



Agenda

Luftqualität in Innenräumen

Handlungsfelder der Standardisierung
und Forschungsbedarf

Juli 2016

Vorwort

Im Jahr 2012 sind laut einer Schätzung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) rund 7 Millionen Menschen an den Folgen von Luftverschmutzung gestorben. Die WHO-Abteilung für öffentliche Gesundheit und Umwelt stuft in diesem Zusammenhang Luftverschmutzung als größte umweltbedingte Gesundheitsgefahr ein. Etwa 50 % der Todesfälle wurden auf Innenraumluftschadstoffe zurückgeführt [1]. Die WHO-Studie verdeutlicht auch, dass die Nutzer von Innenräumen Substanzen oder Substanzgemischen ausgesetzt sind, die spezifisch auf Innenraumquellen zurückzuführen sind (z. B. Emissionen aus der Hydrolyse von Bauprodukten, Einwirkung des indirekten Passivrauchens). Das Vorhandensein vieler Spurenstoffe ist weitgehend unabhängig von der Infiltration typischer Außenluftbelastungen, da physikochemische Prozesse diese Stoffe in situ freisetzen. Daher ist ein besseres Verständnis der Innenraumluftchemie und deren Relation zu Parametern der Gebäudegestaltung sowie der Gebäudeausstattung unabdingbar zur Verbesserung der Planung zukünftiger Gebäude und deren Wartung und Instandhaltung.

Trotz der speziellen Charakteristika von Innenraumluftverunreinigungen sind die grundlegenden Konzepte zur Bewertung von Luftqualität innen und außen identisch. Zu diesen Konzepten gehören die definierte Probenahme und Analytik von Luftschadstoffen, die Identifizierung und Charakterisierung von Quellen, die Beschreibung von Transformations- und Transportprozessen unter Verwendung numerischer Modelle und die Implementierung von Maßnahmen zur Luftqualitätsverbesserung. Daher sollte die Entwicklung internationaler Standards der Luftreinhaltung – sowohl innen als auch außen – eine gemeinsame Basis haben. Generell erfordert eine effiziente Luftreinhaltung Maßnahmen auf internationaler Ebene.

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftschadstoffe erarbeitete die Europäische Union mit den Luftqualitätsrichtlinien eine umfassenden

de Gesetzgebung. Grenzwerte für luftgetragene Partikel, Stickstoffdioxid, Schwermetalle, persistente organische Schadstoffe, sowie weitere Schadstoffe, die in der gesamten EU nicht überschritten werden dürfen, finden sich in den Richtlinien 2008/50/EC und 2004/107/EC. Die Richtlinie 2001/81/EC enthält nationale Emissionshöchstmenge für Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak sowie flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan (im Folgenden als VOCs (Volatile Organic Compounds) bezeichnet).

Erkenntnisse aus dem Forschungsgebiet der Atmosphärenwissenschaften trugen maßgeblich zur Etablierung der heutigen Luftreinhaltungspolitik bei. Regulatorischer Druck und Forschungsförderung stimulierten wiederum den wissenschaftlichen Fortschritt. International standardisierte Referenzmessverfahren für Luftschadstoffe, etablierte Luftmessnetze sowie Luftqualitätsprognosemodelle zeugen heute vom Erfolg der Atmosphärenwissenschaften. Das Vorkommen von Schadstoffen in unserer Atemluft und der Zusammenhang mit Gesundheitsaspekten und dem Klimawandel sind nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung.

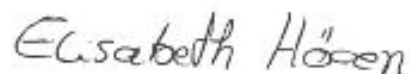
Die Atmosphärenwissenschaft kann sowohl Vorbild als auch Unterstützer der Forschung auf dem Gebiet der Innenraumluftuntersuchungen sein. Innenraumluftqualität ist, wie die Außenluftqualität, abhängig von dynamischen Prozessen, bei denen chemische Reaktionen eine wesentlichen Rolle spielen: Primär emittierte Schadstoffe werden in chemischen Reaktionen zu Sekundärschadstoffen umgesetzt.

Über viele Jahrzehnte führte der geringe regulatorische Druck im Bereich der Innenraumluftuntersuchung zu eingeschränktem Zugang zur Forschungsförderung. Daher mangelt es heutzutage immer noch an präventiven Maßnahmen, um der Schadstoffproblematik in Innenräumen, die keinen arbeitsschutzrechtlichen Kontrollen unterliegen, zu begegnen.

Düsseldorf im Juli 2016



Dr. Sascha Nehr
VDI e.V., Kommission Reinhaltung der Luft



Dr. Elisabeth Hösen
VDI e.V. Kommission Reinhaltung der Luft

Inhalt

Vorwort	1
1 Einleitung	4
1.1 Luftqualität in Innenräumen	4
1.2 Handlungsfelder der Luftreinhaltung im Innenraum	4
1.3 Zielsetzung dieser Agenda	5
2 Regelsetzungsstrategie	6
2.1 Die Kommission Reinhaltung der Luft	6
2.2 Arbeitsausschuss Innenraumluft	6
2.3 Regulatorische Anforderungen an die Innenraumluftqualität	7
3 Standardisierte Innenraumluftanalytik	8
3.1 Messstrategie	8
3.2 Luftprobenahme und –analytik	11
3.3 Bestimmung von Materialemissionen	11
3.4 Probenahme und Analytik für mikrobielle Stoffe	12
3.5 Olfaktorische Bewertung	13
3.6 Erkundung von Gebäuden auf Schadstoffe	14
3.7 Luftqualität in Fahrzeugkabinen	14
4 Forschung im Bereich der Innenraumluftchemie	16
4.1 Feldmesskampagnen zur systematischen Charakterisierung von Innenräumen	17
4.2 Die Rolle der Multiphasenchemie in Innenräumen	18
4.3 Luftqualitätsmodellierung	18
5 Zusammenfassung und Ausblick	19
Anhang VDI-Richtlinien und ISO-Normen zum Themenbereich Innenraumluftqualität	20
Literatur	23

1 Einleitung

1.1 Luftqualität in Innenräumen

Luftverunreinigungen sind Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Gase und Aerosole. Mit dem Begriff Luftqualität beschreibt man wiederum die Beschaffenheit der Luft in Bezug auf den Anteil von Luftverunreinigungen. Wenn eine Luftverunreinigung eine schädliche Umwelteinwirkung verursachen kann, so spricht man von einem Luftschadstoff [2].

Heutzutage wird die Qualität der Außenluft überwacht, um schädliche Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien abschätzen und begrenzen zu können. Ebenso unterliegt die Qualität der Luft an gewerblichen Arbeitsplätzen der Kontrolle, um die Beschäftigten zu schützen. Demgegenüber richtete sich die allgemeine Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Öffentlichkeit trotz bereits im 19. Jahrhundert veröffentlichten Arbeiten [3] erst relativ spät auf die Luft in nicht-gewerblichen Räumen.

Als Innenräume bezeichnet man in der modernen technischen Regelsetzung folgende Räume [4]:

Wohnungen mit Wohn-, Schlaf-, Bastel-, Sport- und Kellerräumen, Küchen und Badezimmern; Arbeitsräume bzw. Arbeitsplätze in Gebäuden, die nicht im Hinblick auf Luftschadstoffe arbeitsschutzrechtlichen Kontrollen aufgrund der gezielten Tätigkeit mit Gefahrstoffen unterliegen (z. B. Büros, Verkaufsräume); öffentliche Gebäude (Krankenhäuser, Bildungseinrichtungen wie Schulen, Kindergärten, Sporthallen, Bibliotheken, Gaststätten, Theater, Kinos und andere Veranstaltungsräume) sowie die Fahrgasträume von privaten und öffentlichen Verkehrsmitteln (Kraftfahrzeuge, Schiffe, Busse, Bahnen, Flugzeuge).

In der öffentlichen Wahrnehmung spielt die Luftqualität in Innenräumen eine wesentliche Rolle in Bezug auf das individuelle Wohlbefinden und die Gesundheit. Schimmelbildung ist die wohl bekannteste Problematik. Unter bestimmten Bedingungen kann der Feuchteintrag durch Aktivitäten wie Duschen oder Kochen zur Schimmelbildung führen. Das richtige Lüften kann hier für Abhilfe sorgen. Allerdings kann auch die Außenluft beim Lüften zur Verunreinigung der Innenraumluft beitragen. Darüber hinaus gibt es zahlreiche andere intermittierende Quellen, die die Innenraumluftqualität nachteilig beeinflussen können. Hierzu gehören vor allem das Rauchen, das Abbrennen von Kerzen und offene Feuerstellen im Allgemeinen. Weiterhin emittieren verschiedene Quellen kontinuierlich Spurenstoffe in die Innenraumluft. Dies

können einerseits Altlasten wie Holzschutzmittelwirkstoffe und Asbest sein. Andererseits gehören neu eingebrachte Baumaterialien und synthetische Produkte zu den Hauptemittenten organischer Chemikalien. Da das Verbraucherverhalten heute durch ausgeprägtes Gesundheitsbewusstsein bestimmt wird, nutzen Hersteller von Alltagsprodukten die Kennzeichnung sogenannter emissionsarmer Produkte als Marketinginstrument. Trotz der Tatsache, dass die meisten organischen Chemikalien in sehr geringen Konzentrationen auftreten, steigerte sich das öffentliche Interesse an emissionsarmen Produkten kontinuierlich, da einige der identifizierten organischen Verbindungen reizend oder gar toxisch wirken und teilweise hohe Geruchsintensitäten aufweisen.

In Schwellenländern wird die Luftqualität in Innenräumen insbesondere durch unvollständige Verbrennungsprozesse in niedereffizienten Öfen und Lampen bestimmt. Die WHO schätzte, dass im Jahr 2012 nahezu 3 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sauberen und modernen Quellen der Energiegewinnung hatten. Ein immenser Anteil der Weltbevölkerung nutzt demnach immer noch feste Brennstoffe wie Kohle, Holz, Ernteabfälle und Dung zum Heizen und Kochen, oftmals an offenen Feuerstellen in Innenräumen [1].

1.2 Handlungsfelder der Luftreinhaltung im Innenraum

Zur Bewertung der Luftverunreinigung durch Schadstoffe ist eine detaillierte Kenntnis physikochemischer Gasphasenprozesse (homogen und heterogen) unabdingbar.

Die Wissenschaft der Innenraumluftuntersuchung ist nunmehr einige Jahrzehnte alt. Geringer regulatorischer Druck und begrenzte Forschungsförderung schränkten den Fortschritt in diesem Forschungsgebiet ein. Vergleicht man die große Anzahl epidemiologischer Studien im Bereich der Außenluftbelastung mit der Zahl der Studien zur Innenraumluftqualität, so bemerkt man, dass, bis auf einige bemerkenswerte Ausnahmen, die Bedeutung der Innenraumluftqualität vergleichsweise nahezu ignoriert wurde [5].

Innenräume sind hochgradig uneinheitlich. Gebäude sind sehr verschieden in Bezug auf die verwendeten Baumaterialien, die Bauweise und die Nutzungsart. Sogar in einem Gebäude können sich die einzelnen Räume in Bezug auf diese Aspekte sehr voneinander unterscheiden. Um vergleichbare Messungen zu ge-

währleisten gibt es daher in der technischen Regelsetzung für Innenraumluftuntersuchungen drei Säulen:

- n definierte Probenahme vor Ort,
- n standardisierte Messtechnik und
- n Emissionsprüfung von Materialien und Produkten.

