

Ergänzung zum Standard der Baubiologischen Messtechnik SBM-2024 und den dazugehörigen baubiologischen Richtwerten für Schlafbereiche

MESSTECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN

ERLÄUTERUNGEN UND ERGÄNZUNGEN

6. Entwurf 8/2024

In den Randbedingungen und Erläuterungen werden die wesentlichen messtechnischen Kriterien für baubiologisch-sachverständige Messungen, Analysen und Vorgehensweisen in Kurzform erweitert und vertieft. Zudem sind die Anleitungen der Gerätehersteller, Anweisungen von Verbänden, Inhalte von Normen und die Fachliteratur zu beachten.

Weitere Angaben zur messtechnischen Umsetzung der baubiologischen Standardpunkte finden Sie im Buch 'Stress durch Strom und Strahlung' von Wolfgang Maes. Umfassende theoretische und praktische Aus- und Weiterbildungen zum Standard, den Richtwerten und Randbedingungen bieten die Basis- und Aufbau-Seminare 'Baubiologische Messtechnik' des Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN sowie weitere Fortbildungsangebote, z.B. die Praxis-Seminare des Verband Baubiologie VB. Der Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB bietet zu den einzelnen Standardpunkten ergänzende Richtlinien, Verfahrensanweisungen und Empfehlungen zur Qualitätssicherung an.

Die Möglichkeiten mehrerer Mess- und Diagnosemethoden innerhalb eines Standardpunktes sorgen für mehr messtechnische Sicherheit. Die beschriebenen Methoden ergänzen sich, sie ersetzen sich nicht und sind je nach Fall und Aufgabenstellung sinnvoll einzusetzen bzw. zu kombinieren.

A FELDER, WELLEN, STRAHLUNG

1 ELEKTRISCHE WECHSELFELDER (Niederfrequenz)

Messung der niederfrequenten elektrischen **Feldstärke** und der **Körperspannung** mit Bestimmung der dominierenden **Frequenz** und von auffälligen **Oberwellen**

- **Feldstärke** (Volt pro Meter, V/m)

a) gegen Erdpotenzial

Effektivwert-Messung unter Einbeziehung des Körpers in Anlehnung an Computernorm TCO.

Mit Feldmessgerät bzw. Feldsonde (TCO- bzw. Tellersonde, Kleinsonde), Feldmeter, NF-Analyser...: Frequenzbereich 10 Hz - 100 kHz (besser 400 kHz und höher), Messbereich bis 5000 V/m oder mehr, Nachweisempfindlichkeit 0,1 V/m, Fehlertoleranz $\pm 10\%$.

Beachten: Solides Erdpotenzial als Bezug (Potenzialausgleich, Steckdose, Sanitärinstallation, Erdspieß...). Körpernahe oder körperferne Sondenführung (Herstellerangabe). Kleinsonden zeigen oft niedrigere Messwerte als TCO-Tellersonden mit Durchmessern bis zu 30 cm, Maßstab ist die TCO-Sonde. Direkte, ungestörte Ausrichtung der Sonde zu den - oft aus mehreren Richtungen kommenden - Feldquellen (maximale "Anpeilung"). 30 cm Mindestabstand zur Feldquelle.

b) potenzialfrei

Effektivwert-Messung des "reinen" Feldes ohne Beeinflussung des Körpers in Anlehnung an DIN/VDE bzw. 26. BImSchV.

Mit Feldmessgerät bzw. Feldsonde (3D-Würfelsonde, 1D-Flächensonde), Feldmeter, NF-Analyser...: Frequenzbereich 10 Hz - 100 kHz (besser bis 400 kHz und höher), Nachweisempfindlichkeit 0,1 V/m, Fehlertoleranz $\pm 10\%$.

Beachten: Keine Menschen oder andere leitfähige Körper, Flächen, Leitungen und Gegenstände im Feld, reichlich Abstand einhalten, 2 m Mindestabstand zum Messgerät bzw. Lichtleiter für die Verbindung von der Sonde zum Anzeigegerät.

- **Körperspannung** (Millivolt, mV)

Messung des Körperpotenzials am im Bett elektrisch isoliert liegenden Menschen gegen Erdpotenzial.

Mit Körperspannungsmessgerät, Voltmeter, Multimeter, Feldmeter, NF-Analyser... und Handelektrode bzw. Fingerelektrode, Einstellung auf ACV: Messgeräte-Innenwiderstand 10 M Ω und Kapazität < 100 pF über alle genutzten Messbereiche, Frequenzbereich um 50 Hz (besser 400 kHz und höher), Nachweisempfindlichkeit 1 mV, Fehlertoleranz $\pm 10\%$; Handelektroden-Zuleitung maximal 50 cm.

Beachten: Solides Erdpotenzial als Bezug (Potenzialausgleich, Steckdose, Sanitärinstallation, Erdspieß...). Nähe der Testperson zu geerdeten Flächen (Abschirmung in Bettnähe...) bzw. Erdkontakt (Abschirmdecke unter dem Körper...) meiden.

- **Dominierende Frequenz** (Hertz, Hz)

Mit NF-Spektrumanalyser, Oszilloskop, Voltmeter, Feldmeter...

- **Auffällige Oberwellen** (Volt pro Meter, V/m, oder Mikrowatt pro Quadratmeter, $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

Mit NF-Spektrumanalyser, (USB-)Oszilloskop, Feldmeter... oder mit Hochfrequenz-Spektrumanalysator: Frequenzbereich etwa 2 kHz bis 1 MHz.

Elektrische Wechselfelder entstehen als Folge elektrischer Wechselfeldspannung. Die Feldlinien verlaufen offen von einem höheren zum niedrigeren Potenzial, im Endeffekt zur Erde (Quellenfeld). Das Feld wird durch leitende Objekte, die Messapparatur, die Mess- und Testperson beeinflusst.

Bei der elektrischen Feldstärke geht es um Messungen von Spannungsunterschieden, so genannten Potenzialdifferenzen. Ein Sensor erfasst das Feld und vergleicht es mit einem Referenzpotenzial. Bei der seit über 30 Jahren in der Baubiologie angewandten und bewährten erdbezogenen Feldstärkemessung (TCO) ist diese Referenz das Erdpotenzial, die Feldsonde ist per Kabel mit Erde verbunden. Bei der in der Baubiologie mit dem SBM-2008 ergänzend eingeführten potenzialfreien Feldstärkemessung (DIN/VDE) befinden sich ein (1D Flächensensor) oder drei (3D Würfelsensor) Elektrodenplattenpaare in einer Feldsonde, es wird die Potenzialdifferenz der in einem definierten Abstand zueinander platzierten Elektrodenflächen ohne

Erdbezug ermittelt. Die erdbezogene Feldmessung (TCO) berücksichtigt den Menschen im Feld, denn er zieht die elektrischen Felder an, konzentriert sie auf sich, der Mensch ist Teil des Feldgeschehens. Die potenzialfreie Messung (DIN/VDE) wünscht das "ungestörte" Feld ohne den feldbeeinflussenden Menschen.

Beide Feldmessmethoden - gegen Erde und potenzialfrei - haben im baubiologischen Alltag Stärken und Schwächen und sorgen gemeinsam für mehr Sicherheit. Die Methoden ergänzen sich, sie ersetzen sich nicht. Nicht entweder...oder, sondern sowohl...als auch. In bestimmten Situationen, in der die eine schwächelt zeigt sich die andere aussagestärker - und umgekehrt. Es sind beim geringsten Verdacht auf eine fehlerträchtige Situation beide Methoden einzusetzen, das stets in Kombination mit der Körperspannungsmessung. Vergleiche sind nur mit denselben Messmethoden möglich.

Beispiele für Vor- und Nachteile: Die erdbezogene TCO-Methode schwächelt mit der Folge falscher Messergebnisse, wenn der Bezug Erdung nicht optimal ist; kein Problem für die potenzialfreie Messung. Die potenzialfreie DIN/VDE-Methode schwächelt, wenn feldbedingte Potenzialgefälle nicht ausgeprägt sind oder fehlen, weil aus verschiedenen Richtungen einwirkende Feldquellen ähnlich oder gleich stark sind, dann werden die Messwerte trotz offensichtlicher Emittenten zu gering oder gar nicht auffallen; kein Problem für die erdbezogene Messung. Vorsicht bei der TCO-Messung mit geerdeten Flächen und Gegenständen in der Nähe, das gilt auch für die Kontrolle von großflächigen Abschirmmaßnahmen. Vorsicht bei der DIN/VDE-Messung mit allen leitfähigen Materialien und Menschen im Feld und in der weiteren Umgebung, mehrere Meter Abstand sind nötig. Die eindimensionale TCO-Messung ist bei optimaler Ausrichtung zum Feldmaximum besonders gut für die Quellensuche und -lokalisierung geeignet ("Emissionsmessung"). Die dreidimensionale DIN/VDE-Messung ist richtungsunabhängig besonders gut für die Erfassung der Summe von Feldquellen an einem Punkt geeignet ("Immissionsmessung"). Die erdbezogene 1D-Messung nach TCO ist meist einfach(er) und schnell(er), die Messgeräte sind erschwinglich(er). Die potenzialfreie 3D-Messung nach DIN/VDE kann komplizierter und aufwändiger sein, die Messgeräte sind teurer, bei einigen sind Computer für die Anzeige und Auswertung nötig.

Auch bei der Körperspannung geht es um die Messung einer Potentialdifferenz, diesmal vom menschlichen Körper, der als Folge der Summe aller Feldeinflüsse seiner Umgebung unter Spannung steht, zur Erde. Die einfache, sensible, seit über 30 Jahren in der Baubiologie eingesetzte und bewährte Körperspannungsmessung ("kapazitive Körperankopplung" nach Ing. Erich W. Fischer) kann nur optimal funktionieren, wenn der zu messende Mensch garantiert (!) isoliert von Erde positioniert ist, wie es im Bett liegend meist der Fall ist. Hat die Testperson Nähe oder gar Kontakt zu Erde, wie es bei abgeschirmten Wandflächen in Bettnähe und geerdeten Abschirmdecken im Bettbau oder direkt unter dem Körper passieren kann, fallen die Messwerte zu niedrig bis gleich Null aus. Es gibt in solchen Fällen der Körperspannungsmessung in Erdnähe oder des Erdkontaktes also falsche oder gar keine Messwertanzeigen, obwohl der Mensch im Feld durch elektrische Felder nach wie vor belastet ist, eventuell sogar mehr noch als ohne Erdnähe. Diese unverzeihlichen Messfehler werden von unseriösen Abschirmdeckenverkäufern gerne und gezielt genutzt und missbraucht, um die angebliche Wirkung ihrer Produkte zu demonstrieren, eine "Wirkung", die gar keine ist.

Die Frequenz eines Feldes und die Anzahl und Ausprägung von Oberwellen, so genannten Harmonischen, also ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz, sind - neben der Feldstärke - ein Aspekt der biologischen Bewertung. Manche Organismen reagieren auf schwächere Felder bestimmter Frequenzen unter Umständen heftiger als auf stärkere Felder anderer Frequenzen, Frequenzgemische oder Oberwellenanteile. Es gibt bei Lebewesen, Organen, Zellen... verschiedenartige "Frequenzfenster" mit gesteigerter Empfindlichkeit.

Oberwellen sind bei ohmschen Verbrauchern (Glühlampe, Herd, Fön...) und meist bei Hochspannungsleitungen, Bahnstrom, konventionellen Transformatoren... weniger ausgeprägt als bei Verbrauchern mit viel Elektronik (Energiesparlampe, elektronische Netzteile, Vorschaltgeräte, Ladegeräte, Dimmer, PC, Bildschirm, Induktionsherd...), hier spricht man oft von 'dirty electricity' oder 'dirty power'. Die in Europa typische Netzfrequenz ist 50 Hz (USA 60 Hz), viele elektronische Geräte funktionieren mit höheren Frequenzen (Energiesparlampen 20-60 kHz) oder mit Frequenzgemischen (PC, Bildschirm...), die Bahn fährt in Deutschland mit 16,7 Hz.

2 MAGNETISCHE WECHSELFELDER (Niederfrequenz)

Messung und Langzeitaufzeichnung der niederfrequenten magnetischen **Flussdichte** von Netz- und Bahnstrom mit Bestimmung der dominierenden **Frequenz** und von auffälligen **Oberwellen**

- **Flussdichte** (Nanotesla, nT) von Netz- und Bahnstrom

Effektivwert-3D-Messung der Summe aller Feldlinienrichtungen in Anlehnung an Computernorm TCO oder DIN/VDE.

Mit Feldmessgerät bzw. Feldsonde (Induktionsspule 3D isotrop/orthogonal oder 1D), Feldmeter, NF-Analyser...: Frequenzbereich 10 Hz - 100 kHz (besser 400 kHz und höher), Messbereich bis 100.000 nT oder mehr, Nachweisempfindlichkeit 1 nT, Fehlertoleranz $\pm 10\%$, Sondenfläche $< 100 \text{ cm}^2$.

Beachten: Netzstrom (50 Hz) und Bahnstrom (16,7 Hz) getrennt untersuchen. 1D-Messung zur Ortung der Feldquelle anhand der Hauptfeldlinienrichtung. Spulengröße je nach Aufgabe: Große Induktionsspulen nach TCO bzw. DIN/VDE mit Durchmessern von 10 cm und mehr zeigen bei kleinen Feldquellen (Kleintrafos, Netzteile, Energiesparlampen...) im Nahbereich niedrigere Messwerte. Messgeräte bzw. -spulen während der Untersuchung nicht heftig bewegen, kann zu Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld und somit zu Messfehlern führen, speziell bei niedrigen Frequenzen (z.B. Bahn).

- **Langzeitaufzeichnung**

Effektivwert-3D-Messung der Summe aller Feldlinienrichtungen.

Mit Datenlogger, Schreiber, PC, Feldmeter, NF-Analyser, Multimeter (min-max-avg)...: Frequenzgang mindestens 16,7 Hz und 50 Hz (besser bis 2 kHz und höher), Messintervalle $< 10 \text{ s}$, Nachweisempfindlichkeit 10 nT, Fehlertoleranz $\pm 10\%$.

Beachten: Langzeitmessung von öffentlichen Stromquellen (Erdversorgungsleitungen, Freileitungen, Bahn, Transformatoren, Straßenbeleuchtung...), Nachtspeicherheizungen und Ausgleichsströmen immer über Nacht, speziell an Werktagen, bei Verdacht 24 Stunden oder mehr. Bei kleinflächigen, inhomogenen Feldern eventuell mehrere Datenlogger simultan. Bei der Messung öffentlicher Feldquellen auf Abschaltung von bzw. Abstand zu hausinternen Emittenten achten. Datenlogger während der gesamten Aufzeichnungszeit nicht bewegen.

- Dominierende **Frequenz** (Hertz, Hz)

Mit NF-Spektrumanalyser, Oszilloskop, Voltmeter, Feldmeter...

- Auffällige **Oberwellen** (Nanotesla, nT, oder Mikrowatt pro Quadratmeter, $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

Mit NF-Spektrumanalyser, Oszilloskop, Feldmeter... oder mit Hochfrequenz-Spektralanalysator: Frequenzbereich etwa 2 kHz bis 1 MHz.

Magnetische Wechselfelder entstehen als Folge von elektrischem Wechselstrom. Die Feldlinien verlaufen in sich geschlossen, ohne Anfang und Ende (Wirbelfeld). Das Feld wird durch elektrisch leitende Objekte, die Messapparatur, die Mess- und Testperson praktisch nicht beeinflusst.

Die Messung der magnetischen Feldstärke bzw. Flussdichte erfolgt durch Spannungsinduktion in stationären Spulen, welche nur bei Wechselfeldern auftritt. Gemessen wird mit 3D- oder 1D-Spulen. 3D weist drei orthogonal angeordnete Spulen (x, y und z-Achse) in einem Messkopf auf, misst, berechnet und zeigt alle Feldlinienverläufe gleichzeitig an. 1D erfasst eine Achse, sie kann das Feldmaximum nur bei einem eindeutigen Feldlinienverlauf angeben, ist aber zur Bestimmung der räumlichen Lage linearer Feldquellen sehr hilfreich. Geht es um mehrere Feldquellen oder Emittenten mit gemischten Feldlinienverläufen, müssten mit 1D-Spulen drei Messungen jeweils um 90° versetzt durchgeführt und deren Ergebnisse quadratisch addiert werden: $\sqrt{(x^2+y^2+z^2)}$. Das sollte - speziell bei schwankenden Feldintensitäten - simultan geschehen, was praktisch selten möglich ist. Bei den häufiger auftretenden eindeutigen Feldverläufen (Freileitungen, Erdversorgungsleitungen, stromführende Installationsrohre...) kann die 1D-Messung

reichen. Bei den seltener zu findenden Feldliniengemischen (Transformatoren, Geräte, mehrere Emittenten...) ist die 3D-Messung sicherer bzw. unbedingbar. Baubiologisch bewertet wird die Summe aller Feldlinienrichtungen.

Die Kurzzeitmessung dient der ersten Übersicht und zur Feststellung der unterschiedlichen Feldquellen im Haus (Elektrogeräte, Sicherungskästen, Ausgleichsströme in der Hausinstallation...) und draußen (Erdkabel, Freileitungen, Trafostationen, Bahnstrom, Ausgleichsströme im öffentlichen Netz...). Eine Langzeitmessung über mehrere Stunden oder Tage erfasst ein Profil der bei Magnetfeldern als Folge von Stromstärkeveränderungen häufig festzustellenden zeitlichen Feldschwankungen. Speziell bei intensiven Feldschwankungen (z.B. mit kurzzeitigen hohen Feldspitzen) ist das aus Langzeitaufzeichnungen - besonders auch über Nacht - ermittelte 95. Perzentil zur Bewertung heranzuziehen.

