

# Beziehungen zwischen Luftverunreinigung und Wohlbefinden

Monika Bullinger

Institut für Medizinische Psychologie der Ludwig Maximilians Universität, München

Die Wirkungen verunreinigter Luft auf die menschliche Gesundheit sind Gegenstand zahlreicher epidemiologischer und toxikologischer Studien, in denen Zielkriterien wie Mortalität, Morbidität, Beeinträchtigungen physiologischer Funktionen und histopathologische Veränderungen untersucht wurden [1-3]. Mit diesen Kriterien wird aber der Aspekt des Wohlbefindens wenig berücksichtigt, auf den die Weltgesundheitsorganisation in ihrer Gesundheitsdefinition hingewiesen hat.

Generell ist die Erforschung der Wirkungen verunreinigter Luft unter psychologischem Aspekt gegenüber medizinisch orientierten Untersuchungen unterrepräsentiert. Der Schwerpunkt empirischer Arbeiten liegt auf Meinungsumfragen zu Einstellungen und Belästigungsreaktionen gegenüber Luftverunreinigungen und auf experimentellen Studien zur Psychophysik der Geruchswahrnehmung sowie zur Beeinträchtigung neuropsychologischer Leistungen unter Schadstoffeinfluss [4-6].

Die Vernachlässigung der psychologischen Dimension der Schadstoffwirkung entammt nicht nur dem Primat sogenannter «harter» klinischer Daten in der Umweltforschung, sondern auch der Frage, was denn eigentlich Luftverunreinigungen mit menschlichem Erleben und Verhalten zu tun haben. Es fehlt also ein Modell, das auf der Grundlage von Theorien über Mensch-Umwelt-Beziehungen psychologisch bedeutsame Zielkriterien sowie Mechanismen der Schadstoffwirkung auf den Menschen zu formulieren gestattet. Für die Entwicklung eines solchen Modells ist der Rückgriff auf die jüngere psychobiologische Stressforschung hilfreich, die jüngst Eingang in die umweltspsychologische Literatur gefunden hat [7-9].

Nach stress-theoretischen Modellvorstellungen sind Umweltbelastungen wie zB Luftverunreinigungen als Stressoren zu klassifizieren, die beim Menschen zu psychischen, körperlichen und verhaltensmässigen Veränderungen führen können [10]. Für die Auslösung und Intensität solcher Stressreaktionen sind nicht primär Charakteristika des Stressors von Bedeutung, sondern wesentlich die Art der Wahrnehmung und Bewertung des Reizes durch die betroffene Person [11, 12]. Wie Selye [13] in seiner Theorie des generellen Adaptationssyndroms betont hat, können stressindu-

zierte psychische Störungen im Rahmen einer psychosomatischen Verknüpfungskette langfristig zu funktionellen Störungen und zu Schädigungen der Endorgane führen. Auf die Umweltforschung übertragen bedeutet dies, dass Schadstoffen möglicherweise nicht nur eine direkte neurotoxikologische Wirkung bei hohen Konzentrationen zuzuschreiben ist, sondern dass sie auch in niedrigeren Konzentrationen über Befindlichkeitsveränderungen zu verschlechterter körperlicher Verfassung führen könnten [14]. Der stress-theoretische Ansatz stellt eine neue Perspektive für die Untersuchung von Beziehungen zwischen Umwelt und Gesundheit dar [15, 16] und liegt einem heuristischen Modell zur Erforschung der Effekte von Schadstoffen auf den Menschen zugrunde (siehe Abbildung 1).

Das Modell identifiziert als stresshaften Einflussfaktor die lufthygienische Situation über das Zusammenwirken von Schadstoffen und Wetter, als Moderatorvariable die Bewertung der Luftqualität, zu erschliessen über Beurteilungen der Aussenluft und Belästigungsreaktionen, und als Zielkriterien mögliche Auswirkungen auf das psychische Befinden, die neuropsychologische Funktion und die körperliche Verfassung.

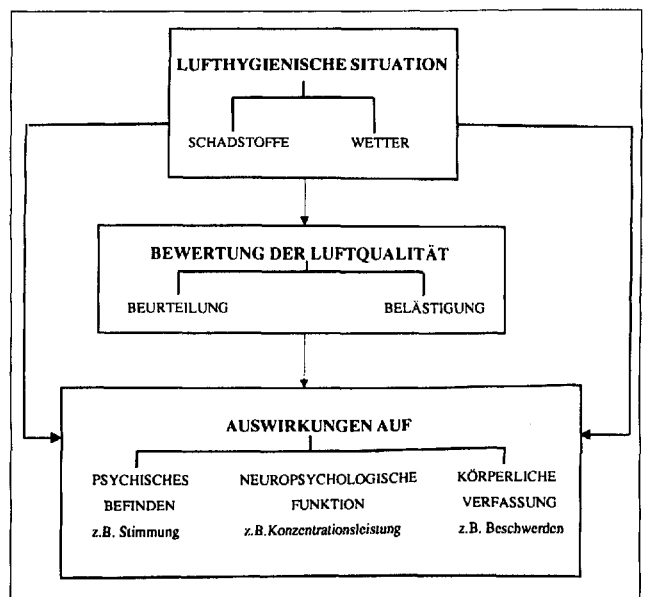


Abb. 1. Ein stress-theoretisches Modell der Wirkung von Luftverunreinigungen auf den Menschen

Die Untersuchung solch subtiler Auswirkungen der Umweltbelastung erfordert sowohl ein Studiendesign, das die Zielkriterien unter gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Feld über den Zeitverlauf erfasst, als auch ein statistisches Verfahren, das zeitlich verzögerte Einflüsse der Schadstoffe auf das Befinden abbildet, sowie Probanden, die einer homogenen Zielgruppe schadstoffexponierter bzw. gesundheitlich sensibler Personen entstammen sollten. Dieser Ansatz lag zwei prospektiven Studien zugrunde, deren Ziel die Untersuchung von Beziehungen zwischen lufthygienischer Situation und psychischem Befinden, neuropsychologischer Funktion und körperlicher Verfassung war.

