeiger

Die Entwicklungstendenzen der Referenzarten (zeigen eine Verbesserung der lufthygienischen Situation an) sind nicht so einheitlich, wie dies bei den Eutrophierungszeigern der Fall ist (Abb. 10): Zunächst ist bei einigen Arten sogar ein deutlicher Rückgang ihrer Häufigkeit (Frequenz) zu beobachten. Besonders auffällig ist dies bei der acidophytischen – saure Substrate bevorzugenden – *Lecanora conizaeoides*. Kam sie 1992 noch mit einer Häufigkeit von 49% vor, so ist sie heute extrem selten geworden (< 2%). Ähnliche Tendenzen lassen sich bei *Amandinea punctata*, bei *Lecanora expallens* und *L. saligna* beobachten. Alle genannten Arten gelten als ± acidophytisch. Ihr Rückgang lässt sich mit der Verminderung saurer Immissionen (Schwefeldioxid) erklären.

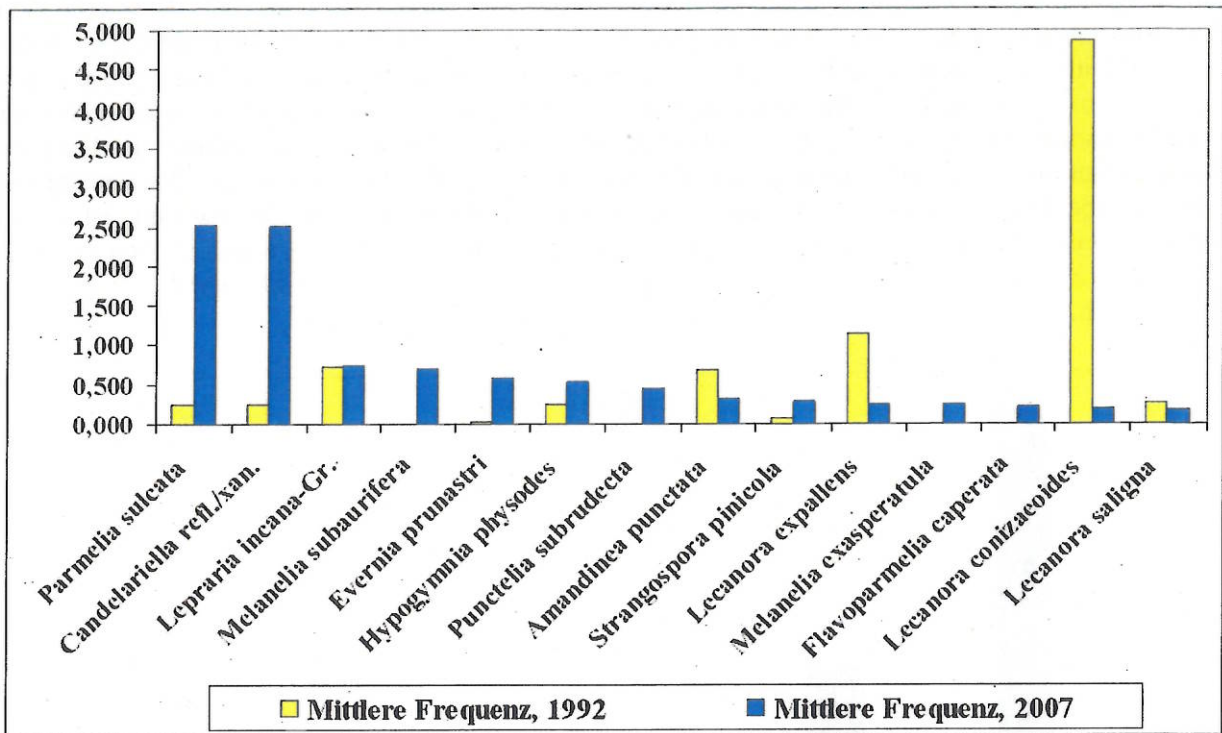


Abbildung10: Entwicklung der Frequenz der häufiger vorkommenden Referenzarten

Bei Acidophyten, wie z.B. *Hypogymnia physodes* oder *Evernia prunastri* lässt sich der oben genannte Trend (noch) nicht erkennen – wie in den meisten übrigen hessischen Flechtendauerbeobachtungsflächen zu beobachten (Abb. 11). Daraus kann man ableiten, dass im Bereich des Flughafens die SO<sub>2</sub>-Belastung noch immer etwas höher ist als in den mehr ländlichen Bereichen Hessens. Diese Vermutung bestätigt sich, wenn man die durchschnittlichen SO<sub>2</sub>-Werte der letzten 5 Jahre (2002-2006) zum Vergleich heranzieht [HLUG, 2007]:

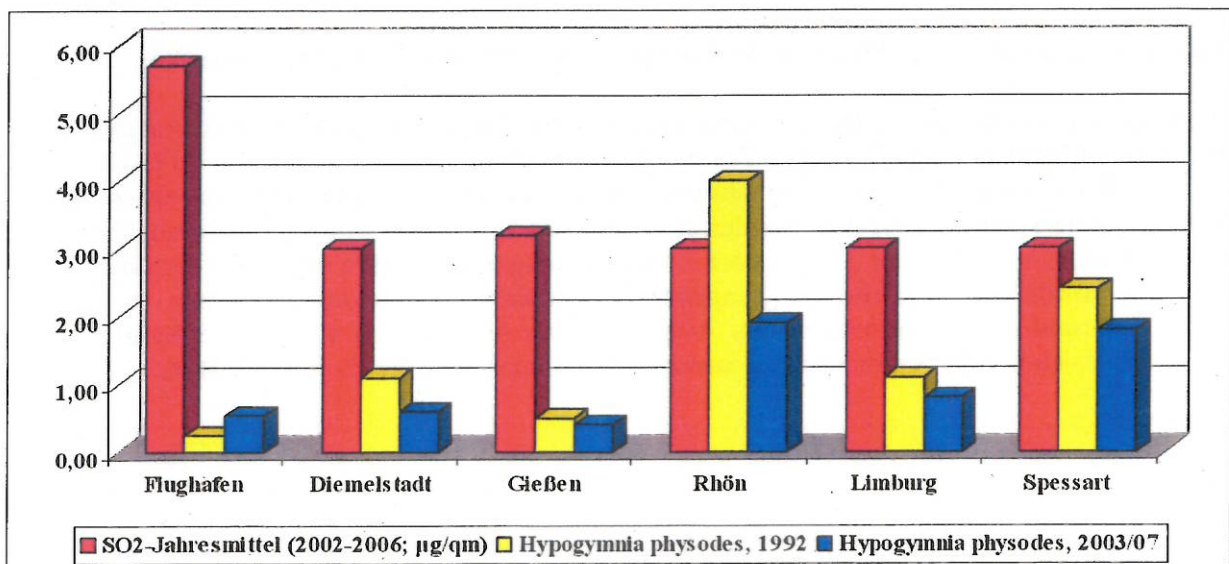


Abbildung 11: Entwicklung der Häufigkeit von *Hypogymnia physodes* in Bezug zur SO<sub>2</sub>-Konzentration (SO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte von 2002-2006: HLUG)



Die meisten der Referenzarten zeigen jedoch deutliche Tendenzen zu größerer Häufigkeit, was auf eine Verbesserung der allgemeinen lufthygienischen Situation hinweist. (Dieser Trend ist auch bei den in der Abbildung nicht dargestellten – weil insgesamt eher seltenen – in Bezug auf Immissionsbelastungen ziemlich empfindlichen Arten zu erkennen: Auch sie haben im Vergleichszeitraum zugenommen). Von den 29 Arten, die seit 1992 wieder in den Untersuchungsraum eingewandert sind (siehe Abbildung 8), gehören 24 (83%) zur Gruppe der Referenzarten.

In Abbildung 12 ist die Entwicklung der lufthygienischen Situation im Umfeld des Frankfurter Flughafens zwischen 1992 und 2007 dargestellt. Im Jahr der ersten Untersuchung gehörten 75% der damals untersuchten 20 Messstellen der schlechtesten Kategorie an (sehr geringe Luftgüte; siehe auch Tab. 1). 15% der Messstellen besaßen eine geringe Luftgüte und nur 10% im Süden des Untersuchungsgebietes hatten eine mittlere Luftgüte.

