

Bioindikation mit Epiphyten – Veränderungen der Flechten- und Moosflora im Ruhrgebiet¹

NORBERT J. STAPPER

Büro für Ökologische Studien, Verresbergerstraße 55, D-40789 Monheim am Rhein,
www.stapper.monheim.de , E-Mail: nstapper@t-online.de

Flechten und Moose werden seit Jahrzehnten erfolgreich zur Bioindikation von Luftverschmutzungen in Ballungsräumen verwendet (Literatur hierzu s.u.). Sie haben ein hohes Verbreitungspotential, sind, im Gegensatz zu den meisten höheren Pflanzen, ganzjährig verfügbar, besitzen kein Abschlussgewebe sondern nehmen Wasser durch die gesamte Oberfläche auf, und sie können einmal aufgenommene Schadstoffe nicht wieder abscheiden. Zudem sind die Flechten Doppelorganismen aus Algen und artspezifischen Pilzen, die in einer „Hungersymbiose“ zusammen leben, welche auf Umweltveränderungen, die das Wachstums-Milieu auf der Baumrinde verändern, empfindlich reagiert. Dies betrifft insbesondere solche Arten, die die Borke von Bäumen bewohnen (= Epiphyten). Die Belastung eines Standortes durch Luftschadstoffe wird anhand des epiphytischen Artenspektrums und der Häufigkeit („Frequenz“) einzelner Arten ermittelt. Hierzu verwendet man Zählgitter, die in festgelegter Weise am „Trägerbaum“ angebracht werden. Auch die Art und die Auswahl der auf Epiphyten untersuchten Bäume erfolgt nach festgelegten Kriterien (Flechten: VDI 3799 Blatt 1, ab etwa Mitte 2005 wird VDI 3957, Blatt 13 gelten; für Moose wird zurzeit eine neue VDI-Richtlinie erarbeitet).

Die hohen Schwefeldioxidimmissionen, allgemein bekannt als „Saurer Regen“, führten dazu, dass in den industriellen Ballungszentren an Rhein und Ruhr vor rund 20 Jahren stellenweise gar keine Epiphyten mehr vorkamen („Flechtenwüste“). Infolge effizienter Rauchgasentschwefelung hat sich die Situation inzwischen erheblich verbessert, und die Epiphyten kehren wieder zurück. Diese Rückkehr verläuft aber nicht

¹ Kurzfassung eines Vortrages auf der Tagung „Flora und Fauna im westlichen Ruhrgebiet“ am Sonntag den 30. Januar 2005 der Biologischen Station Westliches Ruhrgebiet und des NABU Oberhausen. Veröffentlicht auf der Internetseite www.bswr.de im Februar 2005

in umgekehrter Weise wie die Auslöschung. Stattdessen offenbaren sich jetzt, seit etwa Mitte der 1990er Jahre, die Effekte luftgetragener Stickstoffverbindungen. Diese stammen vornehmlich aus dem Straßenverkehr (Stickstoffoxide: „NO_x“) und der Landwirtschaft (überwiegend reduzierter Stickstoff: Ammoniak, Ammonium). Stickstoff ist ein Mangelfaktor am Extremstandort Borke, jedoch zwei Drittel der Flechten, die in den vergangenen Jahren die Ruhrgebietsstädte wiederbesiedelt haben, bedürfen einer geringen Eutrophierung bzw. mit Mineralien angereicherter Borke (STAPPER et al. 2000; KRICKE 2002). Gegenüber Nährstoffeintrag intolerante Arten sterben ab oder werden verdrängt. Dies betrifft nicht nur die Epiphyten sondern das Ökosystem allgemein! Zusätzlich zu diesen gasförmigen Immissionen reagieren die Epiphyten auch auf staubförmige Immissionen und die (mikro-)klimatischen Bedingungen am Standort. Auch Klimafluktuationen wirken sich aus und werden erkennbar.