In Studie 1 wurden diese Zusammenhänge während zweier Herbstmonate bei gesunden Bewohnern eines lufthygienisch stärker belasteten Gebiets (Zielgruppe) gegenüber gesunden Bewohnern eines lufthygienisch geringer belasteten Gebiets (Kontrollgruppe) untersucht; in Studie 2 während zwei Wintermonaten bei chronisch respiratorisch erkrankten Bewohnern eines lufthygienisch stark belasteten Gebiets (Zielgruppe) gegenüber chronisch, nicht aber respiratorisch erkrankten Bewohnern desselben Gebiets (Kontrollgruppe).

Beiden Studien lagen die Annahmen zugrunde, dass im Vergleich zu den Kontrollgruppen die Probanden der Zielgruppen stärkere Beeinträchtigungen ihres Wohlbefindens erleben, dass diese Beeinträchtigungen mit Schadstoffkonzentrationen in deutlichem Zusammenhang stehen und dass individuell schadstoffreagible Personen in den Zielgruppen häufiger vertreten sind.

Die Studien waren Teil einer umfassenden lufthygienischen Wirkungskatasteruntersuchung in den Bereichen Humanmedizin, Pflanzenökologie und Veterinärmedizin, durchgeführt von verschiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU). Beschreibungen der Projekte im Bereich Humanmedizin, darunter auch der vorgestellten Studie, liegen in Berichtform vor [17, 18, 19].

## Methoden

### Untersuchungsgebiete

Gemäss der Jahresdaten des Lufthygienischen Überwachungsnetzes Bayern (LÜB) des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz prüfte das StMLU, welche strukturell und geographisch vergleichbaren Gebiete Bayerns sich in ihrem durchschnittlichen lufthygienischen Belastungsgrad deutlich unterscheiden. Als Belastungsgebiet für Studie 1 identifizierte das Ministerium die Stadt Ingolstadt und als Vergleichsgebiet die Stadt Schrobenhausen; für die Studie 2 wurde als Belastungsgebiet die Stadt Nürnberg ausgewählt.

### Probanden

Um homogene und schadstoffexponierte Studienpopulationen zu erhalten, wurden in beide Studien nicht

berufstätige Frauen im Alter zwischen 50 und 70 Jahren einbezogen, die nicht rauchten, seit mehr als zwei Jahren ortsansässig waren und nicht weiter als 2 km von einer LÜB-Messstelle entfernt wohnten. Zusätzliche Einschlusskriterien für Studie 1 war ein guter selbstberichteter Gesundheitszustand und für Studie 2 die ärztliche Diagnose von entweder chronischer Bronchitis oder Diabetes mellitus nach WHO-Definition. Ausschlusskriterien waren Sprachprobleme, definierte Erkrankungen mit Medikationserfordernis und psychiatrische Auffälligkeiten.

Die Probandinnen in Studie 1 wurden mithilfe der Stadtverwaltungen von Ingolstadt und Schrobenhausen über eine Zufallsliste von je 50 Adressen schriftlich kontaktiert (Verweigerungsrate war 30%). Pro Gebiet erfüllten elf Probandinnen die telefonisch erfragten Ein- und Ausschlusskriterien und waren zur Teilnahme bereit (N = 22). In Studie 2 wurde eine Zufallsstichprobe von 60 praktischen Ärzten aus Nürnberg gezogen, die jeweils ein nach Alter gematchtes Paar von Bronchitis- und Diabeteskranken in die Studie einbeziehen sollten (Verweigerungsrate der Ärzte war 62%). 17 der 25 teilnahmebereiten Ärzte brachten 20 Bronchitis- und 20 Diabetespatientinnen in die Studie ein (N = 40).

### Variablen und Studiendurchführung

Zu Studienbeginn wurden in beiden Studien Daten zu Umweltwahrnehmung, Gesundheitszustand, Persönlichkeitsmerkmalen und soziodemographischen Charakteristika mittels eines aus der Literatur vorliegenden Interviews (20) und verschiedener psychologischer Standard-Fragebögen erhoben. Im zweimonatigen Untersuchungszeitraum wurden über die LÜB-Messstellen die Tageskonzentrationen (Mittelwerte der halbstündigen Aufzeichnungen über 24 Stunden) von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Schwebstaub (Staub) Stickoxiden (NO und NO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen mit und ohne Methan (CnHm und CnHm-<sub>Ch4</sub>) und Ozon (O<sub>3</sub>) gemessen. Zusätzlich zu Tageswerten klimatischer Variablen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck lagen tägliche Angaben zum Stagnationsindex und zu den Tölzer Wetterphasen vor. Der Stagnationsindex, mit einem Wertebereich von 1 bis 100, ist ein Mass für die horizontale und vertikale Durchmischung der Atmosphäre und damit für das Auswaschen von Schadstoffen; er errechnet sich aus der täglichen maximalen Mischungshöhe, dem Tagesmittelwert der Windgeschwindigkeit und der täglichen Niederschlagssumme. Die Tölzer Wetterphasen, in die ua der Luftdruck eingeht, entstammen der biometeorologischen Forschung und spiegeln sechs auf die menschliche Gesundheit günstig vs ungünstig wirkende Wetterepisoden von Schönwetter bis vollzogenem Wetterumschlag wider [17].

Zur Erfassung des psychischen Befindens wurde täglich die von den Probandinnen selbst zu beurteilende Münchener Befindlichkeitsskala eingesetzt (Bf-S:21). Die standardisierte und psychometrisch geprüfte Skala

erfasst die aktuelle Stimmungslage mit einem aus 28 Items gebildeten Summenscore, der mit einem Wertebereich zwischen 0 und 56 eine schlechte vs gute Befindlichkeit reflektiert. Zur Erfassung des Stress-Erlebens wurde eine Visual-Analogskala (VAS) eingesetzt, auf der die Probandinnen den Grad ihrer Belastung durch vorher selbst spezifizierte Ereignisse auf einer Linie zwischen 0 und 100 mm markierten. Die täglich erlebte Luftqualität wurde mit einem eigens für die Studien entwickelten Polaritätsprofil und mit einer Belastungsskala bezüglich Gerüchen, Schmutz, Autoabgasen und Wetterbedingungen erfasst. Das Polaritätsprofil misst mit 14 Adjektivpaaren und 7 Antwortkategorien die Wahrnehmung der Aussenluft (zB sauber vs verschmutzt). Faktorenanalytische Basisauswertungen legen nahe, dass mit dem Profil die positive und negative Luftqualität als voneinander unabhängige Faktoren erfasst werden [18, 19].

