

Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorteutrophierung und verkehrsbedingten Immissionen

Norbert J. Stapper & Randolph Kricke

Zusammenfassung: Anhand der Daten einer immissionsbezogenen Kartierung epiphytischer Moose und Flechten in Düsseldorf im Jahr 2003 wird der Zusammenhang zwischen der Frequenz einzelner Arten beider Pflanzengruppen und der relativen nächtlichen Temperatur und dem Eutrophierungsgrad der Baumstandorte sowie der Belastung durch Straßenverkehr dargestellt. Moose und Flechten ähneln sich weitgehend im Verhalten hinsichtlich der genannten Faktoren und können mit dem selben Verfahren quantitativ erfasst werden. Moose bevorzugen stärker als Flechten Standorte mit nächtlicher Abkühlung. Beide Gruppen eignen sich zur Bioindikation verkehrsbedingter Belastungen. Auch einige nitrophytische Flechten, darunter *Amandinea punctata* und *Physcia tenella*, werden an stark belasteten Standorten seltener, während *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* durch hohe Verkehrsbelastung gefördert werden.

Summary: A recent survey of corticolous lichens and bryophytes in Düsseldorf (North Rhine-Westphalia, Germany) demonstrates a significant increase in species diversity between 1979 and 2003. Most bryophyte and lichen species show a strong negative correlation between their diversity and frequency, as measured according to the proposed EU Quantitative Lichen monitoring methodology, and increasing relative nocturnal temperature (RNT), eutrophication, and transport emissions. Bryophytes apparently prefer sites with low RNT to a somewhat larger extent than lichens do. Both, lichens and bryophytes, are suitable for bioindication of transport emissions which are usually regarded as the mayor source of eutrophicating nitrogen. Some nitrophytic lichens, among them *Amandinea punctata* and *Physcia tenella*, however, show decreasing frequencies with increasing traffic intensity, whereas *Phaeophyscia nigricans* and *Ph. orbicularis* obviously are promoted by transport emissions.

1 Einleitung

Aufgrund bestimmter physiologischer Merkmale, das sind hohes Verbreitungspotential, Wasser- und Schadstoffaufnahme durch die gesamte Thallusoberfläche, Akkumulation von Schadstoffen, Stoffwechselaktivität über das gesamte Jahr, werden epiphytische Moose und Flechten seit Jahrzehnten als Monitororganismen für die Bioindikation von Luftverschmutzungen in Ballungsräumen verwendet (NYLANDER 1866; HAWKSWORTH & ROSE 1970, 1973; DÜLL 1974a, b, 1979;

HERZIG *et al.* 1986; KIRSCHBAUM & WINDISCH 1995, DILG 1998, FRAHM 1998, WINDISCH 1999, STAPPER *et al.* 2000, FRANZEN, 2001a; VORBECK & WINDISCH 2001; FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003), und seit den 1980er Jahren auch für die Immissionsbelastung von Wäldern (KNABE 1981, 1982, 1983; SAUER 1991; JOHN 1997; STETZKA & STAPPER 2001). Beide Pflanzengruppen werden zudem als Bioindikatoren für Boden- und Gewässerversauerung (STETZKA 1993, STETZKA & BAUMANN 2001, TREMP 1999), im Schwermetallmonitoring (SIEWERS & HERPIN 1998) und als Indikatoren für die ökologische Kontinuität von Waldstandorten (ROSE 1976; MCCUNE 2000) und neuerdings auch als Zeigerpflanzen für Klimafluktuationen genutzt (FRAHM & KLAUS 1997; VAN HERK *et al.* 2002).

Seit Anfang der 1990er Jahre ist infolge der drastisch gesunkenen Schwefeldioxidimmissionen die Anzahl epiphytischer Moose und Flechten z.B. in den Großstädten an Rhein und Ruhr wieder angestiegen (KRICKE 1998, 2002; STAPPER *et al.* 2000), wodurch mit Moosen und Flechten als Bioindikatoren hinsichtlich ihrer Einzelwirkung schwächere Störgrößen innerhalb von Ballungsräumen ortsaufgelöst dargestellt werden können. Die derzeit wirksamste Komponente sind luftgetragene Stickstoffverbindungen, die vornehmlich aus dem Straßenverkehr und der Landwirtschaft stammen (FRAHM 1998, 1999; FRAHM & SOLGA 1999; VAN HERK 1999; FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003) und nährstofftolerante Arten begünstigen. Rund zwei Drittel der Flechten, die in den vergangenen Jahren die Ruhrgebietsstädte wiederbesiedelt haben, weisen Nährstoffzahlen über vier auf, bedürfen also mindestens einer geringen Eutrophierung bzw. mineralreicher Rinde (STAPPER *et al.* 2000; FRANZEN 2001a, Kricke 2002). Veränderungen der Moosflora durch Stickstoff-Immissionen finden überhaupt erst seit kurzer Zeit Beachtung (FRAHM & SOLGA 1999).

Im Auftrag des Umweltamtes der Landeshauptstadt Düsseldorf haben die beiden Autoren 2003 eine immissionsbezogene Kartierung epiphytischer Flechten und Moose im gesamten Stadtgebiet von Düsseldorf durchgeführt (STAPPER & KRICKE 2004a, b). Wurden bei der ersten Flechtenkartierung im Jahr 1979 zu Zeiten hoher SO₂-Immissionswerte (KNABE 1981) nur vier gegenüber sauren Luftschadstoffen hoch resistente Flechtenarten angetroffen, so waren es 2003 insgesamt 76 epiphytische Flechten und 23 Moose. Heute hebt sich das Stadtzentrum hinsichtlich der immissionsökologischen Bewertung viel deutlicher als 1979 von der Peripherie ab, deren "bessere" Luftgütwerte (VDI 3799 Blatt 1) sich weitgehend mit den Ergebnissen einer 2001 durchgeführten landesweiten Untersuchung decken (FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003). In der vorliegenden Arbeit wird anhand von Karten gezeigt, dass im hochgradig versiegelten, aufgeheizten, verkehrsbelasteten und anhand der VDI 3799-Flechtendaten "hoch bis sehr hoch belastet" eingestuften Düsseldorfer Stadtzentrum die Artendiversität gering ist und der aus der Nährstoffzahl der Flechten (WIRTH 1992) ermittelte Eutrophierungsgrad der Baumstandorte erwartungsgemäß hoch. Zur Peripherie hin nehmen die Immissionsbelastung durch den motorisierten Straßenverkehr und andere Quellen, der Versiegelungsgrad der Baublöcke und die relative nächtliche Temperatur ab. Parallel dazu sinkt der Eutrophierungsgrad der Baumstandorte und die epiphytische Artendiversität steigt an. Inwieweit sich Moose und Flechten bzw. einzelne Arten der beiden Pflanzengruppen in diesem Verhalten ähneln oder unterscheiden ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Diese Frage ist insofern von Interesse, als in jüngster Zeit vielfach beide Pflanzengruppen bei "Flechtenkartierungen" erfasst und vor dem Hintergrund veränderter Luftschadstoffgemische die Kartierungsrichtlinien überarbeitet werden, wobei Moose zunehmend in das Blickfeld rücken (FRANZEN 2001a).

2 Methodik

Als Grundlage der Kartierung wurde ein Messnetz aus Rasterquadraten mit 1km Seitenlänge verwendet, das sich an den Rechts- und Hochwerten der Gauß-Krüger-Abbildung orientiert. Die Auswahl der Trägerbäume richtet sich weitgehend nach den Kriterien der VDI-Richtlinie 3799 Blatt 1 (VDI 1995). Die Einhaltung der Auswahlkriterien hatte mit Blick auf die Qualität der erho-

benen Daten Vorrang gegenüber dem angestrebten Ziel von mindestens sechs Bäumen pro Rasterquadrat. Bis auf drei Stieleichen (*Quercus robur*, "sauer") handelt es sich um Bäume mit "subneutraler" bzw. "mäßig saurer" Borke (Spitz- und Bergahorn, Winter- und Sommerlinde, Esche, einige Robinien), die auch in früheren Untersuchungen durch die Autoren gemeinsam kartiert wurden (siehe ebenso VORBECK & WINDISCH 2001). Der tatsächliche pH-Wert der Borke dieser Bäume wird in aktuell oder historisch belasteten Regionen möglicherweise wesentlich von der Art der Belastung durch Gase und Stäube bestimmt wird und kann im Rahmen teils großer statistischer Streuungen über alle untersuchten Baumarten *praktisch identisch* sein (KRICKE 2000). Im **Aufnahmebogen** wurden zusätzlich zu Trägerbaumart, Standortkoordinaten, Stammumfang und Borkentextur die Flächennutzung, die Art des nächstgelegenen Verkehrsweges und der Abstand zu diesem notiert.

An den Bäumen wurden alle in ca. 50 bis 200cm Höhe über dem Boden vorkommenden Moose und Flechten erfasst und zusätzlich die Frequenz der Arten in Aufnahmegittern entsprechend der VDI-Richtlinie 3799 Blatt 1 und dem EU-Richtlinienentwurf in seiner aktuellsten Fassung (ASTA *et al.* 2002, 2003) bestimmt (Abbildung 1). Während die VDI-Richtlinie 3799 nur bestimmte Flechten berücksichtigt und deren Frequenzsumme als **Luftgütwert** bezeichnet, werden nach dem EU-Richtlinienentwurf alle (Flechten)Arten erfasst und die Summe der Frequenzen in den vier Haupthimmelsrichtungen als **(Flechten)Diversitätswert** bezeichnet. Wenn in der vorliegenden Arbeit über Frequenzwerte geschrieben wird, so sind diese, abgesehen von der Luftgütekarte in Abbildung 2.1, immer in den vier Haupthimmelsrichtungen aufgenommen worden. Für die Darstellung in Rasterkarten wurden die Ergebnisse in Klassen eingeteilt, deren Breite über die mittlere Standardabweichung aller Rasterquadrate errechnet wurde. Die digitale Kartengrundlage wurde vom Vermessungs- und Katasteramt der Landeshauptstadt Düsseldorf zur Verfügung gestellt. Sofern nichts anderes angegeben ist, wurden Unterschiede auf dem Niveau $p \leq 0,05$ als statistisch signifikant bezeichnet.

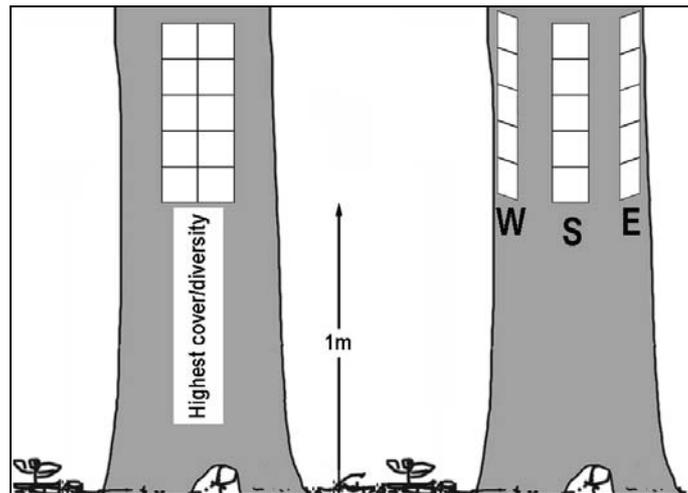


Abbildung 1: Vergleich der beiden Aufnahmeverfahren nach VDI 3799 Blatt 1, linke Seite, und dem EU-Richtlinienentwurf nach ASTA *et al.* (2002, 2003), rechte Seite.

