

Universität & Pädagogische Hochschule Heidelberg  
Abteilung Geographie  
Projektseminar: Stadtökologie  
Dozent: Prof. Dr. Alexander Siegmund  
Sommersemester 2013

# **Pflanzen als Indikatoren für Stadtklima und Lufthygiene**

2013.06

Sen Sun  
Studiengang: Geographie Master  
Matrikelnummer: 3112104  
sensun@live.cn

# Inhaltsverzeichnis

1. Einführung .....	2
2. Begrifflichkeiten .....	2
2.1 Indikation und Monitoring .....	3
2.2 Sensitive Bioindikation und Akkumulative Bioindikation .....	3
2.3 Passives Verfahren und aktives Verfahren.....	3
2.4 Zeigerpflanzen und Zeigerwerte .....	3
3. Eignung von Flechten und Moosen als Bioindikatoren.....	4
3.1 Flechten .....	4
3.2 Moose .....	6
4. Indikation von Luftverunreinigung .....	7
4.1 Flechtenkartierung.....	8
4.1.1 VDI-Richtlinie 3799 Blatt 1.....	8
4.1.2 Richtlinie 3957, Blatt 13 .....	10
4.1.3 Diskussion der Aussagekraft.....	10
4.2 Moose und Schwermetallakkumulation .....	11
4.2.1 Trend der Bioakkumulation von Schwermetallen in Deutschland (1990-2005)11	
4.2.2 Optimierung des Messnetzes .....	13
4.3 Indikation mit Höheren Pflanzen .....	13
4.3.1 Laub- und Nadelbäume .....	13
4.3.2 Nutz- und Zierpflanzen .....	14
4.3.3 Wildpflanzen.....	14
5. Indikation von Temperaturverhältnissen .....	14
6. Standards für Bioindikation .....	15
7. Vorteile und Nachteile der Bioindikation im Vergleich zu Messstationen .....	17
8. Zusammenfassung.....	18
Literatur.....	19

## 1. Einführung

Das Wachstum von Pflanzen hängt mit Standortfaktoren wie der Komposition des Bodens, der Zusammensetzung der Atmosphäre, den Temperaturen oder der Stärke der Sonnenstrahlung zusammen. Jede Pflanzenart hat verschiedene Ertragsbreiten für die Schwankungen einzelner Faktoren. Die Pflanzenarten, die besonders empfindlich auf einen bestimmten Faktor reagieren, können als Bioindikatoren zur Umweltbeobachtung benutzt werden. Seit den 1970er Jahren sind Bioindikationsverfahren zur Luftüberwachung etabliert (Nobel et al., 2005). Am häufigsten werden Flechten und Moose in der Pflanzenwelt als Bioindikatoren eingesetzt. Damit die Ergebnisse in verschiedenen Untersuchungsgebieten bzw. zu verschiedenen Zeitpunkten vergleichbar sein können, ist eine standardisierte oder zumindest nachvollziehbare Methode von großer Bedeutung. Selbst wenn heute die Umweltbeobachtung immer mehr durch moderne Technologien wie Fernerkundung oder andere Messgeräte erledigt werden kann, bleibt Bioindikation immer noch ein wichtiges Instrument in der Forschung über die Ursachenkette Emission – Transmission – Immission – Wirkung.

## 2. Begrifflichkeiten

Zwar sind fast alle Pflanzen verschiedenen Standortfaktoren ausgesetzt und von ihnen beeinflusst, doch ist nur ein Teil davon als Indikatoren einsetzbar. Als Bioindikatoren werden bewusst nur Organismen oder Organismengemeinschaften bezeichnet, die auf Umwelteinflüsse mit Veränderungen ihrer Lebensfunktion und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung reagieren bzw. deren Vorkommen oder Fehlen in einer Biozönose bestimmte Umweltfaktoren charakterisieren (Nobel et al., 2005).

Bei der Auswahl von Indikatoren gelten drei wichtige Kriterien. Zuerst muss die betrachtete Pflanze auf eine bestimmte Art und Weise auf die Veränderung eines Umweltfaktors reagieren. Weiter muss die zum Indikator gewählte Pflanzenart genügend repräsentativ sein für das Untersuchungsgebiet. Außerdem muss die Reaktion für uns Menschen wahrnehmbar sein. Mit Hilfe von der Beobachtung und Durchsichtung bestimmter Pflanzengruppen kann man die unsichtbaren Veränderungen der Umwelt registrieren.

## 2.1 Indikation und Monitoring

Die Begriffe Bioindikation und Biomonitoring kommen oft zusammen vor. Bei der Bioindikation wird oft lediglich die Frage beantwortet, um welchen Schadstoff es sich handelt, während beim Biomonitoring noch eine zeitliche Veränderung bestimmter Schadstoffe erzielt wird. D.h. beim Biomonitoring wird mehr Wert auf eine quantitative Auswertung und regelmäßige Wiederholung des Verfahrens gelegt. Aber die Unterschiede sind nicht deutlich, oft werden die zwei Begriffe auch als Synonyme verwendet (Nobel et al., 2005).

## 2.2 Sensitive Bioindikation und Akkumulative Bioindikation

Nach der Nutzung des Indikators von Seiten des Menschen können die Bioindikation in zwei Kategorien unterteilt werden. Sensitive oder reaktive Indikation wird begriffen als Bewertung visuell wahrnehmbarer Veränderungen. Bei der akkumulativen Indikation werden mit Hilfe von Messinstrumenten Konzentrationen bestimmter Stoffe gemessen, die sich im Indikator angereichert haben (Zierdt, 1997).

## 2.3 Passives Verfahren und aktives Verfahren

Je nachdem, ob die vorhandenen Pflanzen im Untersuchungsgebiet herangezogen werden, unterscheiden sich das passive und aktive Verfahren. Beim passiven Verfahren werden die Indikatoren am Wuchsort untersucht, während beim aktiven Verfahren im Gegensatz geeignete Organismen unter standardisierten Bedingungen ins Gelände ausgebracht und bestimmten Standortbedingungen ausgesetzt werden. Im Vergleich zum aktiven Verfahren, bei dem nur die Verhältnisse in der Expositionszeit wiedergespiegelt werden können, erlaubt der passive Ansatz eine retrospektive Wirkungsanalyse.

## 2.4 Zeigerpflanzen und Zeigerwerte

Weitere relevante Begriffe von der Bioindikation sind die Zeigerpflanzen und ihre Zeigerwerte. Unter "Zeigerpflanzen" (oder Zeigepflanzen) werden Taxa (meist Arten, seltener auch Unterarten) verstanden, deren Anwesenheit eine spezifische Beschaffenheit des Standorts kundtut; es sind diagnostisch einsetzbare Pflanzentaxa (Licht, 2013).