1998 wurden in drei Nord-Süd-gerichteten Transekten durch die Ruhrgebietsstädte Duisburg, Bochum und Dortmund insgesamt 34 epiphytische Flechten und 20 Moose nachgewiesen (STAPPER et al. 2000). Im Mittel wurden auf den nach VDI 3799 Blatt 1 ausgewählten Bäumen eine Moos- und vier Flechtenarten festgestellt. Im Duisburger Transekt waren es 1999 bereits 4,9 Flechten und 1,4 Moose pro Baum (FRANZEN 2001), und im Winter 2000/2001 wurden im Dortmunder Transekt sogar 5,6 Flechten und 1,7 Moose pro Baum angetroffen (STAPPER 2001). Diese Entwicklung hält immer noch an: So wurden z. B. 2003 im gesamten Stadtgebiet von Dinslaken (STAPPER & KRICKE 2003) oder Düsseldorf (STAPPER & KRICKE 2004a) im Mittel elf Moose und Flechten pro Baum nachgewiesen. Die Gesamtzahl epiphytischer Moos- und Flechtenarten in den Großstädten an Rhein und Ruhr dürfte inzwischen bei mindestens 100 liegen.

In Abbildung 1 ist der mittlere Bedeckungsgrad der Baumstämme durch epiphytische Flechten 1998 und 2001 für jedes Rasterquadrat des Transektes durch Dortmund dargestellt. Nur 2,5 Jahre liegen zwischen den beiden Untersuchungen, doch die Artendiversität hat sich praktisch verdoppelt! 1998 drangen nur drei Arten in die zentrale Industriezone vor (Rasterquadrate 9 und 10), 2001 waren es bereits 14 Arten. Bemerkenswert ist der Rückgang der gegenüber sauren Immissionen sehr toleranten Krustenflechte *Lecanora conizaeoides* in dieser kurzen Zeit (Foto siehe Abbildung 2; in Abbildung 1 rosa hinterlegt). Sie ist das bekannteste Beispiel einer durch Luftverschmutzung geförderten Art, die ursprünglich sehr selten war, aufgrund der sauren Immissionen stark zunahm und in den 1970er Jahren mancherorts die einzige überlebende epiphytische Flechte war.

Ortschaften	Lünen- Brambauer	Brechten	Lindenhorst	Eving	Westfalenhütte	Wambel	Schuiren	Aplerbeck									
Relief																	
Flächennutzung																	
Rasterquadrat-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Flechtenart	Mittlerer Bedeckungsgrad 1998 (%)																
<i>Amandinea punctata</i>	+	2,8	+			+	+				+			2	5	0,8	1
<i>Candelariella - Gruppe</i>	+	+	1	5,2	0,7	0,7		+		+	+	+	+	+	0,8	1,4	
<i>Evermia prunastri</i>		+	+	+		+	+	+			+	+	+	+	+	+	+
<i>Hypogymnia physodes</i>	+	+	+	+		+	+				+	0,8	+	+	+	+	
<i>Lecanora conizaeoides</i>	5,8	6,7	7,5	5,5	3	4,8	20	+		+	5	1,3	13	2,8	9		5
<i>Lecanora expallens</i>		1			+	1						+	+	+	+		0,8
<i>Lecanora hagenii</i>	2						1										1
<i>Lepraria incana</i>	+	2,2	1,5	2,1	2,8	+	1				1,1	18	5,4	+	3,8	1,2	7,2
<i>Parmelia caperata</i>							+										
<i>Parmelia exasperatula</i>				+		+	+	+				+	+	+			+
<i>Parmelia glabratula</i>	+	0,7	+	+		+						+	+	+	+		0,7
<i>Parmelia subrudecta</i>			+			+	+				+		+			0,7	+
<i>Parmelia sulcata</i>	+	+	0,7	1	+	0,6	+				+	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	+
<i>Phaeophyscia nigricans</i>														+	+		
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	1	+	3	1	2,7	0,8	0,7	+			2,9	3	1,3	1,6	8,8	4,3	1,5
<i>Physcia spec.</i>	+	1,4	1,5	0,7	2	1,4	0,6	+	+		1,1	1,1	4,5	1,4	1	1,9	1,5
<i>Ramalina spec.</i>						+											
<i>Usnea spec.</i>						+					+					+	
<i>Xanthoria candelaria</i>	+			+			0,6							+	+	+	+
<i>Xanthoria parietina</i>	+	+				1		+			+	+		+	+	+	+
<i>Xanthoria polycarpa</i>		+				0,7						+	+	+	+	+	+