2007 haben sich die Verhältnisse grundlegend gewandelt: Von den insgesamt 24 für eine immissionsbezogene Flechtenuntersuchung geeigneten Messflächen sind nur noch 8% der schlechtesten Luftgüte zuzuordnen, 25% gehören der zweitschlechtesten Luftgütekategorie an. Die Mehrzahl der Stationen (46%) findet sich im Bereich mittlerer Luftgüte und 21% sogar in der zweitbesten Kategorie (hohe Luftgüte). Diese Ergebnisse beweisen, dass sich die lufthygienischen Verhältnisse in den letzten 15 Jahren drastisch verbessert haben. Dieser Befund steht im Einklang mit den Beobachtungen an anderen hessischen Flechten-Dauerbeobachtungsflächen, hat also nichts mit den Auswirkungen des Flughafens zu tun, sondern ist ein überregionales Phänomen.

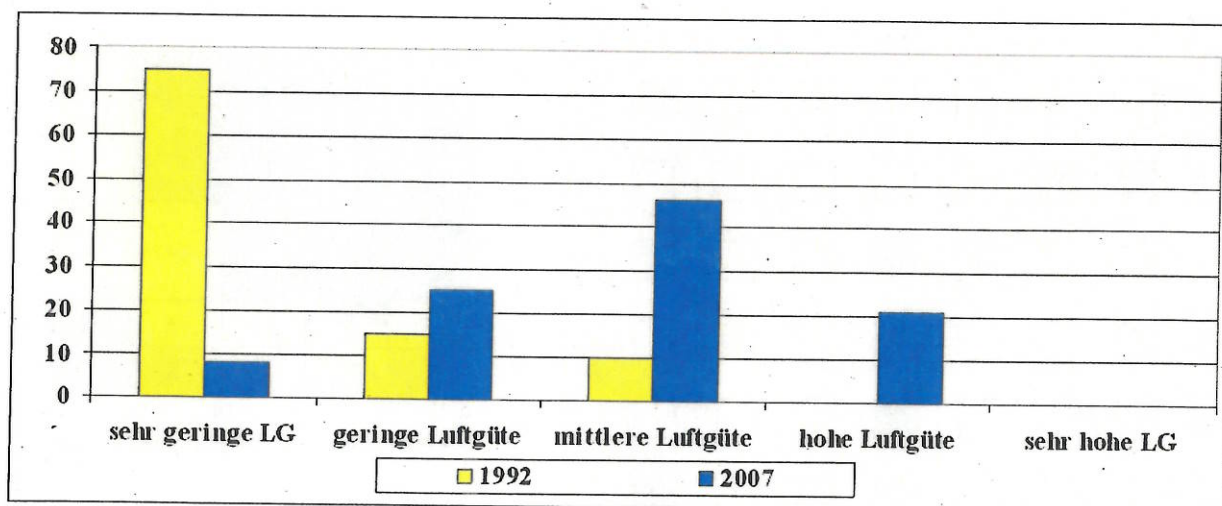


Abbildung 12: Zugehörigkeit der Messflächen zu den Luftgüte-Kategorien (in %; 1992-2007)

Aus Abbildung 13 ergibt sich die räumliche Verteilung der Messflächen unterschiedlicher Luftgüte: Weder für die Untersuchung von 1992 noch für die aktuelle lässt sich eine räumliche Abstufung der Flechten-Indizes nachweisen, die einen Bezug zum Flughafen erkennen lässt. Während die Kartierung von 1992 eine insgesamt relativ einheitliche Verteilung der Luftgüte auf niedrigem Niveau aufzeigt, ergibt sich für 2007 ein kleinräumig differenziertes Bild. Besonders deutlich wird dies bei den Messflächen 5546/3467 und 5546/3469, im Norden des Flughafens. Hier finden sich zwei stark voneinander abweichende Luftgütewerte. Schaut man sich die Grunddaten beider Flächen an, findet sich eine Erklärung in den unterschiedlichen Umweltbedingungen: Während sich die Bäume der roten Station auf extrem versiegeltem Gelände befinden, stehen jene der grünen Fläche in einer vegetationsbewachsenen Umgebung. Infolgedessen sind die mikroklimatischen Verhältnisse für die darauf wachsenden Flechten divergierend und auch der Staubanflug wird sich unterschiedlich gestalten.