Zeigerwerte stellen die quantifizierte Aussagekraft von Pflanzen gegenüber einem ökologischen Faktor dar. Die behandelten Faktoren sind u.a. Licht (L), Temperatur (T), Wasser (Feuchtigkeit) sowie Basengehalt (Reaktionszahl, R) und Nährstoffgehalt (N) des Bodens. Die Aussagekraft wird durch eine Zahl von 1 bis 9 (beim Wasserfaktor 1 bis 12) ausgedrückt. Ein größerer Wert entspricht einer besseren Aussagekraft. Allerdings ist die Zahlenfolge nicht kardinal, sondern ordinal, d.h. die Abstände zwischen den Ziffern sind nicht definiert und damit nicht zwangsläufig konstant. Dies bedeutet u.a., dass Durchschnittsberechnungen, wie sie häufig durchgeführt werden, eigentlich mathematisch nicht korrekt sind (Licht, 2013).

Im Vergleich zu Bioindikatoren sind Zeigerpflanzen allgemeiner eingesetzt. Die weisen auf verschiedene Standortfaktoren hin, während hinter Bioindikation oft die Überwachung von Schadstoffen steht.

### 3. Eignung von Flechten und Moosen als Bioindikatoren

In der Pflanzenwelt werden Flechten und Moose am häufigsten als Bioindikatoren eingesetzt. Das liegt vor allem an ihrer im Vergleich zu höheren Pflanzen relativ einfachen Struktur sowie Wasser- und Nährstoffaufnahme. In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften von Flechten und Moosen im Zusammenhang mit der Bioindikation erklärt.

#### 3.1 Flechten

Schon im 19. Jahrhundert wurden Flechten als Indikatoren für die Luftbelastung entdeckt (Zierdt, 1997). Unter einer Flechte versteht man eine symbiotische Lebensgemeinschaft zwischen einem Pilz und einem oder mehreren Photosynthese betreibenden Partnern (Büdel & Schöller, 1997). In den meisten Fällen besteht diese Lebensgemeinschaft aus einer Pilz- und einer Algenart. Das Zusammenleben ermöglicht den Flechten, Standorte zu besiedeln, wo die einzelnen Pilz- und Algenarten nicht überleben können. In der Natur können Flechten sowohl in Tropen als auch an Polengebieten vorkommen. Dennoch sind sie empfindlich gegen Umweltveränderungen wie Luftverschmutzung, die von Menschen verursacht sind.

In dieser Lebensgemeinschaft haben der Pilz und die Alge verschiedene Aufgaben zu leisten. Der Pilz schützt die Alge vor zu starken Sonnenstrahlung und nimmt Wasser auf, die Produktion der Kohlenhydrate ist aber der Alge überlassen, da Pilze kein Chlorophyll

besitzen und nicht zur Photosynthese befähigt sind. Der Anteil an Kohlenhydraten, den die Alge dabei über ihrem Eigenbedarf hinaus als Nahrungsmittel für den Pilz produziert, ist zum Teil erheblich und kann bis zu 70% betragen (Feige, 1982). Das bildet folglich einen Dauerstress für die Alge. Aus diesem Grund haben die Flechten auch eine geringe Wachstumsrate (Wirth, 2002). Die Empfindlichkeit von Flechten gegen Luftverschmutzung lässt sich auch teilweise durch diese un stabile Arbeitsaufteilung erklären.

Flechten besitzen keine Wurzeln, deshalb haben Flechten Stoffwechsel nur zu einem Medium - der Luft. Das bildet den Hauptgrund für die Einsetzbarkeit der Flechten als Indikatoren für Luftbelastung. Zwar reagieren höhere Pflanzen mit Wurzeln auch auf Standortveränderungen, aber dabei ist es schwierig zu identifizieren, ob die Schadstoffe aus der Luft oder aus dem Boden stammen.

Außerdem fehlt es den Flechten ein Schutzgewebe bei der Aufnahme von Wasser oder Nährstoff. Die im Wasser gelösten Schadstoffe gelangen ungefiltert in die Flechten. Blütenpflanzen verfügen dagegen über eine schützende und sehr widerstandsfähige Haut, die Cuticula, die ihre grünen Organe überziehen.

Je nachdem, auf welcher Art vom Substrat die Flechten wachsen, können die in drei Kategorien unterteilt werden:

- epiphytische (borkenbewohnende) Flechten
- epilithische (mauer- bzw. felsbewohnende) Flechten
- epigäische (erdbewohnende) Flechten

Diese Gliederung hat auch eine ökologische Bedeutung. Am häufigsten werden epiphytische Flechten als passive Bioindikatoren eingesetzt, weil durch eine rationale Auswahl von Trägerbäumen der Einfluss aus dem Medium, in dem die Flechten wachsen, zum großen Teil beseitigt werden kann. Zwar besitzen die Flechten keine Wurzeln, mit denen sie sich aus dem Substrat ernähren können, doch die Substrate können trotzdem einen großen Einfluss auf die Flechten ausüben, z.B. kann der Kalkstein die Säurebilanz in der Umgebung von Flechten beeinflussen und dazu führen, dass die Flechten weniger vom Schwefeldioxid in der Luft geschädigt werden. Zwar haben die Baumborken auch verschiedene PH-Werte, aber da der

Stamm senkrecht steht, ist der Einfluss relativ geringer. Außerdem kann der Einfluss weiterhin verhindert werden, indem nur Bäume mit ähnlichem PH-Wert betrachtet werden. Ein weiterer Grund, der für die Verwendung von epiphytischen Flechten beim passiven Verfahren spricht ist, dass die Suche nach Bäumen tatsächlich viel einfacher ist als die Suche nach steinbewohnenden oder erdbewohnenden Flechten, die sich in irgendeiner Ecke verstecken können.

Die Vegetationskörper von Flechten werden Thallus oder Lager genannt. Neben der Kategorisierung nach Substrat können Flechten auch nach der Wuchsform ihres Thallus in Krustenflechten, Blattflechten sowie Strauchflechten unterteilt werden. Am empfindlichsten gegen Luftverschmutzung sind die Strauchflechten, da sie fast zu 100 Prozent von der Luft umgeben werden. Danach folgen die Blattflechten. Die am wenigsten empfindlichen Arten stellen die Krustenflechten dar, weil sie eng am Substrat liegen und nur zu etwa 50% luftexponiert sind (Zierdt, 1997). Am weitesten dringt die Krustenflechtenart *Lecanora conizaeoides* in die Großstädte und Industriegebiete vor.

Mit Flechten können nahezu alle denkbaren Methoden der Bioindikation durchgeführt werden, eine davon ist die Flechtenkartierung, die unten in Details erklärt wird.