Als Ausgleichsströme bezeichnet man elektrische Ströme, welche nicht über den üblichen, hierfür vorgesehenen Weg fließen (wie den Rückleiter eines Elektrokabels), stattdessen über Erdungsleitungen, PE-Leiter, Schutzschirme, metallische Gas- und Wasserrohre..., dies meist unkomponiert und auch deshalb zu beachtlichen Magnetfeldern führend; sie entsprechen Einleiterströmen, deren Flussdichte im Verhältnis 1/Abstand zu- bzw. abnimmt. Bei hausinternen Ausgleichsströmen eventuell ergänzende direkte Messung bzw. Langzeitaufzeichnung der stromführenden Quellen mit z.B. Zangenamperemeter, Strommesszange bzw. Stromwandler. Bei Feldern durch Ausgleichströme von außen eventuell Simultanmessung mit mehreren Datenloggern im Haus und nahe der Feldquelle.

Zur Messung der räumlichen Magnetfeldverteilung z.B. in der Umgebung von Hochspannungsleitungen, Bahntrassen, Transformatorstationen oder Erdversorgungsleitungen (speziell Ringleitungsführungen, die oft großflächige Feldausdehnungen zeigen) - speziell auch bei zeitlichen Feldschwankungen und/oder mehreren Feldquellen - zwei oder mehrere Messgeräte in verschiedenen Abständen zur Feldquelle gleichzeitig einsetzen, wobei eines als stationäres Referenzgerät dienen kann.

Oberwellen sind bei ohmschen Verbrauchern und meist bei Hochspannungsleitungen, Bahnstrom, Transformatoren... weniger zahlreich und ausgeprägt als bei Verbrauchern mit viel Elektronik (dort spricht man oft von 'dirty electricity' oder 'dirty power'). Die in Europa typische Netzfrequenz ist 50 Hz (USA 60 Hz), viele elektronische Geräte erzeugen höhere Frequenzen oder Frequenzgemische, die Bahn fährt in Deutschland mit 16,7 Hz, in anderen Ländern auch mit 50 Hz oder Gleichstrom. Manchmal kann eine Oberwelle feldstärker ausfallen als die eigentliche Grundfrequenz, z.B. bei Transformatorstationen.

Die Frequenz eines Feldes sowie die Häufigkeit und Art von Oberwellen sind - neben der Feldintensität - ein Aspekt der biologischen Bewertung. Manche Organismen reagieren auf schwächere Felder bestimmter Frequenzen heftiger als auf stärkere Felder anderer Frequenzen, Frequenzgemische oder auf Oberwellen. Es gibt bei Lebewesen, Organen, Zellen... eng begrenzte "Frequenzfenster" mit gesteigerter Empfindlichkeit.

Zur Frequenz des niederfrequenten Feldes und dessen Oberwellen siehe auch Punkt A1 "Elektrische Wechselfelder".

3 ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN (Hochfrequenz)

Messung der hochfrequenten elektromagnetischen **Strahlungsdichte** mit Bestimmung der dominierenden **Frequenzen** bzw. **Funkdienste** sowie deren **Signalcharakteristik** (niederfrequente Pulsung, Periodizität, Breitbandigkeit, Modulation...)

- **Strahlungsdichte** (Mikrowatt pro Quadratmeter, $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

a) Orientierende Breitband-Messung der Summe aller Feldeinflüsse über den **gesamten Frequenzbereich**

Mit Breitband-Messgerät, HF-Feldsonde, HF-Analyser, Strahlungsmonitor, Radiation Meter...: möglichst großer Frequenzbereich ab 100 kHz bis über 6 GHz (mindestens 10 MHz - 3 GHz zur Erfassung der zurzeit im Alltag häufigsten Funkdienste), Messbereich bis mindestens 20.000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ oder (besser) mehr, Nachweisempfindlichkeit 0,1 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, Fehlertoleranz ± 5 dB über den gesamten Messbereich, Möglichkeit der Langzeitmessung.

Beachten: Spitzenwert-Messung aller Raumrichtungen, Polarisierungsebenen, Reflexionen... im Fernfeld mit isotroper 3D-Messantenne oder 1D-Messantenne nach Schwenkmethode.

b) Detaillierte Selektiv-Messung mit Feststellung der **einzelnen Funkfrequenzen** (kHz, MHz, GHz; GSM/2G, UMTS/3G, LTE/4G, 5G, TETRA, LTE, WiMAX, WLAN, DECT, Bluetooth, Radio, Fernsehen, Richtfunk, Radar, Amateurfunk...)

Mit Spektrumanalysator und kalibrierten Messantennen (logarithmisch-periodische Antenne, Dipol, Monopol, Bikonus, Loop, Horn...) oder frequenzselektiv filterndem Breitbandmessgerät bzw. HF-Analyser: möglichst großer Frequenzbereich ab 100 kHz (besser niedriger) bis über 6 GHz (mindestens bis 3 GHz zur Erfassung der zurzeit im Alltag häufigsten Funkdienste), Messbereich bis mindestens 10.000.000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, Nachweisempfindlichkeit 0,01 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, Fehlertoleranz ± 3 dB über den gesamten Messbereich und Messaufbau.

Beachten: Spitzenwert-Messung wie oben, Grund- und Voll-Last bzw. Anzahl möglicher Verkehrskanäle beachten. Baubiologische Richtwerte gelten für einzelne Funkdienste, nicht für Radar.

- **Dominierende Funkdienste** und niederfrequente **Signale** (Pulsung, Periodizität, Breitbandigkeit, Modulation...)

Optisch mit Spektrumanalysator oder akustisch mit Breitband-Messgerät, Signal- bzw. Modulationsmeter... anhand hörbar gemachter demodulierter Signale; möglichst weiter Frequenzbereich wie oben.

Beachten: Bei mehreren Feldquellen kann es zu akustischen Überlagerungen kommen, die eine Diagnose schwer bis unmöglich machen.

Bei elektromagnetischen Wellen - auch Hochfrequenz genannt - geht es um drahtlose Informationsübertragung, um Funkanwendungen. Das für die technische Funknutzung bereitgestellte Frequenzspektrum fängt bei 9 kHz an, füllt den gesamten MHz-Bereich aus und endet bei 300 GHz. Funkwellen sind Transversalwellen und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Funkwellen bestehen aus einem hochfrequenten Trägersignal, dem eine niederfrequente Information aufgeprägt, ein Inhalt aufmoduliert wird, z.B. Bilder, Sprache, Musik oder Daten. Wesentliche Modulationsarten sind die Amplitudenmodulation (AM, oft Kurz-, Mittel-, Langwelle und gepulste Signale wie Radar), Frequenzmodulation (FM, oft UKW) oder Phasenmodulation (PM, oft neuere digitale und gepulste Techniken wie GSM, UMTS, TETRA, DECT, WLAN) mit zahlreichen Misch- und Unterarten.

Mobilfunknetze, Handys, DECT-, WLAN- und andere moderne digitale Techniken funken außerdem gepulst, um möglichst viele Informationen praktisch zeitgleich übertragen zu können. Die Pulsung - speziell die periodische - wird bei baubiologischen Messungen besonders beachtet (Spektrumanalyse in Zero-Span-Einstellung und/oder akustische Diagnose, auch mit Breitband- bzw. Modulationsmessgerät) und kritisch gewichtet.

Im Nahfeld (unterhalb einer Wellenlänge) müssen die elektrischen und magnetischen Feldanteile - wie bei den niederfrequenten Feldern - als elektrische (E , V/m) und magnetische Feldstärke (H , A/m) separat gemessen werden. Im Fernfeld (oberhalb einer Wellenlänge) reicht die Messung einer Feldkomponente zum Rückschluss auf die Strahlungsdichte (S), z.B.: $S = E^2 : Z_0$ bzw. $S = H^2 \times Z_0$ (Z_0 = Feldwellenwiderstand 377 Ω).

Bei mehreren Feldquellen wird für die Ermittlung der Gesamtstrahlungsdichte die arithmetische Summe gebildet.

In der Baubiologie wird bei der HF-Messung oft die Schwenkmethode durchgeführt. Die Messantenne wird möglichst weit vom Körper entfernt in allen Raumteilen (speziell im Schlafbereich) und Raumrichtungen isotrop, sprich dreidimensional geführt, das zu messende Areal abgetastet, 'abgescannt', in die verschiedenen Polarisierungsebenen gedreht und per Spitzenwerteinstellung (Peak Hold) aufgezeichnet. Eine solche Vorgehensweise sollte - je nach Situation - mindestens eine Minute dauern, zumindest so lange, bis sich auf der Anzeige keine Messwertsteigerung mehr zeigt.

Mit dem Spektrumanalysator gehen wir bei der Untersuchung z.B. von GSM-Mobilfunknetzen standardgemäß wie folgt vor: Messung der ständig akti-

ven Organisationskanäle (BCCH, Broadcast Control Channel) in Max-Hold-Einstellung nach Schwenkmethode und Aufsummierung der Strahlungsdichten. Dies Ergebnis entspricht in etwa der Minimalauslastung der Basisstation während der von Handytelefonierern meist nicht stark frequentierten Nacht. Zur Ermittlung der Strahlungsdichte bei maximaler Auslastung einer Basisstation, wenn tagsüber beispielsweise viele Handygespräche über ihre Verkehrskanäle (TCH, Traffic Channel) abgewickelt werden, kann entweder der Messwert der Organisationskanäle theoretisch und grob mit dem Faktor 2-4 multipliziert (es sei denn, es liegen genaue Betreiberdaten vor) oder praktisch eine Langzeitmessung mit Breitbandgerät durchgeführt werden. Alle Funkdienste (GSM, UMTS, TETRA, DECT, WLAN, Rundfunk, Richtfunk...) werden anhand der baubiologischen Richtwerte getrennt bewertet. Im Protokoll steht das zum Zeitpunkt der Messung erfasste Ergebnis mit Minimal- und erfasstem bzw. möglichen Maximalwert.

Nicht alle Sender funken immer und wenn, dann nicht immer gleich stark. So kann es notwendig werden, Langzeitbeobachtungen bzw. -aufzeichnungen durchzuführen. Manche Radiosender oder das Militär z.B. funken nur zu bestimmten Zeiten, manche Behörden- und Industriesender oder Amateurfunker nur bei Bedarf. DECT-Telefone und WLAN-Netzwerke strahlen manchmal nonstop, manchmal aber auch nur bei der Nutzung. Auch die breitbandigen Signale (UMTS, digitales Fernsehen...) mit ihren ausgeprägteren Crest-Faktoren sollten mit Geduld beobachtet werden, sie schwanken. Auch und gerade hier zeigt sich: Die Methoden ergänzen sich und bieten miteinander kombiniert die notwendige analytische Sicherheit. Die Breitbandmessung ist zumeist einfach(er), schnell(er), die Messtechniken preiswert(er). Die Spektrumanalyse ist kompliziert(er), zeitaufwändig(er), die Spektrumanalysatoren teurer, dafür auch sicherer, differenzierter und präziser. Ein Breitbandmessgerät kann keinen Spektrumanalysator oder die akustische Diagnose ersetzen, aber ein Spektrumanalysator auch nicht das Breitband- oder Modulationsmessgerät.

Auch hier gilt, ähnlich wie bei den Standardpunkten A1 "Elektrische Wechselfelder" und A2 "Magnetische Wechselfelder": Die Frequenz der Funkwellen, ihre Modulation und Pulsung, sind - neben der Strahlungsintensität - ein Aspekt der biologischen Bewertung. Manche Organismen reagieren auf schwache Felder bestimmter Frequenzen und Taktungen heftiger als auf starke Felder anderer Frequenzen. Es gibt bei Lebewesen, Organen, Zellen... verschiedenartige "Frequenzfenster" mit gesteigerter Empfindlichkeit. Die niederfrequente Pulsung zeigt sich nach bisheriger Erfahrung umso kritischer, je niedriger die Pulsfrequenz ausfällt. Oberwellen sind bei hochfrequenten Wellen weniger ausgeprägt als bei den niederfrequenten Feldern.

4 ELEKTRISCHE GLEICHFELDER (Elektrostatik)

Messung der statischen elektrischen **Oberflächenspannung** sowie deren **Entladezeit** und der **Luftelektrizität**

- **Oberflächenspannung** (Volt, V)

Messung von elektrostatisch geladenen Oberflächen gegen Erdpotenzial.

Mit Feldmühle, Elektrofeldmeter, Elektrostatiksonde, Statiksensoren... : Messbereich bis ± 20.000 V oder mehr, Nachweisempfindlichkeit 10 V oder weniger, Fehlertoleranz ± 10 %.

Beachten: Messung in 2-10 cm Abstand zur Material- bzw. Bildschirmoberfläche (eventuell Abstandshalter). Provokation und somit Aufladung des Materials durch alltagstypische Reibung (z.B. mit dem Handrücken oder einem nicht leitenden Material) 1-2 Sekunden vor der Messung. Angabe der Polarität der Ladung: plus oder minus. Relative Raumluftfeuchte idealerweise 40-60 %, Raumklimaparameter (Luftfeuchte, Lufttemperatur, Oberflächenfeuchte, eventuell Luftionisation...) angeben. Erdung von Messgerät und Messperson.

- **Entladezeit** (Sekunden, s)

Feststellung, in welcher Zeit sich die aufgeladene Material- bzw. Bildschirmoberfläche wieder auf normale Werte (also Werte vor der Provokation) entlädt.

- **Luftelektrizität** (Volt pro Meter, V/m)

Messung des luftelektrischen Gleichfeldes gegen Erdpotenzial.

Mit Feldmühle, Elektrofeldmeter...: Messbereich ± 200 V/m - ± 20.000 V/m oder größer, Nachweisempfindlichkeit 10 V/m, Fehlertoleranz ± 10 %.

Beachten: Messung der Raumluftelektrizität im Einflussbereich des Menschen (speziell nach Provokation elektrostatisch aufladbarer Materialien und Bildschirme) und als Referenz der Außenluftelektrizität.

Elektrische Gleichfelder entstehen als Folge einseitiger elektrischer Ladungen an isolierenden Materialien (Kunststoffe, Synthetik, Gummi...), nicht abgeschirmten Bildschirmen und durch Gleichspannung (Oberleitung der Straßenbahn, Luftreiniger...). Sie verändern die natürliche Luftelektrizität und andere Raumklimaaspekte (Luftionisation, Staubaufkommen...). Das natürliche elektrische Gleichfeld wird im Freien maßgeblich durch das Wetter beeinflusst.

Auch bei der Elektrostatikmessung, den frequenzlosen Aufladungen und Feldstärken, geht es um Potenzialdifferenzen, und einige der bei den elektrischen Wechselfeldern (A1) beschriebenen Zusammenhänge und Probleme sind hierauf übertragbar. Die Oberflächenspannung wird an verdächtigen Materialien (Teppich, Gardine, Bettwäsche, Gegenstände, Bildschirme...) gemessen und die deshalb veränderte Luftelektrizität in der umgebenden Raumluft. Umrechnung: Oberflächenspannung (V) = Feldstärke (V/m) x Abstand (m).

Für vergleichbare Resultate sollte die relative Raumluftfeuchte bei 40-60 % liegen und die zu messenden Oberflächen diesem Raumklima einige Stunden ausgesetzt sein. Bei über 60 % Luftfeuchte ist mit niedrigeren Oberflächenspannungswerten zu rechnen, über 70 % machen Messungen schon schwierig, über 80 % kaum möglich und über 90 % unmöglich. Unter 40 % werden die Ergebnisse deutlicher, unter 30 % ist mit mehrfachen und unter 20 % Luftfeuchte mit zigfacher Anstieg zu rechnen. Manchmal wird es nötig, zu verschiedenen Jahreszeiten zu überprüfen (feuchter Sommer, trockener Winter). Röhren-Bildschirme (ältere Monitore und Fernseher) müssen vor der Messung einige Minuten eingeschaltet sein, damit sie ihre volle Ladung aufbauen; die Elektrostatik verändert sich mit der Helligkeit des Bildes.

Baubiologisch empfehlenswerte Materialien und Bildschirme sind kaum aufladbar und wenn, entladen sie sich in Sekundenschnelle. Kritische Materialien sind nach Provokation und Bildschirme nach dem Einschalten in Sekundenschnelle extrem aufladbar und entladen sich sehr langsam über Minuten, Stunden oder Tage. Negative Ladungen, welche auf Kunststoffe und Synthetik hinweisen, sind kritischer zu bewerten als positive, die manchmal auch in der Natur vorkommen können (Bernstein, Wolle...).

5 MAGNETISCHE GLEICHFELDER (Magnetostatik)

Messung der **Erdmagnetfeldverzerrung** als statische **räumliche Flussdichteabweichung** (Metall) bzw. **zeitliche Flussdichteschwankung** (Gleichstrom) sowie der **Kompassabweichung**

- **Erdmagnetfeldverzerrung** als räumliche Flussdichteabweichung - **Metall** (Mikrotesla, μ T)

Messung der Summe aller Metall- bzw. Permanentmagnet-bedingten magnetischen Feldlinienrichtungen.

Mit Magnetometer, Magnetfeldindikator, Magnetostatiksensoren...: Messbereich mindestens ± 100 μ T (besser mehr), Nachweisempfindlichkeit wenigstens 100 nT (besser weniger), Fehlertoleranz ± 10 %.

Beachten: Zu messende Fläche abschnitten, eventuell rasterförmige Aufzeichnung des Messareals (Bettfläche, Raum...). Ausrichtung des Sensors auf allen Messstrecken nicht verändern. 1D-Sonde während der Messung nicht kippen, verdrehen oder verkanten, auch nicht minimal. Punktuelle lokale Feldauffälligkeiten mit ausgeprägten Gradienten kritischer be-

werten als ausgedehnte mit weniger ausgeprägten Gradienten.

- **Erdmagnetfeldverzerrung** als zeitliche Flussdichteschwankung - **Strom** (Mikrotesla, μT)

3D-Messung der Summe aller Gleichstrom-bedingten magnetischen Feldlinienrichtungen.

Mit Magnetometer, Magnetfeldindikator, Magnetostatiksensoren...: Messbereich mindestens $\pm 100 \mu\text{T}$ (besser mehr), Nachweisempfindlichkeit wenigstens 100 nT (besser weniger), Fehlertoleranz $\pm 10 \%$.

Beachten: Bei Verdacht auf Feldschwankungen (Straßenbahn, Photovoltaik...) Langzeitaufzeichnung zumindest über 24 Stunden, in jedem Fall über eine Nacht. Positionierung des Messgeräts an einem Magnetfeld-neutralen Ort. 1D-Sonde während der Messzeit nicht bewegen.