Die körperliche Befindlichkeit wurde von den Probanden selbst beurteilt mit der Beschwerdeliste (BL:21), die entsprechend der Beschwerdelast einen Summenwert zwischen 0 und 72 ergibt, sowie mit einer 100 mm langen VAS-Skala zum allgemeinen körperlichen Wohlbefinden. Die selbstberichtete körperliche Verfassung in Studie 2 wurde mit einer Liste respiratorischer bzw diabetesbedingter Symptome erfasst, die speziell für die Studie erstellt worden war. Als Masse der psychophysiologischen Aktivierung wurden in Studie 1 wöchentlich im 24-Stunden-Sammelurin die Konzentrationen von Gesamtkatecholaminen und Cortisol nach üblichen labortechnischen Verfahren bestimmt; zusätzlich wurde der Blutdruck gemessen (im Sitzen, Mittelwert der letzten beiden von drei konsekutiven Messungen). Wöchentlich fanden neuropsychologische Funktionsprüfungen statt, bei denen ein gebräuchlicher Konzentrationstest (D2:22) und Messungen der Reaktionszeit auf auditive und visuelle Einzel- und Doppelreize mithilfe speziell für die Studien konstruierter Messgeräte durchgeführt wurden. Trainierte Mitarbeiter führten die Interviews durch, wiesen die Probandinnen in einer Übungssitzung in die Studie ein und besuchten sie wöchentlich jeweils zur selben Zeit zu Hause, um Tagesprotokolle einzusammeln und die Messungen durchzuführen (vgl Abbildung 2).

### Statistische Analysen

Wöchentlich erhobene Daten, die einem Variablenkomplex zuzuordnen waren, wurden mittels multiva-

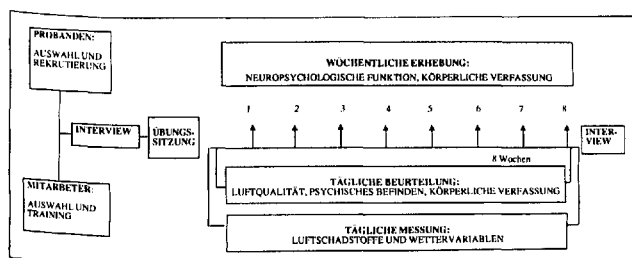


Abb. 2. Studiendesign und erhobene Variablen

riater Varianzanalysen ausgewertet (zB Reaktionszeiten auf verschiedene sensorische Modalitäten, physiologische Variablen). Zur Exploration des Anteils potentieller Schadstoffeffekte wurden univariate Varianzanalysen mit acht Messwiederholungen unter Berücksichtigung lufthygienischer Kovariaten berechnet.

Für die täglich erhobenen Daten wurden Zeitreihenanalysen vom Arima-Typ verwandt [23]. Grundlage dieser Verfahren ist die Abhängigkeit von Beobachtungen in einer Messreihe und Ziel ist die Schätzung des Abhängigkeitsmodells mithilfe zeitlich verzögerter Korrelationen, die anzeigen, auf welchem Verzögerungsfaktor das Verhalten einer Zeitreihe beruht. In univariaten Arima-Modellen kann das Verhalten einer einzelnen stationären Serie bestimmt werden durch ihre autoregressiven Komponenten (AR: die Serie ist von eigenen Vorwerten abhängig) und ihre Moving-Average-Komponenten (MA: die Serie ist von externen Ereignissen abhängig). Zur Herstellung der Stationarität müssen integrierte Serien (I) differenziert werden. Die Ergebnisse univariater Analysen dienen primär der Beschreibung des beobachteten bzw der Vorhersage des künftigen Verlaufs einer Serie. Darüber hinaus können sie aber auch zur Feststellung unterschiedlicher Verlaufscharakteristika zweier Serien herangezogen werden, indem die Arima-Parameter der Abhängigkeitsstruktur in die T-Test-Gleichung einbezogen werden (Arima-adjustierter t-Test: 24).

Beziehungen zwischen zwei bis zu fünf Serien können auf der Basis von Kreuzkorrelationen in einem Schätzvorgang simultan mithilfe multivariater Arima-Modelle geprüft werden. Der zeitliche Verzögerungsfaktor (Lag) ermöglicht hier Zusammenhangsaussagen im Sinne der zeitlichen Sequenz des Einflusses einer Serie auf die andere [25]. Die Arima-Modellierung ist gekennzeichnet durch ein iteratives Vorgehen, das die drei Phasen Modellidentifikation, Parameterschätzung und Modelldiagnostik durchläuft. In der letzten Phase wird die Güte des getesteten Modells anhand eines definierten Kriterienkatalogs geprüft. So kann ein Arima-Modell nur dann akzeptiert werden, wenn die Parametergewichte ( $\emptyset$  für AR,  $\ominus$  für MA-Prozesse) als Indikatoren der Kreuzkorrelationsfunktionen bei den spezifizierten Lags signifikant sind, wenn die Residuen normalverteilt und frei von Abhängigkeitsmodellen sind und wenn der Anteil der durch das Modell erklärten Varianz befriedigend ist. In den beiden Studien wurden univariate Zeitreihenanalysen mit dem BMDP-2T Programm [26] und multivariate Analysen mit dem Wisconsin Multiple Time Series Programm durchgeführt (WMTS: 27).

### Ergebnisse

In Interview und Fragebögen zu Beginn der Studien ergaben sich mit Ausnahme diagnosespezifischer Unterschiede in Studie 2 keine Unterschiede zwischen den Probandengruppen hinsichtlich soziodemographi-

scher, persönlichkeitspsychologischer und gesundheitsbezogener Variablen. Dagegen berichteten, im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollen, sowohl die Bewohnerinnen des Belastungsgebiets Ingolstadt (Studie 1) als auch die Bronchitiskranken aus Nürnberg (Studie 2), Luftverunreinigungen im Wohngebiet deutlicher wahrzunehmen und sich dadurch stärker beeinträchtigt zu fühlen.