Die Frequenzsumme, das ist die Anzahl der von den vorkommenden Flechtenarten besetzten Maschen, wird im Fall des VDI-Aufnahmegitters als "Luftgütwert" und im Fall des EU-Richtlinienentwurfes als "Diversitätswert" des Standortes bezeichnet.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Arteninventar

Eine immissionsbezogene Epiphytenkartierung zielt nicht auf vollständige Erfassung des tatsächlichen Arteninventars im Untersuchungsgebiet. Stattdessen werden die Arten als biologische Wirkungsindikatoren verwendet und auf ausgewählten Trägerbaumarten standardisiert erfasst. In Düsseldorf wurden an 1015 Bäumen im Mittel 10,8 Vorkommen nachgewiesen, also erheblich mehr als nur wenige Jahre zuvor in den Ruhrgebietsstädten Duisburg (6,2; FRANZEN 2001a) oder Dortmund (7,3; STAPPER 2001). Im Bereich der vom Düsseldorfer Stadtgebiet berührten Messtischblattquadranten, die anlässlich der landesweiten Epiphytenkartierung von Nordrhein-Westfalen bereits untersucht wurden (FRANZEN *et al.*, 2002; FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003), ist innerhalb von kaum mehr als zwei Jahren die mittlere Artenzahl geringfügig angestiegen und zeigt an, dass weiterhin epiphytische Arten einwandern und sich im Gebiet ausbreiten. Das Artenspektrum (Tabelle 1) umfasst 23 Moose und 76 Flechten und ist im Vergleich zu ähnlichen Untersuchungen sehr umfangreich. Einige Arten wurden sogar zum ersten Mal in Nordrhein-Westfalen oder im Rheinland nachgewiesen (vgl. DÜLL 1980 und DÜLL *et al.* 1996 oder HEIBEL 1999). Es handelt es sich überwiegend um Halblicht- und Lichtzeiger (alle Zeigerwerte nach DÜLL 1992 bzw. WIRTH 1992). Extreme Kälte- oder Wärmezeiger fehlen, und hinsichtlich der Kontinentalitätszahl liegt das Maximum bei 5 für die Moose und 6 für die Flechten. Der Feuchtigkeitsbedarf der Flechten ist etwas geringer als der der Moose. Hinsichtlich der Reaktionszahlen ergibt sich für beide Gruppen eine breite Verteilung. Nährstoffzahlen wurden bisher nur für Flechten veröffentlicht. Die niedrigsten Werte (N=1) weisen *Placynthiella icmalea* und *Pseudevernia furfuracea* auf, den höchsten (N=9) *Caloplaca citrina*, gefolgt von (N=8) *Physcia caesia* und *Lecanora muralis*, die eigentlich Gesteinsbewohner sind, in Düsseldorf aber auch auf Borke vorkommen. Weitere Zeigerarten für "nährstoffreiche Habitate, häufige Staubimprägnierung oder mäßige Düngung durch Tiere" mit $N > 6$ (WIRTH, 1992) sind u. a. *Phaeophyscia nigricans* und *P. orbicularis* sowie *Physconia grisea* und *Xanthoria candelaria*. 67% der Flechten weisen Nährstoffzahlen ≥ 4 auf (N-Median über alle Flechten 4,0), bedürfen also mindestens einer geringen natürlichen oder anthropogenen Nährstoffanreicherung oder mineralreicher Borke.

Mehr noch als die Gesamtartenzahl lässt die räumliche Verbreitung der Moose und Flechten erste Rückschlüsse über die Lebensbedingungen im Untersuchungsgebiet zu. Die Anzahl der Moose und Flechten pro Baum sowie die daraus errechneten mittleren Artenzahlen pro Rasterquadrat sind in Abbildung 4.1 und 4.2 dargestellt. Im Stadtzentrum sind die mittleren Artenzahlen beider Pflanzengruppen gering und steigen zur Peripherie hin an. Die Luftgütekarte nach VDI 3799 Blatt 1 (Abbildung 2.1) beruht nicht nur auf der Präsenz ausgewählter Flechten, sondern verwendet deren mittlere Frequenzsumme als Maß für die lufthygienische Belastung. Einige dieser Flechten jedoch werden durch verkehrsbedingten Nährstoffeintrag gefördert, weshalb sie von einigen Autoren in einem modifizierten Bewertungsverfahren ("Verkehrsbezogene Luftgütekarte") ausgeschlossen werden (VORBECK & WINDISCH 2001; FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003; STAPPER & KRICKE 2004a, b). Die Flechtendiversitätskarte (ASTA *et al.* 2002, 2003; hier nicht gezeigt) oder die auf Moos- und Flechtendaten basierende Epiphytendiversitätskarte (Abbildung 2.2) benutzt den "Diversitätswert" (s. Abbildung 1) als Maß für die Belastung. Beide Verfahren kommen zu einer weitgehend ähnlichen Bewertung des Stadtgebietes hinsichtlich der räumlichen Variabilität von Immissionsbelastung und lokalklimatischen Bedingungen, obwohl die Aufnahme der Epiphyten auf der "am besten bewachsenen Stammseite" (VDI 3799) und die Aufnahme in den vier Himmelsrichtungen (EU-Verfahren) grundsätzlich verschiedene Ansätze darstellen, weil einige Epiphyten bestimmte Orientierungen bevorzugen.

Flechten	H (%)	Flechten	H (%)
# <i>Amandinea punctata</i> (HOFFM.) COPPINS & SCHEIDEGG.	54,7	#G6 <i>Physcia tenella</i> (Scop.) DC.	97,4
G1 <i>Bacidia adastrata</i> SPARRIUS & APTROOT	2,4	<i>Physcia tribacioides</i> NYL.	0,1
# <i>Buellia griseovirens</i> (TURNER & BORRER EX SM.) ALMB.	0,1	# <i>Physconia distorta</i> (WHIT.) LAUNDON	0,1
<i>Caloplaca citrina</i> (HOFFM.) TH.FR.	0,7	# <i>Physconia enteroxantha</i> (NYL.) POELT	0,1
<i>Caloplaca holocarpa</i> (HOFFM. EX. ACH.) WADE	0,7	# <i>Physconia grisea</i> (LAM.) POELT.	3,8
# <i>Candelaria concolor</i> (DICKS.) STEIN	9,3	# <i>Physconia perisidiosa</i> (ERICHSEN) MOBERG	0,1
<i>Candelariella aurella</i> (HOFFM.) ZAHLBR.	0,4	<i>Placynthiella icmalea</i> (ACH.) COPPINS & P. JAMES	3,5
#G2 <i>Candelariella reflexa</i> (NYL.) LETTAU	67,7	# <i>Pleurosticta acetabulum</i> (NECK.) ELIX & LUMBSCH	0,7
<i>Candelariella vitellina</i> (HOFFM.) MÜLL.ARG.	9,0	# <i>Pseudevernia furfuracea</i> (L.) ZOPF	0,8
# <i>Candelariella xanthostigma</i> (ACH.) LETTAU	0,3	<i>Punctelia borreri</i> (SM.) KROG	0,3
<i>Cladonia spec.</i>	1,0	# <i>Punctelia subrudecta</i> (NYL.) KROG	26,3
<i>Dimerella pineti</i> (SCHRADER EX ACH.) VEZDA	0,1	<i>Punctelia ulophylla</i> (ACH.) VANHERK & APTROOT	32,4
<i>Diploicia canescens</i> (J.DICKS.) A.MASSAL.	0,1	# <i>Ramalina farinacea</i> (L.) ACH.	8,1
# <i>Evernia prunastri</i> (L.) ACH.	46,9	# <i>Ramalina pollinaria</i> (WESTR.) ACH.	0,2
# <i>Flavoparmelia caperata</i> (L.) HALE	23,9	# <i>Ramalina sp.</i>	0,3
<i>Flavoparmelia soredians</i> (NYL.) HALE	5,9	<i>Rinodina gennarii</i> BAGL.	0,3
# <i>Flavopunctelia flaventior</i> (STIRTON) HALE	0,1	<i>Rinodina pityrea</i> ROPIN & H. MAYRHOFER	0,5
<i>Hyperphyscia adglutinata</i> (FLÖRKE) MAYRH. & POELT	0,7	<i>Strangospora pinicola</i> (MASSAL.) KÖRBER	6,5
# <i>Hypocenomyce scalaris</i> (ACH. EX LILJ.) M.CHOISY	0,1	<i>Trapeliopsis flexuosa</i> (FR.) COPPINS & P.JAMES	0,4
# <i>Hypogymnia physodes</i> (L.) NYL.	33,7	# <i>Usnea hirta</i> (L.) WEBER EX WIGG.	0,2
# <i>Hypogymnia tubulosa</i> (SCHAER.) HAV.	7,8	# <i>Usnea sp.</i>	0,7
<i>Hypotrachyna revoluta</i> (FLÖRKE) HALE	1,3	# <i>Xanthoria candelaria</i> (L.) TH.FR.	43,0
<i>Hysterium sp. (+)</i>	0,1	# <i>Xanthoria parietina</i> (L.) TH.FR.	42,5
# <i>Lecanora allophana</i> NYL.	0,1	# <i>Xanthoria polycarpa</i> (HOFFM.) RIEBER	44,3
# <i>Lecanora carpineae</i> (L.) VAIN.	0,4		
# <i>Lecanora chlorotera</i> NYL.	0,6	Moose	H (%)
<i>Lecanora conizaeoides</i> NYL. EX CROMBIE	8,0	<i>Amblystegium serpens</i> (HEDW.) B.S. G.	1,0
#G3 <i>Lecanora expallens</i> ACH.	32,8	<i>Brachythecium rutabulum</i> (HEDW.) B.S. G.	0,5
#G4 <i>Lecanora hagenii</i> (ACH.) ACH.	12,1	<i>Bryum argenteum</i> (HEDW.)	4,2
<i>Lecanora muralis</i> (SCHREBER) RABENH.	2,0	G7 <i>Bryum capillare</i> agg.	0,8
# <i>Lecanora pulicaris</i> (PERS.) ACH.	0,1	<i>Ceratodon purpureus</i> (HEDW.) BRID.	6,0
<i>Lecanora sp.</i>	0,1	<i>Dicranoweisia cirrata</i> (HEDW.) LINDB.	22,8
<i>Lecanora symmicta</i> (ACH.) ACH.	0,2	<i>Dicranum montanum</i> HEDW.	0,1
# <i>Lecidella elaeochroma</i> (ACH.) M.CHOISY	1,3	<i>Dicranum tauricum</i> SAP.	0,3
<i>Lecidella scabra</i> (TAYLOR) HERTEL & LEUCKERT	0,3	<i>Eurhynchium praelongum</i> (HEDW.) B.S. G.	0,1
#G5 <i>Lepraria incana</i> (L.) ACH.	13,8	<i>Frullania dilatata</i> (L.) DUM.	1,2
# <i>Melanelia exasperatula</i> (NYL.) ESSL.	4,9	<i>Grimmia pulvinata</i> (HEDW.) SM.	10,4
# <i>Melanelia fuliginosa</i> (FR. EX DUBY) ESSL.	3,6	<i>Hedwigia ciliata</i> (HEDW.) P.BEAUV.	0,1
# <i>Melanelia subaurifera</i> (NYL.) ESSL.	61,5	<i>Hypnum cupressiforme</i> HEDW. s. str.	13,1
# <i>Parmelia saxatilis</i> (L.) ACH.	0,5	<i>Leskea polycarpa</i> ERH. EX HEDW.	0,6
# <i>Parmelia sulcata</i> TAYLOR	76,9	G8 <i>Orthotrichum affine</i> BRID.	24,0
# <i>Parmelina tiliacea</i> (HOFFM.) HALE	0,6	<i>Orthotrichum diaphanum</i> BRID.	37,4
<i>Parmotrema chinense</i> (OSBECK) HALE & AHTI	6,7	<i>Orthotrichum lyellii</i> HOOK. & TAYL.	0,7
<i>Phaeophyscia nigricans</i> (FLÖRKE) MOBERG	37,6	<i>Radula complanata</i> (L.) DUMORT.	0,2
# <i>Phaeophyscia orbicularis</i> (NECKER) MOBERG	81,0	<i>Tortula latifolia</i> BRUCH. EX HARTM.	0,1
<i>Physcia caesia</i> (HOFFM.) FÜRNR.	21,3	<i>Tortula muralis</i> HEDW.	1,2
<i>Physcia dubia</i> (HOFFM.) LETTAU	9,4	<i>Tortula papillosa</i> WILS.	0,4
# <i>Physcia stellaris</i> (L.) NYL.	3,2	<i>Ulota crispa</i> (HEDW.) BRID. s.l	0,7