- **Kompassabweichung** (Grad, $^\circ$)

Feststellung einer Abweichung der Kompassnadel im Einfluss magnetischer Gleichfelder von Metall oder Strom.

Mit mechanischem flüssigkeitsgedämpften Präzisionskompass, Magnetfeldschiene, elektronischem Fluxgate-Kompass...

Beachten: Kompass langsam und gradlinig in einer Richtung über eine Fläche (Bett...) fahren, nicht verdrehen, Areal rasterförmig abschannen, Abweichungen notieren. Auch auf Ablenkungen der Nadel nach oben oder unten achten. Wenn ein technisches Magnetfeld mit der gleicher Polarisierung wie das Erdmagnetfeld aus Nordsüdrichtung auf die Kompassnadel einwirkt, wird sich die Nadel nicht bewegen, wie sie es besonders deutlich tut, wenn die Felder von der Seite kommen.

Technische magnetische Gleichfelder entstehen als Folge von ferromagnetischen Metallen (Stahl in Baumasse, Möbeln, Einrichtungen...) oder durch Gleichstrom (Straßenbahn, Photovoltaik...). Natürliche magnetische Gleichfelder sind die Folge des Erdmagnetfeldes, in welches sich eine Kompassnadel nach Norden ausrichtet. Der Begriff Erdmagnetfeldverzerrung bezeichnet eine Beeinflussung bzw. Überlagerung des natürlichen Hintergrundes. Jedes Magnetfeld - technisch oder natürlich - hat einen Nord- und Südpol (einen Plus- und Minuspol). Die Feldlinien verlaufen vom Nord- zum Südpol.

Bei der Magnetostatikmessung geht es um den Betrag und die Richtung technisch bedingter Magnetfelder; Referenz ist das ungestörte, gleichmäßige Erdmagnetfeld. Eine Messung mit einem 3D-Magnetometer erfasst - wie bei den magnetischen Wechselfeldern - die magnetische Flussdichte an einem Messpunkt unter Berücksichtigung aller Feldlinienausbreitungen dreidimensional, isotrop; der Messwert ist unabhängig von der räumlichen Ausrichtung der Sonde. Die Messung mit 1D-Magnetometer oder Magnetfeldindikator erfasst nur eine Achse der Feldlinienausbreitung; der eindimensionale Messwert ist richtungsabhängig. Werden drei 1D-Messungen jeweils um 90° versetzt durchgeführt und deren Ergebnisse quadratisch addiert, erhält man die Summe, die bei 3D-Geräten automatisch ermittelt und angezeigt wird $\sqrt{x^2+y^2+z^2}$.

1D-Magnetometer zeigen die ermittelte Flussdichte der Polarität des Feldes entsprechend mit Plus- oder Minus-Vorzeichen an, was für die Berechnung der Flussdichteabweichung innerhalb eines lokal begrenzten Bereiches nötig ist. Die zurzeit handelsüblichen Magnetometer, die bei 3D-Messungen lediglich Betragsberechnungen im Relativmessmodus durchführen und die Richtung des Vektors nicht mit einbeziehen, sind für die Ermittlung der Flussdichteabweichung zwischen zwei Messpunkten nur bedingt geeignet, für alle anderen Zwecke jedoch gut geeignet.

Der Kompass funktioniert zweidimensional und richtet sich hauptsächlich in den horizontalen Feldlinien aus. Er ist kein Messgerät, sondern ein Indikator, und zeigt keine Feldintensitäten an, sondern nur Richtungen. Seine Nadel lässt sich durch fremde Magnetfelder ablenken. Ein elektronischer Fluxgate-Kompass, wie er z.B. beim Segeln eingesetzt wird, funktioniert ähnlich wie ein üblicher Kompass, aber statt mit Nadel mit digitaler Anzeige.

Eine Umrechnung von Magnetometerwerten zu Kompassabweichungen ist kaum, und wenn, dann nur grob möglich. Auch hier ergänzen sich die unterschiedlichen Messmethoden. Der Nachweis per Kompass ist verständlich und überzeugend, er ersetzt Magnetometermessungen aber nicht.

Ermittelt wird - wie immer - im Einflussbereich des Menschen, z.B. auf dem Bett.

Metall-bedingte Magnetfelder können räumlich sehr unterschiedlich ausfallen, kleinflächig heftig mit extrem wechselnden Intensitäten alle paar Zentimeter (steiler Gradient), z.B. über Federkernmatratzen in direkter Körperrnähe, oder großflächig gemäßigter im Verlauf mehrerer Dezimeter oder Meter (flacher Gradient), z.B. über Stahlträgern oder Betonarmierungen. Auch deshalb am besten rasterförmige Aufzeichnung einer definierten Fläche.

Gleichstrom-bedingte Magnetfelder können starken zeitlichen Schwankungen unterliegen. Beim Straßenbahn-, U-Bahn- oder O-Busstrom schwanken sie fortlaufend, je nach Stromfluss in den Oberleitungen und Schienen; nachts fährt die Straßenbahn gar nicht mit dem Effekt: kein Feld. Bei Photovoltaikanlagen schwanken sie unter anderem je nach Sonneneinwirkung, das heißt: nachts keine Feldbelastung. Auch deshalb: Langzeitaufzeichnung.

6 RADIOAKTIVITÄT (Alpha-, Beta- und Gammastrahlung, Radon)

Messung der radioaktiven Strahlung als **Impulsrate**, **Äquivalentdosisleistung** und **Abweichung** sowie Messung und Langzeitaufzeichnung der **Radonkonzentration**

- **Radioaktive Strahlung** (Impulse pro Sekunde/Minute, ips/ipm - Nanosievert pro Stunde, nSv/h)

Aktivitäts-Messung radioaktiv auffälliger Baustoffe, Materialien, Geräte, Einrichtungen... und/oder vergleichende Erfassung der Impulszahlen der Alpha-, Beta- und Gammastrahlung.

Mit Dosisleistungsmessgeräten (Geiger-Müller-Zählrohr, Großflächendetektor, Proportionalzähler, Szintillationszähler...).

Das Messgerät sollte mindestens den Bereich der umweltrelevanten Gammaenergie von 50 keV bis 1,3 MeV erfassen. Pro Messung sind aufgrund der erforderlichen statistischen Genauigkeit im Niedrigdosisbereich mindestens 1000 Impulse pro Messpunkt nötig. Nachweisempfindlichkeit wenigstens 100 nSv/h (besser weniger), Fehlertoleranz $\pm 25 \%$, empfohlene Grundempfindlichkeit 40 Impulse pro Minute bei 100 nSv/h, Nulleffekt (Detektoreigenrauschen) $< 50 \%$ bei 100 nSv/h.

Beachten: Bei Schlafplatzuntersuchungen sind mindestens zwei Messpunkte empfehlenswert, z.B. am Kopf- und am Fußende. Deutliche Unterschiede zwischen Kopf- und Fußmessung deuten auf erhöhte Eigenstrahlung der Baumasse hin (z.B. Kopfwand). Zur Bewertung gilt das höhere Messergebnis. Weiterführende Messungen an Wänden, Böden, Ecken... ermöglichen die Quellensuche und Erarbeitung von Sanierungsvorschlägen. Die meisten Preiswertgeräte sind üblicherweise nicht für die Bestimmung kleiner Abweichungen im Bereich der Hintergrundstrahlung um 100 nSv/h gemacht. Trotzdem ist es möglich, mit Geräten, die den o.g. Anforderungen entsprechen, eine recht zuverlässige Bewertung im Niedrigdosisbereich vorzunehmen; hierbei sind in erster Linie die Impulsausbeute (Zählstatistik) und der Nulleffekt (Detektoreigenrauschen) zu beachten. Aufgrund dieser Problematik sollten vergleichende Messungen bevorzugt werden.

Der Nulleffekt, d.h. das Eigenrauschen des Detektors, schlägt in der Nähe der allgemeinen Hintergrundstrahlung von etwa 100 nSv/h deutlich zu Buche - zum Teil bis zu 50 % vom Messwert, je unempfindlicher das Messgerät ist, desto stärker. Beim Szintillationszähler (NaJ 2" oder 3") ist der Nulleffekt aufgrund der hohen Impulsausbeute praktisch nicht relevant.

Die baubiologischen Bewertungen beziehen sich auf die Gamma-Impulsausbeuten ausgehend von natürlichen Nukliden (Ra-226, Th-232 und K-40). Die neue Umgebungs-Äquivalentdosis H^*10 entspricht im Fall dieser natürlichen Umgebungsstrahlung (Baugrund, Baumaterialien) der Photonen-Äquivalentdosis.

Radioaktivität gibt es in geringen Mengen überall. In der Erde, im Körper und in der Luft finden sich überwiegend natürliche radioaktive Elemente (Radionuklide) aus der Thorium- (Th-232) und der Uran-Radium-Reihe (Ra-226) sowie das Kalium (K-40). Bei der Messung der radioaktiven Strahlung wird die Anzahl der radioaktiven Zerfälle innerhalb einer bestimmten Zeit in Form von Impulsen ermittelt. Messgeräte wandeln die einfallende Strahlung in elektrische Impulse um. Eine für baubiologische Zwecke besonders gut geeignete Methode stellt die vergleichende Messung dar. Hierbei wird die Relation zwischen natürlicher Umgebungsstrahlung und der Strahlung im Haus, am Baustoff, am Schlafplatz usw. als prozentuale Abweichung

angegeben. Es empfiehlt sich stets die Angabe aller gemessenen Bezugswerte. Besonders wichtig ist die Bestimmung der Ortsdosisleistung bzw. Äquivalentdosisleistung durch Gammastrahlung.

Neben der Gammastrahlung sollte auch die Betastrahlung beachtet werden. Alphastrahlung spielt bei baubiologischen Untersuchungen aufgrund der geringen Reichweite eher eine untergeordnete Rolle. In Bezug auf die innere Aufnahme über Radon und die Zerfallsnuklide in der Luft können Messungen der Alphastrahlung über Partikelsammlungen sinnvoll werden.

Bei Messungen im Gebäude darauf achten, dass es häufig um unterschiedliche massive Baumaterialien in Innen- und Außenwänden geht, die sich deutlich auf die Gammaaktivität auswirken können.

Eine differenzierende Nuklidzuordnung kann mittels Gammaskopie erfolgen. Proben von verdächtigen Materialien (z.B. Baustoffen) können hinsichtlich ihrer spezifischen Aktivität im Labor untersucht werden.

Ergeben sich Hinweise auf eine besondere Belastungssituation durch z.B. Radium in der Baumasse, oft sind es Schlacken, sollten Radonmessungen durchgeführt werden.

In Bezug auf eine mögliche Erhöhung der radioaktiven Jahresdosis spielen Auffälligkeiten bei Baustoffen gegenüber der bei Radon meist eher eine untergeordnete Rolle.

- Radon (Becquerel pro Kubikmeter, Bq/m³)

Luft-Messung von Radon-auffälligen bzw. -verdächtigen Gebäuden, Räumen, Materialien und Grundstücken (Vorprüfungen, Kurzzeitmessungen, Langzeitmessungen, Exhalationsmessungen, Bodengasmessungen)

Mit direkt anzeigenden Radonmonitoren, Radon-Tochternuklid-Spektrometern, Passivdosimetern, Kernspur-Exposimetern (elektronische Geräte nach dem Halbleiterdetektorprinzip, Kernspurdetektoren, Aktivkohle...)

Beachten: Messungen bzw. **Vorprüfungen** in ungelüfteten Räumen oder unter Nutzungsbedingungen mit eher schlechter Raumlüftung über einen Zeitraum von wenigen Stunden bis zu drei Tagen liefern erste Hinweise auf eine Radonproblematik und zu Vergleichszwecken. Zur Schnellmessung vor Ort und zur Quellensuche werden z.B. direkt anzeigende elektronische Verfahren mit Pumpen eingesetzt. Mit einfachen Vortest-Verfahren kann eine akut erhöhte Radonkonzentration auch über die Messung der Folgeprodukte und/oder der Luftionisation erkannt werden: Positiv geladene radioaktive Folgenuklide aus der Raumluft werden nach Anreicherung an negativ geladenen Flächen (Elektrostatik-Verfahren) oder auf Filtermedien (Partikelsammlung) mit empfindlichen Geigerzählern nachgewiesen. Mit Ionomern können erhöhte Kleinionenzahlen in der Luft gemessen werden, die mit Radonkonzentrationen und der Anzahl der Zerfallsnuklide gut korrelieren. Eine einfache Vorprüfung der Raumluft erfolgt mit einem Aktivkohle-Passivsammler mit einer Expositionsdauer von bis zu drei Tagen.

Ergibt eine solche Messung bis zu 3 Tagen einen Radongehalt oberhalb eines genaueren zu prüfenden Richtwertes, sollten Wiederholungsmessungen oder solche über längere Zeiträume (in bewohnten Räumen möglichst unter Einbezug von ersten einfachen Sanierungsmöglichkeiten über Lüftung) durchgeführt werden.

Übersichtsmessungen sollten daher mit anderen Methoden über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Für eine zuverlässigere Abschätzung des Jahresmittelwertes werden Messungen mit elektronischen Dosimetern oder Kernspur-Exposimetern über Wochen oder länger empfohlen. Sinnvoll ist eine Simultanmessung, z.B. im Wohnraum und Keller, da das Radon oft über den Erdboden und den Keller in das Haus gelangt.

Die baubiologischen Richtwerte beziehen sich auf eine Messung über mindestens 7 bis 14 Tage in der Übergangszeit (mittleres Jahresklima z.B. Frühjahr/Herbst) unter normalen Nutzungsbedingungen. Mit viel Erfahrung und unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren kann eine erste Abschätzung des Jahresmittelwertes erfolgen. Vor umfangreichen und kostspieligen Sanierungen werden Simultan- und Wiederholungsmessungen empfohlen.

Bewertungsmessungen zur Beurteilung der Überschreitung von Richt- und Referenzwerten z.B. nach EU, WHO, UBA, BfS... werden in der Regel mit Kernspur-Exposimetern mit einer Expositionsdauer von in der Regel mehreren Monaten bis zu einem Jahr durchgeführt. In der Baubiologie sind derart lange Untersuchungszeiträume nur dann sinnvoll, wenn eine Unterschreitung auf der Basis von Vorprüfungen und Übersichtsmessungen möglich und plausibel erscheint oder zur Sanierungskontrolle dienen soll.

Ergänzend zu den Radonmessungen in der Innenraumluft kommen auch Materialuntersuchungen (Radon-Exhalationsrate) und Bodengasmessungen (mit Bodengassonde "Tschechische Sonde", empfohlene Tiefe: 80-100 cm) in Frage.

Das radioaktive Gas Radon ist unsichtbar, völlig geruchs- und geschmacklos. Radon zerfällt direkt in der Atemluft und produziert radioaktive Folgeprodukte (Po-218, Po-214, Pb-214, Bi-214 und andere). Diese Folgeprodukte binden sich an lungengängige Feinstaubpartikel in der Luft und verursachen den größten Teil der aufgenommenen radioaktiven Dosis. Nach statistischen Schätzungen kommt es in Deutschland jährlich bereits zu knapp 2000 zusätzlichen Lungenkrebstoten durch Radon in der Innenraumluft. Es gibt keinen Schwellenwert, unterhalb dessen kein Risiko besteht.

Radonprobleme im Haus entstehen oft durch erhöhte Konzentrationen im Erdreich, Undichtigkeiten zum Erdreich hin, radioaktiv auffällige Baustoffe und Einrichtungen und mangelnde Wohnraumlüftung. Speziell in älteren Häusern mit feuchtem Keller findet sich Radon, da es gut wasserlöslich ist.

Die Radonkonzentration schwankt in einem Gebäude im zeitlichen Verlauf sehr stark, neben der Wohnraumlüftung spielen auch das Außenklima, Temperatur- und Druckschwankungen sowie die Bodenbeschaffenheit eine große Rolle. Während der Heizperiode sind die Raumluftkonzentrationen durch den thermischen Auftrieb, schlechtere Wohnraumlüftung und höhere Bodenluftkonzentrationen deutlich höher. Im Sommer liegen die Radon-Innenraumkonzentrationen bis zu Faktor 5 niedriger als im Winter. Auch im Erdreich können jahreszeitlich bedingte deutliche Unterschiede der Radon-Bodengaskonzentrationen festgestellt werden, hier sind die Unterschiede jedoch deutlich geringer und liegen bei zirka Faktor 1,5 bis 3.

Höhere Radonkonzentrationen kommen vor allem in Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen vor (Bayerischer Wald, Oberpfalz, Fichtelgebirge, Thüringer Wald, Erzgebirge, südlicher Schwarzwald, Vogtland, Sauerland, Saarland und nördliches wie östliches Schleswig-Holstein).

Die Korrelationen der mittleren Radonkonzentrationen im Erdreich und im Innenraum sind recht gut. Während in 1 m Tiefe im Boden sehr hohe Konzentrationen von ca. 10.000 bis über 600.000 Bq/m³ vorherrschen, liegen die Innenraum-Konzentrationen zirka um den Faktor 1000 niedriger. Schon unter 10.000 Bq/m³ Bodenkonzentration kann jedoch bei Undichtigkeiten zum Erdreich mit Radonauffälligkeiten in Häusern gerechnet werden.

Das sehr kurzlebige Thoron (Radon Rn-220 aus der Thorium-Reihe) spielt bei baubiologischen Messungen eine untergeordnete Rolle. Es können jedoch Innenraumprobleme durch offene und nuklidreiche Baumaterialien entstehen. Über Aktivkohlemessungen ist Thoron nicht zu erfassen. Hier eignen sich nur Messungen der Folgeprodukte in der Raumluft (Pb-212, Po.212). Thoron ist durch seine intensiven Alpha-Zerfälle in der Reihe seiner Zerfallsnuklide ebenfalls besonders kritisch zu betrachten. Thoron kann insbesondere bei radioaktiv auffälligem Granit (z.B. als Fußbodenbelag) in die Innenraumluft gelangen. Durch stark Thorium-auffällige Baustoffe, Schlacken und dicke Lehmputzschichten bei hoher Raumbeladung (> 1 m²/m³) und niedrigem mittleren Luftwechsel (< 0,5) können radioaktive Thoron-Zerfallsnuklide in Bezug auf die Jahresdosis im Innenraum merklich beitragen.