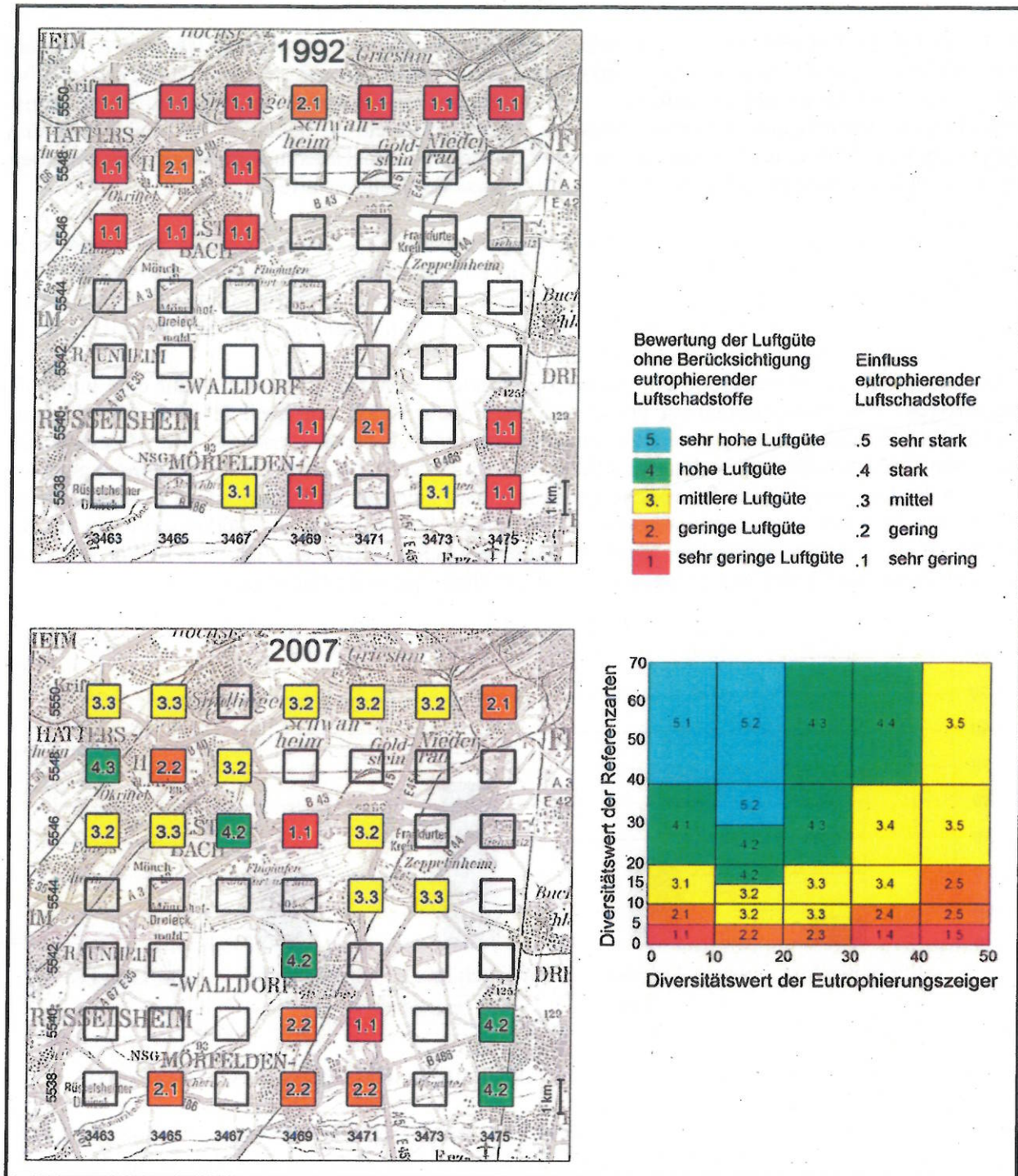


Abbildung 13: Entwicklung der Luftgüte-Indizes im Umfeld des Flughafens Ffm (1992-2007)

Die zweite Ziffer hinter dem Punkt war bei allen Flächen im Jahr der ersten Untersuchung 1, was bedeutet, dass der Einfluss eutrophierender Verbindungen zum damaligen Zeitpunkt sehr gering war. Hingegen ist festzustellen, dass 2007 die Stufe 2 vorherrscht, was auf einen zunehmenden Einfluss luftgetragener Stickstoffverbindungen (u.a. Ammoniak) schließen lässt. In mehreren Messflächen im Nordwesten des Untersuchungsgebietes taucht sogar mehrmals die Ziffer 3 hinter dem Punkt auf; dies ist mit einem mittleren Einfluss eutrophierender Verbindungen gleichzusetzen. Da auch dies ein für weite Teile Hessens gültiges Phänomen ist, kann man davon ausgehen, dass der Flughafen an dieser Entwicklung keinen maßgeblichen Anteil hat.