### 3.2 Moose

Moose und Flechten ähneln sich im Verhalten gegen viele Umweltfaktoren, aber Moose stellen höhere Anforderungen an die Luftfeuchtigkeit. Als Folge von Luftreinhaltemaßnahmen wurde zwar schon mehrfach eine Rückwanderung von Flechten in die Städte beobachtet, entsprechendes von Moosen wird dagegen noch nicht berichtet. Diese Tatsache ist ein Hinweis darauf, dass der Wert der Moose als sensibler Indikator für Luftverunreinigungen in Städten also geringer ist (Blume & Sukopp, 1998).

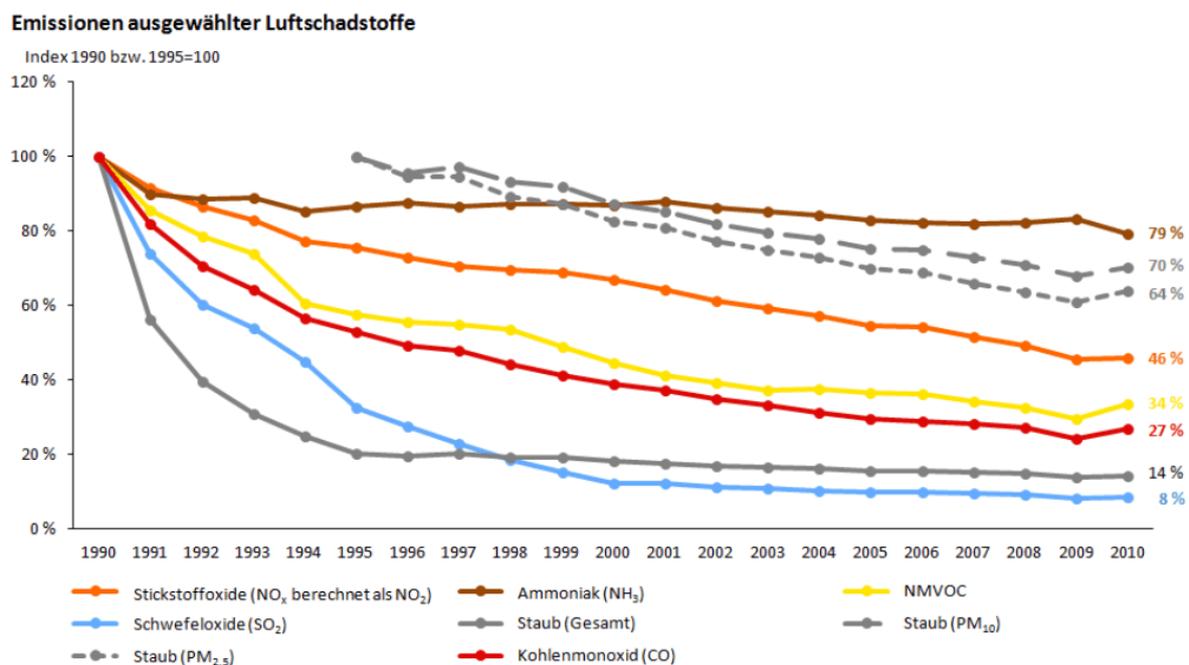
Eine Studie in Düsseldorf stellte einen Zusammenhang zwischen der Frequenz der Flechten und Moose und der relativen nächtlichen Temperatur, dem Eutrophierungsgrad der Baumstandorte sowie der Belastung durch Straßenverkehr fest. Moose und Flechten sind mit demselben Verfahren quantitativ erfasst worden. Die Ergebnisse zeigen: Moose bevorzugen stärker als Flechten Standorte mit nächtlicher Abkühlung. Beide Gruppen eignen sich zur Bioindikation verkehrsbedingter Belastungen. (Stapper & Kricke, 2004).

Zwar besitzen viele Moose wurzelähnliche Organe (Rhizoide), aber die dienen nur zur Verankerung. Die Wasseraufnahme erfolgt überwiegend über die grünen Pflanzenteile in Form von Regen oder Tau (Blume & Sukopp, 1998). Ebenso unterentwickelt sind die Organe zum Wassersparen und -leiten. Deshalb sind die meisten Moose auf luft- und/oder bodenfeuchte Standorte angewiesen. Allerdings sind drei spezifischen Moosarten vorhanden, die sich im europäischen Städten zurechtfinden können: *Bryum argenteum*, *Ceratodon purpureus*, *Brachythecium rutabulum*. *Dicranum scoparium* ist dagegen sehr empfindlich gegen Luftverschmutzung.

Häufig werden Moose wegen höherer Ionenaustauschkapazitäten für die Akkumulation von Schwermetallen in der Atmosphäre eingesetzt.

#### 4. Indikation von Luftverunreinigung

Die Luft in der Stadt ist meistens stark verschmutzt und deshalb schlechter als die auf dem Land. Das wirkt sich auch auf die Pflanzen aus. Wichtige Aspekte der Luftverschmutzung sind u.a. Schwefeldioxid, die Stickstoffverbindungen und die Schwermetalle.



Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990 (Stand: 15. April 2012)  
<http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>

Abbildung 1 Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe

Schwefeldioxid ist für die meisten Pflanzen schädlich, da es die Säurebilanz der Pflanzen stören könnte. Aber als Folge mehrerer Luftreinhaltungsmaßnahmen seit Mitte der 1980er Jahre hat die Konzentration der sauren Schadgase – vor allem Schwefeldioxid – in der Luft deutlich abgenommen. Gleichzeitig verstärken sich allerdings die Auswirkungen der stickstoffhaltigen Nährstoffverbindungen und Stäube (Abbildung 1). Dadurch werden die nitrophytischen Arten gefördert. Säuretolerante Arten können dagegen geschädigt werden, da Stickstoffverbindungen wie Ammoniak den pH-Wert erhöhen können.

Schwermetalle in der Atmosphäre werden von den Pflanzen im Laufe der Zeit angereichert. Eine Studie in Frankreich zeigt, die Mischung der Schwermetalle, die zur Luftverschmutzung führen, hat sich verändert. Während am Anfang des 20. Jahrhunderts die Schadstoffe in der Luft noch zum großen Teil aus der Verbrennung von Kohlen stammten, entsteht heutzutage eine neue Mischung, die auf die lokale Industrie und den Straßenverkehr zurückzuführen ist (Agnan, Séjalon-Delmas, & Probst, 2013).

Im Folgenden werden zwei Anwendungsbeispiele von der Indikation für Luftverunreinigung – Flechtenkartierung und Schwermetallakkumulation vorgestellt.