Wie Tabelle 1 zeigt, waren die durchschnittlichen Luftschadstoffkonzentrationen während des zweimonatigen Untersuchungszeitraums in Studie 1 niedrig, die Tageshöchstwerte lagen deutlich unter den maximalen Immissionskonzentrationen (MIK) und die Schadstoffverläufe folgten einfachen Arima-Modellen. Nach Arima-adjustierten t-Tests zeigten sich leicht erhöhte Konzentrationen von SO<sub>2</sub>, CO und CnHm im Belastungsgebiet Ingolstadt gegenüber dem Vergleichsgebiet Schrobenhausen (vgl Tabelle 1a). Im Belastungsgebiet Nürnberg der Studie 2 erreichten die pro Tag gemittelten Luftschadstoffe im Vergleich zur lufthygienischen Situation der Studie 1 höhere Tageskonzentrationen, aber auch hier betrug die beobachteten Tageshöchstwerte um 50% der MIK-Werte (vgl Tabelle 1b).

( $t = 2.95$ ;  $p < 0.01$ ) der Ingolstädter Probandinnen im Vergleich zu Bewohnerinnen von Schrobenhausen. Im Polaritätsprofil zeigten sich eher neutrale Bewertungen der Luftqualität, dagegen aber verstärkte Belästigungreaktionen auf Gerüche in Ingolstadt ( $t = 2.34$ ,  $p < 0.01$ ).

Die Durchschnittswerte der chronisch kranken Probandinnen aus Studie 2 entsprachen sowohl bei der Befindlichkeitsskala (BF-S) als auch bei der Beschwerdeliste (BL) den Referenzwerten psychosomatisch gestörter Patienten. Die Stressbelastung lag im mittleren Skalendrittel; die Bewertung der Luftqualität war eher positiv. Entsprechend ergaben Arima-adjustierte t-Tests keine Unterschiede zwischen Bronchitis- und Diabeteskranken hinsichtlich der Wahrnehmung und Bewertung der Luftqualität im Untersuchungszeitraum, wohl aber Hinweise auf erhöhte Stressbelastung ( $t = 5.76$ ,  $p < 0.0001$ ) sowie verschlechterte psychische ( $t = 4.32$ ,  $p < 0.0001$ ) und körperliche Befindlichkeit bei den respiratorisch Kranken.

Um Zusammenhänge zwischen lufthygienischer Situation und den täglich erhobenen Variablen zu identifizieren, wurden in bivariaten Arima-Modellen systematisch je ein Schadstoff bzw eine Wettervariable und

Tab. 1. Schadstoffkonzentrationen über 57 Tage in Studie 1 (Belastungsgebiet Ingolstadt vs Vergleichsgebiet Schrobenhausen) und in Studie 2 (Nürnberg).

Angegeben sind maximale 24-Stunden-Immissionskonzentrationen nach Richtlinien des Verbandes deutscher Ingenieure (VDI), maximal beobachtete Werte, Mittelwerte und Streuungen sowie univariate Arima-Modelle; in Studie 1 zusätzlich Ergebnisse des Arima-adjustierten T-Tests für Unterschiede.

SCHADSTOFF	MIK (24h)	a) Ingolstadt		versus Schrobenhausen			b) Nürnberg				
		GEBIET	MAX (24h)	MITTELWERT (SD) 57 Tage	ARIMA Modell Lag	ARIMA adj. T-Test	GEBIET	MAX (24h)	MITTELWERT (SD) 57 Tage	ARIMA Modell Lag	
SO <sub>2</sub> (ppm)	0.1	ING	0.040	0.011 (0.006)	MA 1 1	$t = 4.298$ $p = 0.0006$	NÜR	0.092	0.025 (0.017)	MA 2 1.2	
		SCH	0.014	0.005 (0.003)	MA 1 1						
CO (ppm)	8.6	ING	2.5	1.028 (0.465)	white noise	$t = 3.773$ $p = 0.0003$	NÜR	2.87	1.70 (0.46)	AR 1 1	
		SCH	2.9	0.521 (0.542)	AR 1 1						
NO (ppm)	0.4	ING	0.02	0.007 (0.004)	MA 1 1	n.s.	NÜR	0.103	0.040 (0.021)	AR 1 1	
		SCH	0.04	0.010 (0.009)	AR 1 3						
NO <sub>2</sub> (ppm)	0.05	ING	0.013	0.007 (0.002)	AR 1 1	n.s.	NÜR	0.036	0.021 (0.001)	AR 1 1	
		SCH	0.021	0.006 (0.005)	AR 1 1						
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> (ppm)	4.0	ING	1.16	0.59 (0.20)	MA 1 1,3	$t = 2.67$ $p = 0.0008$	NÜR	1.74	0.84 (0.34)	AR 2 1.2	
		SCH	1.76	0.35 (0.12)	AR 1 2						
Ozon (ppm)	0.03	-	-	-	-	-	NÜR	0.008	0.004 (0.002)	AR 1 1.2	
Staub (mg/m <sup>3</sup> )	0.3	ING	0.072	0.029 (0.014)	MA 2 1.4	n.s.	NÜR	0.125	0.057 (0.029)	MA 2 1.2	
		SCH	0.055	0.026 (0.011)	MA 1 1						

MIK: Maximale Immissionskonzentration über 24 Stunden, MAX: beobachtete Tageshöchstwerte, ARIMA: akzeptiertes univariates Arima-Modell, Arima-adj. T-Test: Prüfung des Unterschieds in der Schadstoffkonzentration zwischen zwei Gebieten (nur Studie 1: ING vs. SCH)

Bei den in Studie 1 pro Tag über alle Probandinnen einer Gruppe gemittelten psychologischen Daten lagen die Befindlichkeitswerte der Probandinnen im Bereich gesunder Referenzgruppen (BF-S:21) und die Stressbelastung (VAS) im unteren Skalendrittel der 100-mm-Skala. Dennoch ergaben Arima-adjustierte t-Tests Hinweise auf eine schlechtere Befindlichkeit ( $t = 4.61$ ;  $p < 0.001$ ) und ein erhöhtes Stress Rating

eine psychologische Variable gepaart. Die deutlichsten Zusammenhänge ergaben sich dabei zwischen SO<sub>2</sub> bzw. Staub einerseits und psychischem Befinden bzw Stresserleben andererseits.