Abb. 1: Epiphytische Flechten entlang eines Transektes durch Dortmund 1998 (oben) und 2001 (nächste Seite). Angegeben sind für jedes Rasterquadrat (1 km²) die mittleren prozentualen Bedeckungsgrade der Flechten auf Bäumen mit subneutraler Borke. (+) <0,5 %. keine Angabe: Flechte wurde nicht nachgewiesen. Die *Candelariella*-Gruppe beinhaltet die beiden Arten *C. reflexa* und *C. xanthostigma*, in „*Parmelia glabratula*“ sind *P. subaurifera* und *P. glabratula* zusammengefasst, *Physcia* sp. beinhaltet *P. adscendens* und *P. tenella*. *Usnea* sp. beinhaltet *U. hirta* und *filipendula*, und *Ramalina* sp. ist überwiegend *R. farinacea* (am Standort belassen). „*Parmelia subrudecta*“ beinhaltet die zu dieser Zeit noch nicht getrennt erfassten Arten *Punctelia subrudecta* und *P. ulophylla*. *Parmotrema chinense* hat sich von Westen her innerhalb kurzer Zeit über ganz NRW ausgebreitet. Das Vorkommen von *Parmelia flaventior* (syn. *Flavopunctelia flaventior* (STIRTON) HALE) ist eines von nur drei bekannten Vorkommen in NRW. Beide Untersuchungen erfolgten im Auftrag der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten LÖBF (NRW).

Flächennutzung																	
Rasterquadrat-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Flechtenart	Mittlerer Bedeckungsgrad 2001 (%)																
<i>Amandinea punctata</i>	+	0,7	6,7	0,5		+	+	+	0,5		+	+		+	10	1,5	+
<i>Candelariella aurella</i>										+	+						
<i>Candelariella</i> -Gruppe	+	+	0,9	1,1		+	+				1,7	0,8	0,5	0,8	2,6	1	1,9
<i>Candelariella vitellina</i>	+							1		+	+						+
<i>Cladonia spec.</i>		+			+									+			
<i>Dimerella pineti</i>				+													
<i>Evernia prunastri</i>	+	+	+	+		+	+				+	+	+	+	+	+	+
<i>Hypogymnia physodes</i>	+	+	0,5	0,8	1	+	+				+	+	+	0,7	1	0,7	
<i>Lecanora conizaeoides</i>	5,3	4,3	5,5	6,7	6,9	1,2	10		+					2	5		+
<i>Lecanora expallens</i>	+	3		1,1		+	+				1	1,4	2	1	+		0,7
<i>Lecanora hagenii</i>	+		1	+			+	10	+	15	1,1						
<i>Lecanora muralis</i>		+								+	+						
<i>Lepraria incana</i>	+	2,9	1,5	8,7	0,7		+		0,7		1,3	12	3,5	1,2	5,7	0,7	4,6
<i>Parmelia caperata</i>							+				+	+	+	+	+	+	+
<i>Parmelia exasperatula</i>					+	+	+					+		+		+	
<i>Parmelia flaventior</i>														+			
<i>Parmelia glabratula</i> -Gr.	+	0,5	+	2,1		+	+		+		+	+	0,5	0,6	0,6	+	+
<i>Parmelia saxatilis</i>														+			
<i>Parmelia subrudecta</i>	+	+	+			+	+				+	+	0,5	+	0,8	+	+
<i>Parmelia sulcata</i>	+	+	0,5	+	+	+	+				+	+	0,5	0,6	0,7	+	0,5
<i>Parmotrema chinense</i>				+	+						+	+		+	+		
<i>Phaeophyscia nigricans</i>	+			+		+	+	0,5	1,1		0,5	+	+	+	+	+	+
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	1,1	2,3	8,6	5,9	7,7	2,2	4,4	14	8,8	+	9,2	5,3	2,8	9,3	6,8	9,4	2
<i>Physcia caesia</i>		+	+			+	+				+	0,5	+	+	+	+	
<i>Physcia stellaris</i>											+						
<i>Physcia</i> -Gruppe	0,8	2,5	1,4	4,6	+	3,6	4,6	1,4	1,6	+	3,3	2,5	15	9,4	6,4	5	0,7
<i>Physconia distorta</i>											+						
<i>Physconia grisea</i>								+			+		+		+		
<i>Placynthiella icmalea</i>				1										+			
<i>Ramalina spec.</i>	+	+	+	+		+	+						+	+	+	+	
<i>Rinodina gennarii</i>								1			0,5						
<i>Scoliciosporum chloroc.</i>					0,7												
<i>Strangospora pinicola</i>		+															
<i>Usnea spec.</i>						+	+					+					
<i>Xanthoria candelaria</i>	+	+	+	+		+	+	+	+		1	+	1,7	+	1,7	+	+
<i>Xanthoria parietina</i>	+	+	+			+	+	+	+		+	+	+	+	+	0,7	+
<i>Xanthoria polycarpa</i>	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+	+		+	