Die Strategie der technischen Regelsetzung ist detailliert in Kapitel 2 und Kapitel 3 beschrieben. Sie trägt maßgeblich dazu bei, dass Probenahme und Analytik von Luftproben, Proben abgesetzten Staubs und Materialproben harmonisiert und damit vergleichbar durchgeführt werden. Emissionsprüfungen von Materialien werden heutzutage ebenfalls zur Produktoptimierung und somit zur Entwicklung emissionsarmer Produkte für die Innenraumanwendung genutzt. Zusammenfassend betrachtet muss man allerdings feststellen, dass die technische Regelsetzung für Innenraumluftuntersuchungen die Innenraumluftchemie als Immissionspfad weitgehend vernachlässigt. Das bestehende technische Regelwerk befasst sich vorwiegend mit Untersuchungen zur Quellenidentifizierung, zur Abschätzung von Quellstärken und zur Ermittlung von Expositionsniveaus. Diese Agenda bietet in Kapitel 4 einen Überblick über Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Innenraumluftchemie, die in Form zukünftiger technischer Regeln maßgeblich zur Gestaltung schadstoffarmer Gebäude beitragen können.

1.3 Zielsetzung dieser Agenda

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema Innenraumluftqualität stimulierte die Erarbeitung europäischer und internationaler Normen, die weltweit durch nationale Regelsetzer umgesetzt werden. Anders als wissenschaftliche Studien dienen Normen und Richtlinien der Vereinheitlichung von Anforderungen an materielle und immaterielle Güter. Damit schaffen sie Vergleichbarkeit und erleichtern die Marktdurchdringung, da ein Waren- und Dienstleistungsverkehr im globalen Handelsnetzwerk nur mit gemeinsamen Standards funktioniert.

Diese Agenda gibt einen Überblick über das bestehende technische Regelwerk des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zur umfassenden Planung und Durchführung von Luftmessungen in Wohnräumen, an Innenraumarbeitsplätzen, die in Bezug auf Luftschadstoffe nicht arbeitsschutzrechtlichen Kontrollen unterliegen, in öffentlichen Gebäuden sowie in Fahrgasträumen von Verkehrsmitteln. Technische Regeln zu Emissionsprüfungen von Materialien und Produkten stellen einen komplementären Ansatz zu Innenraumluftuntersuchungen dar. Sie dienen meist der Bewertung des Einflusses von Materialien und Produkten auf die Innenraumluftqualität.

Innenraumluftuntersuchungen werden z. B. durchgeführt zur Überprüfung der Einhaltung vorgegebener Richtwerte, zur Abnahme nach Sanierungsmaßnahmen bei Immobilienkauf oder Neubau sowie bei Beschwerden von Raumnutzern. Die sorgfältige Planung von Innenraumluftuntersuchungen ist hierbei von besonderer Bedeutung, da das Untersuchungsergebnis erhebliche Konsequenzen in Bezug auf die Feststellung eines Sanierungsbedarfs, die Erfolgskontrolle einer Sanierung oder die spätere Abschätzung einer möglichen gesundheitlichen Gefährdung hat.

Das Risiko von Innenraumluftbelastungen wird aktuell dadurch verschärft, dass Gebäude heutzutage aus energetischen Gründen luftdicht gebaut werden. Erhöhte Luftdichtheit führt zu einer Verringerung des Austauschs der Innenraumluft mit der Außenluft. Energiesparendes Bauen nimmt demzufolge Planer, Eigentümer und Nutzer von Gebäuden in die Verantwortung. Hierbei spielt neben der Auswahl emissionsarmer Materialien die Lüftung bzw. die Lüftungskonzeption eine entscheidende Rolle.

Damit richtet sich diese Agenda primär an Mess- und Prüflaboratorien, Umwelthygieniker, Umweltmediziner, Umwelt- und Verbraucherverbände, Berufsgenossenschaften, Bauämter und Bauschadensfachleute aus Forschungsinstituten, Gutachter- und Ingenieurbüros, Architekten, Innenarchitekten, Gebäudesanierer, die Baustoffindustrie und die chemische Industrie.

2 Regelsetzungsstrategie

Der VDI als Europas größter technisch-wissenschaftlicher Verein ist einer der großen Regelsetzer in Deutschland. Mit mehr als 2.000 gültigen VDI-Richtlinien erstellt er allgemein anerkannte technische Regeln mit Beurteilungs- und Bewertungskriterien und methodischen Grundlagen für nahezu alle Branchen und gibt auch über Ländergrenzen hinweg konkrete Handlungsempfehlungen.

2.1 Die Kommission Reinhaltung der Luft

Die **Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL)**, eine der 12 VDI-Fachgesellschaften, ist als Gemeinschaftsgremium des VDI und des Deutschen Instituts für Normung (DIN) für die Erstellung von technischen Regeln wie VDI-Richtlinien, DIN-Normen, DIN-EN-Normen und DIN-ISO-Normen zum Thema Luftreinhaltung zuständig. Das Wissenskompendium der KRdL umfasst heute etwa 450 VDI-Richtlinien und 150 DIN-Normen, die Antworten auf nahezu alle Fragen der Luftreinhaltung geben. In der KRdL werden alle technischen und naturwissenschaftlichen Bereiche der Luftreinhaltung einschließlich angrenzender Gebiete in den vier Fachbereichen

- n Umweltschutztechnik,
- n Umweltmeteorologie,
- n Umweltqualität und
- n Umweltmesstechnik

bearbeitet. Rund 1.300 ehrenamtliche Experten stehen in einem engen, intensiven Kontakt – fachlich wie auch persönlich. Wichtige Repräsentanten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung sind in der KRdL vertreten und sichern in interdisziplinärer Arbeitsweise den systematischen Erkenntnisgewinn zum Thema Luftreinhaltung. Die KRdL unterstützt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit bei der Durchführung der Aufgaben auf dem Gebiet der Luftreinhaltung im Sinne von § 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Die KRdL stellt den Stand von Wissenschaft und Technik in freiwilliger Selbstverantwortung und gemeinsam mit allen Beteiligten (Behörden, Wissenschaft und Industrie) fest und setzt sie in Richtlinien und technische Normen um. Diese fließen in die Gesetzgebung und die Tätigkeit der Exekutive ein und werden als

Normenentwürfe in die europäische und die internationale Normungsarbeit eingebracht.

Europäische und internationale Normen zur Messung chemischer, biologischer und physikalischer Parameter, die Einfluss auf die Luftqualität nehmen, werden vom Europäischen Komitee für Normung (CEN: Comité Européen de Normalisation) sowie von der internationalen Organisation für Normung (ISO: International Organization for Standardization) in spezialisierten Fachgremien, den sogenannten Technischen Komitees (TC: Technical Committee), erarbeitet. Im CEN/TC 246 und ISO/TC 146 wird ein breites Themenspektrum im Bereich Luftreinhaltung abgedeckt. Beide TCs werden von der KRdL organisiert. Zahlreiche Experten aus Deutschland unterstützen die fachliche Arbeit an den verschiedenen Stellen des Themenspektrums. So werden beispielsweise die Bereiche Emissionen aus stationären Quellen, Luft am Arbeitsplatz, Außenluft und Meteorologie behandelt. Ein eigenständiges ISO-Unterkomitee (SC: Subcommittee) (ISO/TC 146/SC 6) befasst sich mit der Erarbeitung internationaler Standards zum Thema Innenraumluftqualität.

Seit 1994 begegnen Standardisierungsinstitutionen weltweit den regulatorischen Entwicklungen und neuen Marktanforderungen im Bereich der Innenraumluftqualität durch technische Regelsetzung im ISO/TC 146/SC 6. Aktuell beteiligen sich 31 Nationen an der Standardisierungsarbeit auf diesem Gebiet.

2.2 Arbeitsausschuss Innenraumluft

National ist die technische Regelsetzung zum Bereich Innenraumluftqualität dem Arbeitsausschuss „Innenraumluft“ im Fachbereich „Umweltmesstechnik“ der KRdL angesiedelt. Die Tätigkeitsfelder des Arbeitsausschusses „Innenraumluft“ sind verankert in der Konzeption der Bundesregierung zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen [6; 7]. Der Arbeitsausschuss Innenraumluft der KRdL im VDI und DIN widmet sich mit seiner technischen Regelsetzung der Planung von Innenraumluftuntersuchungen, der Bestimmung von Emissionen aus Materialien und Produkten, der Luftprobenahme und -analytik (Partikel- und Gasphase), der Erfassung von Mikroorganismen, der olfaktorischen Bewertung von Innenraumluft und Bauprodukten sowie der Luftqualität in Fahrzeugkabinen (siehe Bild 1).

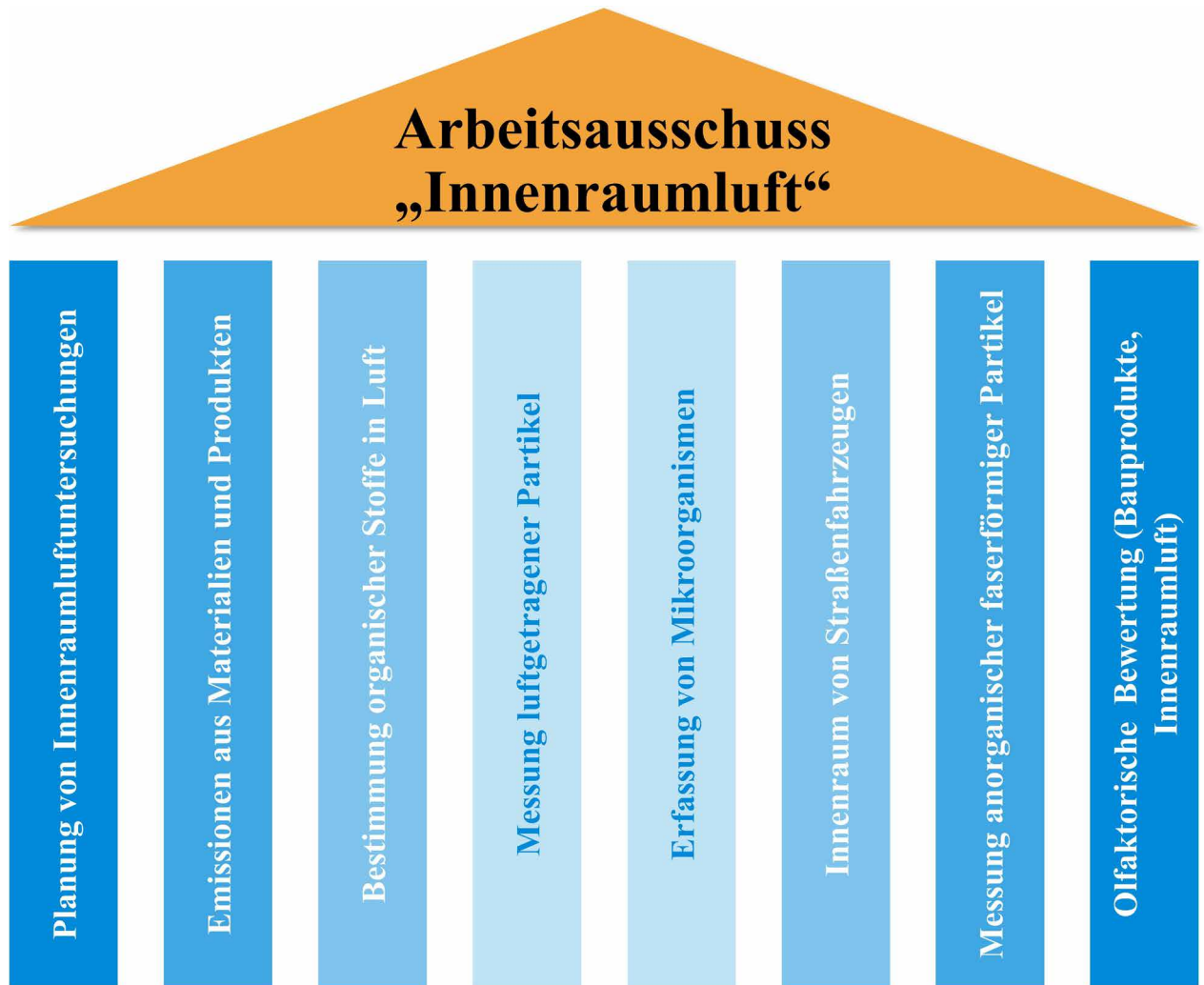


Bild 1. Gremienstruktur im Arbeitsausschuss „Innenraumluft“ der KRdL im VDI und DIN

Damit werden nahezu alle Handlungsfelder abgedeckt, die die Bundesregierung in der Konzeption zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen festgelegt hat. Anforderungen an raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) stellen ein eigenständiges Handlungsfeld der technischen Regelsetzung dar. Auch hier beteiligt sich der VDI mit seiner [VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik](#) aktiv an der Standardisierung.