Tabelle 1: Arteninventar

Nomenklatur nach SCHOLZ (2000) und KOPERSKI *et al.* (2000). H, relative Häufigkeit (%) der Art an 1015 untersuchten Bäumen. G, Gruppe mit weiteren Arten: G1, *B. arnoldiana* (KOERB.) WIRTH & VEZDA; G2, *C. xanthostigma* (ACH.) LETTAU; G3, unterschiedlich hohe Anteile von *L. compallens* VAN HERK & APTROOT und *L. barkmaniana* APTROOT & VAN HERK; G4, *L. dispersa* (PERS) SOMMERF.; G5, *L. lobificans* NYL., *L. jackii* TØNSBERG und *L. rigidula* (DE LESD.) TØNSBERG (?); G6, *P. adscendens* (FR.) H. OLIVIER; G7, *Bryum capillare* HEDW. und *B. flaccidum* BRID.; G8, zusätzlich alle sterilen *Orthotrichum*-Vorkommen ohne Brutkörper und Glasspitzen. #, gehört zu den gemäß VDI 3799 Blatt 1 berücksichtigten Flechten; +, nicht lichenisierter Pilz.

Die Anzahl der Moose und ihre Häufigkeit auf den untersuchten Bäumen sind in Düsseldorf ausreichend hoch, dass sich die mittleren Frequenzsummen der Moose (0,0 bis 9,7) bei einer Klassenbreite von 3,0 in einer Moosdiversitätskarte auf vier Klassen verteilt darstellen lassen. Diese Karte (nicht gezeigt) ähnelt weitgehend der Darstellung der mittleren Anzahl Moose pro Baum (Abbildung 4.1).

3.2 Zusammenhang zwischen relativer nächtlichen Temperatur und Artendiversität

Das klimatisch auffälligste Folgeprodukt der Stadtlandschaft ist die städtische Überwärmung, ein Phänomen, das vor allem abends und nachts spürbar wird (KUTTLER 1998). Die Klimaanalyse der Stadt Düsseldorf (STADT DÜSSELDORF 1995) enthält eine auf 21 Messfahrten beruhende Karte der relativen nächtlichen Temperatur in 2m Höhe für das gesamte Stadtgebiet, nach der die maximal mögliche Temperaturdifferenz in Strahlungsnächten zwischen zwei verschiedenen Gebieten neun Kelvin beträgt. Die mittlere, auf Null gesetzte Stufe, repräsentiert die Bereiche ohne zusätzliche Erwärmung oder Abkühlung. Diese Karte wurde unter Mittelung der Temperaturangaben für die jeweiligen Baumstandorte eines Rasterquadrates in eine Rasterkarte überführt, die in **Abbildung 3.1** dargestellt ist. Sie berücksichtigt im Unterschied zu den anderen Rasterkarten nur die 139 Quadrate *innerhalb* der Grenzen von Düsseldorf, in denen mindestens drei geeignete Trägerbäume gefunden wurden (104 Quadrate mit mindestens 6 Bäumen). Klar erkennbar ist sogar in der Rasterdarstellung die durch eine große Grünanlage (Hofgarten, gelb) unterbrochene innerstädtische Wärmeinsel (dunkel)rot.

Wie **Abbildung 5** zeigt, steigen die mittleren Moos- bzw. Flechtenartenzahlen pro Baum und die anhand der Aufnahmegitter in den vier Haupthimmelsrichtungen bestimmten mittleren Frequenzwerte beider Pflanzengruppen mit abnehmender relativer nächtlicher Temperatur (RNT) signifikant an. Die dreidimensionale Darstellung (Abbildung 5.1) deutet darüber hinaus an, dass mit sinkender relativer Nachttemperatur im Mittel weniger Arten pro Baum und Rasterquadrat vorkommen müssen, um in der Summe dennoch hohe Frequenzwerte zu ermöglichen, also mehrere Thalli ein und derselben Art, ggf. sogar hoher Deckungsgrad innerhalb des von den Gittern erfassten Stammbereiches. Der Beitrag der Moose zur Frequenzsumme aller Epiphyten ist deutlich geringer als ihr Anteil am Artenspektrum. Das Verhältnis der Moose zu den Flechten sinkt mit steigender relativer Nachttemperatur. Demnach werden Moose durch die städtische Überwärmung stärker beeinträchtigt als die Flechten, oder, anders ausgedrückt, sie profitieren von nächtlicher Abkühlung besser als die Flechten. Das Verhältnis der jeweiligen mittleren Artenzahlen von Moosen zu Flechten bringt dies stärker zum Ausdruck als der Quotient der jeweiligen Frequenzwerte, weil immissionstolerante Moose wie z.B. *Orthotrichum diaphanum* (FRANZEN 2001b) meist einen hohen Beitrag zur Frequenzsumme der Epiphyten leisten, während empfindlichere Arten oft nur mit wenigen Exemplaren vertreten sind. Bis auf *Dicranoweisia cirrata* (Abkürzung in den Diagrammen mit den jeweils ersten drei Buchstaben des Gattungs- und Artnamens zu "Diccir") und *Grimmia pulvinata* unter den Moosen sowie *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* unter den Flechten reagieren alle in **Abbildung 7** und **8** berücksichtigten Moose und Flechten auf den Anstieg der relativen nächtlichen Temperatur mit einer Abnahme ihrer mittleren Frequenz. Die Auswahl dieser 19 Arten für die weiteren Untersuchungen erfolgte aufgrund von deren relativer Häufigkeit auf den Bäumen, und, im Fall von *Flavoparmelia caperata* und *Lecanora conizaeoides*, aufgrund der für diese Arten veröffentlichten Sensitivität bzw. Toleranz gegenüber Luftschadstoffen.

3.3 Zusammenhang zwischen Eutrophierungsgrad und Artendiversität

Die Epiphytenflora in Düsseldorf ist zwar im Verlaufe der letzten Jahrzehnte erheblich artenreicher geworden, allerdings ist sie auch, dem bundes- und landesweiten Trend folgend (FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003), geprägt von eutrophierungstoleranten Arten, insbesondere in der Innenstadt. Die anhand der mittleren, ungewichteten Nährstoffzahlen von Flechten erstellte Karte zum Eutrophierungsgrad der Baumstandorte (s. Abbildung 3.2) zeigt dies sehr deutlich. Als Ursachen hierfür werden in erster Linie die in Autoabgasen enthaltenen Stickstoffoxide und deren Folgeprodukte sowie mit Nährstoffen beladener Staub angesehen (die Mittelwertbildung ordinaler Größen, wie hier der Nährstoffzahlen, ist zwar mathematisch nicht korrekt, aber gängige Praxis). Für die Mehrzahl der Epiphyten ist Stickstoff ein Mangelfaktor, sie sind folglich an nährstoffarme Lebensräume angepasst. Daher können sich gegenüber einer Düngung aus der Luft ("Lufteutrophierung") empfindliche Arten vielerorts nicht ansiedeln oder sterben ab.

Wie **Abbildung 6** zeigt, ist die mittlere Anzahl der Moose oder Flechten auf den Bäumen oder die Frequenzsumme der Moose und Flechten umso geringer, je höher die mittlere Nährstoffzahl des Rasterquadrates ist. Das Verhältnis der Moose zu Flechten auf den Bäumen ist zwar insgesamt unabhängig von der mittleren Nährstoffzahl in den Rasterquadraten, doch zeigt sich ein Trend zu höheren Anteilen von Moosen in Rasterquadraten mit hohen Frequenzsummen beider Pflanzengruppen. Bei gleichzeitiger Betrachtung der relativen nächtlichen Temperatur fällt auf, dass eine hohe Anzahl verschiedener Moose pro Baum nur bei starker nächtlicher Abkühlung und niedriger mittlerer Nährstoffzahl vorkommt, während bei den Flechten auch bei mäßiger Überwärmung oder mittlerer Eutrophierung der Baumstandorte noch zahlreiche Arten angetroffen werden. Da die in Düsseldorf vorkommenden Flechten Standorteutrophierung aber nicht generell besser tolerieren als die hier vorkommenden Moose, müssen einige Arten sogleich tolerant gegenüber Eutrophierung als auch relativer nächtlicher Überwärmung sein. Dies trifft in besonderem Maße für die beiden Flechten *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* zu, die nicht nur nächtliche Überwärmung tolerieren, sondern mit steigender mittlerer Nährstoffzahl auch steigende mittlere Frequenzwerte aufweisen. Die Mehrzahl der häufigen Arten beider Pflanzengruppen jedoch (s. Abbildung 7 und 9) zeigt abnehmende Frequenzwerte bei steigender mittlerer Nährstoffzahl, und für die Moose *Grimmia pulvinata*, *Orthotrichum affine* und *O. diaphanum* sowie für die Flechten *Amandinea punctata*, *Xanthoria parietina* und *X. polycarpa* ergibt sich kein Zusammenhang zwischen Nährstoffzahl und Frequenzwert. Die ökologischen Zeigerwerte dieser drei Flechten und Düsseldorf häufigster Flechte *Physcia tenella* (in einer Gruppe mit *Physcia adscendens*) sind weitgehend identisch, dennoch nimmt die Frequenz dieser beiden *Physcia*-Arten oberhalb einer mittleren Nährstoffzahl von 6 deutlich ab. Dies liegt möglicherweise daran, dass eutrophierte Rasterquadrate tendenziell wärmer sind (s. Abbildung 6) und *P. tenella* mit steigender nächtlicher relativer Temperatur seltener wird (Abbildung 8). Andererseits trifft das wiederum auch auf *Xanthoria polycarpa* zu (Abbildung 8), so dass zusätzliche Faktoren in Betracht zu ziehen sind, z.B. artspezifisches Verhalten gegenüber bestimmten Immissionen.

3.4 Zusammenhang zwischen der Intensität des Straßenverkehrs und der Artendiversität

Der Straßenverkehr gilt gemeinhin als Hauptursache für die Eutrophierung der Baumstandorte, doch es liegen bisher nur wenige Studien vor, in denen ein direkter Zusammenhang zwischen verkehrsbedingten Immissionen und Flechtenfrequenzen (München; VORBECK & WINDISCH 2001) bzw. Moos- und Flechtenfrequenzen (FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003) untersucht wurde. In Düsseldorf wurde der Verkehrseinfluss am Standort über den Abstand des Baumes zum

Fahrbahnrand, die Art des Verkehrsweges und die Verkehrsdichte abgeschätzt, sodass es nun möglich ist, einen Zusammenhang zwischen Verkehr auf die Epiphyten generell und unter Berücksichtigung der städtischen Überwärmung zu untersuchen.