Stark zugenommen haben in der gleichen Zeit nitrophytische oder durch mineralische Stäube geförderte Arten. Zu nennen sind hier z. B. *Lecanora hagenii*, *Physcia adscendens* und *P. tenella*, sowie *Phaeophyscia nigricans* und *Ph. orbicularis*. Abbildung 3 zeigt Makrofotos der beiden *Phaeophyscia*-Arten, in Abbildung 1 sind ihre Daten grün hinterlegt. Relativ hoch war der Bedeckungsgrad von *Ph. orbicularis* schon 1998 in Aplerbeck, *Ph. nigricans* wurde sogar nur dort nachgewiesen. Bis 2001 haben beide Arten in diesem Stadtteil, der von Industriebetrieben und (zumin-

dest an den Baumstandorten) regem Straßenverkehr geprägt ist, stark zugenommen. Noch stärker ist ihre Zunahme im Bereich der zentralen Industriezone. Dieser Vorgang kennzeichnet die Veränderung der wesentlichen Belastungsfaktoren: Abnehmende Säurebelastung der Luft bei gleichzeitig hoher Staubbelastung durch Industrie und Straßenverkehr sowie Stickstoffimmissionen (NO_x) und die relative Aufheizung der Baublöcke und Industrieflächen als Folge der Flächenversiegelung. Erst die flächendeckende Epiphytenkartierung 2000-2002 in Nordrhein-Westfalen (FRANZEN *et al.* 2002; FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003) und Untersuchungen in München (VORBECK & WINDISCH 2001) und Düsseldorf (STAPPER & KRICKE 2004a, b) ergaben, dass diese beiden Flechtenarten sowohl durch straßenverkehrsbedingte Immissionen gefördert werden als auch sehr tolerant gegenüber städtischer Überwärmung sind („Urban Heat Island“).

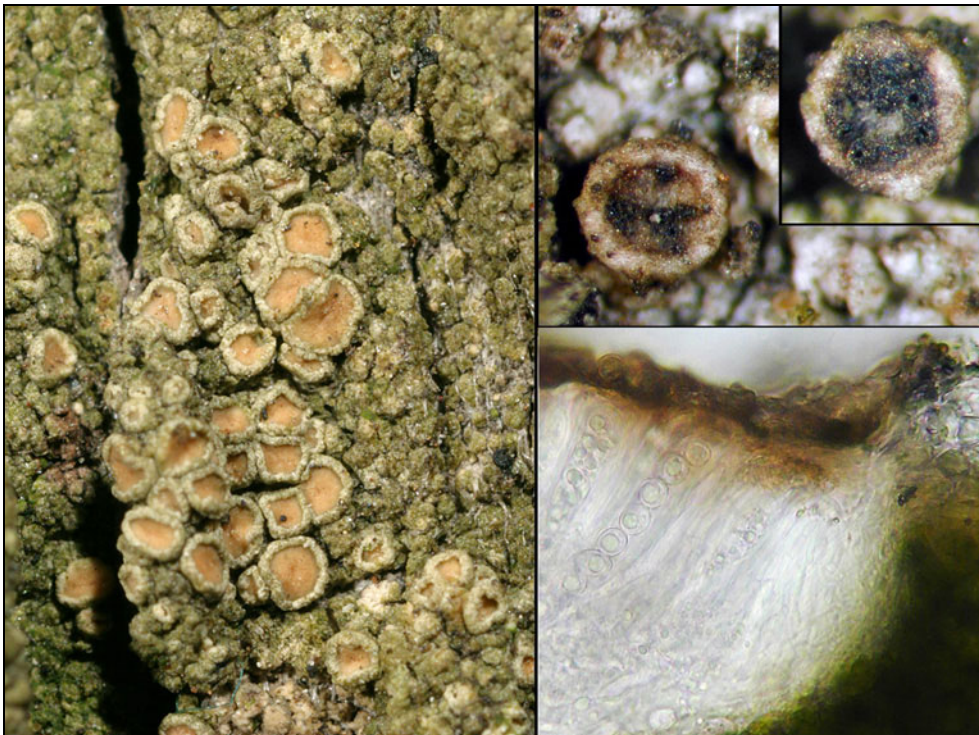


Abb. 2: Krustenflechte *Lecanora conizaeoides*. Die Fruchtkörper (Apothecien) haben einen Durchmesser von 0,5 bis 1,2mm. Im Querschnitt erkennt man die Sporen in den Sporenschläuchen (Asci). Die rechts dargestellten Fruchtkörper sind von einem Pilz befallen. Fotos: N. J. Stapper.