Gebäude mit erhöhter Radioaktivität in der Baumasse können durch den Radiumgehalt (Ra-226) auch baustoffbedingte Radonprobleme verursachen, eine Wahrscheinlichkeit für eine stark auffällige Radon-Exhalation aus der Bausubstanz ist jedoch eher gering. Umgekehrt ist keine Aussage möglich, da Gammastrahlen-unauffällige Häuser unerwartet erhöhte Radonkonzentrationen aufweisen können, da der Eintrag (meist konvektiv) häufig über das Erdreich erfolgt. Radioaktiv stark auffällige Einrichtungen und Gegenstände wie beispielsweise Fliesen, Glasuren, Antiquitäten... können ebenso erheblich zur Radonanreicherung in Räumen beitragen.

7 GEOLOGISCHE STÖRUNGEN (Erdmagnetfeld, Erdstrahlung)

Messung von **Magnetfeld** und **Strahlung** der Erde und ihrer auffälligen **Störungen**

- Auffällige Abweichungen im **Erdmagnetfeld** (Nanotesla, nT)

Mit 3D-Magnetometer: Messbereich bis ± 100.000 nT, Nachweisempfindlichkeit 10 nT (besser weniger), Fehler $< \pm 10$ %.

Beachten: Die Messungen sollten zur Übersicht rasterförmig angelegt sein, z.B. alle 50 cm ein Messpunkt. Magnetische Baustoffe oder Materialien (auch nur leicht auffällige) können die Messung und das Ergebnis - besonders im Haus - verwirren bis unmöglich machen. So ist in einem konventionell gebauten und eingerichteten Gebäude eine geologische Magnetometermessung wegen der zahlreichen technischen Störungen meist nicht möglich.

- Auffällige Abweichungen der radioaktiven **Erdstrahlung** (Impulse pro Sekunde, ips bzw. Prozent, %)

Mit Szintillationszähler: Messempfindlichkeit mindestens 20 ips (besser 200 ips oder mehr), Fehlertoleranz ± 10 % (besser weniger). Bewährt hat sich Natrium-Jodid- und Lithium-Jodid-Kristall als Sensor, Mindestgröße 2" (besser 3"), Kristalle am besten mit Thalliumzusatz, eventuell gegen nicht-terrestrische Umgebungsstrahlung mit isotopenfreiem Blei geschirmt, eventuell mit Neutronen-bremsenden Moderatoren versehen.

Beachten: Auch diese Messungen sollten zur Übersicht rasterförmig angelegt sein, z.B. an empfindlichen Plätzen (Schlafbereiche) alle 50 cm ein Messpunkt; pro Punkt bedarf es einer Impulsausbeute von mindestens 1000, besser 5000. Radioaktive Baustoffe, Einrichtungen oder Materialien (auch nur leicht auffällige) können die Messung und das Ergebnis - besonders im Haus - stark beeinflussen bis unmöglich machen.

Erdstrahlung ist überall. Es gibt allorten ein Erdmagnetfeld und radioaktive Strahlung aus dem Bodengrund. Die Kompassnadel zeugt von der magnetischen Kraft der Erde und der Geigerzähler von der Gammastrahlung. Viele andere Kräfte gehen von der Erde aus.

So genannte geologische Störungen sind Zonen veränderter Erdaktivitäten. Hier sind im Vergleich zum Durchschnitt auffällige Anomalien messbar: Die Flussdichte des Erdmagnetfeldes nimmt lokal begrenzt zu oder ab und die radioaktive Erdstrahlung ist verändert. Andere physikalische Einflüsse zeigen sich hier ebenfalls auffälliger, penetranter oder reduzierter als in der ungestörten Umgebung. Geologische Störungen sind die Folge von z.B. unterirdisch fließendem Wasser - so genannten Wasseradern und Quelläufungen - oder anderen terrestrischen Auffälligkeiten wie z.B. Verwerfungen, Spalten, Klüften oder Brüchen.

Man geht beim Magnetometer- und Szintillationszählereinsatz nach bisheriger Erfahrung davon aus, dass bei unterirdischem Wasser eher eine Messwertabsenkung zu erwarten ist und bei geologischen Verwerfungen, Spalten und Brüchen eher eine Messwerterhöhung.

Zur Differenzierung geologisch oder technisch bedingter Magnetfelder sollte räumlich verändern, die Magnetometermessung sollte auf verschiedenen Höhen durchgeführt werden. Gibt es nah am Boden Messwertanomalien, aber weiter weg nicht mehr, dann geht es nicht um geologische, sondern um technische oder bauliche Einflüsse. Technische oder bauliche Felder reduzieren sich schnell mit Abstand zur Quelle, geologisch bedingte Feldauffälligkeiten bleiben über große Höhenunterschiede konstant. Ein Maschendrahtzaun oder ein parkendes Auto in 10 m Entfernung und mehr kann bei Grundstücksuntersuchungen schon zu ähnlichen Magnetfeldauffälligkeiten führen wie geologische Störungen. Deshalb: Für mehr Sicherheit die Messungen in mindestens zwei Ebenen durchführen: z.B. über dem Boden und die gleiche Strecke in 2 m Höhe noch mal. Erst wenn über vermuteten geologischen Störungen auf beiden (oder noch mehr) Ebenen die gleichen Werte zu messen sind, kann man sicher(er) sein.

Vergleichbar mit Szintillationszählermessungen umgehen: drinnen Abstände zum Boden, zur Baumasse und zu verdächtigen Einrichtungen verändern, draußen Abstand zu z.B. verdächtigen Gebäuden, Straßenbelägen oder kürzlich gedüngten Wiesen halten.

Die zurzeit handelsüblichen 3D-Magnetometer, die Betragsberechnungen im Relativmessmodus ohne Einbeziehung der Vektorrichtung durchführen, sind für die Messung geologischer Störungen gut geeignet.

Bei Radioaktivitätsmessungen über geologisch gestörtem Grund scheint neben der Gamma- auch Neutronenstrahlung beteiligt zu sein, die der NaJ- bzw. LiJ-Kristall des Szintillationszählers ebenfalls indiziert.

Voraussetzend wichtig ist das Auffinden von einem ungestörten, gleichmäßigen Magnetfeld- und Gammastrahlenhintergrund zum Vergleich.

8 SCHALLWELLEN (Luft- und Körperschall)

Messung von **Lärm**, **Hör-**, **Infra-** und **Ultraschall**, **Schwingung** und **Vibration**

- **Luftschall** (Hörschall, Infraschall, Ultraschall)

Messung der unbewerteten und/oder bewerteten Schalldruckpegel zur Beurteilung der Schall- bzw. Lärmbelastung, deren äquivalenter Dauerschallpegel und zeitlicher Verläufe.

Entweder mit preiswerteren Schalldruckpegelmessgeräten der Güteklasse 2 gemäß IEC 61672 mit etwa diesen Spezifikationen: Frequenzbereich 31-8000 Hz, Messbereich 30-130 dB in mehreren Unterteilungen, Zeitbewertung fast und slow, Hörbewertung A und C, Messwertspeicher mindestens 30.000 Messwerte, Stand-alone-Betrieb sinnvoll, Export-Möglichkeit für Messdaten an PC.

Oder mit teureren Geräten der Güteklasse 1 gemäß IEC 61672: Frequenzbereich 5-20.000 Hz (also auch bis in den Infraschallbereich hinunter), Messbereich 20-140 dB in mehreren Unterteilungen, Zeitbewertung fast, slow und Peak (C), eventuell Impuls, Hörbewertung A, C und linear, Messwertspeicher typisch 1-2 GB, Verbindung zum PC.

Für Ultraschall steht aktuell kein Messgerät zu vertretbaren Kosten zur Verfügung. Es bieten sich Indikatorlösungen an, das sind Geräte, die hochfrequente Töne - z.B. von Fledermäusen oder Insekten - hörbar machen können (Fledermausdetektor bzw. Bat Receiver). Verschiedene Techniken transformieren den Ultraschall in den menschlichen Hörbereich, so wird der Ultraschall akustisch einschätzbar. Der Frequenzbereich reicht typischerweise von 16-100 kHz, manchmal bis 200 kHz. Lautstärke, Frequenz und Bandbreite sind einstellbar, Ausgänge für Kopfhörer, Tonband, Datenlogger oder Spektrumanalyse sind integriert.

Beachten: Bei nur zeitweise auftretenden oder stark schwankenden Hörschallereignissen Langzeitaufzeichnungen durchführen, hiermit können Pegelhäufigkeitsverteilungen und Perzentilbetrachtungen ermittelt werden. Messungen an Schlafplätzen sollten in der Nachtphase wenigstens über 8 Stunden von etwa 23 bis 7 Uhr erfolgen.

- **Körperschall, Vibration** (mechanische Schwingungen)

Messung der Schwingung bzw. Bewegung von Bauteilen wie Wänden, Böden, Decken, Heizkörpern, Rohrleitungen, Türen, Fensterscheiben (Vorsicht: Eigenresonanzen)...

Mit entsprechenden Schwingungsmessgeräten und Sensoren (Schwing- und Beschleunigungsaufnehmer, Accelerometer, Laser Vibrometer...). Aus den Messwerten (typischerweise Pegelwerte) werden Beschleunigungswerte in m/s^2 berechnet.

An Fußböden muss eventuell - je nach Bodenbelag - der schallharte Kontakt zum Estrich hergestellt werden, z.B. per Aufnahmeplateau mit Spikes und Nivelliermöglichkeit. Frequenzbereich 5 Hz (besser weniger) bis 10 kHz (und höher), Hoch- und Tiefpassfilter wünschenswert, Nachweisempfindlichkeit unter $0,1 m/s^2$.

Beachten: Bei nur zeitweise auftretenden Vibrationsereignissen sind - wie beim Luftschall - Langzeitaufzeichnungen durch-

- **Frequenzanalyse**

Selektive Untersuchung der Frequenzen von Luft- oder Körperschallereignissen mittels Frequenzanalysen zumindest im Hörschallbereich von 20-20.000 Hz, besser noch bis in niedrige Frequenzbereiche unter 20 Hz bis 5 Hz und weniger hinein (Infraschall, Vibration) oder auch in höhere Bereiche über 20 kHz (Ultraschall), entweder in Form von Terzpegeln (Real Time Analyser) oder hochauflösend in Form von FFT (Fast Fourier Transformation, eine schmalbandige Frequenzanalyse). Als FFT-Zeitfenster sollte mindestens das Hanning-Fenster zur Verfügung stehen.

Wie beim Elektromog geht es auch beim Schall um Wellen und Frequenzen, die in Hertz (also in Ereignissen pro Sekunde) angegeben werden. Diesmal sind es nicht elektromagnetische Schwingungen (also Energieteilchen oder -wellen), sondern Bewegungen von Materieteilchen in der Luft, in Flüssigkeiten oder festen Gegenständen wie z.B. Bauteilen. Die Teilchen üben dabei einen - im wahrsten Sinne des Wortes - Druck aus, führen zu minimalen Dichteänderungen. Jede Art von Druckänderung in Luft, Wasser oder einem anderen Medium ist Schall im weitesten Sinne, Hörschall, wenn das menschliche Ohr ihn hören kann, Infra- und Ultraschall unterhalb oder oberhalb der akustischen Wahrnehmungsfähigkeit.

Die Ausbreitung von Schallwellen ist langsamer als die von elektromagnetischen Wellen: In Luft sind es 343 Meter pro Sekunde (m/s), das sind 1235 Kilometer pro Stunde (km/h), schneller als ein Jumbojet, aber nur ein Millionstel der Geschwindigkeit von Licht oder Funk.

Ein gesunder, jüngerer Mensch hört im Idealfall Frequenzen von rund 20 Hz bis 20 kHz, besonders gut die mittleren zwischen 1 und 5 kHz. Infraschall und Ultraschall nennt man tiefer- und höherfrequente Schallereignisse unter 20 Hz und über 20 kHz, die nicht mehr direkt mit dem Ohr gehört, aber dennoch von vielen Menschen wahrgenommen werden können - oft unangenehm, belästigend oder gar krankmachend. Lärm bezeichnet unerwünschten, störenden oder gesundheitsschädlichen Schall. Bei Vibrationen geht es um spürbare, zumeist störende bis belastende mechanische Schwingungen, die Hand in Hand mit Luft- bzw. Hörschall, speziell auch dem Infraschall gehen können.

Schalldruckpegelmessungen und Frequenzanalysen werden üblicherweise in Raummitte durchgeführt, also möglichst weit entfernt von Wänden, Böden und Decken, denn in der Nähe solcher Grenzflächen ist mit Pegelerhöhung und Pegelvarianz zu rechnen. Wichtig für die baubiologische Praxis ist die Ermittlung der Belastungen dort, wo der Mensch sich häufig und dauerhaft aufhält (Schlafplatz, Arbeitsplatz).

9 LICHT (künstliche Beleuchtung - sichtbares Licht, UV- und Infrarot-Strahlung)

Messung von Lichtspektrum, Spektralverteilung, Lichtflimmern, Beleuchtungsstärke, Farbwiedergabe, Farbtemperatur, elektromagnetischen Feldern, Ultraschall

Wie beim Elektromog und beim Schall geht es auch beim Licht um Wellen und Frequenzen. Die Ausbreitung von Lichtwellen ist mit 300.000 Kilometern pro Sekunde unvorstellbar schnell. Das Frequenzspektrum des Lichts schließt sich direkt oberhalb der elektromagnetischen Funkfrequenzen an. Funk wird bis etwa 300 GHz genutzt (den klassischen Mikrowellen). Das unsichtbare Infrarot-"Licht" (die Wärmestrahlung) beginnt ab 300 GHz, das entspricht der Wellenlänge von 1 mm, und geht bis 780 nm. Das sichtbare Licht umfasst den Wellenlängenbereich von 780-380 nm und hiermit die Farben von rot über orange, gelb und grün bis blau und violett. Das wieder unsichtbare Ultraviolett-"Licht" (die UV-Strahlung) schließt sich mit 380-10 nm an. Trennt man weißes Licht durch ein Prisma auf, so erscheinen die Wellenlängen als Farben des Regenbogens.

Ergänzung zu den baubiologischen Richtwerten - Vorschläge, Orientierungs- und Bewertungshilfen:

Licht, Beleuchtung		unauffällig
Beleuchtungsstärke in Lux	lx	tags ~ 100 - 100.000, abends ~ 10 - 100, nachts < 1
Farbtemperatur in Kelvin	K	tags ~ 4000 - 6000, abends ~ 1500 - 3000
Ultraschall in Dezibel	dB	kein
Elektrische Wechselfelder in Volt pro Meter	V/m	bis 2 kHz < 10 ab 2 kHz < 1
Magnetische Wechselfelder in Nanotesla	nT	bis 2 kHz < 50 ab 2 kHz < 5

Keine Lichtmodulation zur Datenübertragung (präventiver Ansatz aufgrund unzureichender Datenlage). Keine Schadstoffe oder Gerüche. Keine toxischen Inhalte wie z.B. Quecksilber. Herstellung und Entsorgung ökologisch.

Messungen der elektrischen und magnetischen Wechselfelder in Anlehnung an TCO (30 cm Abstand).

Angaben besonders für die Abendstunden vor dem Zubettgehen, um die folgende Schlafphase nicht zu beeinträchtigen.

Die baubiologischen Empfehlungen für Licht orientieren sich an erster Stelle am technisch Machbaren, sie basieren zurzeit weniger - wie die anderen verbindlichen Richtwerte - auf Erfahrung, die bisher noch rar ist. Erste Fallbeispiele und einige wissenschaftliche Forschungsergebnisse zeugen von biologischen Effekten und Risiken.

- **Lichtspektrum und Spektralverteilung (Nanometer, nm)**

Messung des gesamten Lichtspektrums, an erster Stelle sichtbares Licht mit Wellenlängen von etwa 380 bis 780 nm, möglichst auch Infrarot über 780 nm und Ultraviolett unter 380 nm mit Bewertung der Spektralverteilung.

Mit Lichtspektrometer. Für selektive Spektralbänder einschließlich Infrarot und UV auch mit Lichtmeter. Oder für den ersten groben visuellen Eindruck mit Lichtspektroskop.

Das Lichtspektrum sollte bei Leuchtmitteln so Tageslicht-ähnlich wie möglich sein: konstant, kontinuierlich, ausgewogen, nicht unterbrochen und möglichst fließend von UV über alle sichtbaren Farbanteile bis Infrarot ohne überdurchschnittlich herausragenden Blauanteil, eher ausgeprägteren Rotanteil. Diesen Anspruch erfüllen Glüh- und Halogenlampen und manche LEDs. Unerwünscht sind einzelne, schmale, steile Farbspitzen wie beispielsweise bei Energiesparlampen.

Beispiele: Glühlampen und Halogenlicht ausgewogen, fließend über alle Farbbereiche, keine Farbspitzen, Sonnenlicht-ähnlich bis zum Infrarot. Energiesparlampen nur einzelne - aus dem Gesamtspektrum heraus gerissene - schmale und steile Farbspitzen, Natur-fremd; LEDs sowohl als auch, die einen mehr oder minder ähnlich wie Glühlampen, die anderen chaotischer, wenn auch weitgehend fließende Farbverläufe, oft zu hoher Blau-Anteil, immer Fehlen des wichtigen Rot bzw. Infrarot.

- **Lichtflimmern (Hertz, Hz - Prozent, %)**

Messungen des nieder- (bis 2 kHz) und höherfrequenten (ab 2 kHz) maximalen, realen Flimmeranteils am Gesamtlicht in Anlehnung an "Welligkeit nach CIE 1957" (Internationale Beleuchtungskommission, Commission Internationale de l'Eclairage) oder der meist üblichen Modulationstiefe (Flicker Perzent).

Mit Flimmerfrequenz- bzw. Lichtflimmermessgerät, Lichtmeter... und schnellen Silizium-Photodioden (mindestens bis 400 kHz, besser 100 MHz und höher). Anzeige des Flimmeranteils von 0-100 % oder Darstellung mit Oszilloskop und/oder Spektrumanalysator. Zu messender Spektralbereich des sichtbaren Lichtes um 380-780 nm, eventuell auch Infrarot. Eventuell akustische Wiedergabe des Flimmers auch im Hörbereich, Wechselspannungsausgang zur weiteren Analyse.