## 4.1 Flechtenkartierung

### 4.1.1 VDI-Richtlinie 3799 Blatt 1

Wegen der Vielzahl der unterschiedlichen Kartierungsmethoden wurde vom VDI im Jahre 1986 eine Richtlinie zur Vereinheitlichung der „Kartierung des epiphytischen Flechtenvorkommens“ entworfen (Richtlinie 3799, Blatt 1). Diese Methode geht davon aus, dass die Vielfalt der epiphytischen Flechten von der Luftbelastung beeinflusst wird und höhere Diversitätswerte mit besserer Luftqualität einhergehen. Der Ablauf besteht aus folgenden Schritten (Kirschbaum & Wirth, 1997):

#### (1) Vorbereitung des Messnetzes

Bei der Vorbereitung des Messnetzes wird das Kartierungsgebiet in gleichförmige Rasterzellen verteilt. Die Seitenlänge beträgt meistens 1 Kilometer bei Untersuchungen in Städten oder Ballungsräumen.

## (2) Auswahl der Trägerbäume

Bei der Flechtenkartierung werden nur borkenbewohnende Flechten berücksichtigt. Um eine gute Korrelation zwischen der Luftverunreinigung und des Vorkommens von Flechten zu bekommen, sollen die anderen Umweltbedingungen möglichst konstant sein. Deshalb gelten bei der Auswahl von Trägerbäumen folgende Regeln:

- Die Bäume müssen freistehend und nicht schräg sein, so dass vergleichbare Licht-, Wind- und Feuchtigkeitsbedingungen vorliegen.
- Nur Bäume mit ähnlichen Rindenbedingungen dürfen berücksichtigt werden.
- Die Bäume sollen repräsentativ für das Untersuchungsgebiet sein, damit genügend Exemplare zur Verfügung stehen. In jeder Messfläche werden meistens 6 Bäume untersucht.
- Der Baumumfang soll bestimmte Ober- und Untergrenze nicht überschreiten, damit die Bäume ähnlich alt sind.

## (3) Flechtenaufnahme

In der Phase der Flechtenaufnahme werden die vorkommenden Flechtenarten und ihre Frequenz in jeder Messfläche registriert. Dieses Verfahren wird auch standardisiert: Ein Aufnahmebogen von 20cm \* 50cm, der aus 10 Zellen von 10cm \* 10cm besteht, wird auf der am meisten bewachsenen Seite des Trägerbaums festgelegt, die Unterkante ist 1m höher als der Erdboden (Abbildung 2). Die Frequenz einer Flechtenart entspricht der Anzahl der Zellen, in denen diese Flechtenart vorkommt. Die maximale Frequenz beträgt 10.

## (4) Auswertung

Nur die Flechtenarten, die in Mitteleuropa oft vorkommen, gehen in die Auswertung ein. Die Flechtenart *Lecanora coniyaeoides* wird wegen ihrer Toleranz gegen Luftverschmutzung nicht mit berechnet. Die

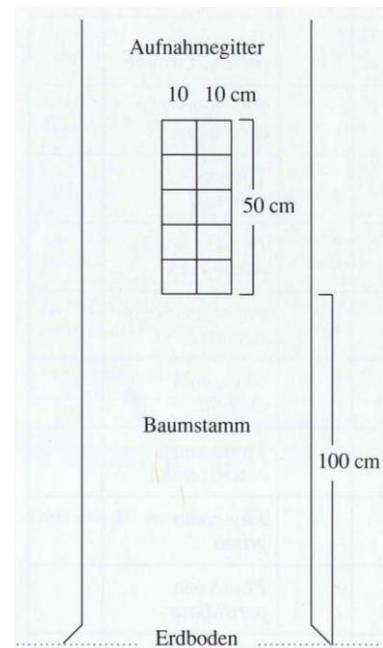


Abbildung 2  
Flechtenaufnahme  
(Kirschbaum & Wirth,  
1997)

Auswertung einzelner Rasterzellen geschieht folgendermaßen: Als erstes wird der Mittelwert der Frequenz einer Flechtenart an den 6 Bäumen ermittelt, dann werden die Mittelfrequenz von allen Flechtenarten addiert. Der dadurch entstandene Wert wird Luftgütwert (LGW) genannt. Ein niedrigerer Luftgütwert entspricht logischerweise einer höheren Luftbelastung.

#### 4.1.2 Richtlinie 3957, Blatt 13

2005 wurde die alte Richtlinie 3799, Blatt 1 durch die neue Richtlinie 3957, Blatt 13 abgelöst. Diese Überarbeitung ist vor allem auf den Rückgang des Schwefels als Schadstoff in der Luft sowie den weiter steigenden Einfluss eutrophierender Luftverunreinigungen zurückzuführen. Eine einfache Summe aus allen vorkommenden Flechtenarten kann die Luftverunreinigung nicht mehr richtig widerspiegeln. Deshalb werden bei der neuen Richtlinie die nitrophytischen Flechten, d.h. die Flechtenarten, denen eine nährstoffreiche Umgebung günstige Lebensbedingungen schafft, von den übrigen Flechtenarten getrennt aufgenommen und bewertet.

#### 4.1.3 Diskussion der Aussagekraft

Um die Aussagekraft der neuen Richtlinie zu beweisen, wurde im Sommer 2006 eine stichprobeartige Untersuchung von der Uni Bonn durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet war auf Nordrhein-Westfalen beschränkt. Dabei wurden die Flechtenkartierungen nach der neuen VDI-Richtlinie mit den Messwerten für Luftschadstoffe  $\text{NO}_2$  sowie  $\text{SO}_2$  verglichen. Die Ergebnisse wiesen überraschenderweise keine Korrelation zwischen den nitrophytischen Flechtenarten und  $\text{NO}_2$ -Messwerten auf. Das besagt allerdings nicht, dass Stickstoff keinen Einfluss auf die eutrophierenden Flechten hat, sondern nur, dass Stickstoff in Form von  $\text{NO}_2$  keinen Einfluss hat, weil er in dieser Form für die Aufnahme von Pflanzen nicht relevant ist. Ein Grund hierfür ist, dass die Flechten Stickstoff vermutlich kaum als  $\text{NO}_2$ , sondern in Form von  $\text{NH}_3$ , bzw.  $\text{NH}_4^+$  aufnehmen. Eine Beziehung ließe sich nur nachweisen, wenn man statt  $\text{NO}_2$  Nitrat und Ammonium im Regenwasser oder Ammoniak in der Luft messen würde, was jedoch in Deutschland nicht der Fall ist (Schumacher, Janssen, & Frahm, 2006).

Die neue Richtlinie ist auf die Verhältnisse von Mitteleuropa abgestimmt und basiert auf dem Vorschlag für eine europaweit einheitliche Methode. Eine ebenfalls auf diesem Vorschlag aufbauende Richtlinie existiert auch in Italien (Bartholmeß, Müller, Nobel, & Winkelbauer, 2011).