In Tabelle 1 sind jene epiphytischen Moose und Flechten aufgelistet, deren Häufigkeit in Nordrhein-Westfalen mit steigendem Einfluss des Faktors Straßenverkehr signifikant abnimmt (sensitive Art) bzw. steigt (geförderte Art). Während für das gesamte Bundesland zwei Moose und vier Flechten als durch Verkehrseinfluss geförderte Arten ausgewiesen werden können, ist die Belastung in den zentrumsnahen, aufge-

wärmten Rasterquadraten (RNT > 0K) des Düsseldorfer Stadtgebietes so hoch, dass hier nur noch die beiden *Phaeophyscia*-Arten mit einem Anstieg ihrer mittleren Frequenz auf einen Anstieg der Verkehrsbelastung reagieren. Aus ähnlichem Grund unterscheidet sich auch das jeweilige Spektrum der auf Verkehrsbelastung sensiblen Arten. Zu diesen sensiblen Arten zählen auch die in NRW sehr häufigen und als eutrophierungstolerant eingestuften Blattflechten *Physcia tenella* und *adscendens*.

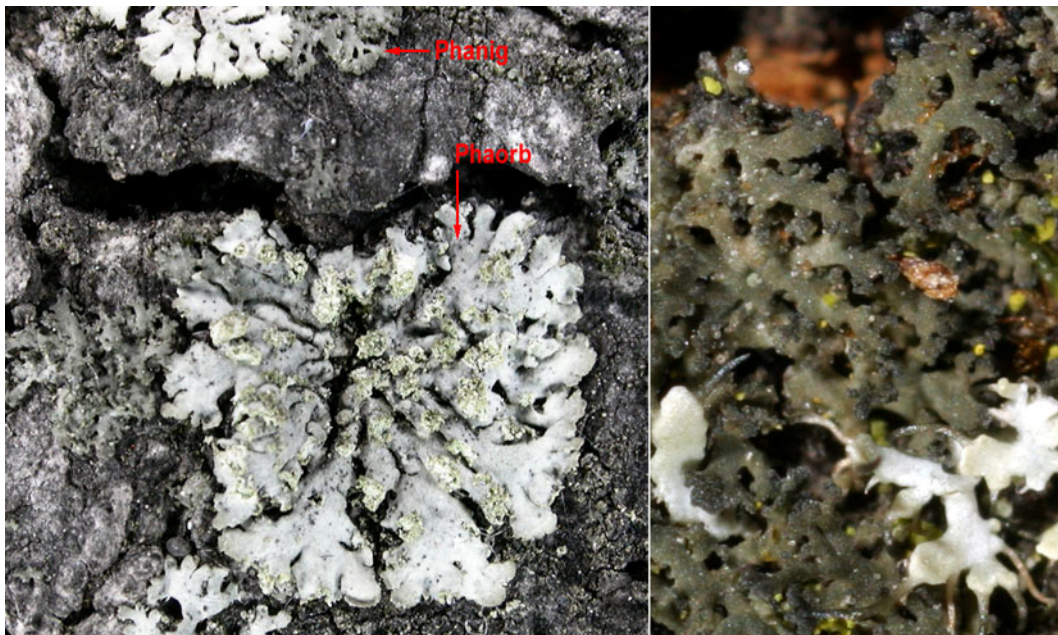


Abb. 3: *Phaeophyscia orbicularis* und *Ph. nigricans*. Das linke Bild zeigt beide Arten auf einem Spitzahorn an einem verkehrsreichen Standort in der Düsseldorfer Innenstadt. Das Lager von *Ph. orbicularis* (Phaorb) ist etwa 2,5cm groß. Die Lager von *Ph. nigricans* hingegen sind nur wenige Millimeter groß, rechts stärker vergrößert wiedergegeben. Beide Flechten sind sehr tolerant gegenüber luftgetragenen Nährstoffen, städtischer Überwärmung und verkehrsbedingten Immissionen. An Bäumen entlang stark befahrener Verkehrswege erreichen sie hohe Bedeckungsgrade. Fotos: N. J. Stapper.