2.3 Regulatorische Anforderungen an die Innenraumluftqualität

Allgemeine regulatorische Belange zum Thema Innenraumluftqualität wurden europaweit besonders durch den EU-Aktionsplan „Umwelt und Gesundheit“ (EHAP) [8], die EU-Verordnung REACH [9], die EU-Verordnung zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten

[10], die EU-Richtlinie für energieeffiziente Gebäude [11] sowie die European Collaborative Action on Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure [12] getragen. Internationale Richtlinien für die Innenraumluftqualität werden von der Weltgesundheitsorganisation WHO veröffentlicht [13].

Die Bewertung der Innenraumluftqualität ist eine komplexe Aufgabe. Im Gegensatz zu anderen Umweltmedien gibt es für die Innenraumluft, abgesehen von wenigen Ausnahmen, weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene Konzentrationswerte für Verunreinigungen, deren Einhaltung gesetzlich verbindlich ist. Der Bericht des Umweltministeriums „Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen“ aus dem Jahre 2005 gibt eine Übersicht über existierende Richt- und Grenzwerte, die oftmals hilfswise zur Beurteilung der Innenraumluftqualität herangezogen werden [7]. Sie orientieren sich an Werten, die entweder für die Beurteilung der Luft an Arbeitsplätzen oder für die Außenluft vorgegeben sind.

3 Standardisierte Innenraumluftanalytik

Die Bewertung der Innenraumluftqualität anhand von Messungen wird in den meisten Fällen veranlasst bei:

- n Beschwerden der Raumnutzer,
- n Erwerb oder Neubau einer Immobilie,
- n Erfolgsüberprüfung nach einer Sanierung,
- n Überprüfung der Einhaltung von Richtwerten (in Innenräumen, die nicht arbeitsschutzrechtlichen Kontrollen unterliegen) oder Grenzwerten (an Arbeitsplätzen).

Im bestehenden technischen Regelwerk werden aktuelle Verfahren für messplanerische Belange (Kapitel 3.1) sowie für die Luftprobenahme und Analytik (Kapitel 3.2) beschrieben. Verfahren zur Emissionsprüfung von Materialien und Produkten (Kapitel 3.3) ermöglichen die Quellzuordnung der Innenraumluftverunreinigungen sowie die Quantifizierung der Quellstärken.

Da sichtbarer mikrobieller Befall (Schimmelbefall), Geruchsbelästigung oder erfolglose Sanierungsmaßnahmen häufig Anlass für Beschwerden sind, werden diese Themenbereiche durch ein komplementäres technisches Regelwerk abgebildet (Kapitel 3.4 bis Kapitel 3.6).

Neben der Wohnung und dem Arbeitsplatz ist das Auto ein Ort, an dem der Mensch einen großen Teil des Tages verbringt. Daher besteht der Bedarf an umfassenden und zuverlässigen Informationen über die Art und Konzentration organischer Spurenstoffe in Fahrzeuginnenräumen. Heutzutage spielt der Geruchseindruck von Fahrzeuginnenräumen ebenfalls eine entscheidende Rolle beim Neukauf von Automobilen. Als Teil der Maßnahmen zur Erreichung einer akzeptablen Luftqualität in Fahrzeuginnenräumen ist die Kenntnis der spezifischen Materialemissionen von entscheidender Bedeutung – für (zukünftige) Fahrzeugbesitzer und für die Automobilindustrie gleichermaßen. Dieses Themenfeld wird in Kapitel 3.7 beleuchtet.

Alle Richtlinien und Normen werden regelmäßig überprüft und gegebenenfalls angepasst, um die Aktualität zu gewährleisten. Darüber hinaus wird der Richtlinien- bzw. Normenkatalog stetig erweitert, um auch neu auftretende Themen abzudecken. Wichtige Voraussetzung für die Überarbeitung bzw. Neuarbeitung sind fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse zu den einzelnen Verfahren.

3.1 Messstrategie

Die sorgfältige Planung ist bei Messungen im Innenraumbereich von besonderer Bedeutung, da das Ergebnis der Messung weitreichende Konsequenzen haben kann, z. B. hinsichtlich der Ermittlung des Sanierungsbedarfs oder der zukünftigen Nutzung von Gebäuden.

Im Innenraum können meistens keine kontinuierlichen Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, sondern es erfolgt in der Regel eine Probenahme vor Ort und eine anschließende Messung im Labor. Die grundlegenden Aspekte bei der Festlegung der Messstrategie sind die folgenden:

- n Ziel der Messung,
- n Zeitpunkt der Messung,
- n Ort der Messung,
- n Probenahmetechnik,
- n Dauer und Häufigkeit der Probenahme und
- n parallele Außenluftmessungen.

Allgemeine Hinweise zur Messstrategie in Innenräumen finden sich in der Richtlinie VDI 4300 Blatt 1. Stoffspezifische Hinweise, die bei der Messstrategie berücksichtigt werden müssen, finden sich in den Richtlinien VDI 4300 Blatt 2 bis VDI 4300 Blatt 12. Teilweise hat die technische Regelsetzung bereits Eingang gefunden in internationale Standards der Normenreihe ISO 16000 (siehe Tabelle 1).

Die stoffspezifischen Hinweise für die Messstrategie bei Innenraumluftuntersuchungen beziehen sich auf organische, anorganische sowie mikrobielle Spurenstoffe.

Als organische Innenraumluftschadstoffe werden polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Dibenz-p-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF), polychlorierte Biphenyle (PCB), Formaldehyd (HCHO), Pentachlorphenol (PCP), γ -Hexachlorcyclohexan (Lindan) sowie flüchtige organische Verbindungen als Summenparameter in der Richtlinienreihe VDI 4300 behandelt.

Als anorganische Innenraumluftschadstoffe werden NO_2 und CO_2 in der Richtlinienreihe VDI 4300 behandelt.

Tabelle 1. Übersicht über die Richtlinienreihe VDI 4300 und korrespondierende ISO-Normen: Messstrategie für Innenraumluftverunreinigungen

VDI-Richtlinie	ISO-Norm	Anwendungsbereich	Mögliche Quellen des Schadstoffs
4300 Blatt 1	16000-1	allgemeine Aspekte	–
4300 Blatt 2	16000-12	PAK, PCDD, PCDF, PCB ^{d)}	unvollständige Verbrennungsvorgänge; teerpechhaltige Materialien; PCP-haltige Materialien; mit PCB als Weichmacher versetzte Dichtungsmaterialien; mit PCB-haltigen Dispersionsfarben behandelte Leichtbauplatten; mit PCB-haltigen Flammschutzmitteln gestrichene Holzoberflächen
4300 Blatt 3 ^{a)}	16000-2	HCHO	Spanplatten und andere Holzwerkstoffe; Harnstoff-Formaldehyd-Schäume; Kleber, Tapeten, Lacke, Anstrichstoffe; Lasuren, Desinfektionsmittel; Verbrennungsprozesse; behandelte Textilien
4300 Blatt 4	–	PCP ^{d)} , Lindan ^{d)}	Holzschutzmittel; Fungizide in Tapeten, Klebstoffen, Farben, Textilien, Teppichböden, Lederartikeln; Herbizide
4300 Blatt 5 ^{a)}	16000-15	NO ₂	Verbrennungsvorgänge
4300 Blatt 6 ^{a)}	16000-5	VOC	kontinuierliche Quellen: alle Arten von Bauprodukten, Möbel und Raumtextilien; diskontinuierliche Quellen: Aktivitäten wie Rauchen, Hobbyarbeiten, Infiltration von Außenluft. Ein umfangreicher Überblick über mögliche Quellen ist der Literatur zu entnehmen [14].
4300 Blatt 7	16000-8	Luftwechsel	–
4300 Blatt 8 ^{b)}	–	Hausstaub	Hausstaub stammt aus einer Vielzahl natürlicher und anthropogener Quellen und variiert daher in seiner chemischen und biologischen Zusammensetzung erheblich.
4300 Blatt 9	16000-26	CO ₂	Verbrennungsvorgänge, Stoffwechsel lebender Organismen
4300 Blatt 10 ^{a)}	16000-19	Schimmelpilze	Eintrag aus der Außenluft; aktuelle oder alte Schimmelpilzschäden; Feuchteschäden der Bausubstanz; verderbende Lebensmittel, Pflanzen; Biomüll- und Wertstoffsammlung; Tierhaltung; falsche Lüftung
4300 Blatt 11	16000-34 ^{c)} 16000-37 ^{c)}	PM _{2,5}	Tabakrauch, Dampf von E-Zigaretten; Kochaktivitäten (Backen, Braten, Frittieren); Reinigungsaktivitäten; Ozonolyse ungesättigter Kohlenwasserstoffe
4300 Blatt 12 ^{c)}	–	UFP	

a) Richtlinie zugunsten der inhaltlich weitgehend identischen ISO-Norm zurückgezogen.

b) Richtlinie zurückgezogen.

c) Wird derzeit erarbeitet.

d) Im Rahmen des Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe wurde die Herstellung und der Gebrauch eingeschränkt bzw. verboten [15].

Tabelle 2. Übersicht über die Richtlinienreihe VDI 4301 und korrespondierende ISO-Normen: Analyseverfahren für Innenraumluftverunreinigungen

VDI-Richtlinie	ISO-Norm	Anwendungsbereich	Mögliche Quellen des Schadstoffs
4301 Blatt 1	–	NO ₂	Heizungen (Gas, Kohle, Öl), Kochstellen, Kerzen, Kamine, Rauchen
4301 Blatt 2	–	PCP und Lindan (GC/MS) ^{a)}	Holzschutzmittel; Fungizide in Tapeten, Klebstoffen, Farben, Textilien, Teppichböden, Lederartikeln; Herbizide
4301 Blatt 3	–	PCP und Lindan (GC/ECD) ^{b)}	s. o.
4301 Blatt 4	–	Pyrethroide und Piperonylbutoxid	Pyrethroide werden als Insektizid zur Schädlingsbekämpfung eingesetzt (Motten- und Käferschutzmittel zur Behandlung von Heimtextilien, Tierarzneimittel, Holzschutzmittel). Piperonylbutoxid wird Schädlingbekämpfungsmitteln als Synergist (Verstärkung der Wirkung der Insektizide) beigefügt; die Stabilität ist vergleichbar mit der der persistenten Pyrethroide.
4301 Blatt 5	16000-31	phosphororganische Verbindungen	Phosphororganische Verbindungen werden verwendet als Weichmacher in Kunststoffen und Lacken, Flammschutzmittel, Härter und Beschleuniger, Beiz- und Haftmittel, zur Behandlung von Metalloberflächen (als reinigender, korrosionshemmender und haftvermittelnder Stoff), Hilfsmittel in Papier und Textilien, Netzmittel, Entschäumer, Emulgator, Stabilisator, als Additiv in Putz- und Reinigungsmittel, schwerentflammbare Hydraulikflüssigkeit, Öl- und Treibstoffadditive.
4301 Blatt 6	16000-33	Phthalate	Phthalate werden verwendet als Weichmacher für Kunststoffe, Nitrocellulose oder synthetisches Gummi und kommen somit in Bodenbelägen, Kunstleder, Tapeten, Duschvorhängen, Elektrokabeln, Babyartikeln, Kinderspielzeug, Verpackungen, Schuhen, Sport- und Freizeitartikeln sowie in Innenraumverkleidungen von Fahrzeugen vor.
4301 Blatt 7 ^{c)}	–	Carbonsäuren	Linoleum, Kork, Holzwerkstoffe, MDF-Platten; Zersetzung organischen Materials, autooxidative Prozesse

a) Gaschromatografie gekoppelt mit Massenspektrometrie.

b) Gaschromatografie gekoppelt mit Elektroneneinfangdetektion.

c) Wird derzeit erarbeitet.