## 4.2 Moose und Schwermetallakkumulation

Moose können über mehrere Jahre die Schwermetalle ohne physische Veränderungen in ihren Geweben anreichern, deshalb sind sie besonders geeignet für das Monitoring atmosphärischer Depositionen. In Europa wird das Moosmonitoring seit 1990 alle fünf Jahre an zahlreichen Messorten in verschiedenen Ländern durchgeführt, um die räumliche Verbreitung und die zeitlichen Entwicklungen der Metallbioakkumulation staatenübergreifend zu kartieren. Deutschland beteiligte sich am Moosmonitoring 1990, 1995, 2000 und 2005. An dem Monitoring-Programm 2010 hat Deutschland allerdings nicht teilgenommen. Die Anreicherung von bis zu 40 Spurenelementen in Moosen wurde nach europaweit harmonisierter Richtlinie bestimmt. Die Richtlinie regelt die Auswahl der Orte, an denen die Moose gesammelt werden, die zu berücksichtigenden Moosarten, ihre chemische Analyse und Qualitätskontrolle sowie die Klassierung der Messdaten für die Kartierung ihrer räumlichen Strukturen (Schröder et al., 2009). Das deutsche Messnetz umfasste zunächst 592 (1990) Moosprobenentnahmestandorte und übertraf seit 1995 mit 1026 bzw. 1028 (2000) Standorten die europaweit vorgesehene Minstdichte von 1,5 Sammelstellen pro 1000 qkm (Pesch, Schröder, Dieffenbach-Fries, & Genßler, 2008). 2005 wurde die Anzahl der Standorte durch Netzoptimierung wieder auf 720 verringert. In der Kampagne 2005 wurde erstmals auch die Anreicherung von Stickstoff in Moosen untersucht.

Die Akkumulation von Schwermetallen in Moosen hat jedoch eine Schwelle (Kularatne & Freitas, 2012). Wird die Grenze erreicht, hört das Akkumulationsverfahren dementsprechend auf. Außerdem wird die Metallakkumulation vor allem von der Moosart, dem Kronentrauffeffekt und dem Niederschlag beeinflusst. Diese Faktoren korrelieren stärker mit der Metallbioakkumulation als die quellenbezogenen Faktoren wie Verkehr- und Siedlungsflächen (Schröder et al., 2008).

### 4.2.1 Trend der Bioakkumulation von Schwermetallen in Deutschland (1990-2005)

Eine Studie (Schröder et al., 2009) hat die Ergebnisse der Schwermetallakkumulation im Zusammenhang mit der Emission von technischen Anlagen sowie die Landnutzungen analysiert (Abbildung 3). Zeitlich gesehen zeigen die Analysen einen statistisch signifikanten Rückgang der Metallakkumulation von 1990 bis 2000. Von 2000 bis 2005 ist wieder ein

Anstieg für Cd (Cadmium), Cr (Chrom), Cu (Kupfer), Sb (Antimon) und Zn (Zink) zu beobachten. Besonders deutlich sind hierbei die Zunahmen für Cr (160 %), das nahezu ähnlich hohe Werte wie 1990 erreicht. Aber es benötigt noch weitere Forschungen, um festzustellen, ob die Zunahme von Cr ist emissionsbedingt oder ein biogener Effekt (z. B. infolge gleichzeitig angestiegener Stickstoffbelastung). Der zeitliche Trend der vergangenen 15 Jahre zeigt für die meisten Metalle jedoch einen deutlichen und flächendeckenden Rückgang der Akkumulation in Moosen. Signifikante Abnahmen seit 2000 wurden bei Hg, Pb und Ti festgestellt. Die entsprechenden Trends für die einzelnen Bundesländer sind allerdings unterschiedlich.

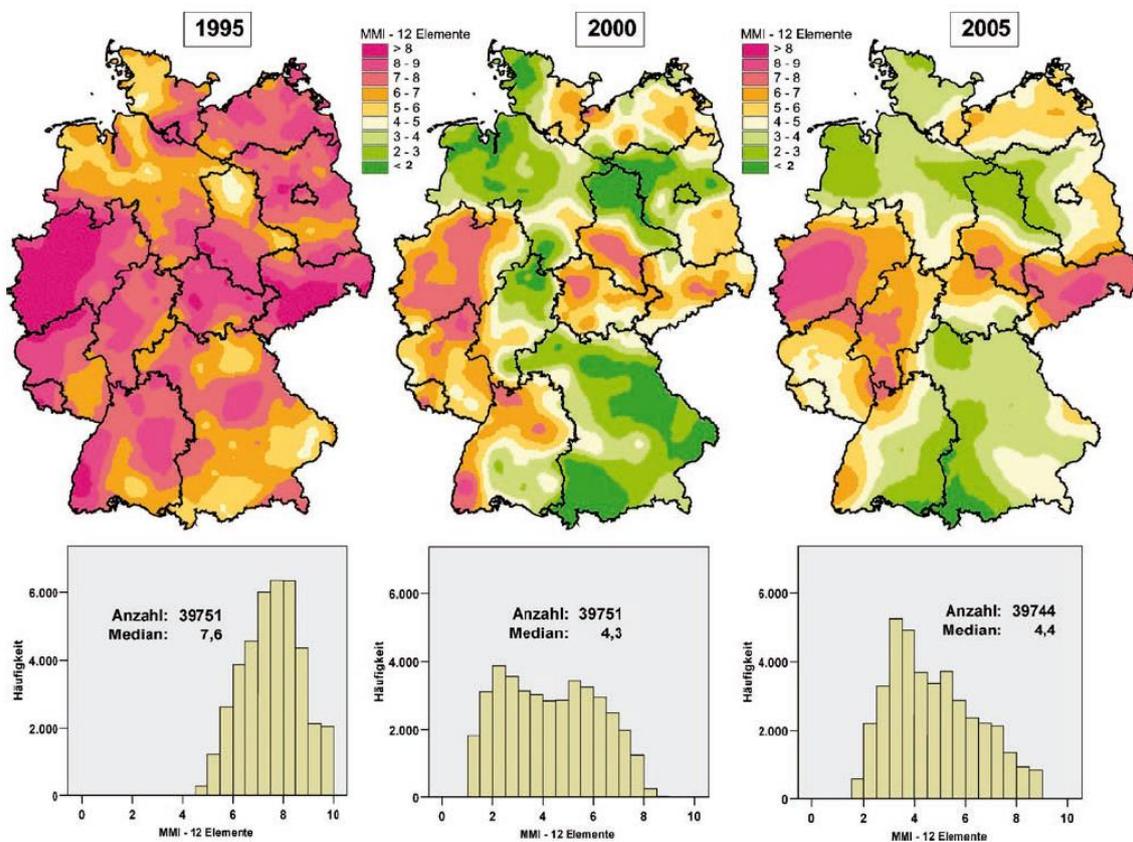


Abbildung 3 Trend der Schwermetallakkumulation in Deutschland (Schröder et al., 2009)

Die Hotspots finden sich zumeist im urban-industriell geprägten Ruhrgebiet, der dicht besiedelten Rhein-Main-Region sowie in den industriell geprägten Regionen der neuen Länder (z. B. Raum Halle/Leipzig).