Wie unterschiedlich die beiden *Physcia*- und *Phaeophyscia*-Arten auf den Faktor Straßenverkehr reagieren, zeigen die Diagramme in Abbildung 4: Je näher der Trägerbaum an der Fahrbahn steht und je stärker der Verkehr ist, um so höher wird die Frequenzsumme der beiden *Phaeophyscia*-Arten. Die Frequenzsumme der beiden *Physcia*-Arten hingegen ist umso geringer, je näher der Trägerbaum an der Fahrbahn steht und je stärker diese befahren wird.

Auch in München (VORBECK & WINDISCH 2001) erwiesen sich *Phaeophyscia nigricans*, *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 NRW bei zunehmender Verkehrsbelastung sinken, zeigten

in München das gleiche Verhalten. Flechten nehmen Stickstoff offenbar auch in oxidiert Form auf (Franzen 2004), doch dürften im Straßenverkehrsraum noch andere Komponenten, wie z. B. mit Nähr- und Schadstoffen beladener Staub auf die Epiphyten einwirken, da bereits in geringen Abständen zu Hauptstraßen die Frequenzen wieder ansteigen (VORBECK & WINDISCH 2001; STAPPER & KRICKE 2004a). Eine exakte Trennung zwischen dem Einfluss von Verkehrsimmissionen und stadtklimatischen Effekten, also relativer Trockenheit, starker Aufheizung am Tage und geringer bzw. langsamer nächtlicher Abkühlung andererseits, ist anhand von Epiphytendaten zurzeit nicht möglich. Wahrscheinlich verstärken sich die beiden Einflüsse – auch von uns Menschen werden beide als negativ empfunden.

Tab. 1: Durch verkehrsbedingte Immissionen gehemmte und geförderte epiphytische Moose und Flechten. Verkehrseinfluss: Angegeben ist die Veränderung der Frequenz (VDI 3957/13) zwischen den Kategorien „gering“ (>10 m Distanz zu gering befahrenen Wirtschaftswegen und Nebenstraßen in Wohngebieten) und „hoch“ (<10 m Distanz zur Fahrbahn und zwei- bis mehrspurige Hauptstraße bzw. Autobahn). Düsseldorf: Grundlage sind die Rasterquadrate mit relativer nächtlicher Temperatur (RNT) \geq Null Kelvin (STAPPER & KRICKE 2004). In NRW wurden nur Quadranten mit maximal 160 m Höhe ü. NN berücksichtigt (FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003). *Physcia tenella* schließt *Ph. adscendens* ein.

Verkehrseinfluss „gering vs. hoch“, $p \leq 0,05$	Düsseldorf RNT >0 K	Nordrhein-Westfalen Standorte <160 m üNN
Frequenz sinkt	<i>Amandinea punctata</i> <i>Dicranoweisia cirrata</i> <i>Hypnum cupressiforme</i> <i>Orthotrichum affine</i> <i>Parmalia sulcata</i> <i>Physcia tenella</i> <i>Candelariella reflexa</i> <i>Flavoparmelia reflexa</i>	<i>Amandinea punctata</i> <i>Dicranoweisia cirrata</i> <i>Hypnum cupressiforme</i> <i>Lecanora expallens</i> <i>Lepraria incana</i> <i>Parmalia saxatilis</i> <i>Physcia tenella</i> <i>Ramalina farinacea</i>
Frequenz steigt	<i>Phaeophysica nigricans</i> <i>Phaeophysica orbicularis</i>	<i>Grimmia pulvinata</i> <i>Orthotrichum diaphanum</i> <i>Phaeophysica nigricans</i> <i>Phaeophysica orbicularis</i> <i>Physcia dubia</i> <i>Xanthoria parietina</i>

Die Rückkehr epiphytischer Moose und Flechten hält unvermindert an. Die meisten Arten sind eutrophierungstolerant, aber auch eine Vorliebe für warme oder wintermilde Standorte wird erkennbar. Ein solcher Vertreter ist die sehr kleine Blattflechte *Hyperphyscia adglutinata*, die erst seit zwei Jahren wieder in NRW zwischen Niederrhein und Westfalen vorkommt und Anfang 2005 z. B. auf Pappeln entlang der

Rheinschiene schon beachtliche Flächen bedeckte (siehe Abbildung 5). Es ist spannend zu verfolgen, ob sich diese im 19. Jahrhundert als selten eingestufte und lange Zeit nicht mehr nachgewiesene Flechte in den kommenden Jahren weiter ausbreitet.