Artcode	Mittlere Frequenz							
	Alle Temperaturkategorien				RNT \geq 0 Kelvin			
	Verkehrskategorie "gering" "hoch"		Veränderung	Signifikanz	Verkehrskategorie "gering" "hoch"		Veränderung	Signifikanz
<i>Amapun</i>	1,63	1,04	-	*	1,96	0,83	-	****
<i>Canref</i>	2,68	2,22	-	n.s.	2,81	1,49	-	***
<i>Diccir</i>	1,13	0,40	-	****	1,63	0,29	-	****
<i>Evepru</i>	0,75	0,43	-	*	0,59	0,38	-	n.s.
<i>Flacap</i>	0,18	0,10	-	n.s.	0,30	0,08	-	***
<i>Gripul</i>	0,05	0,06	+	n.s.	0,07	0,04	-	n.s.
<i>Hypcup</i>	0,30	0,04	-	****	0,30	0,01	-	****
<i>Hypphy</i>	0,75	0,48	-	n.s.	0,44	0,42	-	n.s.
<i>Lecon</i>	0,25	0,12	-	n.s.	0,19	0,07	-	n.s.
<i>Ortaff</i>	0,32	0,17	-	n.s.	0,41	0,10	-	****
<i>Ortdia</i>	1,07	0,90	-	n.s.	1,26	0,75	-	n.s.
<i>Melsba</i>	1,89	0,85	-	****	1,22	0,82	-	n.s.
<i>Parsul</i>	3,27	1,39	-	****	2,89	1,29	-	****
<i>Phanig</i>	0,20	1,69	+++	****	0,22	1,64	+++	***
<i>Phaorb</i>	3,95	6,29	++	***	4,52	6,21	+	n.s.
<i>Phyten</i>	14,04	11,17	-	****	13,22	10,08	-	**
<i>Xancan</i>	1,48	0,87	-	*	1,26	0,65	-	n.s.
<i>Xanpar</i>	0,63	0,39	-	n.s.	0,74	0,33	-	**
<i>Xanpol</i>	1,45	0,60	-	****	0,44	0,53	+	n.s.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Verkehrsintensität und der mittleren Frequenz häufiger Moose und Flechten.

Verkehrskategorien: "gering", >10m Distanz zu gering befahrenen Wirtschaftswegen und Nebenstraßen in Wohngebieten; "hoch", <10m Distanz zur Fahrbahn und zwei- bis mehrspurige Hauptstraße bzw. Autobahn. Veränderungen gegenüber Kategorie "gering". Linke Spalten: alle Temperaturkategorien; rechte Spalten: nur Baumstandorte in Rasterquadraten mit RNT \geq Null Kelvin. Signifikanzen (WELCH *t*-Test): *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,005$; ****, $p <$ oder $\ll 0,001$, n.s., nicht signifikant. *Phyten* und *Canref* schließen jeweils die anderen Arten der Gruppe ein (vergl. Tabelle 1).

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse für den Vergleich der Verkehrskategorien "hoch" (<10m Distanz zur Fahrbahn und zwei- bis mehrspurige Hauptstraße bzw. Autobahn) und "gering" (>10m Distanz zu gering befahrenen Wirtschaftswegen und Nebenstraßen in Wohngebieten) zusammen und zeigt zudem den Unterschied zwischen den beiden Verkehrskategorien in nachts überwärmten Rasterquadraten (RNT \geq 0; für einen entsprechenden Vergleich der beiden Verkehrskategorien an nachts relativ kühlen Standorten ist der Umfang der Stichprobe "Verkehr hoch" zu gering). Für acht der neunzehn häufigen Moose und Flechten ergibt sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Verkehrsbelastung und mittlerer Frequenz. Neun Arten weisen unter hoher Verkehrsbelastung signifikant geringere mittlere Frequenzwerte auf, und für zwei Flechten ergeben sich höhere Frequenzen. Dies sind *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis*, die beiden Flechten, die auch relative nächtliche Erwärmung tolerieren und mit steigender Eutrophierung des Standortes häufiger auftreten. *Phaeophyscia nigricans* zeigt das gleiche Verhalten beim Vergleich der beiden Verkehrskategorien in nächtlich temperaturneutralen bzw. erwärmten Rasterquadraten (RNT \leq 0K), wohingegen der Frequenzanstieg von *Ph. orbicularis* dann nicht mehr signifikant ist. Die Flechten *Amandinea punctata* und *Physcia tenella* und die

Moose *Dicranoweisia cirrata* und *Hypnum cupressiforme* wurden bereits in der landesweiten Kartierung von Nordrhein-Westfalen (FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003) als "verkehrsmeidende" Arten identifiziert, *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* als "Verkehrszeiger" (siehe Tabelle 3). Diese Übereinstimmung war nicht von vornherein zu erwarten. Denn es ist davon auszugehen, dass der Unterschied zwischen den beiden übereinstimmend definierten Verkehrskategorien "hoch" und "gering" für Nordrhein-Westfalen größer ist als innerhalb des Stadtgebietes von Düsseldorf. *Orthotrichum diaphanum* zeigt in Düsseldorf bei einer Auswertung der gemäß VDI 3799 aufgenommenen Frequenzen einen leichten Anstieg der Frequenz mit zunehmendem Verkehrseinfluss, nicht aber in der bei der Auswertung der nach EU-Richtlinie erhobenen Frequenzen. Dies kann sowohl auf der unterschiedlichen Aufnahmemethodik beruhen als auch darauf, dass selbst in relativ verkehrsarmen Rasterquadraten von Düsseldorf verkehrsbedingte Immissionen höher sein dürften, als in stadtfernen, verkehrsarmen und maximal 100m höher gelegenen Gebieten von Nordrhein-Westfalen.

Verhalten in den Verkehrskategorien	Düsseldorf (19 häufige Arten)	Nordrhein-Westfalen
Frequenz sinkt mit zunehmender Verkehrsbelastung	<i>Amandinea punctata</i> <i>Dicranoweisia cirrata</i> <i>Hypnum cupressiforme</i> <i>Parmelia sulcata</i> <i>Physcia tenella</i> ? <i>Candelariella reflexa</i> ? <i>Flavoparmelia caperata</i> ? <i>Orthotrichum affine</i>	<i>Amandinea punctata</i> <i>Dicranoweisia cirrata</i> <i>Hypnum cupressiforme</i> <i>Lecanora expallens</i> <i>Lepraria incana</i> <i>Parmelia saxatilis</i> <i>Physcia tenella</i> <i>Ramalina farinacea</i>
Frequenz steigt mit zunehmender Verkehrsbelastung "Verkehrszeiger"	<i>Phaeophyscia nigricans</i> ? <i>Phaeophyscia orbicularis</i>	<i>Grimmia pulvinata</i> <i>Orthotrichum diaphanum</i> <i>Phaeophyscia nigricans</i> <i>Phaeophyscia orbicularis</i> <i>Physcia dubia</i> <i>Xanthoria parietina</i>

Tabelle 3: Epiphytische Moose und Flechten, die auf zunehmende Belastung des Standortes durch Straßenverkehr mit einer signifikanten Abnahme oder Zunahme ihrer Frequenz reagieren. Vergleich der Ergebnisse in Düsseldorf mit denen aus einer vorangegangenen Studie in Nordrhein-Westfalen (FRANZEN-REUTER & STAPPER, 2003). Ein ? bezeichnet Arten, deren Verhalten in der Stadt noch nicht so gut abgesichert ist.

VORBECK & WINDISCH (2001) untersuchten die Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen in München. Auch hier erwiesen sich *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* und, wie in NRW, *Xanthoria parietina* als durch Verkehr geförderte Flechten. *Xanthoria polycarpa* verhielt sich indifferent, und alle anderen Flechten, deren Frequenzen in Düsseldorf oder NRW bei zunehmender Verkehrsbelastung sinken, zeigten in München das gleiche Verhalten. Aufgrund von Korrelationen der Flechtendaten mit verkehrsbezogenen Daten (DTV, Immissionsberechnungen) folgerten VORBECK & WINDISCH (2001), dass in erster Linie schadstoffbeladener Staub für die Veränderungen der Flechtenfrequenzen entlang stark befahrener Straßen verantwortlich ist. Stickstoffoxide hingegen, die sich als Gase rasch ausbreiten können, wurde nur eine untergeordnete Rolle beigemessen, da bereits in geringen Abständen zu Hauptstraßen die Luftgütewerte rasch wieder anstiegen. Ob Flechten überhaupt in nennenswerten Mengen Stickoxide, sei als Gas oder in Form von Anionen, aufnehmen und metabolisieren, ist zurzeit noch unklar. Auch in Düsseldorf (STAPPER & KRICKE 2004a, b) erholt sich die

Flechtenflora sehr rasch mit steigendem Abstand zu sehr hoch belasteten Standorten weg in die einmündenden Nebenstraßen mit jeweils ähnlicher Bebauungsstruktur und lässt vermuten, dass der Faktor Straßenverkehr gegenüber dem Faktor Stadtklima stärker ins Gewicht fällt. Eine exakte Trennung zwischen dem Einfluss von Verkehrsimmissionen einerseits und stadtklimatischen Effekten, also relativer Trockenheit, starker Aufheizung am Tage und geringer bzw. langsamer nächtlicher Abkühlung andererseits ist auch in Düsseldorf anhand der Epiphytendaten letztlich nicht möglich. Auffallend ist die Artenarmut der Epiphytenflora auf Bäumen entlang verkehrsreicher enger schluchtartiger Straßen - insbesondere hier kommen *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis* mit hoher Regelmäßigkeit vor - im Vergleich zu nahegelegenen breiten und locker bebauten, mindestens ebenso stark frequentierten Durchgangsstraßen, die wahrscheinlich besser durchlüftet sind.

4 Schlussfolgerungen

Mit Blick auf die gemeinsame Erfassung von Moosen und Flechten als Monitororganismen für die lufthygienische Belastung lassen die oben beschriebenen Beobachtungen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Mit ein- und demselben Aufnahmeverfahren können epiphytische Moose und Flechten quantitativ erfasst und die Ergebnisse in separaten Karten für jede Pflanzengruppe dargestellt werden.
- Die Mehrzahl der häufigen Epiphyten - das sind in der Regel diejenigen, die auch den höchsten Beitrag zur Frequenzsumme in Aufnahmen mit Zählgittern leisten - zeigt einen Rückgang der Frequenz mit steigender nächtlicher relativer Temperatur am Baumstandort. Sie sind demnach Indikatoren für die negativen Effekte des Stadtklimas. Dies trifft, abhängig vom Artenspektrum, für Moose möglicherweise in größerem Maße zu als für Flechten.
- Die Mehrzahl der epiphytischen Moose und Flechten meidet stark eutrophierte Standorte. Es gibt aber Flechten, die auch an solchen Standorten mit großer Häufigkeit vertreten sind.
- Sowohl Moose als auch Flechten indizieren Belastungen, die durch Straßenverkehr verursacht sind. Ob dies gasförmige Substanzen sind, z.B. Stickstoffoxide und ihre Folgeprodukte oder in der Hauptsache mit Nähr- und Schadstoffen beladener Staub, ist derzeit noch unklar. Es ist aber keineswegs so, dass nährstofftolerante Flechtenarten gleichzeitig auch tolerant gegenüber verkehrsbedingten Belastungen sind. Dies betrifft die häufigen Flechten *Amandinea punctata*, *Physcia tenella* und *P. adscendens* und möglicherweise auch *Candelariella reflexa*, *C. xanthostigma* sowie *Xanthoria candelaria*.
- Bioindikation der lufthygienischen Belastung mit Epiphyten sollte sich fortan nicht auf Flechten beschränken, sondern Moose als sensitive Monitororganismen einbeziehen. Derzeit ist die Anzahl epiphytischer Moosarten in einigen Industrie-geprägten Bundesländern noch relativ gering, doch sie wird in den kommenden Jahren infolge Wiedereinwanderung weiter ansteigen. Mit zunehmender Kenntnis über die ökologischen Ansprüche der einzelnen Arten wird eine immer genauere Bewertung der Standortbedingungen möglich werden.