In multivariaten Zeitreihenanalysen wurden diese Variablen zusammen mit dem Stagnationsindex als klimatischem Indikator der Inversionssituation auf ihre wechselseitigen Beziehungen untersucht. Dabei erga-

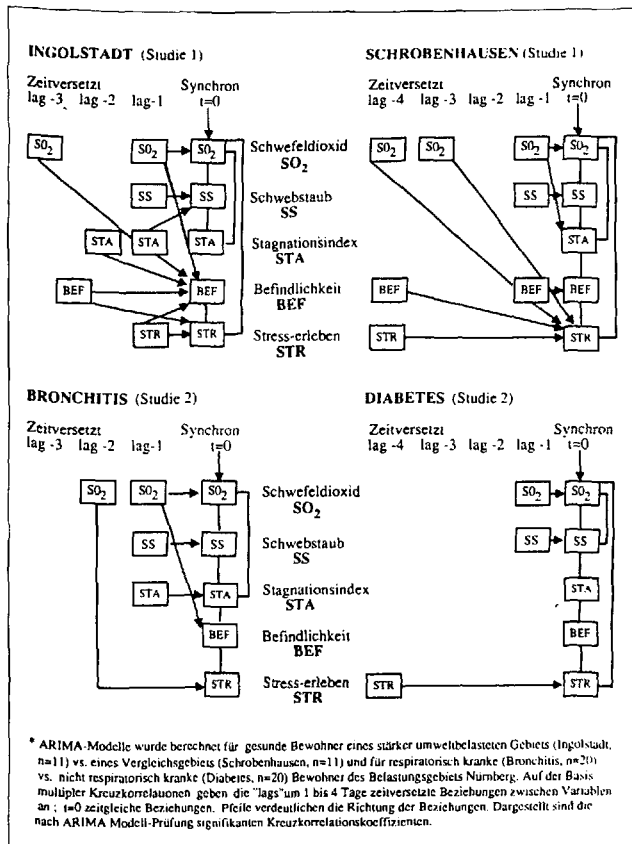


Abb. 3. Multivariate Zeitreihenanalysen der Beziehungen zwischen Schadstoffen, Wetter und psychischen Befinden

ben sich Beziehungsstrukturen, die sowohl auf zeitsynchrone Relationen als auch auf zeitverzögerte Effekte innerhalb einer (Autokorrelation) und zwischen zwei (Kreuzkorrelation) Variablen hinwiesen. Autokorrelationen geben dabei die Abhängigkeit einer Serie von ihrem Vorwert an, Kreuzkorrelationen ihre theoretisch besonders bedeutsame Abhängigkeit von dem Vorwert einer anderen Serie (vgl Abbildung 3). Solche signifikante Kreuzkorrelationen, hier mit gerichteten Pfeilen gekennzeichnet, legten Einflüsse von erhöhten SO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf verschlechtertes Befinden nahe (BF-S-Skala: BEF) sowohl für die gesunden Probandinnen aus dem Belastungsgebiet Ingolstadt (verzögert um einen und drei Tage) als auch für die Bronchitispatientinnen aus Nürnberg (verzögert um einen Tag). Bei den Kontrollgruppen zeigten sich keine Einflüsse von Schwefeldioxidkonzentrationen auf das Befinden, wohl aber auf das Stresserleben (STR): in Schrobenhausen zeitsynchron sowie verzögert um vier Tage; bei Diabeteskranken zeitsynchron. Bei den Ingolstädter Probandinnen ergab sich zudem ein Einfluss des Stagnationsindex (STA) auf die Staubkonzentration (SS) und eine Korrelation mit dem SO<sub>2</sub> sowie ein Effekt erhöhter Inversionsneigung auf verschlechtertes psychisches Befinden (vgl Abbildung 3).

Um den Anteil schadstoffreagibler Patienten in den jeweiligen Ziel- und Vergleichgruppen zu prüfen, wurde die Beziehungsstruktur zwischen den fünf Variablen für jede der 62 Probandinnen zeitreihenanalytisch geprüft. Die Einzelfallanalysen ergaben eine erhöhte Schadstoffreagibilität hinsichtlich der Befindlichkeit sowohl bei den Ingolstädter (9/11) gegenüber den Schrobenhausener (3/11) Probandinnen als auch bei den Bronchitiskranken (10/20) gegenüber den Diabeteskranken (6/10) aus Nürnberg. Aufgrund der hohen interindividuellen Variabilität der Arima-Modelle konnten allerdings weder Muster der Reagibilität noch Beziehungen zu psychosozialen Basisdaten identifiziert werden.

Weitere multivariate Arima-Modelle auf Gruppenebene ergaben für Bewohner beider Belastungsgebiete unmittelbare Beziehungen (Lags 0 und 1) zwischen erhöhter Schadstoffkonzentrationen und als schlecht erlebter Luftqualität. Sowohl die Ingolstädter Probandinnen aus Studie 1 als auch beide Patientengruppen aus Nürnberg berichteten verstärkte Geruchsbelästigungen auf erhöhte SO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die Bronchitispatientinnen in Nürnberg fühlten sich mit zunehmenden Staubkonzentrationen durch verschmutzte Luft belästigt. In beiden Studien zeigte sich zudem ein Effekt ungünstiger Tölzer Wetterphasen auf die Belästigung durch Wetterbedingungen, nicht aber auf die Wahrnehmung der Luftqualität.

Weitere Arima-Analysen zum körperlichen Wohlbefinden zeigten, dass erhöhte SO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei beiden Gruppen chronisch Kranker aus Studie 2 einen Tag später zu verschlechtertem körperlichen Wohlbefinden (VAS-Skala), nicht aber vermehrter Beschwerdelast (BL) führten. Einzelfallanalysen ergaben darüber hinaus, dass nur drei der acht Bronchitispatientinnen mit floriden respiratorischen Symptomen unter SO<sub>2</sub>-Einfluss vermehrte Hustenattacken berichteten. In Studie 1 fanden sich bei den wöchentlichen Erhebungen der Beschwerdeliste und der physiologischen Aktivierung weder signifikante Unterschiede zwischen den Ziel- und Vergleichsgruppen noch Hinweise auf Effekte von Schadstoffen.