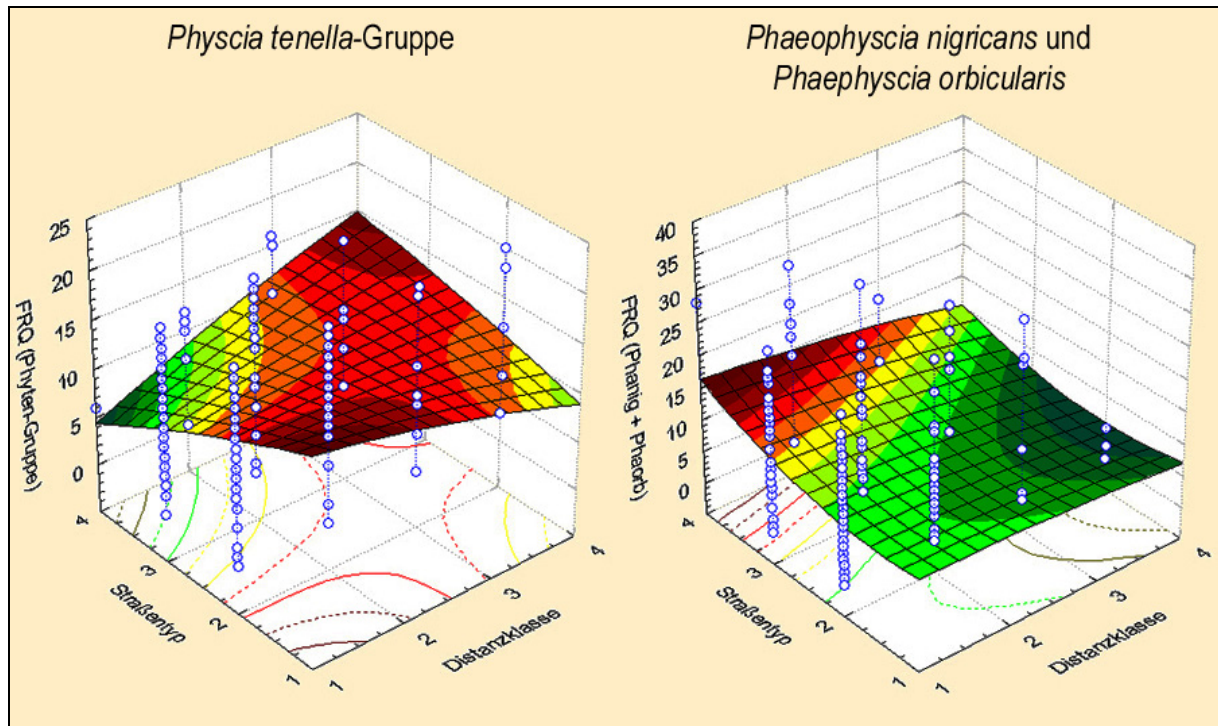


Abb. 4: Unterschiedliches Verhalten gegenüber dem Faktor Straßenverkehr: *Physcia tenella* und *adscendens* (links) und *Phaeophyscia orbicularis* und *Ph. nigricans* (rechts). Dargestellt ist die mittlere Frequenzsumme (FRQ-SUM; nach VDI 3957/13) der jeweils beiden Arten in Abhängigkeit vom Straßentyp (1, Fahrweg mit sehr wenig Verkehr; 2, Nebenstraße in Wohngebiet; 3, zweispurige Hauptstraße; 4, 4spurige Hauptstraße mit starkem Verkehr; subjektive Schätzung im Gelände) und dem Abstand von der Fahrbahn (Distanzklassen: 1, < 2 m; 2, < 5 m; 3, < 10 m; 4, > 10 m). Daten von 255 Bäumen im Stadtgebiet von Gütersloh, Sommer 2004 (STAPPER 2005).