Anzugeben sind die dominierenden niederen und höheren Frequenz(en). Zu beurteilen ist Anzahl und Art von Oberwellen (Spektrumanalyse) und die Art, Gleichmäßigkeit oder Verzerrung der Sinuskurven (Oszilloskop). Wenige Oberwellen und

vergleichsweise saubere, unverzerrte Sinuskurven sind besser zu bewerten als zahlreiche Oberwellen und auffällige, verzerrte Signalformen. Unterscheidung zwischen harmonischen Lichtschwankungen (netzbetriebenes Glüh- und Halogenlicht 100 Hz) und disharmonischem Lichtflimmern (Energiesparlampen, manche LEDs...).

Prinzipiell sollte Kunstlicht - als Vorbild dient wie immer Tageslicht - möglichst frei bzw. arm an nieder- und höherfrequentem Lichtflimmern (Lichtschwankungen, Lichtwelligkeit, Lichtmodulation, Lichtsignale) sowie Oberwellen ("Dirty Light") soweit technisch machbar sein.

Kunstlicht sollte nicht periodisch gepulst sein, wie es beispielsweise bei der elektronischen Helligkeitssteuerung durch Pulsweitenmodulation bei LEDs oder Bildschirmen vorkommen kann.

Licht, das ins Auge gelangen kann, sollte nicht nieder- oder hochfrequent moduliert und auf solche Weise zur Datenübertragung missbraucht werden (beispielsweise Visible Light Communication VLC).

Optimal: Versorgung mit Gleichstrom.

Beispiele Lichtflimmern in Prozent vom Gesamtlicht: Glühlampen und Halogenlicht am Netzstrom (nicht elektronisch vorgeschaltet) 5-20 % (harmonische Lichtschwankungen, kaum verzerrte Sinuskurven, wenige Oberwellen); Energiesparlampen 20-70 % (stark disharmonisch, stark verzerrte Sinuskurven, Oberwellen-reich, "Dirty Light"); LEDs 2-100 % (oft - nicht immer - mehr oder minder disharmonisch, verzerrte Sinuskurven, Oberwellen-reich). Messungen der Baubiologie Maes an handelsüblichen Leuchtmitteln in E27-Fassung für Öko-Test und andere Verbrauchermagazine.

- **Beleuchtungsstärke (Lux, lx)**

Messung der Beleuchtungsstärke auf einer beleuchteten Fläche.

Mit Luxmeter, Lichtmeter... Messbereich mindestens 1-100.000 lx, Auflösung 1 lx, Genauigkeit $\pm 5\%$.

Auch die Lichthelligkeit hat wesentlich mit dem Wach-/Schlafrythmus zu tun. Melatonin und Serotonin sind die hauptverantwortlichen Hormone, die hiervon gesteuert werden. Je heller umso weniger Melatonin, je dunkler umso mehr. Der Melatoninausstoß nimmt unterhalb von etwa 500 lx zu.

Beispiele: Sonniger Sommertag 100.000 lx, bewölkter Sommertag 30.000 lx, sonniger Wintertag 20.000 lx, bewölkter Wintertag 10.000 lx, trüber Wintertag 5000 lx, heller Arbeitsplatz 1000 lx, Zimmer-, Bürolicht 100-500 lx, Straßenbeleuchtung 10-50 lx, Kerze (1 Meter) 1 lx, Vollmondnacht 0,2-1 lx.

- **Farbwiedergabe (Ra-Wert)**

Messung des Farbwiedergabe-Index (Ra-Wert bzw. CRI, Color Rendering Index) eines Leuchtmittels.

Mit Spektrometer. Messung von mindestens 8 Testfarben nach DIN 6169 (Standardmessung, übliche Angaben auf den Verpackungen oder technischen Angaben der Leuchtmittel), besser alle 14 Testfarben nach DIN 6169.

Der Farbwiedergabewert soll so hoch und somit Tageslicht-ähnlich wie möglich sein, in jedem Fall über 90.

Achtung: Würden statt des üblichen R_a -Wertes, der sich auf nur 8 Testfarben bezieht, alle 14 Testfarben nach DIN beachtet, fielen in den meisten Fällen die Ergebnisse schlechter aus: bei Energiesparlampen und LEDs um die 10 %, bei Glühlampen und Halogenlicht kaum bis gar nicht. Die Farbwiedergabe gemessen nach R_{1-14} ist aussagestärker, speziell was die wichtigen Rot-Töne anbetrifft, die bei R_a nahezu völlig fehlen.

Beispiele: Sonnenlicht hat einen R_a -Wert von 100, Tageslicht 95-100, Kerzenlicht 98, Glühlampe 98-99, Halogenlicht 95-98, LED 40-95, Energiesparlampe / Leuchtstoffröhre 40-85, Quecksilberdampf Lampe 40-60, Natriumdampf Lampe 20-40.

- **Farbtemperatur, Lichttemperatur (Kelvin, K)**

Messung der Farb- bzw. Lichttemperatur eines Leuchtmittels.

Mit Spektrometer, Farbtemperaturmesser, Lichtmeter, Colormaster...

Die Farbtemperatur beim Kunstlicht sollte dem Tageslicht möglichst ähnlich sein: tagsüber eher "kühler", abends "wärmer".

Je höher die Farbtemperatur umso stärker der Blauanteil im Licht, je niedriger umso stärker der Rotanteil. Der Blau- und Rotanteil ist wesentlich für die Steuerung des Wach-/Schlafrythmus zuständig. Melatonin ist das hauptverantwortliche Hormon, das hiervon gesteuert wird. Je mehr blau umso geringer die Freisetzung des "Schlafhormons", je mehr rot umso so stärker. Mittagslicht hat einen hohen Blauanteil, die Abendsonne viel Rotanteil.

Beispiele: Kerze, Feuer 1500 K, Glühlampe, Halogen 2600-3200 K, warmweiß < 3300 K, neutralweiß 3300-5000 K, kaltweiß > 5000 K, Sonne 3000-5800 K, bedeckter Himmel 6500-7500 K, LED-Autoscheinwerfer ~ 8000 K, tiefblauer Mittagshimmel 9000 K, "Blaue Stunde" 10.000-12.000 K.

- **Elektrosmog - nieder- und höherfrequente elektrische und magnetische Felder**

Elektrische Feldstärke (Volt pro Meter, V/m) - siehe unter A1

Effektivwert-Messung gegen Erdpotenzial in Anlehnung an Computernorm TCO, aufgeteilt in niederfrequente (bis 2 kHz) und höherfrequente (ab 2 kHz) elektrische Felder.

Mit Feldmessgerät bzw. Feldsonde (TCO- bzw. Tellersonde, Kleinsonde), Feldmeter, NF-Analyser...

Magnetische Flussdichte (Nanotesla, nT) - siehe unter A2

Effektivwert-3D-Messung der Summe aller Feldlinienrichtungen in Anlehnung an Computernorm TCO, aufgeteilt in niederfrequente (bis 2 kHz) und höherfrequente (ab 2 kHz) magnetische Felder.

Mit Feldmessgerät bzw. Feldsonde (Induktionsspule 3D isotrop/orthogonal oder 1D), Feldmeter, NF-Analyser...

Dominierende Frequenz(en) (Hertz, Hz) und auffällige Oberwellen

Mit NF-Spektrumanalyser, Oszilloskop, Frequenzzähler, Voltmeter, Feldmeter...: Frequenzbereich 10 Hz - 100 kHz (besser 400 kHz und höher).

Hochfrequente Felder sind bei den Leuchtmitteln nicht zu erwarten, falls doch, sollten auch diese mit HF-Breitbandmessgeräten und/oder Spektrumanalysatoren oberhalb der TCO-Frequenzvorgaben zusätzlich gemessen werden.

Prinzipiell sollte der Elektrosmog an Leuchtmitteln möglichst frei bzw. arm an nieder- und höherfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern sowie Oberwellen ("Dirty Power") soweit technisch machbar sein.

Optimal: Versorgung mit Gleichstrom.

Beispiele elektrische Wechselfelder bis 2 kHz / ab 2 kHz (30 cm) in V/m: Glühlampen < 10 / 0, Energiesparlampen bis 68 / bis 71, LEDs bis 125 / bis 7.

Beispiele magnetische Wechselfelder bis 2 kHz / ab 2 kHz (30 cm) in nT: Glühlampen < 5 / 0, Energiesparlampen bis 80 / bis 80, LEDs bis 20 / bis 4.

Messungen der Baubiologie Maes an handelsüblichen Leuchtmitteln in E27-Fassung für Öko-Test und andere Verbrauchermagazine.

- **Ultraschall (Dezibel, dB)**

Messung des von Leuchtmitteln emittierten Ultraschalls.

Mit Schallpegelmessgerät, Lichtmeter, eventuell auch mit Fledermausdetektor...

Einige Energiesparlampen und elektronische Geräte emittieren hohe, kaum direkt hörbare Schallfrequenzen - Ultraschall.

B WOHNIGFTE, SCHADSTOFFE, RAUMKLIMA

Für zuverlässige Untersuchungen und Bewertungen chemischer und raumklimatischer Innenraumbelastungen sind in der Regel kombinierte und gezielt aufeinander aufbauende Untersuchungsmethoden einzusetzen. Neben der Analyse der akuten Innenraumbelastung durch Schadstoffe über Luft-, Staub-, Oberflächen- oder Materialkonzentrationen steht die Erkennung von Innenraumquellen im Vordergrund.

Begehung und Befragung

Anamnese von Gebäude und Nutzer, visuelle Inspektion, allgemeine und olfaktorische Eindrücke (Gerüche); eventuell Zuhilfenahme von Sicherheitsdatenblättern, technischen Merkblättern, Bauakten, Fotodokumentation...

Inspektion der zu untersuchenden Innenräume inklusive Befragungen der Bewohner hinsichtlich der Hausgeschichte, der verwendeten Baumaterialien, Einrichtungen, Möbeln, Böden, Klebern, Farben, Lacken oder sonstigen Bau- und Renovierungsmaterialien, aktueller oder ehemaliger Geruchsauffälligkeiten, Verdachtsmomente oder Krankheitssymptome. Die gründliche visuelle Inspektion umfasst möglichst auch Informationen in Bezug auf Boden-, Wand- und Deckenaufbau, Nutzung von Nebenräumen und -wohnungen, Nutzungs- und Lüftungsgewohnheiten, typische baujahr- und konstruktionsbedingte Schwachpunkte, z.B. PAK- und PCB-haltiger Teerkleber unter dem Parkett in älteren Häusern, Formaldehyd und Holzschutzmittel z.B. in einem Fertighaus aus den 70er Jahren oder in verdächtigen Holz-verkleideten und entsprechend behandelten Innenräumen.

Direkt anzeigende Messungen, Vortestverfahren und orientierende Messungen

Orientierende und vergleichende Messungen mit direkt anzeigenden Prüfröhrchen, Plaketten und Messgeräten.

Eine erste und schnelle Einschätzung der Luftsituation vor Ort lässt sich über einfache Vortestverfahren realisieren (z.B. Bio-Check-F für Formaldehyd oder direktanzeigende Prüfröhrchen, das sind recht empfindliche und wenig störepfindliche Einschätzungen einer Belastungssituation). Es gibt auch direkt anzeigende Messgeräte für Formaldehyd, speziell die moderneren Geräte sind ausreichend empfindlich und können selektiv zur ersten Einschätzung und speziell zur Quellensuche eingesetzt werden.

Für Lösemittel und andere leicht- bis mittelflüchtige Schadstoffe geeignete Geräte arbeiten auf dem Prinzip der Photoionisationsdetektion (PID). Mit empfindlichen Geräten können oft geringe Lösemittel-Summenkonzentrationen angezeigt und die oft wichtige Quellenzuordnung durchgeführt werden.

Untersuchungen dieser Art sind ergänzend hilfreich zu Vortests oder zu aufwändigeren Probenahmen mit Fachlaboranalysen, sie können schnell in verschiedenen Räumen, an verdächtigen Bauteilen oder Möbeln vorgenommen werden. In Ritzen, Spalten, Hohlräumen und auf Oberflächen sind vergleichende Messungen sofort vor Ort einfach möglich. Weiterhin können verdächtige Materialien z.B. direkt auf den verdächtigen Oberflächen (Teppich, Bodenaufbau...), unter einer Abschottung oder in einem Prüfgefäß untersucht werden.

Bei Pestiziden und anderen schwerflüchtigen Schadstoffen gibt es keine zuverlässigen Schnelltests.

Ergeben erste Messungen einen Schadstoffgehalt nahe oder oberhalb eines genaueren zu prüfenden Richtwertes (SBM, UBA, WHO, AGÖF), ist die Einhaltung des Richtwertes bzw. das Maß der Überschreitung durch eine geeignete Probenahme mit Fachlaboranalyse (Bewertungsmessungen, siehe unten) zu bestimmen.

Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Bewertungsmessungen (z.B. SBM-Richtwerte für Schlafbereiche) mit Vor-Ort-Probenahmen und Laborauswertung.

Diese genaueren und differenzierteren Untersuchungen liefern keine direkten Ergebnisse vor Ort, sondern erfordern nach den Probenahmen Laboranalysen und sind entsprechend teurer. Es können Luft-, Staub-, Oberflächen- und Materialproben untersucht werden. Einzelheiten werden bei den jeweiligen Standardpunkten formuliert. Proben werden entnommen und in ein Fachlabor weitergeleitet, welches sich speziell auf die Analytik von Innenraumschadstoffen spezialisiert hat. Sammelmedium, Probenahmebedingungen und -mengen sowie Prüfparameter sollten mit dem Labor abgestimmt werden. Besonders bei den Luftmessungen sind die nachfolgenden Randbedingungen bei der Gewinnung der Proben zu berücksichtigen.

Randbedingungen bei Raumluftuntersuchungen und Probenahmen

Bei Raumluftmessungen und Fachlaborprobenahmen wird für Bewertungsmessungen (Vergleich mit Richtlinien, Zielwerten, Orientierungswerten oder baubiologischen Richtwerten für Schlafbereiche) in der Regel 8 Stunden zuvor nicht gelüftet. Es sollten 24 Stunden vor der Untersuchung keine Chemikalien, Reinigungsmittel, Kosmetika, Sprays, Parfüms oder andere störende und ausdünstende Anwendungen in den zu prüfenden und umliegenden Räumen zum Einsatz kommen. Die Proben werden bei normalen und möglichst stabilen Innenraumtemperaturen (18-24 °C, während der Untersuchung/Proben und 24 Stunden vorher) durchgeführt. Raumlufttechnische Anlagen (Filter...) sollten ebenfalls 8 Stunden zuvor ausgeschaltet werden. In den Räumen halten sich vor und während der Probenahmen möglichst wenige oder gar keine Personen auf.

Bei orientierenden und vergleichenden Messungen können die Randbedingungen frei gewählt und müssen bei der Interpretation (Quellensuche, Worst-Case, Notwendigkeit weiterer Untersuchungen) ausreichend berücksichtigt und bei der Protokollierung angegeben werden.

1 FORMALDEHYD und andere gasförmige Schadstoffe

Messung **gasförmiger Schadstoffe** wie Formaldehyd, Ozon und Chlor, Stadt- und Industriegase, Erdgas, Kohlenmonoxid und Stickstoffdioxid sowie weitere Verbrennungsgase

Messung der Konzentrationen in der Raumluft oder Prüfkammer (Mikrogramm pro Kubikmeter, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. parts per million, ppm) oder im Material (mg/kg) mit Vortests, direkt anzeigenden Messgeräten und Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Vortests: Messungen von Formaldehyd mit Bio-Check-F oder direkt anzeigenden Prüfröhrchen. Der Grad der Verfärbung zeigt das Ausmaß der Formaldehydbelastung grob an. Diese Testverfahren liefern zumeist solide erste Eindrücke bei einer Nachweisempfindlichkeit von etwa 0,04 ppm ($\sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Genauigkeit und Aussagekraft dieser Verfahren darf nicht überschätzt werden, es sind einfache, schnelle und vergleichende Vortests, um Weichen zu stellen, z.B. für die Notwendigkeit oder die räumliche Zuordnung von genaueren Laboranalysen oder zur Quelleneingrenzung.

Direkt anzeigende Messgeräte: Messungen von Formaldehyd mit direkt anzeigenden Messgeräten wie Formaldemeter oder PID. Nachweisempfindlichkeit um 0,1 ppm, möglichst niedriger. Die digitale Anzeige zeigt das Ausmaß der Formaldehydbelastung an. Es geht um schnelle und vergleichende Vortests, um Weichen zu stellen, z.B. für die Notwendigkeit oder die räumliche Zuordnung von genaueren Laboranalysen oder zur Quelleneingrenzung. Für kritische und genaue Raumluftmessungen sind diese Geräte oft nicht sensibel genug, eher für orientierende Aussagen.

Luftprobenahme mit Fachlaboranalyse: Probenahmen zur Untersuchung auf Formaldehyd und andere Aldehyde oder gasförmige Schadstoffe mit Pumpe und Prüfröhrchen. Luft wird hierbei durch Silikagelröhrchen, DNPH-Kartuschen... gezogen, in welchen z.B. Formaldehyd festgehalten wird. Die folgende Laboranalyse erreicht eine Nachweisempfindlichkeit von rund $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Silikagel) oder sogar $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DNPH) und ist auch für höhere Aldehyde (siehe B2) anwendbar. Als Resultat erhält man eine volumenbezogene Konzentrationsangabe in Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Bewertungsmessungen nach SBM beziehen sich auf korrigierte Werte (berechnet für 23 °C und 45 % rel. Luftfeuchte analog VDI-Richtlinie 4300).

Durchflussrate 0,5-1,5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 30 Liter bei DNPH (siehe auch VDI 3484, Blatt 3), um 90 Liter bei Silikagel.

Materialprobenahme mit Fachlaboranalyse: Ein verdächtiges Material, z.B. ein Stück Spanplatte, Holz oder Stoff, wird vor Ort entnommen und zur Untersuchung auf Formaldehyd in ein Fachlabor geschickt. Bei Prüfkammerversuchen sollten die Verhältnisse möglichst an realistische Wohnraumsituationen angepasst werden und die Luftwechselrate auf 0,5/h oder niedriger eingestellt werden; als Resultat erhält man eine Prüfkammerluftkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder die massebezogene Material-Konzentrationsangabe in Milligramm pro Kilogramm (mg/kg).