#### 4.2.2 Optimierung des Messnetzes

Eine höhere räumliche Auflösung bei der Bioindikation oder beim Biomonitoring ermöglicht zwar eine genauere Analyse, löst auch wesentlich mehr Kosten aus. Vor der vierten Untersuchung im Jahre 2005 wurde untersucht, ob und wie das bis auf 1028 Standorte angewachsene Messnetz möglichst ohne Einschränkung der statistischen Aussagekraft reduziert werden kann. Ein weiteres Ziel ist eine stärkere Vernetzung des Moosmonitoring mit anderen Umweltbeobachtungsprogrammen. Das Moosmonitoring-Messnetz für den Survey 2005 wurde von zuletzt 1028 Standorten auf 720 verringert ohne wesentliche Veränderung der Landschaftsrepräsentanz des Netzes, der geostatistischen Repräsentanz seiner Messwerte oder der Schätzung klassischer statistischer Kenngrößen. (Pesch et al., 2008).

#### 4.3 Indikation mit Höheren Pflanzen

Im Vergleich zu Flechten und Moosen sind Höhere Pflanzen wesentlich weniger empfindlich gegen Luftverschmutzung. Deshalb kann eine einfache Verbreitungskartierung nicht genügend Nachweis für die Luftbelastung liefern. Höhere Pflanzen werden häufiger als akkumulative Indikatoren herangezogen. Außerdem haben Höhere Pflanzen, im Gegensatz zu Flechten und Moosen, Stoffwechsel zu zwei Umweltmedien, zum Boden oder anderem Substrat und zur Luft (Zierdt, 1997). Das bildet ein weiteres Problem für die Verwendung von höheren Pflanzen als Bioindikatoren für Luftverunreinigungen, da die ausschlaggebende Quelle von Schadstoffen schwierig zu identifizieren ist. Deshalb werden höhere Pflanzen häufiger für die Bioindikation integrierter Verschmutzung von der Luft und der Erde eingesetzt.

##### 4.3.1 Laub- und Nadelbäume

Als Akkumulationsindikatoren für Schwermetalle eignen sich die Laub- und Nadelbäume, z.B. die sowohl in Städten als auch im Umland vorkommende Pyramiden-Pappel (*Populus nigra 'Italica'*). In Bulgarien werden die Blätter von Pyramiden-Pappeln aus 10 Jahren für die Evaluation der Belastung von As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb und Zn verwendet (Djingova, Wagner, & Kuleff, 1999).

Ein weiterer bewährter Pflanzenteil zur Bioakkumulation ist die Borke. Eine Studie (Sawidis, Breuste, Mitrovic, Pavlovic, & Tsigaridas, 2011) hat die Konzentrationen von vier Metallen (Cu, Pb, Fe, Cr) in Blätter- sowie Borkenproben aus drei europäischen Städten (Salzburg, Belgrade und Thessaloniki) verglichen. Die untersuchten Baumarten sind *Platanus orientalis* L. und *Pinus nigra* Arn. Im Vergleich zu den Blättern weisen die Borkenproben logischerweise einen höheren Gehalt von Schwermetallen. Auf der einen Seite sind die Borken resistenter gegen Verschmutzung als die Blätter und haben folglich eine höhere Schwelle dafür. Auf der anderen Seite können die Schadstoffe auf der Oberfläche von Blättern leichter vom Regenwasser abgewaschen werden. Bei manchen Bäumen werden außerdem die Blätter jährlich gewechselt.

#### 4.3.2 Nutz- und Zierpflanzen

Viele krautigen Nutz- und Zierpflanzen eignen sich auch zum aktiven Biomonitoring in Städten. Die häufig verwendete Arten sind u.a. die Petunien (insbesonder *Petunia hybrida*), die Buschbohne (*Phaseolus vulgaris*), der Tabak (*Nicotiana tabaccum*, Sorte Bel W3), die Gladiolen (*Gladiolus spec.*), der Grünkohl (*Brassica oleracea acephala*) und das Italienische Weidelgras (*Lolium multiflorum italicum*, Sorte Lema). Eine ausführliche Zusammenstellung ist in dem Buch von (Arndt, Nobel, & Schweizer, 1987) zu finden.

#### 4.3.3 Wildpflanzen

Auch die Wildpflanzen sind für die Bioindikation nützlich. Z.B. reagieren die Kleine Brennessel (*Urtica urens*) und das Kleine Rispengras (*Poa annua*) empfindlich gegen PAN und Ozon. In den USA gilt *Poa annua* seit langem als empfindlicher Bioindikator für photochemischen Smog. Typische Schadsymptome sind Farbeveränderungen und Nekrosen an den Blättern.

### 5. Indikation von Temperaturverhältnissen

Das Klima in der Stadt ist im Allgemeinen wärmer und trockener als es im Umland. Das ist eine Begünstigung für wärmeliebende und trockenheitsresistente Arten führt zu erhöhter Überlebenschance frostempfindlicher Arten. Für stark (luft-)feuchtigkeitsabhängige Arten (Hydrophyten) bedeutet es im Gegensatz geringe Existenzmöglichkeiten.

Die höheren Temperaturen in der Stadt können außerdem zu einer verfrühten Blüten- und Blühtentfaltung der Pflanzen führen. Die Differenz zwischen den Blühterminen im Umland und in der Stadt lässt Rückschlüsse über die Temperaturunterschiede ziehen: Mit Hilfe der Blüten- und/oder Blühtentwicklung der Pflanzen sind daher Zonen gleicher bzw. unterschiedlicher Temperaturverhältnisse erkennbar. Durchgeführt wurden derartige phänologische Untersuchungen bisher oft an Linden und Rosskastanien (Blume & Sukopp, 1998).

Im Jahr 2006 wurde eine solche phänologische Untersuchung in Berlin mit Hilfe von öffentlicher Beteiligung durchgeführt. Dabei wurden der Blühtermin und der Blühtentfaltungstermin von den Pflanzenarten Forsythie (*Forsythia intermedia*), Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), Hänge-Birke (*Betula pendula*), Löwenzahn (*Taraxacum officinale*), Sommer-Linde (*Tilia platyphyllos*, *Tilia grandifolia*), Apfel (*Malus domestica*), Flieder (*Syringa vulgaris*) und Götterbaum (*Ailanthus altissima*) beobachtet und registriert. Die Ergebnisse zeigten, im Mittel beträgt die Verfrühtung der phänologischen Phasen in Berlin gegenüber dem Umland drei Tage, wobei zwischen den Pflanzenarten (Phänophasen) Unterschiede erkennbar sind. Die größten Differenzen wurden für den Austrieb der Rosskastanie im Beobachtungsprogramm beobachtet (7,1 Tage). Auch für die nachfolgenden Phasen der Kastanie wurden deutliche Unterschiede zwischen Stadt und Umland festgestellt. Ähnlich große Differenzen ergaben sich beim Flieder und in etwas abgeschwächter Form bei der Sommerlinde. Vernachlässigbar waren hingegen die Stadt-Umland-Gradienten beim Blühtbeginn des Apfels und der Blühtentfaltung der Hängebirke (Henniges & Chmielewski, 2007).