Zum Vergleich der Flughafenergebnisse können Resultate aus einer kürzlich abgeschlossenen, nach der gleichen Methodik durchgeführten, immissionsbezogenen Flechtenkartierung aus den mittelhes-sischen Städten Gießen und Wetzlar herangezogen werden (Abb. 13 und 14).

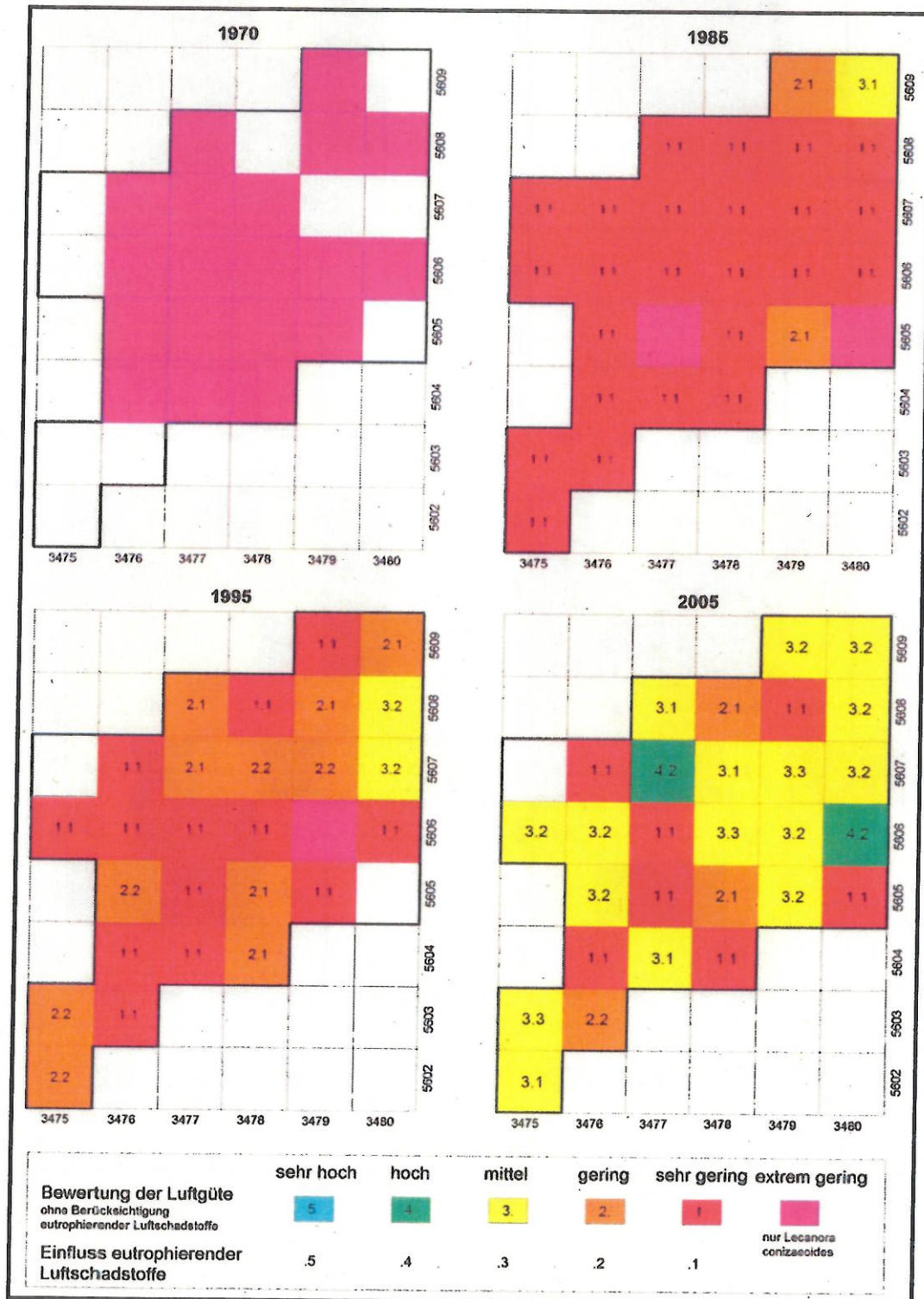


Abb. 13: Entwicklung der Luftgüte-Indizes in Gießen (1970 – 2005) [nach VDI 3957, 13; aus Kirschbaum et al. 2006]