Bei den neuropsychologischen Funktionen zeigten sich varianzanalytisch neben krankheitspezifischen Leistungsbeeinträchtigungen der Diabetespatienten im Konzentrationstest D2 in beiden Studien signifikante Veränderungen der Konzentrationsfähigkeit über die acht Messzeitpunkte (Studie 1: F = 6.6, p < 0.01; Studie 2: F = 2.7, p < 0.05), auf die die Schadstoffe, speziell SO<sub>2</sub>, aber nur in Studie 1 Einfluss zu haben schienen. Bei den Reaktionszeiten ergaben sich signifikant verschlechterte Leistungen der Bronchitiskranken in allen Reizmodalitäten, jedoch keine signifikanten Veränderungen über die Zeit. Bei den gesunden Probanden in Studie 1 traten signifikante zeitliche Veränderungen für Reaktionszeiten bei komplexen akustischen (F = 6.6, p = < 0.01) und optisch-akustischen Wahlreaktionen auf (F = 3.6, p = < 0.05), für die

negative Assoziationen mit erhöhten Schadstoffen angenommen werden können.

### Diskussion

Das Hauptergebnis der dargestellten Untersuchungen bezieht sich auf die zeitreihenanalytisch identifizierten möglichen Effekte des SO<sub>2</sub> auf Befindlichkeitsbeeinträchtigungen in Studie 1 und auf die Replikation dieses Befundes in Studie 2. Die Analyse der individuellen Schadstoffreagibilität unterstützt dieses Ergebnis, indem im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollgruppen ein höherer Anteil psychisch schadstoffreagibler Personen sowohl bei den gesunden als auch den respiratorisch kranken Bewohnern der Belastungsgebiete gefunden wurde. Aufgrund des Pilotcharakters der Studien und der geringen Fallzahl ist dieses Ergebnis aber nur unter explorativem, nicht aber unter interferenzstatistischem Aspekt zu verstehen: es ermöglicht die Formulierung von Hypothesen über befindlichkeitsabträgliche Einflüsse des SO<sub>2</sub>, wobei sich der Begriff «Einfluss» nicht auf eine Ursache-Wirkungskette bezieht, sondern auf die festgestellte zeitliche Sequenz und Richtung des Zusammenhangs zwischen Schadstoff und psychischer Verfassung. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass es sich um leichte subklinische Veränderungen der Befindlichkeit handelt, dass das SO<sub>2</sub> als grober Indikator für die Luftverschmutzung gilt und dass die Schadstoffbelastung in beiden Studien insgesamt gering war.

Diese niedrigen Schadstoffkonzentrationen während des Untersuchungszeitraums in beiden Studien reflektieren ein grundlegendes Problem quasi-experimenteller Studien: trotz sorgfältiger Auswahl von Jahreszeiten und Erhebungsgebieten können Schadstoffe im niedrigen Konzentrationsbereich bleiben. Diese Situation ist in Bayern aufgrund der insgesamt eher geringen Schadstoffbelastung im Vergleich zu anderen Bundesländern sicher besonders wahrscheinlich. Ähnliche Untersuchungen sollten deswegen in Gebieten mit höheren Schadstoffbelastungen durchgeführt werden. Obwohl Studien mit ähnlichem Design und Zielkriterien in der Literatur noch nicht beschrieben wurden, weisen verschiedene Arbeiten auf Stimmungsveränderungen unter Luftschadstoffeinfluss hin. So fand eine experimentelle Studie Verschlechterungen der Stimmung und Aggressionen unter zigarettenrauchbedingter Luftverschmutzung [28] und eine andere Studie Beziehungen zwischen Geruchsbelästigungen und depressiver Verstimmung [29]. Epidemiologische Studien haben Assoziationen zwischen Luftverunreinigungen und Aufnahmen wegen psychiatrischen Störungen erbracht [30, 31]. Feldstudien haben sowohl Interaktionen zwischen stresshaften Lebensereignissen und wahrgenommener emotionaler Beeinträchtigung durch akute Erhöhung von Ozonkonzentrationen gefunden [32] als auch Hinweise auf Anpassungseffekte bei Langzeitanwohnern von Los Angeles, die gegenüber Smogbedingungen weniger reagibel waren

als Neuankömmlinge [33]. Andere Studien legen dabei den Einfluss von Persönlichkeitsvariablen wie Kontrollüberzeugung oder Bewältigungsstrategien auf die Schadstoffreagibilität nahe [34].

In den eigenen Studien ergaben sich keine Hinweise auf Persönlichkeit als Mediatorsvariable, dafür aber auf die Rolle der kognitiven Bewertungsprozesse. Sowohl Bewertungen der Luftqualität als auch Belästigungsreaktionen waren abhängig von den aktuellen lufthygienischen Bedingungen und diese hingen mit den Befindlichkeitsveränderungen zusammen. Allerdings lagen in den dargestellten Studien selbst die Tageshöchstwerte nicht in der Nähe der Schwellenwerte für die Geruchswahrnehmung, für die ein Schwellenwert im Bereich von 1 ppm SO<sub>2</sub> veranschlagt wird [1]. Allerdings sind solche Schwellenwertangaben aus der Literatur schwer interpretierbar, weil sie abhängig sind von speziellen experimentellen Bedingungen und individuellen Reaktionscharakteristika. Die Hypothese, dass die Beziehungen zwischen Schadstoffen und Wohlbefinden eine Funktion nicht nur von Wirkungszuschreibungen, sondern auch der aktuellen Schadstoffsituation sein könnten, sollte weiterverfolgt werden. Solche Beziehungen zwischen Schadstoffsituation und Wahrnehmung wurden bereits in früheren Studien zu Belästigungsreaktionen gefunden [35]; der Einsatz von neueren Analyseverfahren wie Zeitreihenanalysen könnte dabei von Nutzen sein.

Hinweise auf neuropsychologische Funktionsveränderungen unter Schadstoffeinfluss ergaben sich nur bei gesunden Probanden aus Studie 1; die vergleichsweise niedrigen Testleistungen der kranken Probandinnen aus Studie 2 schienen durch Schadstoffe unbeeinflusst. In der Literatur wurden neuropsychologische Studien vorwiegend im Labor mit jungen gesunden Probanden durchgeführt; untersucht wurde primär die Beeinträchtigung kognitiver und psychomotorischer Leistungen durch hohe Konzentrationen von CO und O<sub>3</sub> [36]. Bisher ist also noch ungeklärt, ob in Feldstudien neuropsychologische Leistungsbeeinträchtigungen unter Schadstoffeinfluss zu erwarten sind und inwieweit sie Indikatoren der Stressreaktion sein können. Ähnliches gilt auch für die negativen Ergebnisse zur psychophysiologischen Aktivierung aus Studie 1: stressinduzierte Veränderungen der Hormonausschüttung treten möglicherweise nur bei massiveren Stressoren auf [37].