## 6. Richtlinien für Bioindikation

Eine zeitliche und räumliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse von der Bioindikation oder vom Biomonitoring setzt standardisierte Methoden voraus. Standardisierung ist nicht nur für die Erfassung, sondern auch für die Auswertung von Daten wichtig. In Deutschland gibt die Richtlinie 3957 von dem Verein der Deutschen Ingenieure (VDI) seit 2005 konkrete Arbeitsanweisungen vor. Die aktuellen Richtlinien sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Die laufende Richtlinienarbeit umfasst z. B. die Standardisierung von Beurteilungsverfahren, und Verfahren, die verstärkt auf Biodiversitätsaspekte und auf faunistische Ansätze eingehen,

sowie Richtlinien für ein Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen (Nobel et al., 2005).

**Tabelle 1** Akutelle Richtlinien zur Bioindikation

<b>Nummer</b>	<b>Titel</b>	<b>Ausgabedatum</b>
<b>Blatt 1</b>	Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation) - Grundlagen und Zielsetzung	1999-05
<b>Blatt 5</b>	- Das Fichten-Expositionsverfahren	2001-12
<b>Blatt 2</b>	- Verfahren der standardisierten Graskultur	2003-01
<b>Blatt 8</b>	Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung	2003-01
<b>Blatt 6</b>	- Ermittlung und Beurteilung der phytotoxischen Wirkung von Ozon und anderen Photooxidantien - Verfahren der standardisierten Tabak-Exposition	2003-04
<b>Blatt 10</b>	- Emittentenbezogener Einsatz pflanzlicher Bioindikatoren	2004-12
<b>Blatt 14</b>	- Verfahren der Standardisierten Gladiolen-Exposition	2005-11
<b>Blatt 13</b>	- Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte	2005-12
<b>Blatt 12</b>	- Kartierung der Diversität epiphytischer Moose als Indikator für die Luftqualität	2006-07
<b>Blatt 11</b>	- Probenahme von Blättern und Nadeln zum Biomonitoring von immissionsbedingten Stoffanreicherungen (passives Biomonitoring)	2007-10
<b>Blatt 16</b>	- Nachweis genotoxischer Effekte mit dem <i>Tradescantia</i> -Kleinkern-Test	2008-06
<b>Blatt 3</b>	- Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl	2008-12
<b>Blatt 17</b>	- Aktives Monitoring der Schwermetallbelastung mit Torfmoosen (Sphagnum-bag-technique)	2009-07
<b>Blatt 19</b>	- Nachweis von regionalen Stickstoffdepositionen mit den Laubmoosen <i>Scleropodium purum</i> und <i>Pleurozium schreberi</i>	2009-12
<b>Blatt 15</b>	- Untersuchungsstrategie nach Schadensereignissen (passives Biomonitoring)	2010-12

## 7. Vorteile und Nachteile der Bioindikation im Vergleich zu Messstationen

Heutzutage sind immer mehr Möglichkeiten zur Umweltüberwachung vorhanden. Zu Beispiel werden seit den 90er Jahren Messstationen auf der Bundes- und Bundesländer-Ebenen betrieben. Diese Messstationen können unterschiedliche Parameter in der Luft mit Präzision messen. Da die Pflanzen eine Zusammenwirkung verschiedener Umweltfaktoren ausgesetzt, eine vergleichbare Genauigkeit für die einzelnen Schadstoffe lässt sich bei der Bioindikation nicht erwarten.

Allerdings lässt die Bioindikationsverfahren vorteilhaft eine höhere räumliche Auflösung zu. Z.B. bei der Flechtenkartierung können die räumliche Auflösung auf  $1\text{km}^2$  gesetzt werden. Dadurch ist eine flächendeckende Analyse möglich. Die Messungen bei Messstationen geschehen dagegen meistens punktmäßig. Die räumliche Auflösung ist aus finanziellen Gründen meistens niedrig. Abbildung 3 stellt das aktuelle Messnetz in Baden-Württemberg dar.

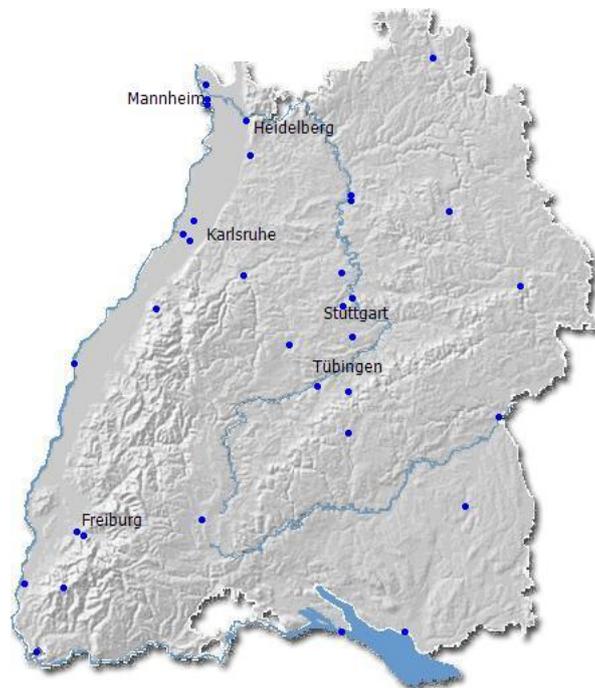


Abbildung 4 Luftmessnetz in Baden-Württemberg

(Quelle: [http://mnz.lubw.baden-wuerttemberg.de/messwerte/langzeit/images/mp\\_akt\\_index.jpg](http://mnz.lubw.baden-wuerttemberg.de/messwerte/langzeit/images/mp_akt_index.jpg))

Ein weiterer Vorteil von Bioindikation liegt in dem breiteren Schadstoffspektrum. Dieser Vorteil ist besonders deutlich bei der Schwermetallakkumulation, die die Anreicherung von bis zu 40 Spurelementen ermöglicht. In keinem anderen Messprogramm werden räumlich so verdichtet Daten über ein breites, ökotoxikologisch relevantes Stoffspektrum erhoben.