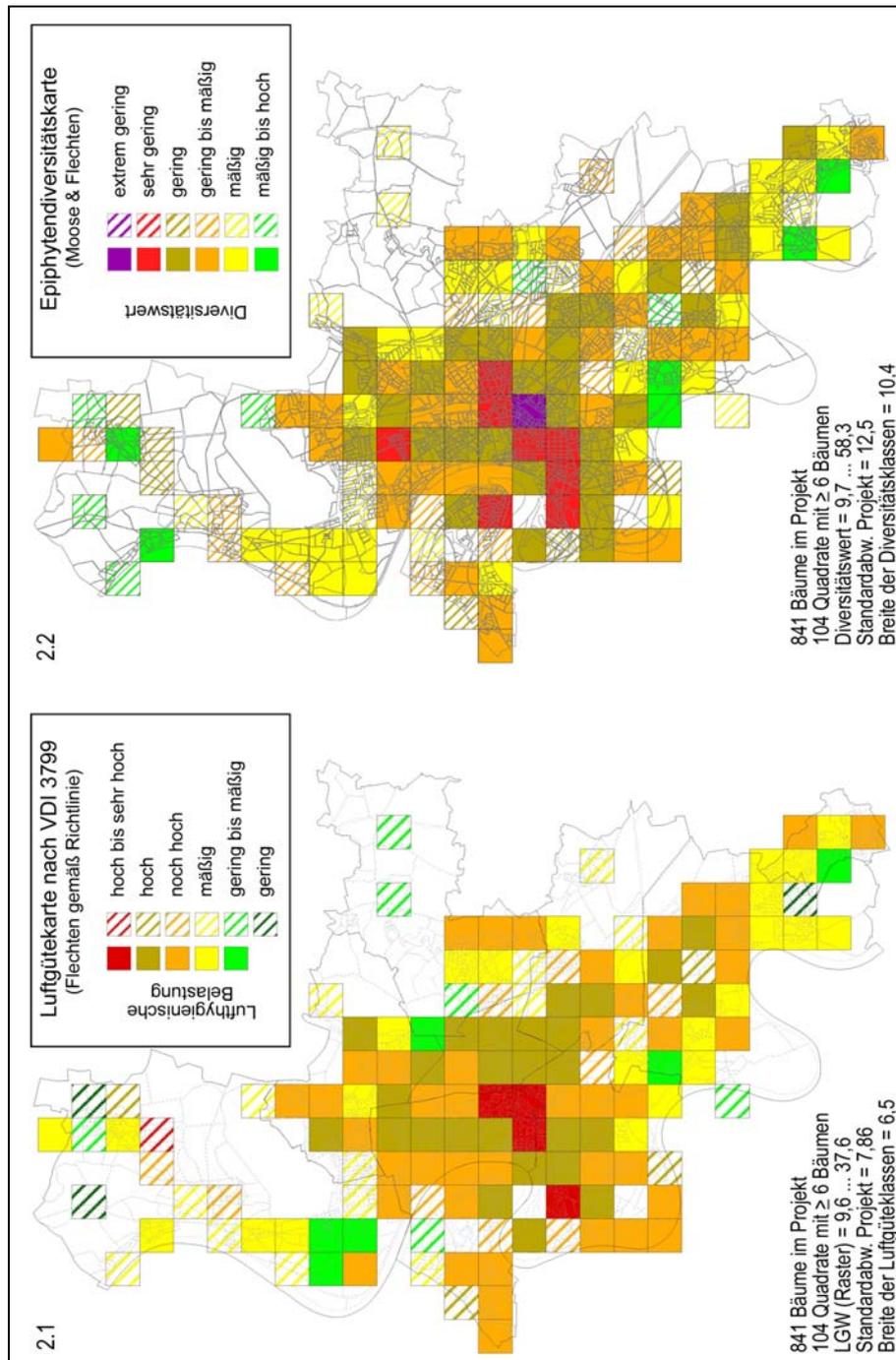


Abbildung 2: Luftgütekarte nach VDI 3799 und Epiphytendiversitätskarte in Anlehnung an ASTA *et al.* (2003, 2004). Schraffur: 3 bis 5 Trägerbäume, alle anderen mindestens 6 Bäume pro Rasterquadrat. Nicht benachbarte Klassen unterscheiden sich signifikant.

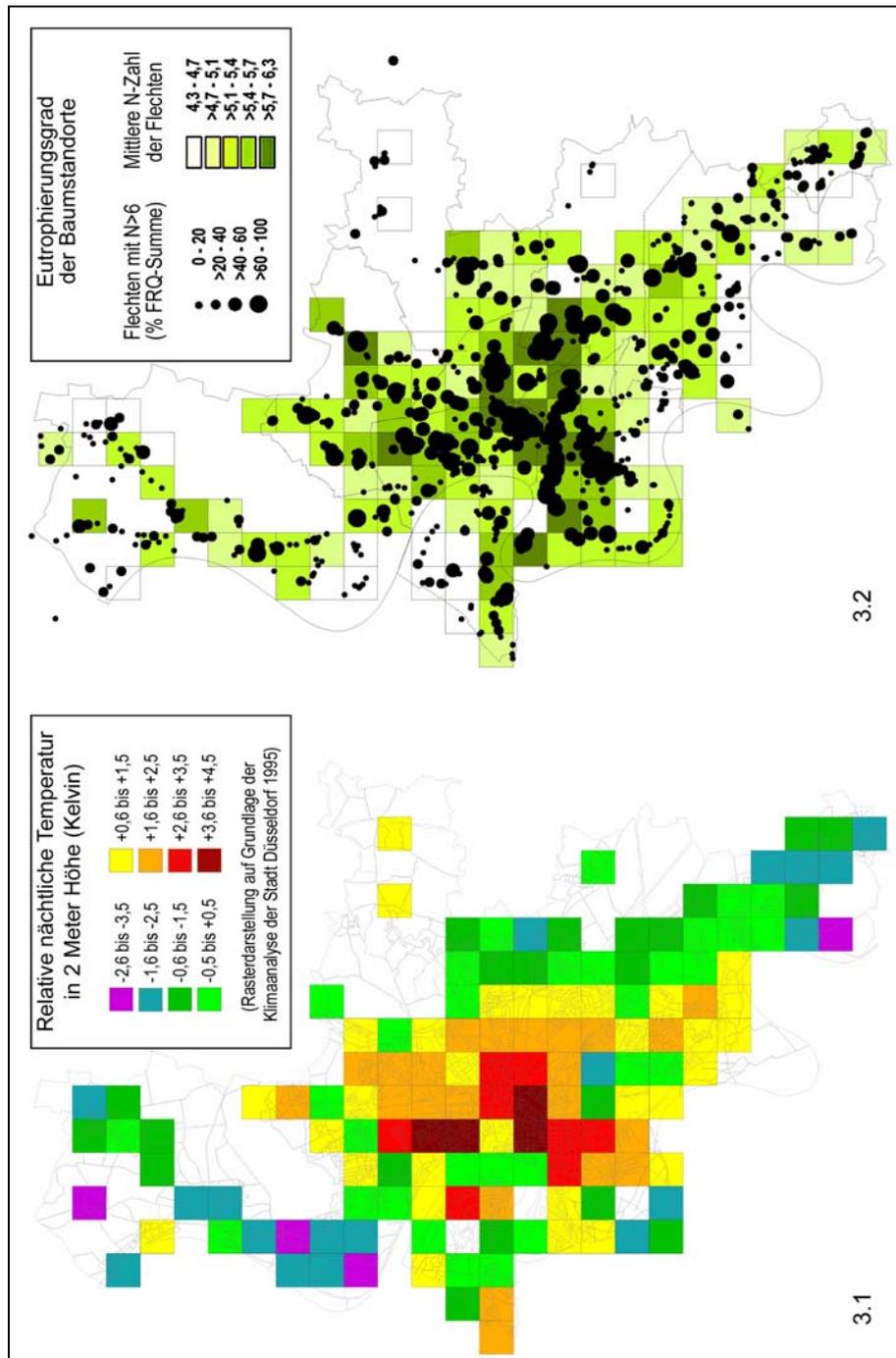


Abbildung 3: Relative nächtliche Temperatur im Düsseldorfer Stadtgebiet (139 Rasterquadrate) und Eutrophierungsgrad der Baumstandorte sowie Häufigkeit von Flechten mit Nährstoffzahl > 6.

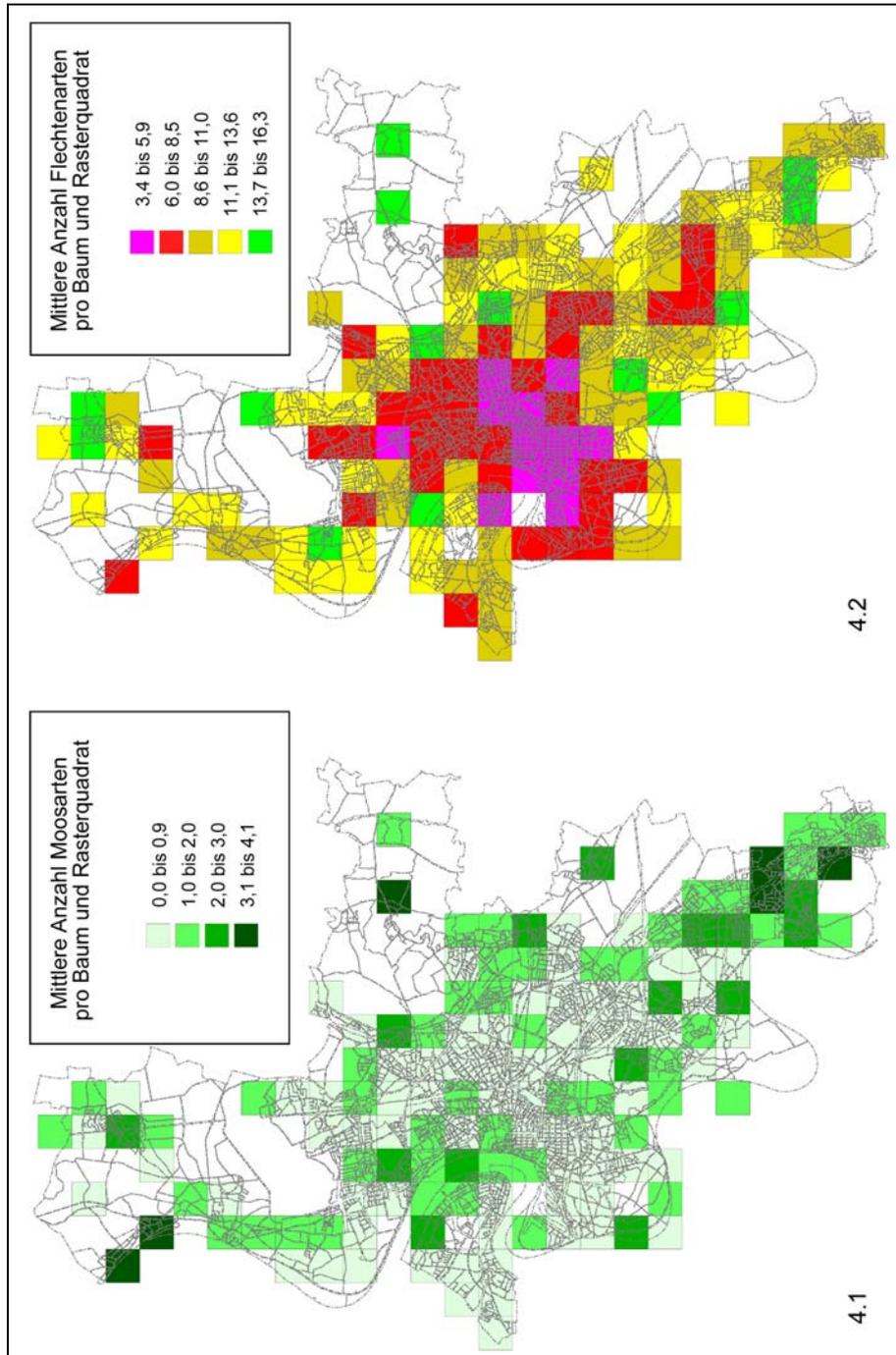


Abbildung 4: Mittlere Anzahl der Moos- (4.1) und Flechtenarten (4.2) pro Baum und Rasterquadrat.