Die Messstrategie für Schimmelpilze, für luftgetragene Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) sowie für ultrafeine Partikel (UFP) wird in eigenständigen Blättern der Richtlinienreihe VDI 4300 dargestellt.

3.2 Luftprobenahme und -analytik

Im Anschluss an die Erarbeitung einer Strategie für Messungen zur Bewertung der Innenraumluftqualität erfolgt die Probenahme mit anschließender Analytik. Die Richtlinienreihe VDI 4301 beschreibt ausschließlich diskontinuierliche Verfahren zur Bestimmung der Konzentrationen von Schadstoffen (siehe Tabelle 2). Dabei wird die Probenluft über bzw. durch ein geeignetes Sorbens geleitet. Mittels Adsorption bzw. Absorption reichert sich der Analyt an der Grenzfläche bzw. im Sorbens an. Mit anschließender instrumenteller Analytik erfolgt die Quantifizierung des Analyten.

Für die einzelnen Analyten sind die folgenden Aspekte bei der Luftprobenahme und -analytik zu beachten:

- n Kontrolle und Protokollierung der Probenahmebedingungen,
- n Wahl des geeigneten Sorbens,
- n Herstellung und Verwendung von Stamm- und Kalibrierlösungen,
- n Wahl der geeigneten Detektionsmethode zur Quantifizierung des Analyten.

Zusätzlich zu den Innenraumluftschadstoffen, für die in der Richtlinienreihe VDI 4300 messstrategische Anforderungen beschrieben werden, behandelt die Richtlinienreihe VDI 4301 Quantifizierungsverfahren für Pyrethroide und Piperonylbutoxid (VDI 4301 Blatt 4), phosphororganische Verbindungen (VDI 4301 Blatt 5), Phthalate (VDI 4301 Blatt 6) und Carbonsäuren (VDI 4301 Blatt 7).

Die technische Regelsetzung im Bereich der Luftprobenahme und -analytik wird sich einem hochdynamischen Portfolio von Produkten für Innenraumanwendungen anpassen müssen. Die kurzen Marktzyklen von neuen Innenraumprodukten bedingen ein sich rasch veränderndes Spektrum an Spurenstoffen, die in die Innenraumluft emittiert werden. So listet z. B. die American Chemical Society mehr als 100 Millionen chemische Substanzen in ihrer Datenbank CAS (Chemical Abstracts Services). 15.000 Chemikalien werden täglich neu registriert, und in absehbarer Zeit werden auch diese Stoffe in unserer Umwelt nachweisbar sein. Die neu vermarkteten Substanzen können nicht zwangsläufig durch bestehende Innenraumluftanalytik erfasst werden und ihre ökotoxikologi-

schen Eigenschaften sind nicht immer vollständig bekannt. Zukünftige Innenraumluftanalytik muss demnach sehr flexibel sein. Die konventionelle Zielkomponentenanalytik beinhaltet einen festgelegten Parameterumfang mit spezifisch optimierten Analyseverfahren. Somit erreicht man für den festgelegten Parameter eine störungsfreie und empfindliche Messung. Allerdings kann man auf diese Weise nicht den raschen Veränderungen der heutigen Immissions szenarien in Innenräumen folgen. Das sogenannte Non-Target-Screening bietet die Möglichkeit der simultanen Analyse von hunderten Analyten. Non-Target-Screening bezeichnet eine problemorientierte chemische Analytik mit offenem Parameterumfang, die für ganze Parametergruppen optimiert ist. Mit diesem Analyseverfahren erhält man möglichst viel Information in möglichst kurzer Zeit. Allerdings ist das Non-Target-Screening zumeist wesentlich unempfindlicher als die gezielte Spurenstoffanalytik. Grenzen und Möglichkeiten des Non-Target-Screenings werden zukünftig Gegenstand des technischen Regelwerks werden müssen, um eine harmonisierte Datenlage zu schaffen.

3.3 Bestimmung von Materialemissionen

Emissionsarme Materialien und Gegenstände tragen dazu bei, dass Innenraumluft in möglichst geringem Maße mit Schad- und Geruchsstoffen belastet wird. Innenraummaterialien (z. B. Bauprodukte) spielen hier eine zentrale Rolle, da ihre Auswahl häufig nicht im Ermessen der Raumnutzer liegt und weil viele Bauprodukte häufig großflächig in den Raum eingebracht werden. Ein erklärtes Ziel der europäischen Gesetzgebung ist es, die Gesundheit von Gebäudenutzern zu schützen. Eine Konkretisierung dieser Anforderung findet sich in einem von der Europäischen Kommission erarbeiteten Grundlagendokument [16], in dem die Vermeidung und die Begrenzung von Schadstoffen in Innenräumen explizit genannt werden. In Deutschland befasst sich der Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB) mit den Emissionen von VOCs und hat hierzu ein Prüf- und Bewertungskonzept (AgBB-Schema) entwickelt [17]. Mit diesem werden adäquate Anforderungen an die Gesundheitsverträglichkeit von Bauprodukten gestellt, die eine verlässliche Produktauswahl ermöglichen.

Ergänzend zu Innenraumluftuntersuchungen vor Ort kann die Charakterisierung von Innenraummaterialien und Bauprodukten zur Entwicklung nachhaltiger Materialien und Produkte für Innenraumanwendungen beitragen.

Tabelle 3. Übersicht über die Normenreihe ISO 16000: Verfahren zur Emissionsprüfung von Materialien und Produkten

ISO-Norm	Anwendungsbereich
16000-3	Bestimmung von HCHO und anderen Carbonylverbindungen (aktive Probenahme) ^{a)}
16000-4	Bestimmung von HCHO (passive Probenahme) ^{a)}
16000-6	Bestimmung von VOCs ^{a)}
16000-9	Emissionsprüfkammer-Verfahren
16000-10	Emissionsprüfzellen-Verfahren
16000-11	Probenmanagement
16000-23	Leistungsprüfung HCHO-sorbierender Materialien
16000-24	Leistungsprüfung VOC-sorbierender Materialien
16000-25	Mikroprüfkammer-Verfahren

^{a)} Anwendbar für Untersuchungen von Innenraum- und Prüfkammerluft.

Emissionsprüfverfahren der ISO-16000-Normenreihe (siehe Tabelle 3) erfolgen in Prüfkammern. Das bedeutet, dass das entsprechende Prüfstück in eine Prüfkammer eingebracht wird und dort definierten Bedingungen ausgesetzt ist. Aus der Prüfkammer werden Luftproben entnommen, die wie die Luftproben aus Innenräumen behandelt werden. In Tabelle 3 sind aktuelle Emissionsprüfverfahren zusammengestellt. Neben den Anforderungen an Prüfkammern und Prüfzyklen werden in eigenständigen Normen ebenfalls das Probenmanagement (ISO 16000-11) sowie die Leistungsprüfung für sorbierende Baumaterialien bei der Minderung von Formaldehyd (ISO 16000-23) und von VOCs (ISO 16000-24) spezifiziert.

3.4 Probenahme und Analytik für mikrobielle Stoffe

Das Einatmen von Sporen und Stoffwechselprodukten von Schimmelpilzen kann allergische und/oder reizende Symptome beim Menschen auslösen. Außerdem kann es beim Wachstum von Schimmelpilzen zu starken geruchlichen Beeinträchtigungen kommen. In

seltenen Fällen können einige Schimmelpilzarten darüber hinaus bei bestimmten Risikogruppen auch Infektionen auslösen [18; 19].

Epidemiologische Untersuchungen haben gezeigt, dass feuchte und verschimmelte Gebäude das Risiko von Atemwegssymptomen, Atemwegsinfektionen und Asthmasymptomen der Bewohner erhöhen [20]. Daher sollte ein Schimmelpilzwachstum in Gebäuden vermieden werden. Standards der ISO-16000-Normenreihe geben Hilfestellung zum Nachweis von Schimmelpilzquellen im Innenraumbereich (siehe Tabelle 4).

Zu den grundlegenden Aspekten bei der Untersuchung eines Raums auf die Schimmelpilzbelastung gehören die Festlegung des Probenahmeorts und damit verbunden auch die Beschreibung der Probenahmetechnik und des Analyseverfahrens.

Probenahme und Analytik von Schimmelpilzen umfassen folgende Fragestellungen:

- Wo werden die mikrobiellen Stoffe nachgewiesen?
 - Auf oder in Materialien.
 - In der Luft.
 - Im Hausstaub.
- Welche messtechnischen Anforderungen existieren?
 - Je nach verwendeter Messtechnik muss eine entsprechende Probenahme und Lagerung gewährleistet werden.
 - Der Transport der Probe und die Probenaufbereitung können je nach verwendeter Technik variieren.

Die Schimmelpilzbelastung ist lediglich ein Teilaspekt mikrobieller Belastungen. Ebenso können Verunreinigungen der Innenraumluft mit Bakterien und Viren auftreten. Im Rahmen eines neuen Projekts wird zukünftig ein Prüfkammerverfahren standardisiert zur Eignungsprüfung von Luftreinigern für die Minderung luftgetragener Bakterien (ISO 16000-36). Generell ist in diesem Zusammenhang weitere Forschung erforderlich, insbesondere bei der standardisierten Erfassung von Bakterien, die z. B. mit Schimmel zusammen auftreten, sowie bei der standardisierten Erfassung von Endotoxinen.

Tabelle 4. Übersicht über die Normenreihe ISO 16000: Bestimmungsverfahren für mikrobielle Belastungen

ISO-Norm	Anwendungsbereich
16000-16	Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme durch Filtration
16000-17	Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Kultivierungsverfahren
16000-18	Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme durch Impaktion
16000-19	Probenahmestrategie für Schimmelpilze
16000-20	Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Bestimmung der Gesamtsporenzahl
16000-21	Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme von Materialien
16000-36 ^{a)}	Prüfkammer-Verfahren zur Bestimmung der Minderungsrate luftgetragener Bakterien durch Luftreinigungseinrichtungen

^{a)} Wird derzeit erarbeitet.

3.5 Olfaktorische Bewertung

Unangenehme Geruchsempfindungen bis hin zur Geruchsbelästigung, aber auch gesundheitsbezogene Beschwerden, wie die Reizung von Augen, Nase und Rachen sowie Kopfschmerzen, Müdigkeit oder Konzentrationsschwierigkeiten, gehören zu den häufigsten Beeinträchtigungen, die Personen beim Aufenthalt in Innenräumen nennen.

Da beispielsweise VOC-Emissionen häufig mit Geruchsempfindungen einhergehen, die auch zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können, ist die sensorische Prüfung ein wichtiges Element bei der Bewertung von Bauprodukten.

Die European Collaborative Action (ECA) „Indoor Air Quality and its impact on Man“ hat sich speziell mit den Fragen der Bewertung von Gerüchen beschäftigt [12]. Im bereits genannten AgBB-Schema (siehe Kapitel 3.3) ist die sensorische Bewertung als wichtiger Bestandteil einer umfassenden Bewertung von Bauprodukten erwähnt.