Abb. 5: *Hyperphyscia adglutinata* auf einer Pappel am Rhein südlich von Düsseldorf. Die Flechte ist als grauer Belag (rote Pfeile) auf dem links abgebildeten Stamm erkennbar. Die kleinen Lager liegen dem Substrat unablösbar an (Name!). Auffallend ist der Größenunterschied zu *Phaeophyscia orbicularis* (Makrofoto oben) und *Physcia tenella* (unten). Weitere Arten am Baum (auf dem Makrofoto nicht alle gezeigt): *Amandinea punctata*, *Lecanora hagenii*, *Lecidella elaeochroma*, *Phaeophyscia nigricans*, *Physconia grisea*, *Punctelia ulophylla*, *Xanthoria parietina* (gelb), *X. polycarpa*, sowie die Moose *Grimmia pulvinata*, *Orthotrichum affine*, *O. diaphanum* u.a.m. - insgesamt also eine sehr nährstofftolerante Gesellschaft. Fotos: N. J. Stapper.

Literaturverzeichnis

Zitierte und ausgewählte weiterführende Literatur zum Thema Bioindikation von Luftschadstoffen, Lufteutrophierung und Klimawandel mit Epiphyten.

- DÜLL, R. (1974): Neuere Untersuchungen über Moose als abgestufte Zeigerarten für die SO₂-Immissionen im Industriegebiet zwischen Rhein und Ruhr. – VDI-Kommission Reinhaltung der Luft.
- FRAHM, J.-P. (1998): Moose als Bioindikatoren. – Biologische Arbeitsbücher 57. – Wiesbaden (Quelle & Meyer), 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, Bonn 16: 85 S.
- FRANZEN-REUTER, I. (2004): Untersuchungen zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Flechten und Moose im Hinblick auf die Bioindikation. – Dissertation Universität Bonn.
- 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. S. 330-367 in: B. W. FERRY, M. S. BADDELEY & D. L. HAWKSWORTH (eds.): Air pollution and lichens. – London (Athlone Press).
- 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.
- HERK, C. M. VAN & APTROOT, A. (2004): Veldgids Korstmossen. – KNNV Uitgeverij, Utrecht. 424 S. (reich bebildertes Flechtenbestimmungsbuch mit Angaben zur Ökologie der Arten, insbesondere die Eutrophierungstoleranz betreffend).
- 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.
- KRICKE, R. & FEIGE, G. B. (2001): Biomonitoring der Luftqualität im Ruhrgebiet mit Hilfe von Flechten – 1966 bis 2000. Gefahrstoffe. – Reinhaltung der Luft 61: 163-166.
- LEBLANC, F. & DE SLOOVER, J. (1970): Relation between industrialisation and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. – Can. J. Bot. 48: 1485-1496.
- LOPPI, S. (2004): Mapping the effects of air pollution, nitrogen deposition, agriculture and dust by the diversity of epiphytic lichens in central Italy. – Lichens in a changing pollution environment. – English Nature Research Reports 525: 37-41.

- 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.
- RABE, R. & BECKELMANN, U. (1987): Zusammenhänge zwischen der durch Flechten angezeigten Gesamtverunreinigung der Luft und Gesundheitsbeeinträchtigung beim Menschen. – In: Bioindikation (VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Hrsg.), VDI-Berichte, Düsseldorf 609: 729-753.
- 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 Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten LÖBF (NRW), 88 S.
- STAPPER, N. J. (2005): Luftbelastung in Gütersloh 2004 ermittelt mit epiphytischen Flechten und Moosen als Bioindikatoren. – Untersuchung im Auftrag der Stadt Gütersloh, Fachbereich Umweltschutz (unveröffentlicht).
- 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. (2003): Immissionsökologische Situation in Dinslaken 2003 ermittelt mit epiphytischen Moosen und Flechten. – Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten LÖBF (NRW), Recklinghausen. 44 S.
- 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): Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorteutrophierung und verkehrsbedingten Immissionen. – Limprichtia (Bonn) 24: 187-208.
- 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). – Düsseldorf (Beuth), 24 S.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure [Hrsg.]) (2004): VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13 Entwurf: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator der Luftgüte. – Berlin (Beuth), 27 S.
- VORBECK, A. & WINDISCH, U. (2001): Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Flechtenkartierung München – Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. – Bayrische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU). Materialien Umwelt und Entwicklung, München 173: 174 S.
- WIRTH, V. (1992): Zeigerwerte von Flechten. In: ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., PAULISEN, D. (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. – Scripta Geobotanica 18 (2): 215–237.
- WIRTH, V. (1993): Trendwende bei der Ausbreitung der anthropogen geförderten Flechte *Lecanora conizaeoides*? – Phytocoenologica 23: 625–636.