Die in Studie 2 gefundenen körperlichen Beeinträchtigungen durch Schadstoffe sind nur bedingt mit epidemiologischen Ergebnissen zur Exazerbation respiratorischer Symptomatik unter Luftschadstoffeinfluss in Beziehung zu setzen [38]. Zwar konnten mithilfe von Zeitreihenanalysen sowohl Einflüsse auf die Mortalität [39], als auch unter geringer Schadstoffbelastung Effekte auf Krankenhauseinweisungen wegen Atemwegserkrankungen [40] und Beeinträchtigungen von Lungenfunktion gefunden werden [41, 42]. In den eigenen Studien handelte es sich allerdings primär um selbstberichtete körperliche Beschwerden, unter

denen nur ein Teil der respiratorisch kranken Frauen im Untersuchungszeitraum litt, was die auch in der Literatur berichtete grosse interindividuelle Variabilität der Ergebnisse erklärt [43].

Zusammenfassend weisen die Ergebnisse beider Studien auf den potentiellen Stresscharakter von Luftverunreinigungen hin. Während die Rolle von Schadstoffen bei der Beeinträchtigung neuropsychologischer Funktionen und psychophysiologischer Aktivierung nach wie vor ungeklärt ist, können Hypothesen über Beeinträchtigungen der Befindlichkeit unter Schadstoffeinfluss formuliert werden. Es kann weiter angenommen werden, dass solche Beeinträchtigungen nicht nur bei hochdosierten Reizen, sondern auch bei geringgradig chronisch intermittierenden Stressoren auftreten [44]. Methodisch erscheint zur Identifikation der Beziehungen zwischen Schadstoffen und psychischen Veränderungen der Einsatz von Zeitreihenanalysen angebracht, da mit ihnen komplexe ökologische Prozesse in ihrer Vernetzung beschrieben werden können.

Nicht zuletzt erscheinen Befindlichkeitsstörungen als sensible Indikatoren für Schadstoffbelastungen; ihre potentielle umwelt- und gesundheitspolitische Bedeutung liegt sowohl in der Rolle psychischen Befindens für die Lebensqualität [45] als auch in ihrem langfristigen Beitrag zur Auslösung körperlicher Funktionsstörungen im Rahmen einer psychosomatischen Verknüpfungskette [7]. Das Thema Befindlichkeit verdient deshalb im Zielkriterienkatalog der Umweltforschung zukünftig mehr Beachtung.

#### Zusammenfassung

In zwei prospektiven Feldstudien wurden die Effekte von Luftschadstoffen auf das psychische Wohlbefinden (Stimmung, Stresserleben), die neuropsychologische Leistung (Reaktionszeiten, Konzentrationsfähigkeit) und die körperliche Verfassung (physiologische Aktivierung, Beschwerden) im Verlauf von zwei Monaten bei gesunden und chronisch kranken Bewohnern verschieden umweltbelasteter Gebiete untersucht. Nach multivariaten Zeitreihenanalysen ergaben sich unter Einfluss von Schwefeldioxid in beiden Studien Beeinträchtigungen des psychischen Wohlbefindens und bei Kranken vermehrte selbstberichtete Beschwerden. Hinweise auf Beeinträchtigungen der Leistung durch Luftschadstoffe zeigten sich nur bei Gesunden.

#### Résumé

##### Association entre la pollution de l'air et le bien-être psychique

Dans le cadre de deux études prospectives, les effets de la pollution de l'air sur le bien-être psychique (humeur, stress), sur le fonctionnement neuro-psychologique (rapidité de réaction, capacité de concentration) et sur l'état physique (activations physiologiques, symptômes) de personnes en bonne santé et de malades chroniques de régions polluées à des degrés différents ont été examinés pendant deux mois. Les analyses multivariées de séries temporelles montrent que, sous l'effet des concentrations élevées de dioxyde de soufre, les habitants des régions polluées souffraient d'une aggravation de leur état psychique et les malades, d'une aggravation des symptômes. Seules les personnes en bonne santé ont fait référence à une diminution de leurs capacités neuro-psychologiques attribuée à la pollution de l'air.