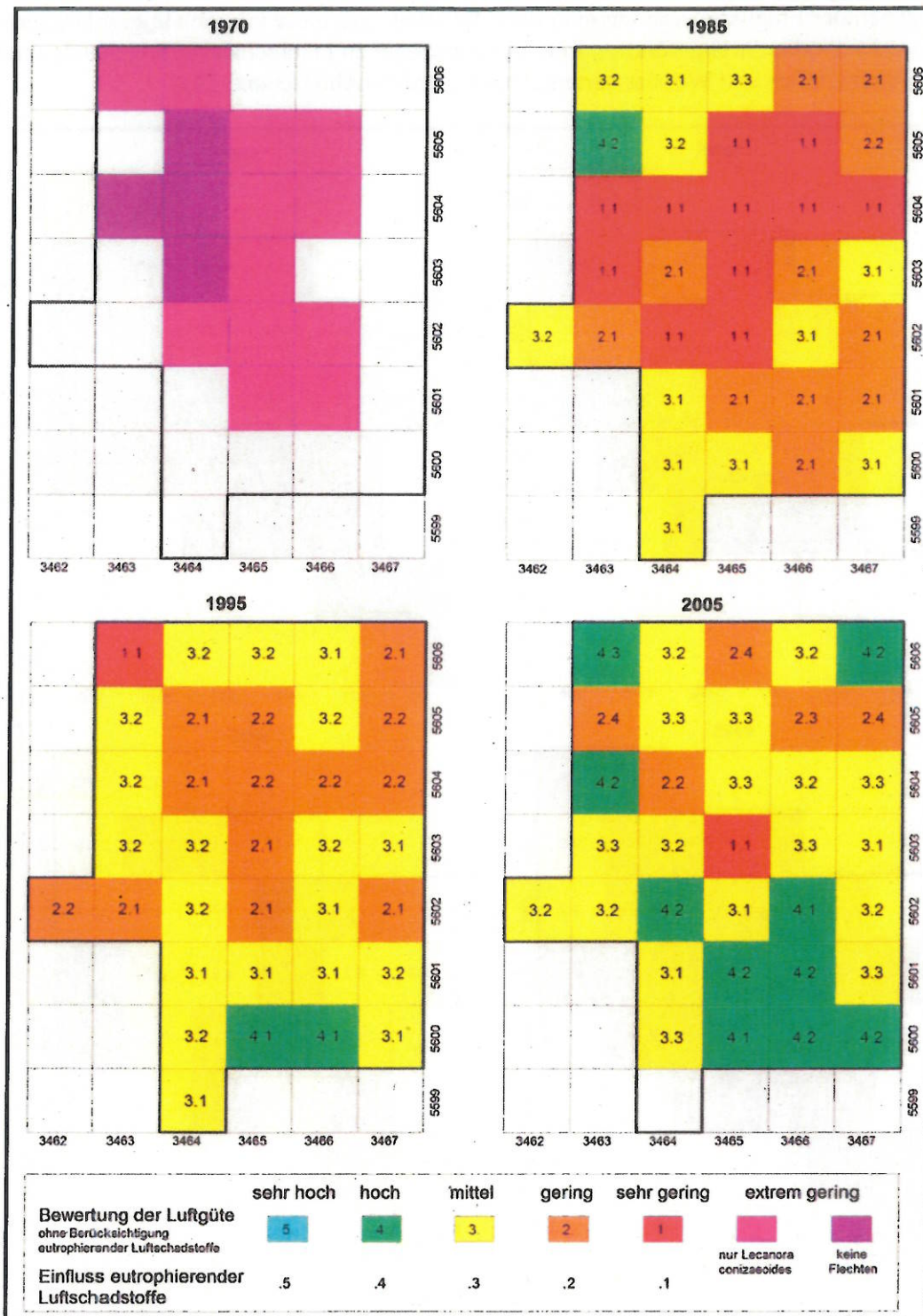


Abb. 14: Entwicklung der Luftgüteindizes in Wetzlar (1970 – 2005) [nach VDI 3957, 13; aus Kirschbaum et al. 2006]

Zwar sind die Zeiträume der Untersuchungen nicht völlig identisch; der gleiche Trend ist jedoch unverkennbar:

Hier wie dort manifestiert sich die Abnahme der Immissionsbelastung in einer Rückkehr von Arten, die in der Zeit extremer Belastung verschwunden waren. Die Verbesserung der lufthygienischen Situation ist also ebenso wenig ein flughafenspezifisches Phänomen, wie die Zunahme der Eutrophierungszeiger.