Außerdem bleibt die Bioindikation immer noch ein wichtiges Instrument für die Forschung über die Ursachenkette Emission-Transmission-Immission-Wirkung. Technische Messnetze basiert meistens auf dem Grenzwertkonzept, die tatsächlichen Verhältnisse in der Umwelt werden vereinfacht. Es ist auch immer häufiger der Fall, dass Bioindikation und andere Messmethoden bei der Umweltüberwachung kombiniert eingesetzt werden (Bartholmeß, Schlottmann, & Nobel, 2011). Angesichts der jeweiligen Vor- und Nachteile ist eine gegenseitige Ergänzung der technischen und biologischen Ansätze sinnvoll.

## 8. Zusammenfassung

Die für uns Menschen normalerweise kaum wahrnehmbaren Umweltveränderungen wirken allerdings auf die Pflanzen aus und können ihr Vorkommen beeinflussen oder verschiedene Schadsymptome auslösen (Reaktive Bioindikation). Andere Schadstoffe können von den Pflanzen angereichert werden und lassen sich später mit Hilfe von chemischen Untersuchungen bestimmen und bewerten (Akkumulative Bioindikation). Nach der Quelle der untersuchten Pflanzen unterscheiden sich die aktiven und passiven Ansätze. Beim passiven Verfahren werden die vorhandenen Pflanzen im Untersuchungsgebiet herangezogen, während beim aktiven Verfahren werden die Indikatoren unter standardisierten Bedingungen ins Gelände ausgebracht.

Am Häufigsten werden Flechten und Moose als Bioindikatoren eingesetzt. Die Kartierung epiphytischer Flechten und Metallakkumulation mit Moosen sind zwei relativ bewährte Methoden. Aber auch Höhere Pflanzen finden ihre Anwendung.

Um eine räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird die Bioindikation in Deutschland seit 2005 durch die VDI Richtlinie 3957 standardisiert. Die Richtlinie-Serie stellen Arbeitsanweisungen für verschiedene Verfahren bereit. Im Zusammenhang mit Umweltveränderungen werden die Richtlinien auch ständig überarbeitet.

Bioindikationsverfahren und technische Messgeräte bringen verschiedene Vorteile und Nachteile mit sich. Eine Kombination ist deshalb von großer Bedeutung für ein besseres Verständnis der Ursachenkette Emission-Transmission-Immission-Wirkung.

## Literatur

- Agnan, Y., Séjalon-Delmas, N., & Probst, A. (2013). Comparing early twentieth century and present-day atmospheric pollution in SW France: A story of lichens. *Envir Pollut*, 172, 139-148. doi: 10.1016/j.envpol.2012.09.008
- Arndt, U., Nobel, W., & Schweizer, B. (1987). *Bioindikatoren : Möglichkeiten, Grenzen u. neue Erkenntnisse ; 102 Tab.* Stuttgart: Ulmer.
- Bartholmeß, H., Müller, K., Nobel, W., & Winkelbauer, W. (2011). Biomonitoring im Rahmen der Ökosystembewertung eines Automobil-Produktionsstandorts. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft*, 71, 339-346.
- Bartholmeß, H., Schlottmann, K., & Nobel, W. (2011). Immissionsmessungen mit Diffusionssammlern und Flechtenkartierungen im Zusammenhang mit dem Eintrag von Stickstoff in die Umwelt. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft*, 71(4), 165.
- Blume, H.-P., & Sukopp, H. (Eds.). (1998). *Stadtökologie : ein Fachbuch für Studium und Praxis* (2., überarb. und erg. Aufl., [Nachdr.] ed.). Stuttgart ; Jena ; Lübeck ; Ulm: Fischer.
- Büdel, B., & Schöller, H. (Eds.). (1997). *Flechten : Geschichte, Biologie, Systematik, Ökologie, Naturschutz und kulturelle Bedeutung ; Begleitheft zur Ausstellung "Flechten - Kunstwerke der Natur"*. Frankfurt am Main: Kramer.
- Djingova, R., Wagner, G., & Kuleff, I. (1999). Screening of heavy metal pollution in Bulgaria using *Populus nigra* 'Italica'. *Science of the total environment*, 234(1), 175-184.
- Henniges, Y., & Chmielewski, F.-M. (2007). Stadt-Umland-Gradienten phänologischer Phasen im Raum Berlin 2006. Berlin: Bibliothek der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.
- Kirschbaum, U., & Wirth, V. (1997). *Flechten erkennen, Luftgüte bestimmen : 6 Tabellen* (2., verb. Aufl. ed.). Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Kularatne, K., & de Freitas, C. (2012). Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution. *Environmental and Experimental Botany*.
- Licht, W. (2013). *Zeigerpflanzen : erkennen und bestimmen* (1. Aufl. ed.). Wiebelsheim: Quelle & Meyer.
- Nobel, W., Beismann, H., Franzaring, J., Kostka-Rick, R., Wagner, G., & Erhardt, W. (2005). Standardisierte biologische Messverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Wirkung von

- Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation) in Deutschland. *Gefahrstoffe–Reinhalt. Luft*, 65, 478-484.
- Pesch, R., Schröder, W., Dieffenbach-Fries, H., & Genßler, L. (2008). Optimierung des Moosmonitoring-Messnetzes in Deutschland. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 20(1), 49-61. doi: 10.1065/uwsf2007.03.166
- Sawidis, T., Breuste, J., Mitrovic, M., Pavlovic, P., & Tsigaridas, K. (2011). Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, 159(12), 3560-3570.
- Schröder, W., Englert, C., Pesch, R., Zechmeister, H., Thöni, L., Suchara, I., . . . Alber, R. (2008). Metallakkumulation in Moosen: Standörtliche und regionale Randbedingungen des Biomonitoring von Luftverunreinigungen. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 20(2), 120-132. doi: 10.1065/uwsf2007.08.448
- Schröder, W., Pesch, R., Matter, Y., Göritz, A., Genßler, L., & Dieffenbach-Fries, H. (2009). Trend der Schwermetall-Bioakkumulation 1990 bis 2005: Qualitätssicherung bei Probenahme, Analytik, geostatistischer Auswertung. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 21(6), 549-574.
- Schumacher, J., Janssen, A.-M., & Frahm, J. (2006). Spiegelt der VDI-Luftgüteindex die Schadstoffbelastung durch NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> wider. *Herzogia*, 19, 205-213.
- Stapper, N. J., & Kricke, R. (2004). Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorteutrophierung und verkehrsbedingten Immissionen. *Limprichtia*, 24, 187-208.
- Wirth, V. (2002). *Indikator Flechte : Naturschutz aus der Flechten-Perspektive*. Stuttgart: Staatliches Museum für Naturkunde [u.a.].
- Zierdt, M. (1997). *Umweltmonitoring mit natürlichen Indikatoren : Pflanzen, Boden, Wasser, Luft ; mit 25 Tab.* Berlin ; Heidelberg [u.a.]: Springer.