Die Richtlinien der Reihe VDI 4302 behandeln die Grundlagen und Methoden der sensorischen Prüfung und Bewertung von Gerüchen in der Innenraumluft und von Innenraummaterialien durch Prüfer (siehe Tabelle 5). Es werden Methoden und Kriterien für die Durchführung der Prüfungen dargestellt, mit denen Geruchsstoffemissionen von Innenraummaterialien und Geruchsstoff-immissionen im Innenraum bezüglich der Akzeptanz, der Geruchsintensität, der Hedonik und der Geruchsqualität sensorisch beurteilt werden können.

ISO 16000-28 beschreibt die Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten unter Verwendung einer Emissionsprüfkammer und bietet somit ein standardisiertes Verfahren für die praktische Umsetzung der sensorischen Analytik. Die Geruchsprüfung von Innenraumluft wird in ISO 16000-30 beschrieben.

Eine Geruchsprüfung der Innenraumluft und von Innenraummaterialien kann unterschiedlichen Zielen dienen:

- fachlich fundierte Beurteilung von Gerüchen in Innenräumen und von Innenraummaterialien,
- Suche nach den Ursachen für als unangenehm empfundene Gerüche,
- Feststellung der Nutzbarkeit von Räumen und der Zumutbarkeit von Gerüchen.

Die zu wählende Bewertungsmethode ist abhängig, von der Zielsetzung und dem Anwendungsbereich der Geruchsprüfung.

Unter anderem sind die folgenden spezifischen Anforderungen an eine Geruchsprüfung zu berücksichtigen.

- Prüfraum und Aufenthaltsraum sollten geruchsneutral sein. Ein eventueller Hintergrundgeruch muss vor der Messung festgestellt werden.
- Bei der Bewertung von Luft aus einer Prüfkammer muss gewährleistet werden, dass diese nicht mit der Umgebungsluft vermischt ist. Der Probenbehälter muss dicht schließend und geruchsneutral sein.
- Die eingesetzten Prüfer müssen die festgelegten Anforderungen erfüllen und einen Nachweis über ihre sensorischen Fähigkeiten haben.

Tabelle 5. Übersicht über die Richtlinienreihe VDI 4302 und korrespondierende ISO-Normen: Geruchsprüfverfahren für Innenraumluft und für Geruchsstoffemissionen aus Innenraummaterialien

VDI-Richtlinie	ISO-Norm	Anwendungsbereich
4302 Blatt 1	16000-30, (16000-28)	Grundlagen der Geruchsprüfung
4302 Blatt 2	16000-30	Prüfstrategie für Geruchsprüfungen
4302 Blatt 3 ^{a)}	–	Bewertung durch Raumnutzer

a) Wird derzeit erarbeitet.

3.6 Erkundung von Gebäuden auf Schadstoffe

Die Erkundung von Gebäuden auf Schadstoffe kann Ausgangspunkt für die spätere Beprobung von Verdachtsbereichen sowie zur Bestimmung der Art und Menge der Schadstoffe sein. Eine Schadstofferkundung kann aus unterschiedlichen Gründen erfolgen:

- n als Bestandsaufnahme,
- n als Folge von Beschwerden,
- n als Ankaufs- bzw. Verkaufsprüfung,
- n als Vorbereitung für eine Sanierung, einen Umbau oder Abbruch,
- n als Grundlage für ein Gebäudemanagementprogramm.

Unter Schadstoffen versteht man gefährliche Stoffe und Zubereitungen, die in unterschiedlichen nationalen oder europäischen Gesetzen aufgeführt sind [9; 10]. Bei der Erkundung von Gebäuden wird zwischen primären und sekundären Schadstoffquellen aus Bauprodukten unterschieden. Unter primären Quellen versteht man beispielsweise Asbest, künstliche Mineralfasern, Schwermetalle, PCB, VOC. Bei sekundären Quellen entstehen die Schadstoffe durch Zusammenwirken verschiedener primärer Quellen und weiterer Einflüsse durch chemische Reaktionen. Auch geogene Quellen können zu einer Schadstoffbelastung von Gebäuden führen (z. B. Radon).

Ziele der Schadstofferkundung in Gebäuden können die Bestimmung eines bestimmten Schadstoffs, einer Schadstoffgruppe oder eines unbestimmten Schadstoffspektrums sein. Die Untersuchung kann dabei einen Gebäudeteil, das gesamte Gebäude, mehrere

Gebäudeeinheiten sowie den Außen- und Innenbereich des Gebäudes umfassen.

Die Schadstofferkundung von Gebäuden enthält im Allgemeinen folgende Schwerpunkte:

- n Recherche der Standort-, Bau- und Nutzungssituation,
- n Erfassen und Aufnehmen von Klagen,
- n Begehung,
- n Probenahmeplanung,
- n Probenahme und Analytik,
- n Einschätzung und Bewertung.

Die Probenahme und Analytik erfolgt je nach Untersuchungsziel mit den in der ISO-16000-Normenreihe für spezifische Stoffgruppen beschriebenen Verfahren.

Die detaillierte Vorgehensweise zur Bestimmung einer Gebäudebelastung beschreibt die ISO 16000-32. Spezifische Informationen zum Thema Asbestbelastung bieten die Normen ISO 16000-7 und ISO 16000-27.

3.7 Luftqualität in Fahrzeugkabinen

Die Luftqualität in Fahrzeugkabinen wird zum einen durch Emissionen aus Ausstattungsteilen im Fahrzeuginneren, zum anderen durch äußere Einflüsse wie die Lüftungs- und Klimasysteme der Fahrzeuge bestimmt. Der regulative Bereich behandelt bislang ausschließlich Emissionen aus Fahrzeuginnenraumausstattungsteilen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Untersuchung von flüchtigen organischen Verbindungen. Im Gegensatz zu Innenräumen von Gebäuden, wo häufig in Nutzung befindliche Räume untersucht werden, wird dies für Fahrzeugkabinen nicht durch Normen abgedeckt. Dort werden ausschließlich Verfahren zur Untersuchung von Neuwagen, die nicht älter als 28 Tage sind, beschrieben. Die Untersuchungen dienen damit den Herstellern zur Kontrolle im Herstellungsprozess und als Marketinginstrument.

Die Bestimmung der VOC-Emissionen von Fahrzeuginnenraumausstattungsteilen kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Baugruppen-spezifische Messungen liefern Daten zur Gesamtemission, wohingegen schnelle Screening-Verfahren Aussagen über individuelle Bauteile oder sogar granulierten Materialien liefern können.

Tabelle 6. Übersicht über die Normenreihe ISO 12219: Prüfverfahren für die Innenraumluft von Straßenfahrzeugen

ISO-Norm	Anwendungsbereich
12219-1	Gesamtfahrzeugprüfkammer
12219-2	Probenbeutel
12219-3	Mikroprüfkammer
12219-4	Kleinprüfkammer (VOC)
12219-5	Statische Prüfkammer
12219-6	Kleinprüfkammer (SVOC) ^{a)}
12219-7	Olfaktorische Prüfung
12219-8 ^{b)}	Probenmanagement
12219-9 ^{b)}	Großbeutel

a) schwerflüchtige organische Verbindungen

b) Wird derzeit erarbeitet.

Die Bestimmung der Luftqualität in Fahrzeugkabinen umfasst folgende Fragestellungen:

- Soll der gesamte Innenraum untersucht werden oder einzelne Komponenten?
- Werden Emissionsdaten vollständiger Komponenten benötigt oder Emissionsdaten repräsentativer Proben homogener Ausstattungsteile?
- Soll die gesamte Bandbreite der organischen Verbindungen nachgewiesen werden oder soll die Konzentration einzelner Stoffe bestimmt werden?

Das auszuwählende Verfahren ist abhängig von den Antworten auf diese Fragen.

Detaillierte Informationen zu den unterschiedlichen Prüfverfahren finden sich in den Normen der Reihe ISO 12219 (siehe Tabelle 6).

4 Forschung im Bereich der Innenraumluftchemie

Verschiedenste flüchtige organische Verbindungen werden sowohl von biogenen als auch von anthropogenen Quellen in die Erdatmosphäre freigesetzt. Emissionen der terrestrischen Vegetation sind die Hauptquelle der biogenen VOCs. Vorherrschende anthropogene VOC-Quellen sind unvollständige Verbrennungsprozesse in stationären und mobilen Verbrennungsmotoren, Verdampfung von Lösungsmitteln sowie die häusliche Holzverbrennung [21 bis 23]. In Innenräumen sind zum einen VOCs nachweisbar, die mit der Außenluft eingetragen wurden. Zum anderen sind VOCs nachweisbar, die aus spezifischen Innenraumquellen stammen. Die enorme VOC-Emissionsrate in unserer Umwelt wird durch eine gleich große Verlustrate ausgeglichen. Nach der Freisetzung in die Erdatmosphäre werden die VOCs durch radikalisch initiierte Reaktionen mit dem Hydroxylradikal (OH) oder dem Nitratriadikal (NO_3), durch Ozonolyse und durch Fotolyse oxidiert. Für die meisten VOCs ist die OH-initiierte Oxidation, die komplexe Reaktionssequenzen umfasst, der Hauptabbaupfad [24; 25]. Die tagsüber vorherrschende OH-initiierte troposphärische Fotochemie und deren Hauptreaktionspfade sind in Bild 2 dargestellt. Die Radikalchemie wird initiiert durch Primärproduktion von Radikalen (Bild 2, blaue Pfeile). Radikalkettenreaktionen führen zur zyklischen Umsetzung von OH in Hydroperoxyradikale (HO_2) und organische Peroxyradikale (RO_2) (Bild 2, rote Pfeile). Abbruchreaktionen der Radikalzyklen führen zur Bildung von Salpetersäure, Hydroperoxiden und organischen Nitraten. Die Oxidation der VOCs in Gegenwart von Stickoxiden (NO_x ; entspricht der Summe aus NO und NO_2) führt zur Bildung von OVOCs (Oxygenated Volatile Organic Compounds) und Oxidantien wie O_3 [26].

Im Vergleich zu ihren organischen Vorläufersubstanzen haben OVOCs einen geringeren Dampfdruck sowie eine erhöhte Wasserlöslichkeit. Daher können sie an Oberflächen deponiert oder durch Niederschlag ausgewaschen werden.

Insbesondere in Räumen mit hoher Luftfeuchtigkeit (z. B. Badezimmer, Küche) kann es daher zu einer Belastung der Oberflächen mit OVOCs kommen. Außerdem können sie unter Bildung von sekundärem organischen Aerosol (SOA) kondensieren. Allerdings können OVOCs auch erhebliche Reaktivitäten gegenüber OH-Radikalen aufweisen.

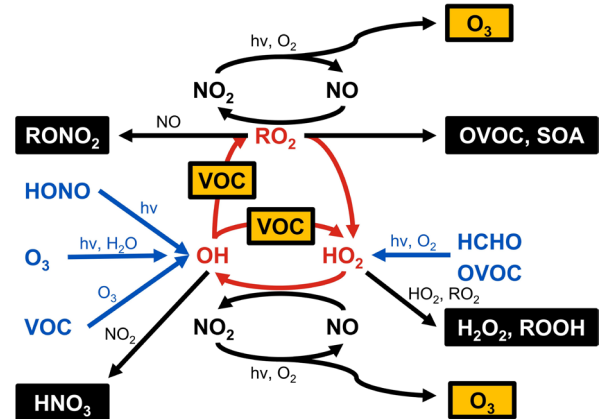


Bild 2. Hauptreaktionspfade der troposphärischen Fotochemie

Viele nachgewiesene VOCs und OVOCs sind toxisch oder karzinogen und können Erkrankungen der Atemwege oder des Herz-Kreislauf-Systems hervorrufen. Ferner haben luftgetragene Partikel nachteilige Gesundheitseffekte bei Expositionsniveaus, die in urbanen Regionen ermittelt wurden.