2 LÖSEMITTEL und andere leicht- bis mittelflüchtige Schadstoffe

Messung **flüchtiger Schadstoffe** ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm) wie Aldehyde, Aliphaten, Alkohole, Aromaten, Ester, Glykole, Ketone, Kresole, Phenole, Siloxane, Terpene und andere organische Verbindungen (VOC)

Messung der Konzentrationen in der Raumluft oder Prüfkammer (Mikrogramm pro Kubikmeter, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. parts per million, ppm) oder im Material (Milligramm pro Kilogramm, mg/kg) mit Vortests, direkt anzeigenden Messgeräten und Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Vortests: Einsatz von ausreichend empfindlichen, direkt anzeigenden Prüfröhrchen für Einzelsubstanzen oder Stoffgemische mit geeigneter Probenahmepumpe (Handpumpe, Automatikpumpe). Je nach Aufgabe und eingesetztem Teströhrchen wird eine definierte Menge Luft gezogen (Pumpenhubhöhe nach Angabe des Herstellers). Bei Vorliegen von entsprechenden Schadstoffen verfärbt sich das Röhrchen.

Direkt anzeigende Messgeräte: Vor-Ort-Messungen mit direkt anzeigenden, empfindlichen Photoionisationsdetektoren (PID). Eine direkte Umrechnung in die Bezugsgröße $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ist aufgrund der meist vorliegenden Stoffgemische in der Regel nicht möglich, da der Detektor unterschiedlich empfindlich auf Einzelsubstanzen reagiert und diese nicht identifizieren kann. Als Resultat erhält man eine volumenbezogene Konzentrationsangabe bezogen auf TVOC (Summe VOC) in parts per million (ppm) oder parts per billion (ppb). Die Nachweisempfindlichkeit sollte zirka bei 100 ppb bzw. 0,1 ppm in Bezug auf das gängige Prüfgas Isobutylen liegen - besser noch niedriger.

Luftprobenahme mit Fachlaboranalyse: Proben zur quantitativen und qualitativen Untersuchung auf Lösemittel und andere leicht- bis mittelflüchtige Schadstoffe mit Pumpe und Substratröhrchen. Luft wird hierbei durch Tenax-Röhrchen gezogen, in welchem ein möglichst breites Spektrum an polaren und unpolaren VOC festgehalten wird (siehe auch DIN EN ISO 16000-6). Für Einzelstoffanalysen oder orientierende Bewertungen können - je nach Substanz und Substanzklasse - auch Aktivkohle-, Anasorb- oder Silikagel- Röhrchen verwendet werden. Als Resultat erhält man eine volumenbezogene, genaue Konzentrationsangabe der Einzelstoffe und der Gesamtsumme (TVOC) in Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Laboranalyse der vor Ort gewonnenen Proben sollte eine Nachweisempfindlichkeit von rund 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ je Einzelstoff erreichen. Tenax ist besonders empfindlich und kann z.B. bei der Untersuchung von Geruchsproblemen und Bestimmung der TVOC-Konzentration hilfreich sein. Für geruchsintensive Aldehyde und Ketone kann zudem DNPH verwendet werden.

Methode A - Tenax

Durchflussrate 0,1 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 1-4 Liter bei Tenax.

Methode B - Aktivkohle kombiniert mit Silikagel

Durchflussrate 0,5-1,5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 90 Liter bei Aktivkohle plus Silikagel.

Methode C - Anasorb-Aktivkohle

Durchflussrate 0,5-1,5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 90-150 Liter bei Anasorb.

Ergänzung Aldehyde und Ketone (DNPH)

Durchflussrate 0,5-1,5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 50 Liter bei DNPH.

Für besondere Messaufgaben können auch passive Mini-Aktivkohleröhrchen (z.B. ORSA) eingesetzt werden, die beim Kunden ein bis zwei Wochen lang im verdächtigen Raum aufgehängt oder einige Tage in einem Prüfvolumen (Prüfkammer...) mit einem verdächtigen Material eingesetzt werden, um sie dann zur Analyse an das Labor zu schicken. Die Laboranalyse liefert die in der Raumluft gefundenen Lösemittel mit ähnlicher Empfindlichkeit aber etwas eingeschränkter Vielseitigkeit (unpolare VOC werden schlechter nachgewiesen) gegenüber den oben genannten aktiven Probenahmen. Je nach Fragestellung kann auch eine Langzeitmessung in Ergänzung zu den aktiven Probenahmen mit dieser Methode sinnvoll sein. Als Resultat erhält man eine qualitative Einzelstoffauswertung und eine ungefähre volumenbezogene Konzentrationsangabe in Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Materialprobenahme mit Fachlaboranalyse: Ein verdächtiges Material, z.B. ein Stück lackierte oder versiegelte Fläche, Holz oder Stoff, wird vor Ort entnommen und zur Untersuchung auf Lösemittel in ein Fachlabor geschickt. Bei Prüfkammerversuchen sollten die Verhältnisse möglichst an realistische Wohnraumsituationen angepasst werden und die Luftwechselrate auf 0,5/h oder niedriger eingestellt werden; als Resultat erhält man eine Prüfkammerluftkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder die massebezogene Material-Konzentrationsangabe in Milligramm pro Kilogramm (mg/kg).

3 PESTIZIDE und andere schwerflüchtige Schadstoffe

Messung **schwerflüchtiger Schadstoffe** wie Biozide, Insektizide, Fungizide, Holzschutzmittel, Teppichschutzmittel, Flammschutzmittel, Weichmacher, Pyrethroide, PCB, PAK, PFAS, Dioxine

Messung der Konzentrationen im Staub (Milligramm pro Kilogramm, mg/kg), im Material (Milligramm pro Kilogramm, mg/kg), auf Oberflächen (Mikrogramm pro Quadratmeter, $\mu\text{g}/\text{m}^2$), in der Prüfkammer oder in der Raumluft (Nanogramm pro Kubikmeter, ng/m^3) mit Vortestverfahren, direkt anzeigenden Messgeräten und Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Vortestverfahren: Für das Holzschutzmittel Pentachlorphenol bietet der Bio-Check-PCP einen ersten Vor-Ort-Test. Hier wird eine Testplakette für 24 Stunden - ähnlich wie ein Pflaster - auf eine verdächtige Holzoberfläche geklebt. Nach der Einsendung und Auswertung gibt das Fachlabor Auskunft über die Konzentration. Vorteil: zerstörungsfreie Probenahme. Nachteil: nur PCP-Nachweis, keine anderen Pestizide.

Staubprobenahme mit Fachlaboranalyse: Im Hausstaub reichern sich die meisten schwerflüchtigen Schadstoffe bevorzugt an, sind hier recht gut und oft sensibel nachweisbar und geben deutliche Hinweise auf vorhandene Innenraumquellen. Die Probenahme des zu untersuchenden Hausstaubes wird durch einfaches Saugen erreicht. Die zu untersuchenden Räume sollten um die 7 Tage vor der Probe gründlich gesaugt werden. Dann, nach 7 Tagen ohne weitere Reinigung, wird die Probe genommen. Hierzu wird mit dem üblicherweise im Haus eingesetzten Staubsauger oder alternativ einem speziell Probenahmesauger mit einem frischen Beutel oder einem speziellen Sammelkopf mit Filter Staub gesaugt. Bei Proben mit dem Staubsaugerbeutel sollte der Sauger vorher ein paar Minuten im Freien laufen gelassen werden. Je nach Situation nicht nur den Boden, sondern auch Stoffoberflächen, Polster, Kissen, Matratzen, Schmusetiere, Vorhänge, Gardinen, Wandteppiche, Bücher... und andere Staubfänger absaugen.

Schadstoffhaltige oder -verdächtige Oberflächen nicht direkt absaugen, denn wir wollen die Sekundärkontamination anhand der Staubprobe erfassen, die von Primärquellen - beispielsweise eine pestizidbehandelte Holzdecke - ausgeht. Nur auf diese Sekundärkontamination beziehen sich die baubiologischen Richtwerte. Ergebnisse von Primärkontaminationen als Folge des direkten Absaugens von schadstoffhaltigen Materialien und Flächen würden höher ausfallen, können aber im Rahmen einer gewünschten und gezielten Quellensuche und -zuordnung durchaus interessant sein.

Die Probe (Staubsaugerbeutel...) wird luftdicht in Aluminiumfolie eingepackt oder schadstoffneutrales Kunststoff eingeschweißt und an das Fachlabor geschickt. Als Resultat erhält man eine massebezogene Konzentrationsangabe in z.B. Milligramm pro Kilogramm (mg/kg) mit differenzierten Angaben der einzelnen Substanzen (Pestizide, Pyrethroide, Weichmacher, Flammschutzmittel, PCB, PAK...). Es ist darauf zu achten, dass im Labor eine breite Palette möglichst vieler Schadstoffe bestimmt wird.

Methode A - Staubsaugerbeutel

Probenahme vor Ort mit Staubsauger, möglichst Papierbeutel mit Zwischenlage, möglichst 1-2 Gramm Feinstaub, Fraktion < 200 μm , besser < 63 μm .

Methode B - Sammelkopf

Probenahme vor Ort mit ALK-Sammelkopf und Spezialfilter, möglichst 1-2 Gramm Feinstaub, Fraktion: < 200 μm , besser < 63 μm .

Materialprobenahme mit Fachlaboranalyse: Probe einer verdächtigen Materialoberfläche (Holz) oder eines Materialmusters (Leder, Teppich...) mit anschließender Untersuchung im Fachlabor. Benötigt wird ein Stück Holzoberfläche (insgesamt zirka 10-20 Quadratzentimeter, etwa 2-3

Gramm) und etwa ein bis maximal zwei Millimeter dick. Es ist günstig, mehrere Proben von verschiedenen Stellen einer verdächtigen Holzoberfläche zu nehmen, z.B. vom Anfang, vom Ende und der Mitte eines Balkens. Bei Stoff- oder Lederproben reicht ein briefmarkengroßes Stück. Bei Teppichen ist es sinnvoll, Flusen vorsichtig abzuzupfen, um das Material nicht zu zerstören. Die Proben werden dampfdicht in Aluminiumfolie eingepackt oder schadstoffneutrales Kunststoff eingeschweißt und an das Fachlabor geschickt. Als Resultat erhält man eine massebezogene Konzentrationsangabe in z.B. Milligramm pro Kilogramm (mg/kg) mit differenzierten Angaben der einzelnen Substanzen.

Oberflächenprobenahme mit Fachlaboranalyse: Wischproben eignen sich gut als zerstörungsfreie Methode bei der Materialbewertung und zur Erkennung von Sekundärkontaminationen. Hier wird mit einem sauberen Baumwolltuch und etwas Alkohol (meist Isopropanol) eine definierte (wenige Quadratdezimeter), meist glatte Fläche gründlich abgewischt und die Probe zur Analyse in das Labor gegeben. Als Resultat erhält man eine flächenbezogene Konzentrationsangabe in z.B. Mikrogramm pro Quadratmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^2$) oder Mikrogramm pro Quadratdezimeter ($\mu\text{g}/\text{dm}^2$).

Luftprobenahme mit Fachlaboranalyse: Mit Probenahmepumpen wird eine definierte - recht große - Menge Raumluft durch Sammelmedien wie PU-/Polyurethanschaum oder NIOSH-Aktivkohle (nur Weichmacher) gezogen und anschließend im Fachlabor aufgearbeitet und analysiert. Raumluftmessungen sind bei manchen Pestiziden recht unempfindlich und können deshalb - je nach Situation - relativ unauffällig ausfallen, da die Konzentrationen schwerflüchtiger Substanzen in der Luft gering sind. Werden jedoch erhöhte und auffällige Konzentrationen in der Luft vorgefunden, dann gibt es oft ein Problem und eine Innenraumquelle. Wenn die Luft unauffällig ist, ist dem Rückschluss auf einen unbelasteten Raum mit Vorsicht zu begegnen. Die Luftmessung sollte eine gezielte Material- und Staubmessung nicht ersetzen, sondern eher ergänzen. Als Resultat erhält man eine volumenbezogene Konzentrationsangabe in Nanogramm pro Kubikmeter (ng/m^3).

Durchflussrate 30 Liter pro Minute und Gesamtvolumen 1000-2000 Liter, PU-Schaum mit 5 cm Durchmesser.

Durchflussrate 5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen 1000-2000 Liter, PU-Schaum mit 2 cm Durchmesser.

Durchflussrate 0,5-1,5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 500 Liter bei NIOSH-Aktivkohle.

4 SCHWERMETALLE und andere verwandte Schadstoffe

Messung **anorganischer Schadstoffe** wie Leicht- und Schwermetalle (Aluminium, Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink...), Metallverbindungen und Salze

Messung der Konzentrationen im Staub (Milligramm pro Kilogramm, mg/kg), im Material (Milligramm pro Kilogramm, mg/kg), auf Oberflächen (Mikrogramm pro Quadratmeter, $\mu\text{g}/\text{m}^2$), in der Raumluft (Nanogramm pro Kubikmeter, ng/m^3) und im Trinkwasser (Mikrogramm pro Liter, $\mu\text{g}/\text{l}$), Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Bestimmung von mindestens 12 Leicht- und Schwermetallen (besser noch mehr), das sind unter anderem die Metalle Aluminium (Al), Antimon (Sb), Arsen (As), Barium (Ba), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Thallium (Tl), Zinn (Sn) und Zink (Zn). In manchen Fällen kann es sinnvoll sein, nach bestimmten Oxidationsstufen wie bei Chrom-6 (Cr6) im Material (Leder) zu suchen.

Staubprobenahme mit Fachlaboranalyse: Die Metalle werden bei baubiologischen Messungen über den Hausstaub nachgewiesen. Die Probenahme entspricht der bei B3 beschriebenen. Auch hier Wert darauf legen, dass die Staubanalyse möglichst viele Einzelkomponenten erfasst. Die Bestimmung erfolgt nach Aufschluss mit Salpetersäure oder Königswasser mit ICP-MS. Die Nachweisgrenzen liegen bei 0,1-5 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

Methode A - Staubsaugerbeutel

Probenahme vor Ort mit Staubsauger, möglichst Papierbeutel mit Zwischenlage, möglichst 1-2 Gramm Feinstaub, Fraktion < 200 μm , besser < 63 μm .

Methode B - Sammelkopf

Probenahme vor Ort mit ALK-Sammelkopf und Spezialfilter, möglichst 1-2 Gramm Feinstaub, Fraktion: < 200 μm , besser < 63 μm .

Materialprobenahme mit Fachlaboranalyse: Probenahme der verdächtigen Materialoberfläche (Holz, Leder, Farbe, Schlacke) oder eines Materialmusters und die anschließende Untersuchung im Fachlabor. Die Proben (2-3 Gramm) werden in Gläser gefüllt oder in Aluminiumfolie eingepackt und an das Fachlabor geschickt. Als Resultat erhält man eine massebezogene Konzentrationsangabe in z.B. Milligramm pro Kilogramm (mg/kg).

Oberflächenprobenahme mit Fachlaboranalyse: Wischproben eignen sich gut als zerstörungsfreie Methode bei der Materialbewertung und zur Erkennung von Sekundärkontaminationen (z.B. bei Quecksilber). Hier wird mit einem sauberen Baumwolltuch und etwas Alkohol (meist Isopropanol) eine definierte (wenige Quadratdezimeter), meist glatte Fläche gründlich abgewischt und die Probe zur Analyse gegeben. Als Resultat erhält man eine flächenbezogene Konzentrationsangabe in z.B. Mikrogramm pro Quadratmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^2$) oder Mikrogramm pro Quadratdezimeter ($\mu\text{g}/\text{dm}^2$).

Luftprobenahme mit Fachlaboranalyse: Eine Luftanalyse ist nur bei Quecksilber sinnvoll. Die Probenahme entspricht der zuvor bei B2 beschrieben. Als Sammelröhrchen werden speziell für die Quecksilberanalyse mit Jod beschichtete Aktivkohleröhrchen verwendet. Die Nachweisgrenze ist ausreichend niedrig bei 30 ng/m^3 . Die Bestimmung erfolgt nach Aufschluss über Kaltdampf-AAS. Als Resultat erhält man eine volumenbezogene Konzentrationsangabe in z.B. Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) oder Nanogramm pro Kubikmeter (ng/m^3).

Durchflussrate 0,5-1,5 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 250 Liter bei Jod-Aktivkohleröhrchen.

Trinkwasserprobenahme mit Fachlaboranalyse: Bei Verdacht auf Trinkwasserbelastungen sollten Wasseranalysen vorgenommen werden, in erster Linie auf Blei, Kupfer, Nickel, Cadmium und Arsen. Die Probenahme wird mit PE-Flaschen (ca. 50 ml zur Urinalyse aus der Apotheke) durchgeführt und die Bestimmung erfolgt nach ICP-MS. Als Resultat erhält man eine Konzentrationsangabe in z.B. Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g}/\text{l}$).

Für genauere Wasseranalysen sind bei der Probenahme und Laborauswertung die Vorgaben der Trinkwasserverordnung zu beachten.

5 PARTIKEL und FASERN (Feinstaub, Nanopartikel, Asbest, Mineralfasern...)

Messung von **Staub, Partikelzahl** und **-größe, Asbest** und sonstigen **Fasern**

Messung der Konzentrationen in der Raumluft ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, l), im Staub (/g), im Material (/g) oder auf Oberflächen (/cm²) mit direkt anzeigenden Messgeräten und Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Mikroskopische Vorprüfungen: Mit Partikelsammler (z.B. Allergenco, MBASS30-PS30) und Klebefilm auf Objektträger, Auswertung mit Lichtmikroskop.

Direktmessungen mit Partikelzählern: Messungen mit Laser-Partikelzählern (Mehrkanalsystem für Partikel ab 0,3-0,5 μm Durchmesser) oder Kondensationspartikelzählern (für kleinere Partikel bis zu 1 nm), gegebenenfalls mit Größenklassifizierung.