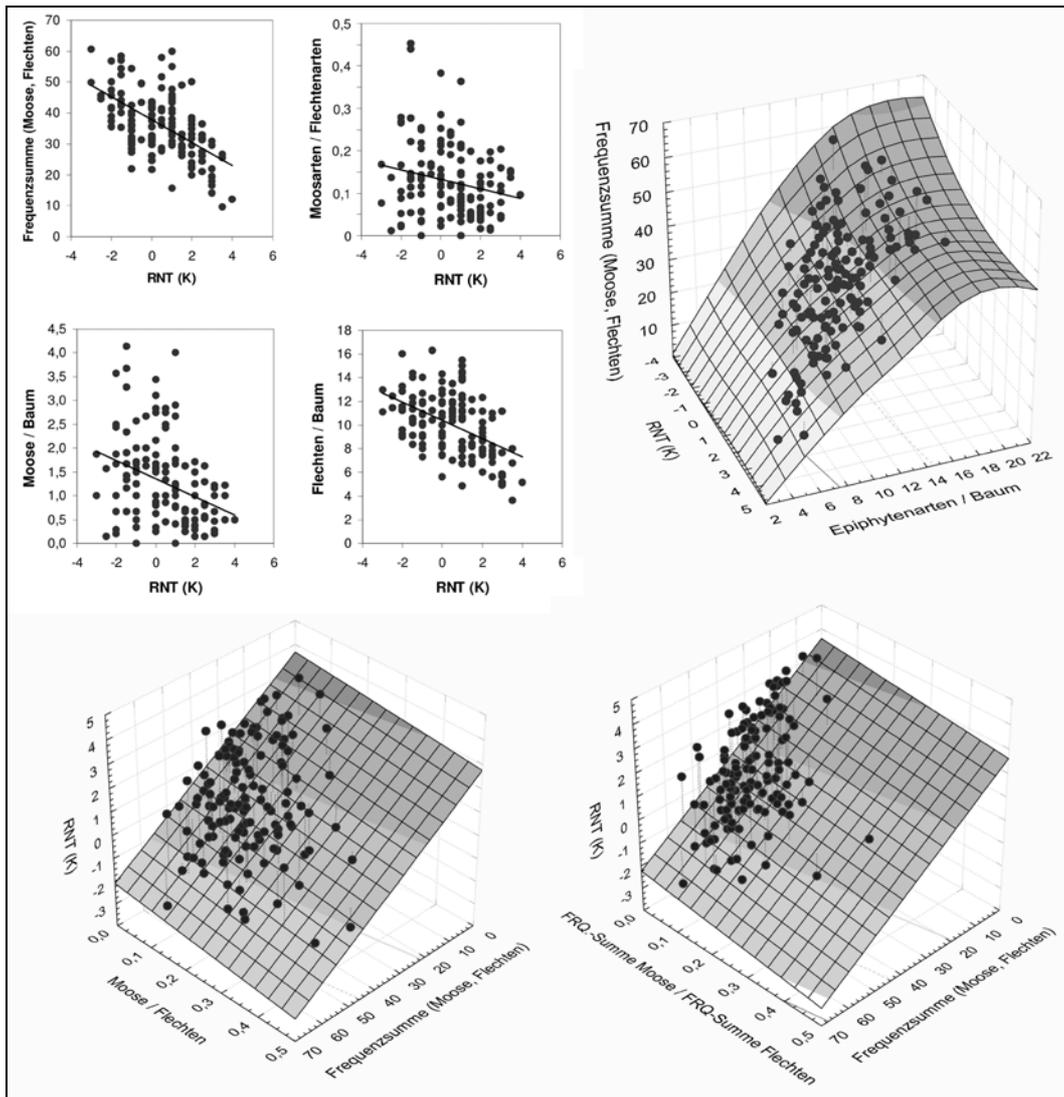


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen relativer nächtlicher Temperatur in 2m Höhe (RNT in Kelvin) und mittlerer Frequenz der Moose und Flechten sowie das Verhältnis Moosarten zu Flechtenarten pro Baum. Daten von 139 Rasterquadraten im Stadtgebiet von Düsseldorf, für die relative Temperaturdaten vorliegen.

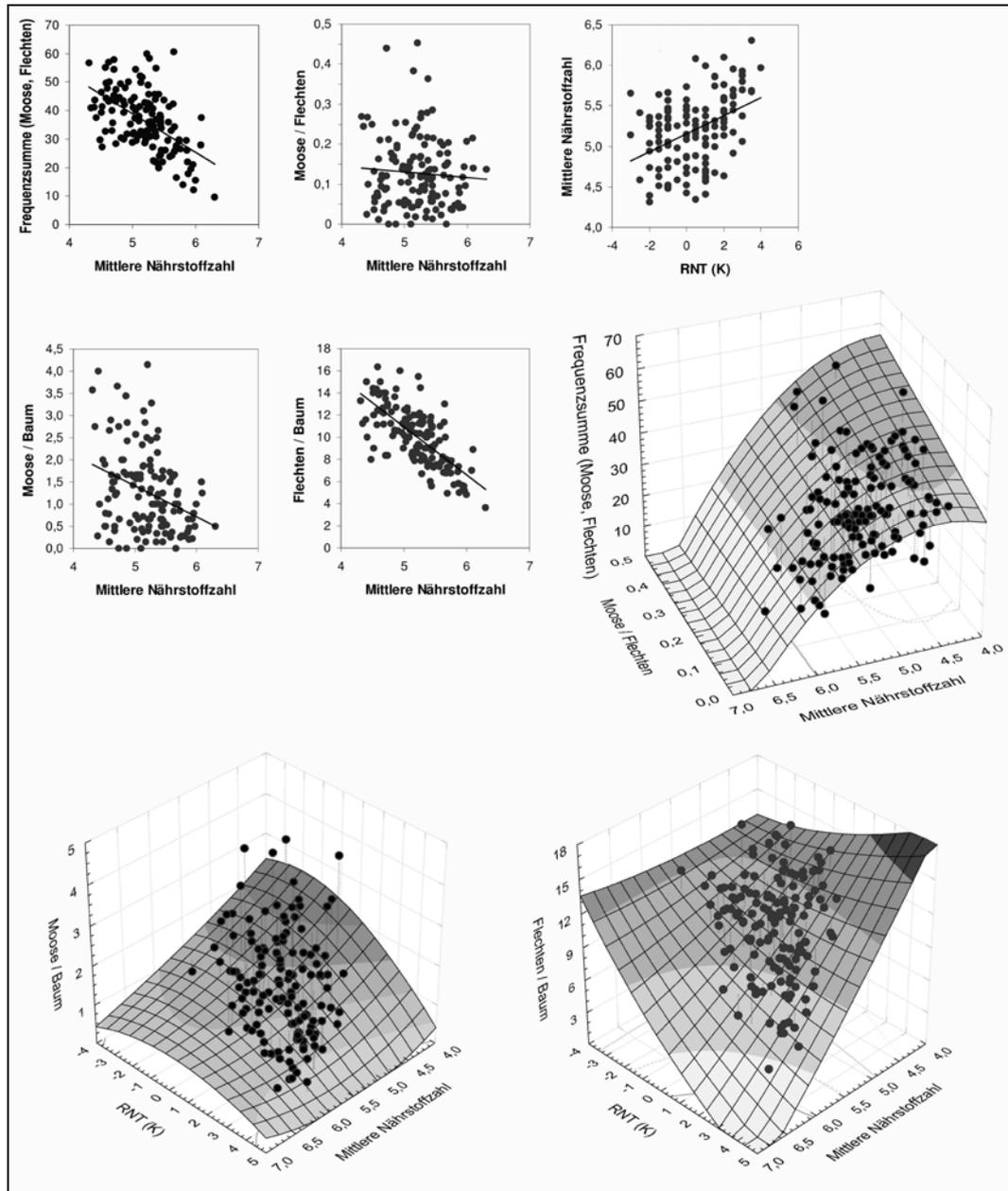


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der mittleren Nährstoffzahl bzw. der relativen nächtlichen Temperatur in 2m Höhe (RNT) und der mittleren Frequenz der Moose und Flechten sowie dem Verhältnis Moosarten zu Flechtenarten pro Baum. Daten von 139 Rasterquadraten im Stadtgebiet von Düsseldorf, für die relative Temperaturdaten vorliegen.