Vergleicht man das Artenspektrum der Flechten, die am Flughafen gefunden worden mit zwei weiteren hessischen Dauerbeobachtungsflächen, die ebenfalls im Jahr 2007 kartiert wurden (Spessart, Limburg), so fällt dieses keineswegs schlechter aus als bei den zuletzt genannten. Für einen detaillierten Vergleich fehlt bisher die Auswertung der zwei DBF. Es kann jedoch schon jetzt gesagt werden, dass in der Messfläche „Flughafen“ einige Flechtenarten gefunden wurden, die als besonders anspruchsvoll gelten und die in den anderen Flächen bisher nicht vorkommen. Daraus lässt sich ableiten, dass die lufthygienischen Verhältnisse am Flughafen sich zumindest nicht schlechter darstellen als im Gebiet Limburg und im Spessart (dabei gelten diese beiden unter den sieben hessischen DBF als eher unbelastet).

Bereits 1992 wurden von uns bioindikative Untersuchungen am Flughafen Frankfurt durchgeführt [Wilbertz, 1992]. Damals war weder bei den Photooxidantien noch bei den Schwermetallen Blei und Cadmium eine Beziehung der Werte zu potentiellen Emissionen des Flughafens festzustellen. Diese Erkenntnis wird durch die vorliegende Untersuchung mit Flechten untermauert. Sie steht auch mit Aussagen im Einklang, die von der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen publiziert wurden [ADV, 2007]. Dort wird darüber berichtet, dass bei Immissionsmessungen an Flughäfen in keinem Fall signifikant erhöhte Werte im Vergleich zu benachbarten Wohngebieten oder dem Umland nachzuweisen waren.

## 5 LITERATURVERZEICHNIS

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2007): Emissionen. – Berlin, S. 16-22.

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.

Cislaghi, C. & P. L. Nimis (1997): Lichens, air pollution and lung cancer. – Nature, 387, 463-464.

Franzen-Reuter, I. & N. J. Stapper (2003): Nachweis eutrophierender Luftverunreinigungen in NRW. – Landesweite Kartierung epiphytischer Flechten und Moose. LÖBF-Mitteilungen 1/2003, 76-78.

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2007): Jahresmittelwerte SO<sub>2</sub>. – (schriftliche Mitteilung).

Hessische Landesanstalt für Umwelt (1995): Beurteilung der lufthygienischen Situation Hessens mittels epiphytischer Flechten. – Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, H. 171, 150 S.

John, V. (2007): Stickstoff und Wärme – Synergieeffekte oder gegenseitige Verschleierung der Wirkung auf Flechten. – KRdL-Expertenforum „Stickstoff und die Wirkungen auf die Vegetation“, Februar 2007 in Braunschweig, KRdL-Schriftenreihe, 37, 109-118.

Kirschbaum, U. & K. Hanewald (1998): Immissionsbezogene Flechtenkartierung in hessischen Dauerbeobachtungsflächen. J. Appl. Bot. 72, 212-227.

Kirschbaum, U., U. Windisch, A. Vorbeck & K. Hanewald (2006): Mapping lichen diversity in Wetzlar and Giessen as an indicator of air quality – Comparison between the surveys of 1970, 1985, 1995 and 2005. – Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 272-280.

- Nylander, W. (1866): Les Lichens du Jardin du Luxembourg. – Bull. Soc. Bot. de France, 13, 364-372.
- Rabe, R. & U. Beckelmann (1987): Zusammenhänge zwischen der durch Flechten angezeigten Gesamtverunreinigung der Luft und Gesundheitsbeeinträchtigung beim Menschen. - VDI-Bericht 609: Wirkungsbezogene Erhebungsverfahren für den Immissionsschutz, 729-753. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- 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.
- Van Herk, C. M. (2002): 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.
- 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.
- 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.
- Wilbertz, J. (1992): Bioindikation von Luftschadstoffen am Frankfurter Flughafen. – Unveröffentlichte Diplomarbeit der FH Gießen-Friedberg, Fachbereich TG.