Direktmessungen oder Feinstaubsammlungen: Messungen zur Massenermittlung von Stäuben mit entsprechenden Pumpen und Filtrationseinheiten sowie Vorabscheidern, als Resultat erhält man Konzentrationsangaben in z.B. Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Staubprobenahme mit Fachlaboranalyse: Asbest und künstliche Mineralfasern (KMF) können orientierend über den Hausstaub nachgewiesen werden. Die Probenahme entspricht der bei B3 beschriebenen. Die Staubprobe wird im Fachlabor nach Veraschen des Filters mit Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM-EDXA) untersucht. Diese Analyse differenziert Faserzahl und Faserart.

Materialprobenahme mit Fachlaboranalyse: Probenahmen von Asbest und KMF oder eines Materialmusters und die anschließende Untersuchung im Fachlabor. Bei der Probenahme ist darauf zu achten, dass keine Kontamination der Umgebung verursacht wird (bei Asbest Probenahme nach VDI 6202 Blatt 3 und nach geeigneter Schulung - TRGS 519-Sachkundenachweis). Die Materialproben (in der Regel mindestens 2 g) werden in luftdichte Behälter oder Gläser gefüllt und an das Fachlabor geschickt. Die Proben werden mit Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM-EDXA) untersucht. Diese Analyse differenziert bei Asbest oder KMF Massenanteile in % und KI-Index bei KMF.

Oberflächenprobenahme mit Fachlaboranalyse: Mit der Klebestempelmethode nach VDI 3877 Blatt 1 können Asbestfasern und KMF

auf Oberflächen bestimmt werden. Hierbei werden spezielle Klebebänder oder Graphitklebestempel auf eine vor zirka 3-7 Tagen abgestaubte horizontale Oberfläche gedrückt und rasterelektronenmikroskopisch mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM-EDXA) ausgewertet. Diese Analyse differenziert Faserzahl und Faserart.

Luftprobenahme mit Fachlaboranalyse: Luftmessungen auf Asbestfasern und KMF werden nach VDI-Richtlinie 3492 durchgeführt. Hierbei soll darauf geachtet werden, dass sedimentierter Staub oder versteckte Faserdepots zur Nutzungssimulation vorher aufgewirbelt werden. Ansonsten gelten die Vorgaben der VDI 4300 wie bei anderen Luftmessungen. Mit Spezialpumpen wird über acht Stunden hinweg Raumluft beprobt. In der Regel werden 3800 Liter Probenahmenvolumen benötigt. Bei hohen Staub- oder Rauchbelastungen sollte weniger Luft beprobt werden, da der Probenahmekopf ansonsten überladen wird. Die Asbestfasern und KMF lagern sich im Probenahmekopf auf einem goldbedampften Kernporenfilter ab und eine Teilfläche wird im Fachlabor nach Veraschen des Filters mit Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM-EDXA) untersucht. Diese Analyse differenziert Faserzahl, Faserart, Faserdicke und Faserlänge.

Probenahme mit geeigneter Asbestpumpe (pulsationsfrei, z.B. Drehschieberpumpe).

Durchflussrate 8 Liter pro Minute und Gesamtvolumen um 3800 Liter auf Probenahmekopf mit goldbedampften Kernporenfilter.

Es ist die "Richtlinie für die Bewertung und Sanierung schwach gebundener Asbestprodukte in Gebäuden - Asbest-Richtlinie" nebst beigefügtem Bewertungs-Formblatt sowie die "Leitlinie für die Asbesterkundung zur Vorbereitung von Arbeiten in und an älteren Gebäuden" des Umweltbundesamtes u.a. zu beachten. Untersuchungen der Staub-, Material- und Oberflächenproben auf Asbest erfolgen gemäß VDI-Richtlinie 3866.

6 RAUMKLIMA (Temperatur, Feuchte, Kohlendioxid, Luftionen, Luftwechsel, Gerüche...)

Messung von **Luft- und Oberflächentemperatur, Luft- und Materialfeuchte, Sauerstoff, Kohlendioxid, Luftdruck, Luftbewegung, Luftwechselrate und Luftionen**, Feststellung von **Gerüchen**

Messung von Temperatur (°C), Feuchte (r.F., a.F., %), Sauerstoff (Vol.%), Kohlendioxid (ppm), Druck (mbar), Luftbewegung (m/s), Luftionen (/cm³), Luftelektrizität (V/m)

Feuchte- und Temperatur von Luft und Materialien - Messungen mit Thermometern, Hygrometern, Baufeuchtemessgeräten, Klima-Datenloggern, modularen Systemen...

Messungen der Lufttemperatur und der Luftfeuchte mit Thermo-Hygrometern. In Kondensationsproblem-Situationen mit nicht sofort offensichtlichen Zusammenhängen sind zur Klärung Langzeitmessungen mit Klima-Datenloggern über mehrere Tage oder Wochen durchzuführen. Die Angabe erfolgt in Grad Celsius (°C) und Prozent relativer Luftfeuchte (% r.F.). Geräte-interne Umrechnungen oder solche anhand von Tabellen und Computerprogrammen liefern auch Angaben des Taupunktes (in °C) und der absoluten Feuchte in Gramm pro Kubikmeter (g/m³).

Bei der Raumluftfeuchte sind in der Regel sowohl die relative als auch die absolute Feuchte zu ermitteln. Bei Kurzzeitmessungen ist auf die ausreichende Akklimatisierung der Sensoren zu achten, speziell beim Überführen der Messgeräte von draußen nach drinnen. Die Geräte sind weit genug vom Körper bzw. dem Mund und der Atemluft entfernt zu halten, um Beeinflussungen zu vermeiden.

Oberflächentemperaturen in Grad Celsius (°C) können mit Kontaktthermometern oder -berührungsfrei und bequemer - mit Infrarot-Lasermotoren gemessen werden. Speziell bei letzterem sollten möglichst Vergleiche am selben Material vorgenommen werden, bei Oberflächen mit stark unterschiedlichem Reflektionsverhalten sind die entsprechenden Emissionsgrade zu beachten bzw. am Gerät einzustellen.

Messungen der Luftfeuchte und von Oberflächentemperaturen zur Untersuchung von Kondensationsproblemen sind in der der Fragestellung angemessenen Jahreszeit bzw. Witterung durchzuführen: Bei der Fragestellung kühler Außenwandbereiche in oberirdischen Räumen sollten entsprechend kühle Außentemperaturen herrschen, je kühler desto besser; Untersuchungen von Kondensationsproblemen in Keller- bzw. Souterrainräumen sind in der Regel nur im Sommer und Herbst sinnvoll.

Bei Messungen der Luftfeuchte und von Oberflächentemperaturen ist das Nutzerverhalten mit zu beachten bzw. zu protokollieren.

Baufeuchtemessungen sind zunächst orientierend zerstörungsfrei per Hochfrequenzverfahren vorzunehmen, dann an verdächtigen Stellen weiter per Oberflächen- und/oder Einstech- bzw. Hammerlektroden über die elektrische Leitfähigkeit an der Oberfläche und in verschiedenen Tiefen, ergänzend je nach Situation auch per Mikrowellenverfahren. Bei den Leitfähigkeitsmessungen ergeben sich zumeist Werte in Holzfeuchteäquivalenten (% HFÄ) oder Geräte-spezifischen Digits. Anhand von Tabellen können bei Bedarf Materialfeuchten ermittelt werden, ganz exakt können diese mit Calciumcarbid (CM-Methode) oder durch Trocknen/Wiegen bestimmt werden (Darr-Methode). Bei Leitfähigkeitsmessungen zu beachten sind Fehlermöglichkeiten durch versalzete Baustoffe oder Metalle bzw. andere elektrisch leitfähige Schichten, Baustoffe und Anstriche. Hilfreich kann die Messung der Luftfeuchte im Material an frisch angefertigten Bohrlöchern sein, in die der Feuchtesensor eingeführt und zur Raumluft hin abdichtet wird.

Sauerstoff - Messungen mit Prüfröhrchen oder Messgeräten

Dieses für uns lebenswichtige Gas ist in Innenräumen fast nie zu wenig vorhanden. Der Ausspruch "hier ist kein Sauerstoff mehr" ist falsch, das Problem ist vielmehr das im Übermaß vorhandene CO₂. Messungen des Sauerstoffs sind deshalb in der Regel nicht notwendig, zur Not kann der Gehalt über CO₂ abgeschätzt werden. Genaue Daten liefern nur Messungen mit z.B. Prüfröhrchen oder direkt anzeigenden elektronischen Messgeräten.

Kohlendioxid - Messungen mit direktanzeigenden Prüfröhrchen oder Kohlendioxid-Monitoren

Kohlendioxid-Messungen können einen guten Eindruck des Raumklimas und über die Luftwechselrate liefern. Die Kohlendioxid-Konzentration ist auch ein Gradmesser für mögliche Belastungen mit Schadstoffen und Gerüchen. Messungen vor Ort sind mit Prüfröhrchen möglich, besser sind direkt anzeigende elektronische Messgeräte wie Kohlendioxid-Monitore (möglichst mit internem Datenspeicher oder mit Datenlogger-Ausgang für Langzeitmessungen). Die Angabe erfolgt in parts per million (ppm) oder Volumenprozent (Vol%).

Luftdruck - Messungen mit Barometern

Die Messung des Luftdrucks im Rahmen baubiologischer Prüfungen ist auch deshalb wichtig, weil sie ein Kriterium bei der Bewertung anderer baubiologischer Einflüsse ist (z.B. bei der Messung von Luftschadstoffen) und die Kenntnis des Luftdruckes Rückschlüsse auf hierfür typische Beschwerden zulässt. Der Luftdruck wird mit Barometern gemessen. Hier werden in der baubiologischen Messtechnik digitale Geräte eingesetzt - oft Kombinationsgeräte mit Lufttemperatur- und Luftfeuchtesensor. Die Messwertangabe erfolgt in Millibar (mbar) bzw. Hektopascal (hPa). Druckschwankungen können nur mit Geräten mit Schreiber- oder Datenloggerfunktion korrekt ermittelt werden.

Luftbewegung - Messungen mit Strömungsprüfröhrchen oder Strömungsmessgeräten

Gut zur ersten Einschätzung der Luftbewegungen im Raum sind Strömungsprüfröhrchen. Diese geben einen Nebel-ähnlichen Rauch ab, der sich in der Luft wie eine kleine Wolke der Thermik und Luftbewegung entsprechend bewegt. Dieses Verfahren wird gern zur Beobachtung der Effektivität von Lüftungs- und Klimaanlage eingesetzt (Vorsicht! Bitte nicht einatmen, Schwefelsäure). Weitere Messungen erfolgen mit Strömungsmessgeräten, z.B. mit thermischen Anemometern oder Hitzkugelsonden. Manchmal zeigen schon Flammen (Kerze, Feuerzeug) Luftbewegungen an. Die Messwertangabe bei Strömungs sonden erfolgt in Meter pro Sekunde (m/s). Die Geräte sollten so empfindlich sein, dass sie leichte Luftbewegungen noch unter 0,1 m/s (Meter pro Sekunde) registrieren.

Luftionen - Messungen mit Ionometern

Messungen der Kleinionen in der Luft erlauben einen generellen Eindruck des Raumklimas. Auffällig hohe und zeitlich konstant steigende Werte liefern wertvolle Hinweise auf Radon-Belastungen. Niedrige Werte deuten auf elektrostatisch geladene Oberflächen, Feinstaub oder andere Auffälligkeiten hin. Die Messung der Kleinionen erfolgt mit Ionometern, moderne Geräte können gleichzeitig positiv und negativ geladene Ionen messen und haben Datenlogger-Funktionen zur Langzeitaufzeichnung. Die Messwertangabe erfolgt in Ionen pro Kubikzentimeter Luft (Ionen/cm³).

Luftelektrizität - Messungen mit Elektrofeldmetern bzw. Feldmühlen

Die Luftelektrizität entsteht im Innenraum als Folge von Elektrostatik und Oberflächenspannungen, gemessen wird, wie bei A4 beschrieben, mit Feldsonden (Elektrofeldmetern), die meist nach dem Feldmühlen-Influenz-Prinzip arbeiten. Die Luftelektrizität ergibt sich aus der elektrischen Gleichfeldstärke im Raum. In 1 m Entfernung von einem elektrostatisch geladenen Objekt mit 1000 V Oberflächenspannung resultiert eine Feldstärke von 1000 V/m. Umrechnung: Oberflächenspannung (V) = Feldstärke (V/m) x Abstand (m). Entscheidend ist eine leichte Provokation des Materials (Teppich, Gardine) kurz vor der Messung. Die neutrale Erde gilt als Bezugspunkt.

Gerüche - Sensorische Wahrnehmung oder Messungen mit Luftprobenahmen

Gerüche werden in erster Linie sensorisch bzw. olfaktorisch erfasst. Hierbei spielen zunächst Intensität und Qualität eine Rolle. Außerdem kann unterschieden werden, ob es unangenehm oder angenehm riecht, ob die Gerüche akzeptabel oder inakzeptabel sind oder ob konkrete Hinweise auf Verursacher vorliegen (Pilze oder Chemie? Nach welchen Baustoffen, Materialien, Einrichtungsgegenständen... riecht es?). Bei Bedarf kann messtechnisch wie bei B1/B2/B3 vorgegangen werden, es ist nach besonders geruchsintensiven Schadstoffen und Verbindungen in der Luft oder in Materialien zu suchen. Manchmal können schon einfache Tests mit verdächtigen Materialien in luftdichten Prüfgefäßen aus Glas geruchliche Hinweise auf die Quelle liefern.

Luftwechsel - Messungen mit Tracergas

Ergänzung zu den baubiologischen Richtwerten - Vorschläge, Orientierungs- und Bewertungshilfen:

Luftaustausch		unauffällig	schwach	stark	extrem
Luftwechselrate pro Stunde	/h	> 1	~ 0,5 - 1	~ 0,2 - 0,5	< 0,2
Luftzufuhr in Kubikmeter Frischluft pro Stunde u. Person	m ³ /h	> 50	~ 25 - 50	~ 10 - 25	< 10

Luftwechsel bezogen auf normalgroße Schlafzimmern (~ 20 m² / ~ 50 m³) mit Nutzung durch eine Person als Mittelwert über die Schlafphase; bei kleineren Räumen oder mehr Personen im Raum strenger bewerten.

Allgemein empfohlene Luftzufuhrmengen für andere Räume: Großraumbüro 40-50 m³/h, Einzelbüro 40 m³/h, Klassenraum, Hörsaal, Gaststätte 30-40 m³/h, Konferenzraum 30 m³/h, Theater, Konzert, Kino 20 m³/h. Die hygienische Mindestluftwechselrate liegt bei etwa 0,3/h.

Der Luftwechsel in einem Gebäude ist abhängig von vielen Faktoren wie Luftdichtigkeit der Gebäudehülle, Außen- und Innenklima bzw. Jahreszeit, Heizgegebenheiten, Wind- und Druckverhältnisse am und im Gebäude, Position und Dimension von Fenstern, freier Lüftung über Fenster und Schachtlüftung sowie Lüftungstechnischen Anlagen (dezentral oder zentral) über Ventilatoren. Meist kann man den tatsächlich vorhandenen bzw. möglichen Luftwechsel schon über die vor Ort vorliegenden oben genannten Faktoren und das Nutzerverhalten (wie oft wird wie lange gelüftet) gut abschätzen. Genaue Daten liefern nur Messungen. Messtechnisch kann man den Luftwechsel mit der Konzentrationsabklingsmethode nach VDI-Richtlinie 4300 Blatt 7 bzw. DIN EN ISO 16000 Blatt 7 bestimmen. Bei dieser Methode wird ein Prüfgas (Tracergas, z.B. Kohlendioxid) in den Raum geleitet und der Konzentrationsabfall messtechnisch erfasst. Aus der Abklingkurve und dem Raumvolumen wird der Luftwechsel pro Stunde (/h) bestimmt. Es werden oft mehrere Messpunkte eingerichtet, um eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung im Raum dokumentieren zu können. Als Bewertungshilfe dient auch die neue Lüftungsnorm DIN1946-6 von 2019. Hier werden für bestimmte Wohnungsgrößen benötigte Mindestluftwechsel definiert. In neuen, modernen und dichten Gebäuden ist die Lüftungsnorm bei der Planung zu berücksichtigen und der Mindestluftwechsel sicherzustellen. In den meisten Fällen reicht die manuelle, zumutbare Fensterlüftung zur Mindestlüftung und sogar zum geforderten Feuchteschutz nicht mehr aus, und es ist ein Lüftungskonzept mit technischen Hilfestellungen erforderlich.

C PILZE, BAKTERIEN, ALLERGENE

1 SCHIMMELPILZE und deren Sporen sowie Stoffwechselprodukte

Messung und Bestimmung von kultivierbaren und nicht kultivierbaren **Schimmelpilzen**, Schimmelpilzsporen und Pilzbestandteilen sowie Stoffwechselprodukten (MVOC, Toxine...)

2 HEFEPILZE und deren Stoffwechselprodukte

Messung und Bestimmung von **Hefepilzen** und Stoffwechselprodukten

3 BAKTERIEN und deren Stoffwechselprodukte

Messung und Bestimmung von **Bakterien** und Stoffwechselprodukten

Ergänzung zu den baubiologischen Richtwerten - Vorschläge, Orientierungs- und Bewertungshilfen:

Sinnvolle und möglichst sichere Bewertungen und Quellenzuordnungen ergeben sich speziell bei Schimmelpilzen durch die sachverständige und situationsangepasste Kombination verschiedener Untersuchungsmethoden bzw. das Zusammenführen diverser Ergebnisse und Eindrücke, in der Regel dagegen nicht aus Einzelbefunden.

Hinweise auf Innenraumquellen, -auffälligkeiten, -belastungen oder gesundheitliche Risiken können ergänzend zu den übergeordneten, wesentlichen Richtsätzen und Werten in den baubiologischen Richtwerten für Schlafbereiche in vielen Fällen unter anderem aus den folgenden Angaben und Erfahrungen abgeleitet werden:

Schimmelpilze relativ pro Kubikmeter Raumluft *	/m ³	< außen	bis 100 mehr	bis 500 mehr	> 500 mehr
Einzelne Arten relativ pro Kubikmeter Raumluft *	/m ³	< außen	bis 50 mehr	bis 300 mehr	> 300 mehr

Pilzgesamtzahlen in der Innenraumluft im Vergleich zu Referenzproben der Außenluft und/oder aus unbelasteten Räumen und die Menge von einzelnen Pilzarten, die sich von draußen und/oder Referenzräumen deutlich unterscheiden.