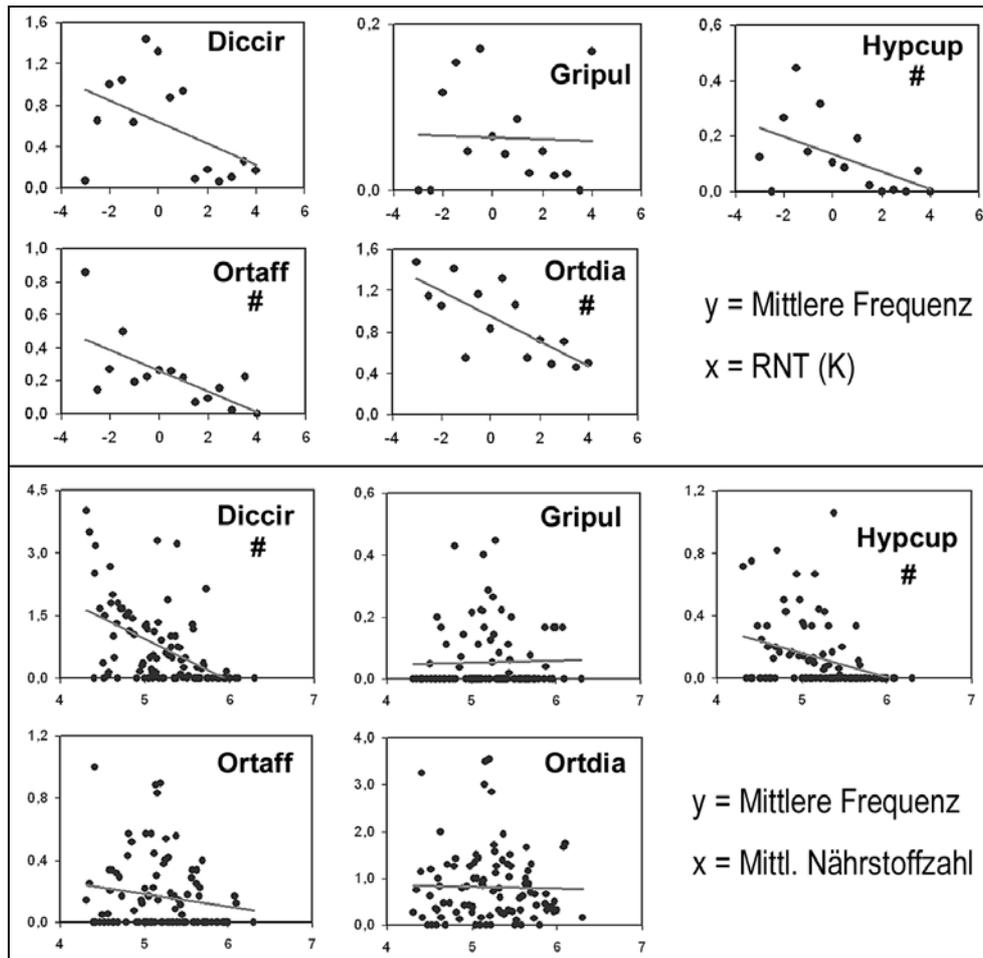


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der relativen nächtlichen Temperatur (Abszisse der oberen Diagramme) bzw. der aus Flechtendaten abgeleiteten Eutrophierung des Baumstandortes (Mittlere Nährstoffzahl, Abszisse der unteren Diagramme) und dem mittleren Frequenzwert (Ordinaten) häufiger Moose. Zur Berechnung wurden alle Bäume in den 139 Rasterquadraten berücksichtigt, für die relative Temperaturdaten vorliegen, also auch solche Bäume, auf denen die jeweilige Art nicht vorkommt (Frequenzwert Null). #, signifikanter Zusammenhang auf dem Niveau $p \leq$ oder $\ll 0,05$.

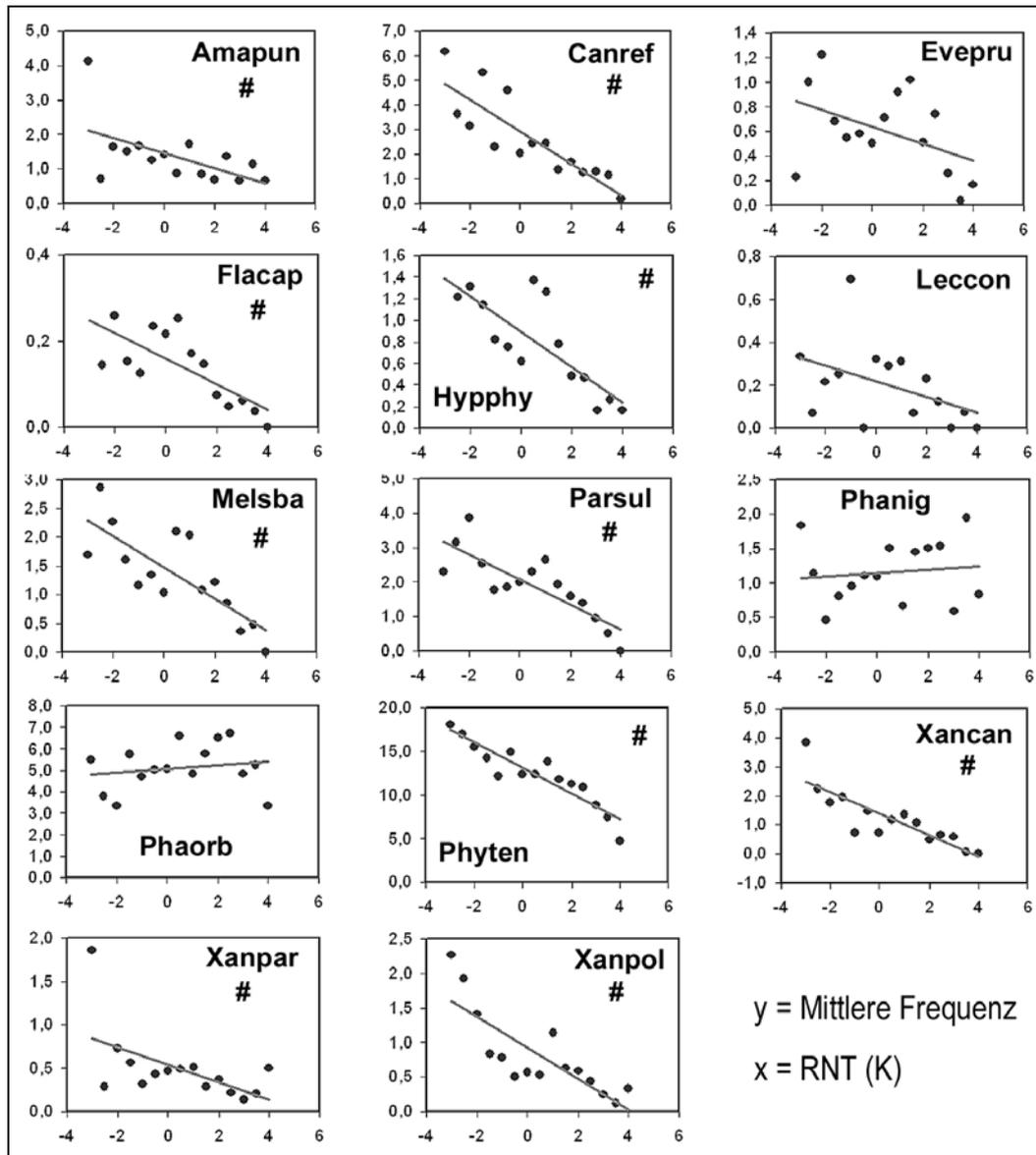


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen der relativen nächtlichen Temperatur (Abszisse) und der mittleren Frequenz häufiger Flechten. Weitere Hinweise siehe Abbildung 7.

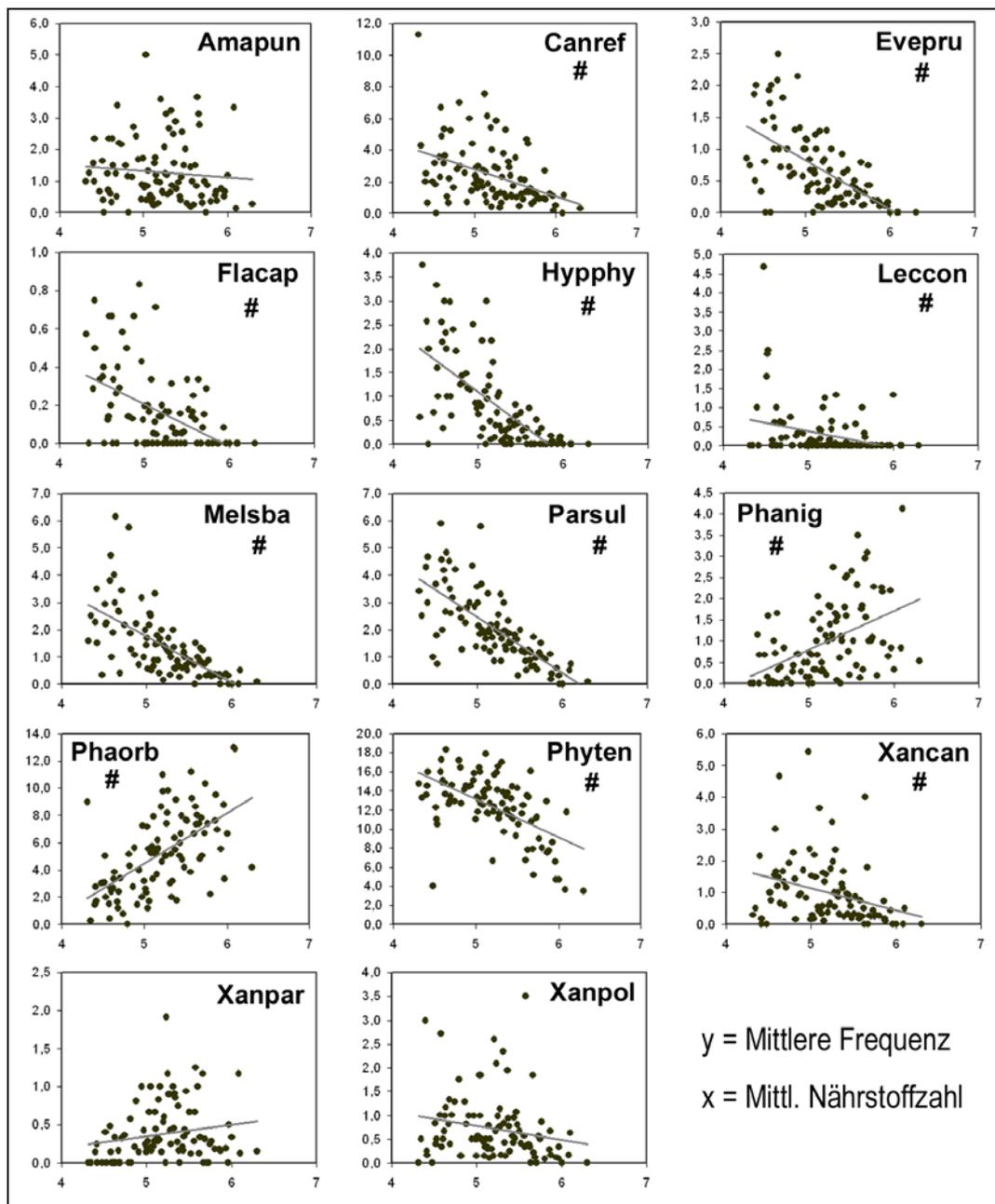


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der aus Flechtendaten abgeleiteten Eutrophierung des Baumstandortes (Mittlere Nährstoffzahl, Abszisse) auf den mittleren Frequenzwert (Ordinaten) häufiger Flechten. Weitere Hinweise siehe Abbildung 6.

Danksagung

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten wurden im Auftrag des Umweltamtes der Landeshauptstadt Düsseldorf erhoben. Frau Dipl. Biol. Isabelle Franzen-Reuter, Herrn Prof. Dr. Jan-Peter Frahm (beide Bonn) und Herrn Dr. Andre Aptroot (Utrecht, NL) danken wir für hilfreiche Diskussionen und die Bestätigung kritischer Belege.