Bei der Bildung von Radikalen in Innenräumen spielt O₃ eine entscheidende Rolle. So entstehen z. B. NO₃-Radikale bei der Reaktion von NO₂ mit O₃. Die Primärbildung von OH-Radikalen hingegen resultiert in Innenräumen hauptsächlich aus fotolytischen Prozessen sowie aus der Ozonolyse ungesättigter Kohlenwasserstoffe (vorwiegend Monoterpene). Die Monoterpene Limonen und α -Pinen kommen häufig in der Innenraumluft vor. Beide Stoffe werden von Pflanzen emittiert. Limonen wird zudem traditionell als preiswerter Duftstoff eingesetzt und α -Pinen ist Bestandteil von Farben, Ölen und Wachsen. Radikalisch initiierte (foto)chemische Prozesse sind demnach auch relevant bei der Bewertung von Innenraumluftqualität.

Chemische Reaktionen tragen zur Transformation von Substanzen bei, bevor der Raumnutzer sie über die Atemluft aufnimmt. Für die Luftchemie im Innenraum ist zu beachten, dass hier weniger direkte Sonneneinstrahlung, geringere Temperaturschwankungen, ein größeres Verhältnis von Oberfläche zu Rauminhalt sowie höhere Konzentrationsniveaus von VOCs vorherrschen. In diesen Punkten unterscheiden sich die physikochemischen Rahmenbedingungen von denen, die man typischerweise im Außenluftbereich vorfindet.

4.1 Feldmesskampagnen zur systematischen Charakterisierung von Innenräumen

Die genaue Messung des dynamischen Verhaltens von Spurenstoffkonzentrationen in der Innenraumluft erfordert geeignete und zuverlässige Messverfahren, die bisher keinem standardisierten Protokoll folgen. Beispielsweise erfordert die Online-Messung von VOCs bei Feldmesskampagnen schnelle, mobile, robuste Instrumente, die eine empfindliche Multi-komponentendetektion ermöglichen. Auf dem Forschungsgebiet der Innenraumluftchemie wurden bisher vorwiegend folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Korrosionsschutz und Denkmalschutz (z. B. [27]),
- Ozonolysereaktionen (z. B. [28]),
- strahlungsinduzierte HONO-Bildung und anschließende HONO-Fotolyse (z. B. [29]),
- Ozon-induzierte Oberflächenreaktionen (z. B. [30]),
- NO_3 -initiierte Radikalchemie (z. B. [31]),
- OH-initiierte Radikalchemie (z. B. [32; 33]),
- SOA-Bildung (z. B. [34]).

Aktuelle Feldstudien haben bereits den Nutzen von Online-Messverfahren herausgestellt. Die Echtzeitmessung von Spurenstoffen in Innenräumen ist von besonderem wissenschaftlichen Interesse, vor allem in Bezug auf die Quellen- und Senkenidentifizierung sowie die Erforschung der Gasphasen- und Grenzflächenchemie [30; 35 bis 37]. Allerdings sind derartige Feldmesskampagnen zeit- und kostenintensiv und können daher nicht in vielen Gebäuden wiederholt werden. Des Weiteren sind Gebäude in Bezug auf Baumaterialien, Konstruktion, Raumnutzung, Lüftungskonzeption und Beeinflussung durch Außenluftinfiltration sehr unterschiedlich. Diese Heterogenität tritt nicht nur bei verschiedenen Gebäuden auf, sondern auch innerhalb desselben Gebäudes. Daher gilt es bei der Planung und Durchführung von Feldmesskampagnen folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- eindeutige Festlegung der wissenschaftlichen Fragestellung und Definition des zu untersuchenden Raum-/Gebäudetyps,
- Festlegung objektiver Kriterien zur Kategorisierung von Raum-/Gebäudetypen,
- Festlegung der Mindestanzahl an zu untersuchenden Räumen/Gebäuden um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen.

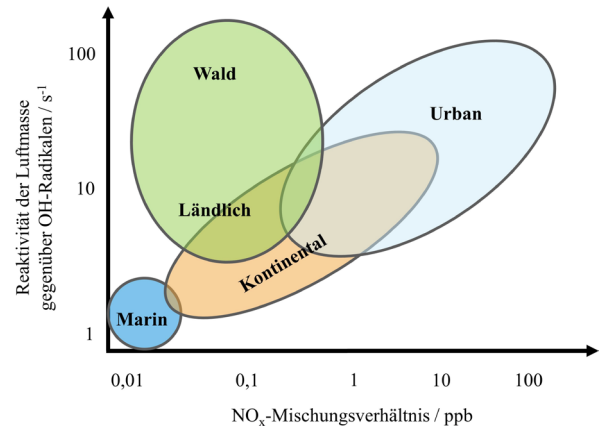


Bild 3. Chemisches Koordinatensystem, aufgespannt durch die NO_x -Konzentration und die Reaktivität der Luftmasse gegenüber OH-Radikalen; das Koordinatensystem findet bei der Kategorisierung von Außenluftuntersuchungen Anwendung (nach [38])

Forschungsbedarf besteht demnach in erster Linie bei der Entwicklung von Werkzeugen zur Kategorisierung von Innenräumen. Die Kategorisierung der untersuchten Luftmasse hinsichtlich der oxidativen Kapazität wird bei Feldmessungen im Außenbereich bereits erfolgreich angewendet. Während Außenluftuntersuchungen zum Zwecke der Vergleichbarkeit in ein chemisches Koordinatensystem, aufgespannt durch die NO_x -Konzentration und der Reaktivität der Luftmasse gegenüber OH-Radikalen [38] (siehe Bild 3), eingeordnet werden können, gibt es keine vergleichbare Kategorisierung für die oxidative Kapazität der Innenraumluft. Außenluftuntersuchungen haben gezeigt, dass vor allem urbane Regionen charakterisiert sind durch eine hohe Reaktivität der Luftmasse gegenüber OH-Radikalen sowie durch hohe NO_x -Konzentrationen (siehe Bild 3). Die hohe OH-Reaktivität ist hierbei bedingt durch die räumliche Nähe zu VOC-Emissionsquellen, die hohen NO_x -Konzentrationen sind verkehrsbedingt. Der Eintrag von NO_x in Innenräume ist u. a. stark abhängig von der Lage des Gebäudes, von der betrachteten Etage in einem Gebäude und der Lage des betrachteten Raums relativ zur nächstgelegenen Straße. Oftmals wird das NO_x -Level in Räumen durch spezifische Innenraumquellen, z. B. offene Verbrennungsprozesse sowie durch strahlungsinduzierte HONO-Bildung, bestimmt [29].

Für Feldstudien im Innenraumbereich gibt es hier noch erheblichen Bedarf zur Schaffung einer einheitlichen Datenlage, die die Kategorisierung von Innenräumen anhand der oxidativen Kapazität ermöglicht. Erst wenn dieser Aspekt auch in harmonisierten Feldversuchen untersucht ist, wird die technische Regelung von diesem Wissen profitieren.

Bei der Auswahl von Innenräumen für Feldmesskampagnen mit dem Ziel der Ableitung allgemeingültiger

Schlussfolgerungen ist in einem ersten Ansatz die Berücksichtigung der folgenden Gemeinsamkeiten aller Innenräume hilfreich:

- n ähnliche Quellen organischer Verbindungen,
- n ähnliche Verhältnisse von Oberfläche zu Rauminhalt,
- n ähnliche Belichtungsverhältnisse (Fensterflächen und künstliche Beleuchtung),
- n ähnlicher Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften durch Hautabschuppung (30 mg bis 90 mg Hautschuppen pro Stunde pro Raumnutzer) [39],
- n ähnliche chemische Zusammensetzung von Oberflächenfilmen.

4.2 Die Rolle der Multiphasenchemie in Innenräumen

Innenraumluftchemie umfasst sowohl homogene Gasphasenreaktionen als auch heterogene Reaktionen (Partikelneubildung, Oberflächenreaktionen). Generell werden beide Reaktionstypen von der Raumtemperatur beeinflusst. Die Luftwechselrate im Innenraum hat zumeist einen erheblichen größeren Einfluss auf homogene Gasphasenreaktionen: Die Lüftung eines Innenraums führt zum Austrag von Spurenstoffen, die eine Innenraumquelle haben. Allerdings führt die Lüftung auch zum Eintrag von Spurenstoffen aus der Außenluft (z. B. Ozon), die dann wiederum chemische Prozesse (z. B. Ozonolyse) und somit die Bildung sekundärer Schadstoffe initiieren können. Die Luftwechselrate beeinflusst also maßgeblich die Innenraumluftchemie. Bei homogenen Gasphasenreaktionen wird die Reaktionszeit durch die Luftwechselrate bestimmt. Bei heterogenen Reaktionen bestimmt die Luftwechselrate die Strömungsbedingungen und somit den Stofftransport an reaktive Oberflächen.

Auch das chemische Reaktionsgemisch wirkt sich auf den zu erwartenden Einfluss der Luftwechselrate aus. So führt die Absenkung der Luftwechselrate bei der Ozonolyse von Limonen zu einer Begünstigung der Bildung von sekundärem organischem Aerosol. Weniger stark ausgeprägt ist dieser Zusammenhang bei der Ozonolyse von α -Pinen [40].

Die hier ausgeführten Betrachtungen sind besonders relevant für Reaktionen in Lüftungsschächten und auf den Oberflächen von Filteranlagen. An diesen Stellen werden bevorzugt VOCs ozonolytisch und NO_3 -Radikale gebildet [41].

Ein weiterer relevanter Aspekt für die Innenraumluftqualität ist das sogenannte indirekte Passivrauchen (Thirdhand Smoke, THS). Der an Oberflächen abgelagerte Zigarettenrauch altert mit der Zeit. Sorbiertes Nikotin reagiert mit salpetriger Säure unter Bildung von Tabak-spezifischen Nitrosaminen [42]. In-vitro-Studien haben gezeigt, dass indirektes Passivrauchen oxidativen Stress auslöst und genotoxisch in menschlichen Zellen wirkt [43].

4.3 Luftqualitätsmodellierung

Feldmesskampagnen werden üblicherweise zur physikochemischen Charakterisierung der Innenraumluftqualität durchgeführt. Die Verwendung von Chemietransportmodellen (CTM) zur Vorausberechnung und Bewertung der erwarteten Schadstofflevel in Gebäuden bietet hierzu einen komplementären Ansatz. Zu den weiteren Anwendungsbereichen für die Modellierung von Innenraumluftqualität gehören die Quellzuordnung sowie die Bewertung von Plänen und Maßnahmen zur Steuerung der Innenraumluftqualität [44 bis 47]. Des Weiteren können Datensätze aus Feldmesskampagnen der Validierung von CTM dienen. Der Einsatz von CTM ist in der Atmosphärenwissenschaft obligatorisch zur Vorausberechnung der Luftqualität. Erfahrungen zeigen, dass vor allem die Wahl der Modell-Eingangsp Parameter, die Qualität der Emissionsdaten (zeitliche, räumliche und stoffliche Auflösung) sowie die Wahl des chemischen Mechanismus (homogene und heterogene Chemie) von Bedeutung für die Qualität der CTM sind [48 bis 50]. Hieraus ergeben sich für die Modellierung der Innenraumluftqualität folgende Erfordernisse:

- n Festlegung von Anforderungen an Modell-Eingangsgrößen,
- n Definition von Qualitätsindikatoren (z. B. mittlere quadratische Abweichung, Standardabweichung, Korrelationskoeffizient, Verzerrung) zur Beschreibung der Eignung eines Modells für eine bestimmte Anwendung,
- n Festlegung von Schwellenwerten der Qualitätsindikatoren zur Gewährleistung einer ausreichenden Qualität des Modells,
- n Schaffung einer harmonisierten Datenbasis für Emissionsfaktoren, Emissionsinventare, zeitliche Variabilität von Emissionsquellen zur Kategorisierung von Innenräumen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zukünftig ist die weitere Etablierung des bestehenden technischen Regelwerks zur Innenraumluftanalytik von entscheidender Bedeutung, um Gebäudenutzer, Gebäudebetreiber und die Passagiere in Fahrgastzellen (z. B. in Autos, Zügen, Flugzeugen) für das Thema Innenraumluftqualität zu sensibilisieren. Als neue Aufgabenfelder der Standardisierung im Bereich der Messtechnik sind zu benennen:

- n Online-Messverfahren für langlebige Spurenstoffe (NO_x, HONO, O₃, VOCs)
- n Online-Messverfahren für kurzlebige Spurenstoffe (OH, HO₂, RO₂, NO₃, reaktive Sauerstoffverbindungen)
- n Strahlungsmessung in Innenräumen (Fotolysefrequenzen)

Erforderlich ist nicht nur die Erweiterung des technischen Regelwerks um die genannten Messmethoden. Vielmehr ist die Entwicklung von Messstrategien für die Online-Analytik regulierter Stoffe (das heißt Innenraumrichtwert ist vorhanden [7]) als auch nicht regulierter Stoffe erforderlich. Im Zusammenhang der nicht regulierten Spurenstoffe gewinnt das sogenannte Non-Target-Screening zunehmend an Bedeutung, für das es noch keine international standardisierten Protokolle gibt.