#### Summary

##### Association Between Air Pollution and Well-Being

In two longitudinal field studies, influences of ambient pollutant concentrations on psychological well-being (mood, perceived stress), neuropsychological function (concentration, reaction times) and physical state (physiological arousal, complaints) were investigated over a two-months period in samples of healthy and ill residents of differentially polluted areas. In both studies, results of multivariate time-series analyses yielded decrements of emotional well-being with increased sulfur dioxide levels. Chronically ill persons reported somatic complaints and respiratory symptoms with pollutants. Analyses of variance suggested a pollution-induced neuropsychological impairment in healthy residents of polluted areas but no effects on arousal.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Goldsmith Jd, Friberg L. Effects of air pollution on human health. In: Stern AC, ed. Air Pollution 3. New York: Academic Press, 1977.
- [2] Faus-Kessler T, König K. et al. Umwelt und Gesundheit. Berlin: Springer, 1987.
- [3] Love L, Seskin F. Air pollution and human health. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1977.
- [4] Evans GW, Campbell IM. Psychological perspectives on air pollution and health. *Bas Appl Soc Psychol* 1983; 4: 137-171.
- [5] Evans GW, Jacobs SV. Air pollution and human behavior. *J Soc Iss* 1981; 37: 95-125.
- [6] Robinson JD, Higgins MD, Bolyard PK. Assessing environmental impacts on health: a role for behavioral science. *Environ Impact Assess Rev* 1983; 4: 41-53.
- [7] Baum A, Decker AW, Gatchel RJ. Environmental stress and health: is there a relationship? In: Sanders GS, Suls I, eds. Social psychology of health and illness. Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum Assoc Publ, 1982.
- [8] Lazarus RS, Cohen I. Environmental Stress. In: Altman I, Wohlwil I, eds. Human Behavior and Environment 2. New York: Plenum, 1978.
- [9] Stokols D. Theoretical directions of environment and behavior research: introduction. *Environ Behav* 1983; 15: 259-272.
- [10] Campbell JM. Ambient stressors. *Environ Behav* 1983; 15: 355-380.
- [11] Folkman S, Schaefer C, Lazarus RS. Cognitive Processes as mediators of stress and coping. In: Hamilton V, Warburton, eds. Human stress and cognition - an information processing approach. London: Wiley, 1979.
- [12] Cohen S. Cognitive processes as determinants of environmental stress. In: Sarason I, Spielberger C, eds. Stress and Anxiety Vol 7. Washington DC: Hemisphere Press, 1980.
- [13] Selye H. The stress of life. New York: Mc Graw Hill, 1956.
- [14] Wortis I. Pollution, somatopsychics and disease. *Biol Psychiat* 1971; 3: 103-104.
- [15] Baum A, Singer JE, Baum CS. Stress and the environment. *J Soc Iss* 1981; 37: 4-35.
- [16] Cohen S, Evans GW, Stokols D, Krantz DS. Behavior, health and environmental stress. New York: Plenum Press, 1986.
- [17] Kellhammer U, Überla, Bullinger M. Gesamtabschlussbericht der Humanmedizin, Materialien des StMLU, 1985.
- [18] Bullinger M, Pöppel E. Befindlichkeitsveränderungen unter Luftschadstoffeinfluss in Bayern (Befindlichkeitsstudie 1). Abschlussbericht, Materialien des StMLU, 1982.
- [19] Bullinger M, Pöppel E. Luftschadstoffeffekte auf die Befindlichkeit chronisch kranker Personen (Befindlichkeitsstudie 2), Materialien des StMLU, 1984.
- [20] Kastka J. Untersuchungen zur Belästigungswirkung von Umweltbedingungen: Verkehrslärm und Industriegeräusche. In: Kaminsky G. Umweltpsychologie. Stuttgart: Klett, 1976.
- [21] Zerssen DV. Klinische Selbstbeurteilungsskalen: Die Befindlichkeitsskala (Bs-S) und die Beschwerdeliste (BL). Weinheim: Beltz Verlag, 1976.

- [22] *Brickenkamp R.* Der Aufmerksamkeits-Belastungstest D2. Stuttgart: Hogrefe, 1967.
- [23] *Box GEP, Jenkins GM.* Time series analysis: forecasting and control. San Francisco: Holden Day, 1976.
- [24] *Bullinger M, Keeser W.* Befindlichkeitsverläufe unter Luftschadstoffeinfluss in unterschiedlich umweltbelasteten Gebieten – einzeitreihenanalytischer Ansatz. In: Appelt H, Strauss B, eds, Ergebnisse einzelfallstatistischer Untersuchungen. Heidelberg: Springer 1985.
- [25] *Tiao GC, Box GEP.* Modelling multiple time-series with applications. J Am Stat Assoc 1981; 76: 802–816.
- [26] *Dixon WJ, Brown MB.* BMDP Statistical Software 1983. Berkeley CA: University of California Press, 1983.
- [27] *Tiao GC, Box GEP, Grupe MR, Hudak GB, Bell WR, Chang I.* The Wisconsin Multiple Time Series Program – a preliminary guide. Madison: Department of Statistics, University of Wisconsin, 1979.
- [28] *Rotton J.* Affective and cognitive consequences of malodorous pollution. Bas Appl Soc Psychol 1983; 4: 171–193.
- [29] *Jacobs SV, Evans GW, Catalano R, Dooley D.* Air pollution and depressive symptomatology: Exploratory analyses of intervening psychosocial factors. Popul Environ 1984; 7: 260–272.
- [30] *Rotton J, Frey J.* Psychological costs of air pollution: Atmospheric conditions, seasonal trends, and psychiatric emergencies. Popul Environ 1984; 7: 3–16.
- [31] *Strahilevitz M, Strahilevitz A, Miller IE.* Air pollutants and the admission rate of psychiatric patients. Am J Psychiatry 1979; 136: 205–207.
- [32] *Evans GW, Jacobs SV, Dooley D, Catalano R.* The interaction of stressful life events and chronic strains on community mental health. Am J Comm Psychol 1987; 15: 23–34.
- [33] *Evans GW, Jacobs SV, Frager NB.* Human adaptation to smog. J Air Poll Contr Assoc 1982; 32: 1054–1057.
- [34] *Navarro PL, Simpson-Housley P, de Man AF.* Anxiety, locus of control and appraisal of air pollution. Percept Mot Skills 1987; 64: 811–814.
- [35] *Koelega HS.* Environmental annoyance: characterization, measurement and control. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987.
- [36] *Breisacher P.* Neuropsychological effects of air pollution. Am Behav Sci 1984; 14: 837–864.
- [37] *Frankenhaeuser M.* Psychoneuroendocrine approaches to the study of stressful person-environment transactions. In: Selye H, ed. Selye's Guide to stress research. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [38] *Whittemore AS.* Air pollution and respiratory disease. Ann Rev Publ Health 1981; 2: 397–429.
- [39] *Hechter HH, Goldsmith JR.* Application of time series analysis to acute air pollution reactions. Am J Med Sci 1961; 241: 581–588.
- [40] *Bates DV, Szito R.* Relationships between air pollutant levels and hospital admissions in southern Ontario. Can J Publ Health 1983; 74: 117–123.
- [41] *Lawther PJ, Waller RE, Henderson M.* Air pollution and exacerbation of bronchitis. Thorax 1970; 25: 525–534.
- [42] *Lan SP, Sky C.* Effects of air pollution on chronic respiratory disease in the New York City metropolitan area 1972. Environ Health Perspect 1981; 42: 202–214.
- [43] *Shy CM, Muller KE.* Evaluating the effects of air pollution on sensitive subjects. Am J Publ Health 1980; 70: 680–681.
- [44] *Burchfield SR.* The stress response: a new perspective. Psychosom Med 1979; 41: 661–672.
- [45] *Bullinger M, Pöppel E.* Lebensqualität in der Medizin. Schlagwort oder Forschungsansatz. Dtsch Ärztebl 1988; 85: 679–680.

Diese Studie wurde gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, Nr. 6497-V/6b-5161/80

*Korrespondenzadresse:*

Dr. Monika Bullinger  
 Institut für Medizinische Psychologie  
 der Ludwig Maximilians Universität  
 Goethestrasse 31  
 D-8000 München 2