Literatur

- ASTA, J., ERHARDT, W., FERRETTI, M., FORNASIER, F., KIRSCHBAUM, U., NIMIS, P.L., PURVIS, O.W., PIRINTSOS, S., SCHEIDEGGER, C., VAN HALUWYN, C. & WIRTH, V. 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, pp. 273 -279.
- ASTA, J., ERHARDT, W., FERRETTI, M., FORNASIER, F., KIRSCHBAUM, U., NIMIS, P.L., PURVIS, O.W., PIRINTSOS, S., SCHEIDEGGER, C., VAN HALUWYN, C. & WIRTH, V. (2003): European guideline for mapping lichen diversity as an indicator of environmental stress. Unveröff. Entwurf.
- MCCUNE, B. (2000). Lichen communities as indicators of forest health. – *Bryologist* 103, 353-356.
- DAVIES, L., JAMES, P.W., CHIMONIDES, J.H., PURVIS, O.W., 2002: Impacts of NO_x and NH₃ ion on Lichens. A pilot study. Part 1. Corticolous Lichens in London. A.P.R.I.L. (Air Pollution Research In London), Hrsg.. Im Internet verfügbar unter der Adresse:
- DILG, C. 1998: Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren der Luftqualität im Stadtgebiet von Bonn. *Limprichtia*, 11, Bonn, 150 S.
- DÜLL, R., 1974a: Moose als abgestufte ökologische Zeigerarten für die SO₂-Immissionen im Industriegebiet zwischen Rhein und Ruhr bei Duisburg. – *Bull. Soc. Bot. France* 121, 265–269.
- DÜLL, R., 1974b: Neuere Untersuchungen über Moose als abgestufte Zeigerarten für die SO₂-Immissionen im Industriegebiet zwischen Rhein und Ruhr. – VDI-Kommission Reinhaltung der Luft.
- DÜLL, R., 1979: Moose als ökologische Indikatoren für die Luftverschmutzung. – S.81–92 in: GRZIMEK, B. & WEINZIERL, H. [Hrsg.], *Die grüne Stadt – Naturschutz in der Großstadt*. München.
- DÜLL, R., 1980: Die Moose (Bryophyta) des Rheinlandes (Nordrhein-Westfalen, Bundesrepublik Deutschland). – *Decheniana-Beihefte (Bonn)* 24, 1–365.
- DÜLL, R., 1992: Zeigerwerte von Laub- und Lebermoosen. – In: ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., PAULIBEN, D. 1992: *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*. – *Scripta Geobotanica* 18(2), 175–214.
- DÜLL, R., KOPPE, F., MAY, R. 1996: *Punktkartenflora der Moose (Bryophyta) Nordrhein-Westfalens (BR Deutschland)*. – IDH-Verlag Bad Münstereifel. 218 S.
- FRAHM, J.-P., 1998: Moose als Bioindikatoren. – *Biologische Arbeitsbücher* 57. – Quelle & Meyer, Wiesbaden. 187 S.
- FRAHM, J.-P., KLAUS, D., 1997: Moose als Indikatoren von Klimafluktuationen in Mitteleuropa. *Erdkunde* 51: 181–190.
- FRAHM, J.-P., SOLGA, A., 1999: Der Einfluss von Stickstoffimmissionen auf Moose und Flechten. – *Bryologische Rundbriefe* 28, 1–10.
- FRANZEN, I., 2001: Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren der Luftgüte am Westrand des Ruhrgebietes. – *Limprichtia*, 16, Bonn, 85 S.
- FRANZEN, I. 2001a: Entwurf zu einer VDI-Richtlinie für die Kartierung epiphytischer Moose. - *Bryol. Rundbr.* 45: 1-5.

- FRANZEN, I., STAPPER, N.J., FRAHM, J.-P., 2002: Ermittlung der lufthygienischen Situation Nordrhein-Westfalens mit epiphytischen Flechten und Moosen als Bioindikatoren. – Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen – MUNLV. 41 S. (elektronisch verfügbar über den Server der Universität Bonn, Link unter: www.bryologie.uni-bonn.de/Bryologie).
- FRANZEN-REUTER, I., STAPPER, N.J., 2003: Nachweis eutrophierender Luftverunreinigungen in NRW – Landesweite Kartierung epiphytischer Flechten und Moose. LÖBF-Mitteilungen 1/03, 71–73.
- HAWKSWORTH, D.L., ROSE, F. 1970: Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. - *Nature* 227, 145-148.
- HAWKSWORTH, D.L., ROSE, F., COPPINS, B.J. 1973: Changes in the lichen flora of England and Wales attributable to pollution of the air by sulphur dioxide. *In: Air pollution and lichens.* - B.W. Ferry, M.S. Baddeley & D.L. Hawsksworth, eds.: 330-367. Athlone Press, London.
- HEIBEL, E., 1999: Untersuchungen zur Biodiversität der Flechten von Nordrhein-Westfalen. – Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde 61 (2), 1–346.
- HERK, C.M. VAN, 1999: Mapping of ammonia pollution with epiphytic lichens in The Netherlands. – *Lichenologist* 31, 9–20.
- HERK, C.M. VAN, APTROOT, A., DOBBEN, H.F. VAN, 2002: Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. *Lichenologist*, 34 (2): 141–154.
- HERZIG, R., LIEBENDÖRFER, L., URECH, M., AMMAN, K., CUECHEVA, M., LANDOLT, W., 1989: Passive biomonitoring with lichens as a part of an integrated biological measuring system for monitoring air pollution in Switzerland. - *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 35: 43-57.
- JOHN, V., 1997: Aufnahme der epiphytischen Flechtenvegetation in Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz. – *Mitteilungen der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland Pfalz* 40, 91–112.
- KIRSCHBAUM, U., WINDISCH, U., 1995: Beurteilung der lufthygienischen Situation Hessens mittels epiphytischer Flechten. *Schrift. d. Hess. Landesanstalt f. Umwelt* 171. 150 S.
- KNABE, W., 1981: Immissionsökologische Waldzustandserfassung in Nordrhein-Westfalen. – *Allg. Forst-Z. (München)* 36, 641–643.
- KNABE, W., 1981: Algen und Flechten als Zeiger der Luftqualität. - Untersuchungen zum Grünordnungsrahmenplan im Auftrag des Oberstadtdirektors der Landeshauptstadt Düsseldorf, Garten-, Friedhofs- und Forstamt. 21 Seiten und 4 Karten im Anhang.
- KNABE, W., 1982: Immissionsbelastungen von Waldökosystemen. – *Mitteilungen der Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen* 7, 47 S.
- KNABE, W., 1983: Immissionsökologische Waldzustandserfassung in Nordrhein-Westfalen (IWE 1979). Fichten und Flechten als Zeiger der Waldgefährdung durch Luftverunreinigungen. – *Forsch. u. Berat. R. C.* 57.
- KOPERSKI, M., SAUER, M., BRAUN, W., GRADSTEIN, S.R., 2000: Referenzliste der Moose Deutschlands. – *In: Schriftenreihe für Vegetationskunde.* Hrsg.: Bundesamt für Naturschutz, Bonn. Heft 34, S. 1–519.
- KRICKE, R., 1998: Epiphytische Flechten als Bioindikatoren zur Ermittlung der Luftqualität der Stadt Mülheim an der Ruhr. – *Diplomarbeit Universität-GHS-Essen.*
- KRICKE, R., 2000: Untersuchung der Luft- und Klimasituation im Stadtgebiet von Ratingen mit Hilfe von Flechten als Bioindikatoren. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der Stadt Ratingen.

- KRICKE, R., 2002: Untersuchungen zur epiphytischen Flechtenvegetation in urbanen Gebieten, dargestellt an der Rückkehr der Flechten in das Ruhrgebiet und ausgewählter Nachbargebiete. Ph.D. Dissertation, Universität Essen. 208 p.
- NYLANDER, W., 1866: Les lichens du Jardin du Luxembourg. – Bull. Soc. Bot. France 13, 364–372. Zitat aus LEBLANC, F., RAO, D., 1973: Evaluation of the pollution and drought hypothesis in relation to lichens and bryophytes in urban environments. – The Bryologist 76, 1–19.
- ROSE, F., 1976: Lichenological indicators of age and environmental continuity in woodlands. – In: D.H. Brown, D.L. Hawksworth & R.H. Bailey (eds.): Lichenology: Progress and Problems. Academic Press, London pp. 279–307.
- SAUER, M., 1991: Epiphytische Moose. Einsatz als Bioindikatoren im passiven Monitoring. – Beih. Veröf.f Naturschutz und Landschaftspflege Bad. Württ. 64, 174–181.
- SCHOLZ, P., 2000: Katalog der Flechten und flechtenbewohnenden Pilze Deutschlands. – In: Schriftenreihe für Vegetationskunde. Hrsg.: Bundesamt für Naturschutz, Bonn. Heft 31, S. 1–298.
- SIEWERS, U., HERPIN, U., 1998: Schwermetalleinträge in Deutschland. Geol. Jahrbuch, Sonderhefte Reihe D, SD2, Stuttgart, Hannover, 199 S.
- STADT DÜSSELDORF 1995: Klimaanalyse für die Landeshauptstadt Düsseldorf. Herausgeber: Landeshauptstadt Düsseldorf, Umweltamt, Quante, W., Diehl, H. 238 S.
- STAPPER, N.J., 2001: Biomonitoring im Ballungsraum Ruhrgebiet: Epiphytische Moose und Flechten in den Monitoring-Transekten durch Duisburg, Bochum und Dortmund. Wiederholungskartierung 2001 im Dortmunder Transekt. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der LÖB Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten LÖBF (NRW). 88 S.
- STAPPER, N.J., FRANZEN, I., GOHRBANDT, S., FRAHM, J.P., 2000: Epiphyten kehren ins Ruhrgebiet zurück. Ergebnisse einer Moos- und Flechtenkartierung entlang von Transekten durch Duisburg, Bochum und Dortmund. – LÖBF-Mitteilungen 2/2000, 12–21.
- STAPPER, N.J., KRICKE, R., 2004a: Luftbelastung in Düsseldorf 2003 ermittelt mit epiphytischen Flechten und Moosen als Bioindikatoren. - Unveröffentlichtes Gutachten im der Landeshauptstadt Düsseldorf, Der Oberbürgermeister, Umweltamt. - 68 S.
- STAPPER, N.J., KRICKE, R., 2004b: Luftqualität in Düsseldorf 2003. - Zusammenfassender Bericht über eine Untersuchung mit Flechten und Moosen. - Landeshauptstadt Düsseldorf, Der Oberbürgermeister, Umweltamt. - 9 S. (Anlage zu Vorlagen Nr. 19/12/2004).
- STETZKA, K.M., 1993: Moose als Zeigerpflanzen für Umweltveränderungen: Anwendungsmöglichkeiten von ökologischen Zeigerwerten. Forstarchiv 64, 226–232.
- STETZKA, K.M., BAUMANN, M., 2001: Wassermoose als Versauerungs- und Eutrophierungsindikatoren – Untersuchungen aus dem Erzgebirge/Sachsen. Herzogia 15; erscheint Sommer 2001.
- STETZKA, K.M., STAPPER, N.J., 2001: Moose und Flechten im Level-II-Programm: Erste Untersuchungsergebnisse aus Hessen, Sachsen und Nordrhein-Westfalen. S. 88–157. – In: Dauerbeobachtung der Waldvegetation im Level II-Programm: Methoden und Auswertung. Hrsg.: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Referat 533.
- TREMP, H., 1999: Submerged Bryophytes in Running Waters, Ecological Characteristics and their Use in Biomonitoring. Environmental Science Forum 96: 233–242.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure [Hrsg.]), 1995: VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1: Messen von Immissionswirkungen, Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten. Flechtenkartierung zur Ermittlung des Luftgütwertes (LGW). Beuth, Düsseldorf, 24 S.

-
- VORBECK, A., WINDISCH, U., 2001: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Flechtenkartierung München – Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU). – Materialien Umwelt und Entwicklung 173. München. 174S.
- WIRTH, V., 1992: Zeigerwerte von Flechten. – In: ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., PAULIBEN, D. 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. – Scripta Geobotanica 18(2), 215–237.

Anschriften der Autoren

Dr. Norbert J. Stapper
Büro für Ökologische Studien
Verresbergerstraße 55
40789 Monheim am Rhein
FAX 02173-101505
nstapper@t-online.de

Dr. Randolph Kricke
Biologische Station Westliches Ruhrgebiet e.V.
Ripshorster Straße 306
46117 Oberhausen
randolph.kricke@bswr.de