Des Weiteren fehlen praktische Anwendungen für den Alltag in Bezug auf die Schadstoffproblematik in Innenräumen, auch für Fahrzeugkabinen in Schiffen, Bahnen, Personenkraftwagen und Flugzeugen. Für Fahrzeugführer und Fahrgäste ist der hygienische Betrieb von Klimaanlage von Interesse. Hier beteiligt sich der VDI mit seiner **VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik** an der Standardisierung. Die Relevanz der Desinfektion von Fahrzeugkabinen wird insbesondere bei Flugzeugkabinen offensichtlich. Auf bestimmten Flugstrecken werden z. B. Schädlingsbekämpfungsmittel in der Kabine ausgebracht, während Passagiere und Besatzung anwesend sind. Gesundheitliche Beeinträchtigungen sind hierbei nicht auszuschließen.

Im Bereich der Modellierung gibt es für Innenraumluftuntersuchungen noch keine technischen Regeln. Hier sind vor allem die Festlegung harmonisierter Qualitätsindikatoren für spezifische Modellanwendungen sowie die Schaffung einer harmonisierten Datenbasis (z. B. für Emissionsdaten) prioritär zu bearbeiten. Zu einer harmonisierten Datenbasis gehören ebenfalls objektive Kriterien zur Kategorisierung von Innenräumen, für die es ebenfalls keine internationalen Konventionen gibt.

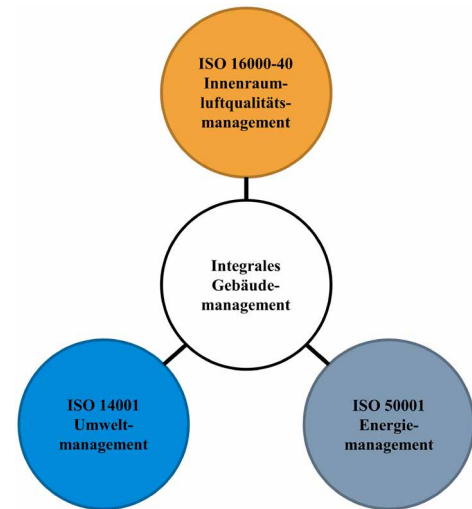


Bild 4. Integrales Gebäudemanagement bestehend aus Energie-, Umwelt- sowie Innenraumluftqualitätsmanagementsystemen auf Basis der Normen ISO 50001, ISO 14001 und ISO 16000-40

Zuverlässige Modelle zur Vorhersage der Luftqualität in Innenräumen können zukünftig dazu beitragen, den Einfluss der Lüftungskonzeption auf die Innenraumluftchemie zu bewerten.

Trotz des umfangreichen theoretischen Hintergrunds mangelt es oftmals immer noch an praktischen Anwendungen, um der Schadstoffproblematik in Innenräumen zu begegnen. Im Allgemeinen werden noch keine Handlungsanweisungen zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen angewendet. Die Überwachung der Innenraumluftqualität kann zweifellos enorme gesellschaftliche Vorteile in Bezug auf Wohlbefinden und Gesundheit der Bevölkerung haben.

Die Implementierung eines Managementsystems zur Kontrolle verschiedenster Aspekte der Innenraumluftqualität wird derzeit als eigenständige Norm der ISO-16000-Serie erarbeitet. Das antizipierte „Indoor Air Quality Management System (IAQ-MS)“ wird kompatibel zu den existierenden Systemen für Umweltmanagement [51] und Energiemanagement [52] sein (siehe Bild 4). Die Grundidee umfasst ein ganzheitliches Gebäudemanagement zur Überwachung des Energieverbrauchs, der allgemeinen Umweltaspekte sowie der Innenraumluftqualität. Eine „Dreifach-Zertifizierung“ von Gebäuden kann dazu beitragen, dass Gebäude umweltverträglich betrieben werden, Energie effizient genutzt wird und eine gesunde Innenraumluft für die Gebäudenutzer vorhanden ist.

Die hier aufgeführten Aufgabenfelder werden in Zukunft maßgeblich vom Arbeitsausschuss Innenraumluft der KRdL im VDI und DIN mitgestaltet.

Anhang VDI-Richtlinien und ISO-Normen zum Themenbereich Innenraumlufthqualität

- n VDI 4300 Blatt 1:1995. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Messstrategie.
- n VDI 4300 Blatt 2:1997. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzop-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle.
- n VDI 4300 Blatt 3:1997 (zurückgezogen). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für Formaldehyd.
- n VDI 4300 Blatt 4:1997. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für Pentachlorphenol (PCP) und γ -Hexacyclohexan (Lindan) in der Innenraumlufth.
- n VDI 4300 Blatt 5:2000 (zurückgezogen). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für Stickstoffdioxid (NO₂).
- n VDI 4300 Blatt 6:2000 (zurückgezogen). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC).
- n VDI 4300 Blatt 7:2001. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen.
- n VDI 4300 Blatt 8:2001 (zurückgezogen). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Probenahme von Hausstaub.
- n VDI 4300 Blatt 9:2005. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid (CO₂).
- n VDI 4300 Blatt 10:2008 (zurückgezogen). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie zum Nachweis von Schimmelpilzen im Innenraum.
- n VDI 4300 Blatt 11:2013. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für die Erfassung von luftgetragenen Partikeln im Innenraum – PM_{2,5}-Fraktion.
- n VDI 4300 Blatt 12 (in Vorbereitung). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie und Bestimmung von ultrafeinen Partikeln.
- n VDI 4301 Blatt 1:1997. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messen der Stickstoffkonzentration – Manuelles photometrisches Verfahren (Saltzman).
- n VDI 4301 Blatt 2:2000. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messen von Pentachlorphenol (PCP) und γ -Hexacyclohexan (Lindan) GC/MS-Verfahren.
- n VDI 4301 Blatt 3:2003. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messen von Pentachlorphenol (PCP) und γ -Hexacyclohexan (Lindan) GC/ECD-Verfahren.
- n VDI 4301 Blatt 4:2016. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messen von Pyretroiden und Piperonlybutoxin in Luft.
- n VDI 4301 Blatt 5:2009. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messen von Flammenschutzmitteln und Weichmachern auf Basis phosphororganischer Verbindungen – Phosphorsäreesester.
- n VDI 4301 Blatt 6:2012. Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messen von Phtalaten mit GC/MS.
- n VDI 4301 Blatt 7 (in Vorbereitung). Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messung von Carbonsäuren.
- n VDI 4302 Blatt 1:2015. Geruchsprüfung von Innenraumlufth und Emissionen aus Innenraummaterialien – Grundlagen.
- n VDI 4302 Blatt 2:2012 (Entwurf). Geruchsprüfung von Innenraumlufth und Emissionen aus Innenraummaterialien – Prüfstrategie für Geruchsprüfungen von Innenraumlufth.
- n VDI 4302 Blatt 3 (in Vorbereitung). Geruchsprüfung von Innenraumlufth und Emissionen aus Innenraummaterialien – Erhebung der Zufriedenheit des Raumnutzers mit der Raumlufthqualität mittels Fragebogen.
- n ISO 16000-1:2004. Indoor air – Part 1: General aspects of sampling strategy.
- n ISO 16000-2:2004. Indoor air – Part 2: Sampling strategy for formaldehyde.

- n ISO 16000-3:2011. Indoor air – Part 3: Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds in indoor air and test chamber air – Active sampling method.
- n ISO 16000-4:2011. Indoor air – Part 4: Determination of formaldehyde – Diffusive sampling method.
- n ISO 16000-5:2007. Indoor air – Part 5: Sampling strategy for volatile organic compounds (VOCs).
- n ISO 16000-6:2011. Indoor air – Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID.
- n ISO 16000-7:2007. Indoor air – Part 7: Sampling strategy for determination of airborne asbestos fibre concentrations.
- n ISO 16000-8:2007. Indoor air – Part 8: Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions.
- n ISO 16000-9:2006. Indoor air – Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – Emission test chamber method.
- n ISO 16000-10:2006. Indoor air – Part 10: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – Emission test cell method
- n ISO 16000-11:2006. Indoor air – Part 11: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – Sampling, storage of samples and preparation of test specimens.
- n ISO 16000-12:2008. Indoor air – Part 12: Sampling strategy for polychlorinated biphenyls (PCBs), polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs).
- n ISO 16000-13:2008. Indoor air – Part 13: Determination of total (gas and particle-phase) polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) – Collection on sorbent-backed filters.
- n ISO 16000-14:2009. Indoor air – Part 14: Determination of total (gas and particle-phase) polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) – Extraction, clean-up and analysis by high-resolution gas chromatography and mass spectrometry.
- n ISO 16000-15:2008. Indoor air – Part 15: Sampling strategy for nitrogen dioxide (NO₂).
- n ISO 16000-16:2008. Indoor air – Part 16: Detection and enumeration of moulds – Sampling by filtration.
- n ISO 16000-17:2008. Indoor air – Part 17: Detection and enumeration of moulds – Culture-based method.
- n ISO 16000-18:2011. Indoor air – Part 18: Detection and enumeration of moulds – Sampling by impaction.
- n ISO 16000-19:2012. Indoor air – Part 19: Sampling strategy for moulds.
- n ISO 16000-20:2014. Indoor air – Part 20: Detection and enumeration of moulds – Determination of total spore count.
- n ISO 16000-21:2013. Indoor air – Part 21: Detection and enumeration of moulds - Sampling from materials.
- n ISO 16000-23:2009. Indoor air – Part 23: Performance test for evaluating the reduction of formaldehyde concentrations by sorptive building materials.
- n ISO 16000-24:2009. Indoor air – Part 24: Performance test for evaluating the reduction of volatile organic compound (except formaldehyde) concentrations by sorptive building materials.
- n ISO 16000-25:2011. Indoor air – Part 25: Determination of the emission of semi-volatile organic compounds by building products - Micro-chamber method.
- n ISO 16000-26:2012. Indoor air – Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂).
- n ISO 16000-27:2014. Indoor air – Part 27: Determination of settled fibrous dust on surfaces by SEM (scanning electron microscopy) (direct method).
- n ISO 16000-28:2012. Indoor air – Part 28: Determination of odour emissions from building products using test chambers.
- n ISO 16000-29:2014. Indoor air – Part 29: Test methods for VOC detectors.
- n ISO 16000-30:2014. Indoor air – Part 30: Sensory testing of indoor air.

- n ISO 16000-31:2014. Indoor air – Part 31: Measurement of flame retardants and plasticizers based on organophosphorus compounds – Phosphoric acid ester.
- n ISO 16000-32:2014. Indoor air – Part 32: Investigation of buildings for the occurrence of pollutants.
- n ISO/DIS 16000-33:2015. Indoor air – Part 33: Determination of phthalates with gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS).
- n ISO/AWI 16000-34:2013. Indoor air – Part 34: Strategies for the measurement of airborne particles.
- n ISO/AWI 16000-35:2013. Indoor air – Part 35: Measurement of polybrominated diphenylether, hexabromocyclododecane and hexabromobenzene.
- n ISO/CD 16000-36:2015. Indoor air – Part 36: Test method for the reduction rate of airborne bacteria by air purifiers using a test chamber.
- n ISO/AWI 16000-37:2014. Indoor air – Part 37: Measurement of PM_{2,5} mass concentration.
- n ISO/AWI 16000-38:2015. Indoor air – Part 38: Determination of amines in indoor and test chamber air – Active sampling on samplers containing phosphoric acid impregnated filters.
- n ISO/AWI 16000-39:2015. Indoor air – Part 39: Determination of amines in indoor and test chamber air – Analysis of amines by means of high-performance liquid chromatography (HPLC) coupled with tandem mass spectrometry (MS MS).
- n ISO/AWI 16000-40:2016. Indoor air – Part 40: Indoor Air Quality Management System.
- n ISO 12219-1:2012. Interior air of road vehicles – Part 1: Whole vehicle test chamber – Specification and method for the determination of volatile organic compounds in cabin interiors.
- n ISO 12219-2:2012. Interior air of road vehicles – Part 2: Screening method for the determination of the emissions of volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials – Bag method.
- n ISO 12219-3:2012. Interior air of road vehicles – Part 3: Screening method for the determination of the emissions of volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials – Micro-scale chamber method.
- n ISO 12219-4:2013. Interior air of road vehicles – Part 4: Method for the determination of the emissions of volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials – Small chamber method
- n ISO 12219-5:2014. Interior air of road vehicles – Part 5: Screening method for the determination of the emissions of volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials – Static chamber method.
- n ISO/DIS 12219-6:2015. Interior air of road vehicles – Part 6: Method for the determination of the emissions of semi-volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials at higher temperature – Small chamber method.
- n ISO/DIS 12219-7:2016. Interior air of road vehicles – Part 7: Odour determination in interior air of road vehicles and test chamber air of trim components by olfactory measurements.
- n ISO/AWI 12219-8:2014. Interior air of road vehicles – Part 8: Handling and packaging of materials and components for emissions testing.
- n ISO/AWI 12219-9:2015. Interior air of road vehicles – Part 9: Screening method for the determination of the emissions of volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials – Large bag method.

Literatur

- [1] World Health Organization, Burden of disease from ambient and household air pollution, Public Health, Social and Environmental Determinants of Health Department, 2014
- [2] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG), In der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013, BGBl. I, S. 1274
- [3] Pettenkofer, M. (1858) Über den Luftwechsel in Wohngebäuden, München: Cotta
- [4] Sondergutachten Mai 1987, Luftverunreinigungen in Innenräumen. Gutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen, Servicecenter Fachverlage, Kunsterdingen, Deutschland
- [5] Weschler, C. J. (2011) Commemorating 20 years of Indoor Air, Chemistry in indoor environments: 20 years of research, *Indoor Air*, **21**, 205-218
- [6] Konzeption der Bundesregierung zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen, Hrsg. Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bundesumweltministerium, 1992
- [7] Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen – Ausgewählte Handlungsschwerpunkte aus Sicht des Bundesumweltministeriums, Hrsg. Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bundesumweltministerium, 2005
- [8] Communication from the Commission to the Council, The European Parliament; The European Economic and Social Committee No 416 of 9 June 2004, The European Environment and Health Action Plan 2004-2010 (EHAP), Official Journal of the European Union SEC 729
- [9] Commission Regulation (EU) No 348/2013 of 17 April 2013 amending Annex XIV to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of chemicals (REACH), Official Journal of the European Union L 101/1
- [10] Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonized conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC (1), 4.4.2011, Official Journal of the European Union L 88/5
- [11] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union L 153/13
- [12] European Collaborative Action (ECA) “Indoor Air Quality and its Impact on Man” (1999) Sensory Evaluation of Indoor Air Quality, Report No. 20, EUR 18676, Office for Official Publications of the European Communities
- [13] World Health Organization, WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, WHO Regional Office for Europe, 2010
- [14] Salthammer, T. (2009) Organic indoor air pollutants – Occurrence, measurement, evaluation, Wiley-VCH
- [15] United Nations Environment Programme, Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, UNEP/POPS/CONF/2, Conference of Plenipotentiaries in the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, 2001
- [16] European Commission (1994) Mitteilung der Kommission über die Grundlagendokumente der Richtlinie des Rates 89/106/EWG, Amtsblatt EG, C 62/1
- [17] Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten, Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVO, VOC und SVOC) aus Bauprodukten, 2015
- [18] Empfehlung des Robert-Koch-Instituts (2007) Schimmelpilzbelastung in Innenräumen – Befunderhebung, gesundheitliche Bewertung und Maßnahmen, Bundesgesundheitsblatt, **50**, 1308-1323
- [19] Gabrio, T., Link, B., Weidner, U., Zöllner, I. (2007) Innenraumrelevante Schimmelpilze im Zusammenhang mit Allergien, *Derm*, **13**, 27-35
- [20] World Health Organization, WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and mould, WHO Regional Office for Europe, 2009
- [21] Piccot, S. D., Watson, J. J., and Jones, J. W. (1992) A global inventory of volatile organic compound emissions from anthropogenic sources, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **97**, 9897-9912
- [22] Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinberger, R., Tallamraju, R., Taylor, J., and Zimmermann, P. (1995) A global model of natural volatile organic compound emissions, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **100**, 8873-8892
- [23] Koppmann, R. (2007) Volatile organic compounds in the atmosphere, Blackwell Publishing Ltd
- [24] Ehhalt, D. H. (1999) Photooxidation of trace gases in the troposphere, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **1**, 5401-5408

- [25] Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts, J. (2000) Chemistry of the upper and lower atmosphere: Theory, experiments, and applications, Academic Press
- [26] Elshorbany, Y., Barnes, I., Becker, K.-H., Kleffmann, J., and Wiesen, P. (2010) Sources and cycling of tropospheric hydroxyl radicals – An overview, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, **224**, 967-987
- [27] Graedel, T. E., Schwartz, N. (1977) Air quality reference data for corrosion assessment, *Mater Perform*, **16**, 17-25
- [28] Sabersky, R. H., Sinema, D. A., Shair, F. A. (1973) Concentrations, decay rates and removal of ozone and their relation to establishing clean indoor air, *Environ. Sci. Technol.*, **7**, 347-353
- [29] Gligorovski, S. (2016) Nitrous acid (HONO): An emerging indoor pollutant, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **314**, 1-5
- [30] Wisthaler, A., Weschler, C. J. (2010) Reactions of ozone with human skin lipids: sources of carbonyls, dicarbonyls, and hydroxycarbonyls in indoor air, *PNAS*, **107**, 6568-6575
- [31] Weschler, C. J., Brauer, M., Koutrakis, P. (1992) Indoor ozone and nitrogen dioxide: A potential pathway to the generation of nitrate radicals, dinitrogen pentoxide, and nitric acid indoors, *Environ. Sci. Technol.*, **26**, 179-184
- [32] Gómez Alvarez, E., Amedro, D., Afif, C., Gligorovski, S., Schoemaeker, C., Fittschen, C., Doussin, J.-F., Wortham, H. (2013) Unexpectedly high indoor hydroxyl radical concentrations associated with nitrous acid, *PNAS*, **110**, 13294-13299
- [33] Gligorovski, S., Weschler, C. J. (2013) The oxidative capacity of indoor atmospheres, *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 13905-13906
- [34] Weschler, C. J., Shields, H. C. (1999) Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles, *Atmospheric Environment*, **33**, 2301-2312
- [35] Wisthaler, A., Tamas, G., Wyon, D. P., Strom-tejsten, P., Space, D., Beauchamp, J., Hansel, A., Mark, T. D., Weschler, C. J. (2005) Products of ozone-initiated chemistry in a simulated aircraft environment, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 4823-4832
- [36] Weschler, C. J. et al. (2007) Ozone-initiated chemistry in an occupied simulated aircraft cabin, *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 6177-6184
- [37] Schripp, T., Etienne, S., Fauck, C., Fuhrmann, F., Märk, L., Salthammer, T. (2014) Application of proton-transfer-reaction-mass-spectrometry for Indoor Air Quality research, *Indoor Air*, **24**, 178-189
- [38] Rohrer, F. et al. (2014) Maximum efficiency in the hydroxyl-radical-based self-cleansing of the troposphere, *Nature Geoscience*, **7**, 559-563
- [39] Milstone, L. M. (2004) Epidermal desquamation, *Journal of Dermatological Science*, **36**, 131-140
- [40] Youssefi, S., Waring, M. S. (2014) Transient secondary organic aerosol formation from limonene ozonolysis in indoor environments: Impacts of air exchange rates and initial concentration ratios, *Env. Sci. Technol.*, **48**, 7899-7908
- [41] Morrison, G. C., Nazaroff, W. W., Cano-Ruiz, J. A., Hodgson, A. T., Modera, M. P. (1998), *J. Air and Waste Manage. Assoc.*, **48**, 941-952
- [42] Sleiman, M., et al. (2010) Formation of carcinogens indoors by surface-mediated reactions of nicotine with nitrous acid, leading to potential thirdhand smoke hazards, *PNAS*, **107**, 6576-6581
- [43] Hang, B. et al. (2013) Thirdhand smoke causes DNA damage in human cells, *Mutagenesis*, **28**, 381-391
- [44] Sarwar, G., Corsi, R., Kimura, Y., Allen, D., Weschler, C. J. (2002) Hydroxyl radicals in indoor environments, *Atmospheric Environment*, **36**, 3973-3988
- [45] Carslaw, N. (2007) A new detailed chemical model for indoor air pollution, *Atmospheric Environment*, **41**, 1164-1179
- [46] Schoemaeker, C. et al. (2014) Characterization of the IAQ in low energy public buildings in France through a dual experiment and modelling approach, *Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Hong-Kong, 000-008
- [47] Mendez, M., Blond, N., Blondeau, P., Schoemaeker, C., Hauglustaine, D. A. (2015), Assessment of the impact of oxidation processes on indoor air pollution using the new time-resolved INCA-Indoor model, *Atmospheric Environment*, **122**, 521-530
- [48] Thunis, P., Pederzoli, D., Pernigotti, D. (2012) Performance criteria to evaluate air quality modelling applications, *Atmospheric Environment*, **59**, 476-482
- [49] Thunis, P., Pernigotti, D., Gerboles, M. (2013) Model quality objectives based on measurement uncertainty. Part II: NO₂ and PM₁₀, *Atmospheric Environment*, **79**, 861-868
- [50] Pernigotti, D., Gerboles, M., Belis, C. A., Thunis, P. (2013) Model quality objectives based on measurement uncertainty. Part I: Ozone, *Atmospheric Environment*, **79**, 869-878
- [51] ISO 14001:2015. Environmental management systems – Requirements with guidance for use.
- [52] ISO 50001:2011. Energy management system – Requirements with guidance for use.

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 155.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN
Dr. Sascha Nehr, Dr. Elisabeth Hösen
Tel. +49 211 6214-661
hoesen@vdi.de
www.vdi.de

VDI-Agenda Innenraumlufthqualität
Juli 2016
ISBN 978-3-931384-84-5