Schimmelpilze absolut pro Kubikmeter Raumluft *	/m ³	< 200	200 - 500	500 - 1000	> 1000
---	-----------------	-------	-----------	------------	--------

Raumluft bei moderaten Werten der Außenluft unter 500/m³, je nach klimatischen und hygienischen Bedingungen.

Schimmelpilze pro Quadratdezimeter Fläche *	/dm ²	< 20	20 - 100	100 - 200	> 200
---	------------------	------	----------	-----------	-------

Sedimentierte Pilze bzw. Sporen auf alltäglich, regelmäßig gereinigten, nicht stark verstaubten Oberflächen.

Schimmelpilze pro Gramm Hausstaub *	/g	< 500	500 - 2000	2000 - 10000	> 10000
-------------------------------------	----	-------	------------	--------------	---------

Pilzsporenzahl im gesammelten rund 7 Tage alten Hausstaub. Direktes Ausbringen des Staubs auf Nährböden. Vergleichende Untersuchungen zu anderen und speziell unverdächtigen Räumen.

MVOC Summe in Nanogramm pro Kubikmeter Luft	ng/m ³	< 200	200 - 1000	1000 - 10000	> 10000
Spezifische Einzelsubstanzen	ng/m ³	< 50	50 - 200	200 - 2000	> 2000

Mikrobielle flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft, mindestens 15 Einzelsubstanzen mit Summenangabe.

* Bei den auf Nährböden kultivierten Pilzen geht es um koloniebildende Einheiten (KBE) bezogen auf eine Bebrütungstemperatur 20-25 °C.

Detailliertere Bewertungen und Angaben: Umweltbundesamt 'Schimmelleitfaden', WTA-Merkblatt 4-12 05.2021/D, VDB-Zert, LGA-Leitfaden....

Hier noch einmal der übergeordnete, verbindliche Text aus den baubiologischen Richtwerten SBM-2024 zur Erinnerung, versehen mit vier entsprechenden Ergänzungen:

Die Schimmelpilzzahlen in der Raumluft, auf Oberflächen, im Hausstaub, in Hohlräumen, in Materialien... sollten **unter** denen im Freien bzw. im Bereich von unbelasteten Vergleichsräumen liegen. Die Schimmelpilzarten drinnen sollten sich **nicht** wesentlich von jenen draußen bzw. in unbelasteten Vergleichsräumen unterscheiden. Besonders **kritische** Pilze *1, z.B. toxinbildende, allergisierende oder bei 37 °C Körpertemperatur wachsende *2, dürfen **nicht** oder nur minimal nachweisbar sein. Es darf keine Kontaminationen mit **Stoffwechselprodukten** von Schimmelpilzen (Mykotoxine, MVOC, Glukane...) geben.

Um Schimmelwachstum entgegen zu wirken, sind dauerhaft erhöhte Material- und Luftfeuchten sowie zu kühle Oberflächentemperaturen und kritische Wärmebrücken zu vermeiden; die **Wasseraktivität** von Materialien sollte nicht längere Zeit über **0,65** liegen.

Weitere **Auffälligkeiten, Verdachtsmomente** oder Hinweise auf mikrobielle Belastungen sind zu berücksichtigen bzw. in Bewertungen mit einzubeziehen (z.B. Verfärbungen, Flecken, Mikroorganismen-typische Gerüche, feuchteindizierende Pilze *3, Bau-, Nässe- und Fäkal-Schäden, Problemkonstruktionen, Hygieneaspekte, erhöhte Einträge von außen *4, Altschäden, Gebäudeanamnese, Ortsbesichtigung, Krankheiten der Bewohner, umweltmedizinische Ergebnisse...).

*1 Besonders kritische und Toxin-bildende Schimmelpilze wie beispielsweise Stachybotrys, Aspergillus, Alternaria, bestimmte Chaetomium-, Paecilomyces-, Penicillium-, Trichoderma-Spezies

*2 Bei 37 °C Körpertemperatur wachsende und potenziell Infektionen hervorrufende Schimmelpilze wie beispielsweise Aspergillus, bestimmte Absidia-, Acremonium-, Fusarium-, Mucor-, Paecilomyces-, Rhizopus-, Trichoderma-Spezies

*3 Feuchte-indizierende Schimmelpilze wie beispielsweise a) Acremonium, Aspergillus fumigatus, Eurobasidium pullulans, Chaetomium, Stachybotrys, Trichoderma oder Hefepilze für massive Nässe sowie b) Aspergillus versicolor, A. penicilloides, A. restrictus, Eurotium oder Wallemia sebi für leicht erhöhte Feuchte

*4 Überdurchschnittliche Pilzeinträge von außen, z.B. durch Mülldeponien, Recyclingbetriebe, Kompostierungs- und Schredderanlagen, staubintensive Bau-, Abriss-, Feld- und Gartenarbeiten...

Standardpunkte C1 bis C3: Schimmelpilze, Hefepilze und Bakterien

Für solide Bewertungen mikrobieller Belastungen bei Schimmelpilzen, Hefepilzen und Bakterien sind in der Regel - wie erwähnt - verschiedene Situations- und Fragestellungs-angepasste Untersuchungsmethoden einzusetzen; deren Ergebnisse und Befunde müssen in Kombination einen plausiblen Gesamteindruck ergeben.

Beachten: Als Folge von Feuchte- oder Hygieneproblemen sind neben Pilzen oft auch (manchmal sogar ausschließlich) Bakterien beteiligt. Die gesundheitlichen Probleme der Bewohner können mit Pilzen und Bakterien zusammenhängen. Deshalb sind bei baubiologischen Untersuchungen alle drei mikrobiologischen Standardpunkte gleichermaßen zu erfüllen. Auf spezielle Indikatorkeime für Feuchtigkeit und das Vorhandensein hochtoxischer Keime ist speziell zu achten.

Begehung und Befragung

Anamnese von Gebäude und Nutzer, visuelle Inspektion, allgemeine und olfaktorische Eindrücke (Gerüche). Eventuell unter Zuhilfenahme von Endoskop, Lupe, Stabmikroskop, bauforensischen Lampen, Fotodokumentation...

Durch die Inspektion der in Frage stehenden Innenräume inklusive Befragungen der Bewohner hinsichtlich der Hausgeschichte, aktueller oder ehemaliger Bau-, Feuchte- oder Hygieneschäden, Problemkonstruktionen, Geruchsauffälligkeiten, dem Nutzerverhalten oder Krankheitssymptomen sind Verdachtsmomente betreffend mikrobieller Probleme zu gewinnen oder zu verifizieren.

Eine gründliche visuelle Inspektion umfasst dabei bei Bedarf auch versteckte Bereiche und Oberflächen, z.B. hinter Schränken, auch Hohlräume von Zwischenwänden, Dachkonstruktionen, Wandverkleidungen, Fußbodenaufbauten, Kaminen, Schächten....

Kultivierungsmethoden

Anzuchten von Mikroorganismen mit nachfolgender Zählung und Identifizierung. Auf Nährböden (Agars, Petrischalen, Rodacplatten, Contact Slides, Keimindikatoren...).

Für Innenraumanalysen geeignete Nährböden sind für Schimmel- und Hefepilze in erster Linie YM-Baubiologie-Agar und DG18-Agar, je nach Anwendung auch z.B. Bengalrot-, Sabouraud- oder Malzextrakt-Agar; für Bakterien CASO- (TSA) oder Plate-Count-Agar.

Bei Luftproben (idealerweise auch bei Oberflächenproben) sind pro Probenahmestelle für Pilze mindestens zwei verschiedene Nährböden mit unterschiedlichen Nährstoff- und Wasserangeboten und für Bakterien ein weiterer Nährboden einzusetzen.

Die Kultivierung erfolgt in der Regel bei 20-25 °C (Raumtemperatur), für den Nachweis thermotoleranter Arten (z.B. Aspergillen, Candida) auch bei 37 °C (Körpertemperatur), bei thermophilen Arten (Actinomyceten, Legionellen...) bei noch höheren Temperaturen.

Die Angaben der Keimzahlen erfolgen in koloniebildende Einheiten (KBE).

Beim Umgang mit Nährmedien und den entsprechenden Probenahmegeräten ist auf möglichst steriles bzw. sauberes Arbeiten zu achten. So sollten Nährboden und Geräte auf frischen Aluminiumfolien abgestellt, nur mit sauberen Händen bzw. Handschutz gearbeitet und die Geräte regelmäßig (zumindest vor jedem neuen Messauftrag) mit Alkohol oder Hitze desinfiziert werden.

Mikroskopische Analysen

Proben (Luft, Oberflächen, Materialien, Staub...) werden direkt einer lichtmikroskopischen Auswertung zugeführt. Mit Lichtmikroskop, Objektträgern, Mikroskopierlösungen...

Dabei werden in der Regel übliche mikrobiologische Anfärbverfahren für Pilze (z.B. mit Baumwollblau bzw. Lactophenolblau) eingesetzt. Vergrößerungen bis 600fach sind meist ausreichend.

Luftuntersuchungen

Sammlung von Pilzen, Pilzsporen und Bakterien aus der Raumluft mit kultureller und/oder mikroskopischer Auswertung. Mit Luftkeimsammler, Air-Sampler, Impaktor, Partikel- bzw. Schlitzsammler und Klebefilm-Objektträger, Gelatinefilter...

Es sind immer Vergleiche der Luft von Innenräumen mit der Außenluft sowie mit der von unauffälligen Referenzräumen durchzuführen (sowohl bei Probenahmen zur Kultivierung als auch zur direkten Mikroskopie).

In der Regel sollte vor den Luftproben mindestens 6-8 Stunden nicht gelüftet werden. Im Einzelfall ist zu erfragen bzw. anzugeben, wie die Verhältnis-

se im Detail waren, und dies bei der Interpretation der Ergebnisse mit in Betracht zu ziehen.

Ebenfalls beachtet und angegeben werden sollte, welche Aktivitäten vorher im Raum stattfanden: z.B. alltagstypisches Nutzerverhalten (eventuell vor Probenahme durch Gehen im Raum, Öffnen von Schränken, Bewegen von Gardinen... simulieren), oder ruhige Verhältnisse (längere Zeit keine Personen im Raum), oder (je nach Fragestellung auch absichtlich herbeigeführte) intensive Bewegungen und Aufwirbelungen (so genannte aggressive Probenahme, speziell zur Sanierungskontrolle sinnvoll). Speziell vor Untersuchungen von Bakterienbelastungen sollten sich in den Stunden vor den Probenahmen möglichst keine Personen in dem Raum aufhalten.

Im Falle von Lüftungs- und Klimaanlage- oder -geräten ist je eine Luftprobe vor und einige Minuten nach dem Einschalten sinnvoll.

Als Probenahmeort im Raum ist eine möglichst repräsentative Stelle, in der Regel mittig in rund 1-1,5 Meter Höhe auszuwählen. Alternativ kann auch mit dem Sammler am ausgestreckten Arm durch den Raum gegangen werden, um eine gute Stichprobe des gesamten Raumes zu generieren. Bei bestimmten Fragestellungen kann direkt vor verdächtigen Stellen beprobt oder Luft aus Hohlräumen bzw. angefertigten Bohrlöchern gesaugt werden (bei Hohlraum-Beprobungen ist darauf achten, möglichst keinen Sedimentationsstaub aufzuwirbeln und auf die Sammelmedien aufzubringen).

Luftkeimsammlung

Probenahme mit Luftkeimsammler, Impaktor, Gelatinefilter...

Bevorzugt beprobt werden sollte per aktiver Impaktionsmethode mit Luftkeimsammlern, die für Pilze und Bakterien geeignete Abscheidegrade (Cut-Off-Wert) von 1 µm bzw. weniger aufweisen. Es ist eine der Situation angemessene Luftmenge einzusaugen: In der Regel 50-100 Liter pro Standard-Petrischale, im Sommer (wegen tendenziell höherer Luftkeimzahlen) eher 50 l, im Winter eher 100 l, in vermutlich belasteten Situationen oder Hohlräumen weniger, in extrem sauberen oder unverdächtigen Räumen mehr. Die Nährböden sollten bei der Probenahme Zimmertemperatur haben.

Bei Einsatz des passiv sammelnden Sedimentationsverfahrens (OPD, Open Petri Dish) sind sicherheitshalber mehrere parallele Probenahmen an verschiedenen Stellen eines Raumes ratsam (z.B. Fußboden in Raummitte, Schreibtisch, Bücherregal...). Der Nährboden in der Petrischale sollte für 30-60 Minuten offen in Kontakt mit der Raumluft sein (je weniger Keime zu erwarten sind, desto länger). Diese Methode kann jedoch fehlerbehaftet sein und führt unter anderem - je nach Situation - auch zu einer Unterbewertung der besonders kritischen Pilzgattungen mit sehr kleinen Sporen (Aspergillus/Penicillium), sie kann nur als grobe orientierende Methode betrachtet werden.

Die Angaben der Pilz- und Bakterienzahlen erfolgen bei aktiven Probenahmen in koloniebildende Einheiten pro Kubikmeter Luft (KBE/m³), bei passiven in koloniebildende Einheiten pro Nährboden (KBE/Agar). Grobe Faustregel: 1 Stunde Sedimentation multipliziert mit 20-50 entspricht oft in etwa der mit Impaktoren ermittelten Keimzahl pro m³ Luft.

Luftpartikelsammlung

Probenahme mit Partikel- bzw. Schlitzsammlern und Klebefilm-Objektträgern.

Bei Partikelsammlungen zur Erfassung von Gesamtsporenzahlen (also sowohl kultivierbarer als auch abgestorbener bzw. nicht kultivierbarer Pilze) sind Schlitzsammler mit für die Abscheidung von Pilzsporen geeigneten Pumpsystemen, Dimensionierungen und Klebefilm-Objektträgern einzusetzen. Es erfolgen direkte lichtmikroskopische Auswertungen der eingesammelten Partikel und Pilzstrukturen. In der Regel beträgt das Probenahmevolumen etwa 100-200 Liter Luft (je weniger Keime zu erwarten sind, desto mehr).

Die Angaben der Pilzzahlen erfolgen in Sporen pro Kubikmeter Luft, zudem sind weitere Aussagen bzw. Beschreibungen (Nebenbefunde) möglich (z.B. über sonstige Pilzbestandteile wie Hyphen bzw. Myzelien, außerdem über Hautschuppen, Haare, Milben, Staub, Partikel, Mineralfasern...).

Oberflächenuntersuchungen

Zur Kultivierung auf Nährböden oder zur direkten mikroskopischen Analyse. Mit Abklatschnährböden, Petrischalen, sterilen Tupfern, Klebefilmen.

Für die direkte mikroskopische Auswertung werden so genannte Klebefilm-Kontaktproben angefertigt: Hierbei werden durchsichtige Klebestreifen (z.B. kristallklarer Tesafilm) auf die verdächtigen oder befallenen Flächen aufgedrückt, dann auf Objektträger oder Folie aufgebracht und mikroskopiert, bei Bedarf mit entsprechenden Färbeverfahren. Solche Proben ermöglichen schnelle Aussagen, unter Umständen bis hin zu Artenidentifizierungen, sowie Unterscheidungen, ob es sich nur um Sporen-Ablagerungen handelt oder aber um Pilzhyphen oder Sporulationsorgane, also um nur sekundär oder aber primär pilzbefallene Oberflächen.

Abklatschproben auf Nährböden werden z.B. mit so genannten Rodacplatten, Contact Slides oder "Paddeln" angefertigt: Die Agar-Oberfläche ist mehrere Sekunden auf die zu überprüfenden Oberflächen zu drücken. Sinnvoll sind solche Proben z.B. zur Einschätzung von Sekundärkontaminationen bei Pilzschäden, für den Eindruck nicht offensichtlich befallener Oberflächen, zur Überprüfung der Wirksamkeit von Feinreinigungen nach Pilzsanierungen oder zur Kontrolle des allgemeinen Hygienestatus.

Eine definierte Oberfläche (z.B. 1 dm²) kann für vergleichende Eindrücke auch mit einem steril angefeuchteten Tupfer abgerollt, 'abgescantt' werden und die darauf anhaftenden Pilzsporen auf einen Nährboden (z.B. Petrischale) durch mehrfaches Abrollen übertragen werden.

Abstrichproben mit sterilen Wattetupfern eignen sich speziell zur Beprobung von Ritzen und Fugen oder Bohrlöchern in Wänden, Fußböden oder Hohlräumen. Die vor den Probenahmen leicht anzufeuchtenden Tupfer sind danach auf Nährböden auszurollen. Solche Tupferprobenahmen eignen sich darüber hinaus gut als Rückstellproben, die erst nach Wochen oder Monaten bei Bedarf in Kontakt mit Nährböden gebracht werden können.

Sterile Tupfer kommen neben Abklatschproben speziell bei Hefepilz-Probenahmen zum Einsatz, z.B. für Kühlschränke, Spülmaschinen, Waschmaschinen, Toilettenspülkästen, Abflüsse, Duschköpfe, Mundduschen, Inhaliergeräte, Babyflaschen, Getreidemühlen, Lebensmittel- und -vorräte...

Die Angaben der Pilz- und Bakterienzahlen bei Abklatsch- oder Abstrichproben erfolgen in koloniebildende Einheiten pro Quadratdezimeter oder Quadratcentimeter Fläche (KBE/dm² oder KBE/cm²). Bei Tupferproben sollten eher nur semi-quantitative Mengenangaben bzw. Eindrücke oder qualitative Artbestimmungen vorgenommen werden, z.B. vergleichende Mengenangabe pro Nährboden (KBE/Agar).

Es ist bei beprobten Ablagerungsflächen (z.B. Böden, Tische, Möbel...) anzugeben, wie lange sie zuvor nicht gereinigt worden sind: Für die Anwendung der baubiologischen Richtwerte sollten die Oberflächen in der Regel alltagsgemäß regelmäßig gereinigt worden sein, in den letzten wenigen Tagen vor der Probenahme dann möglichst nicht. Die Richtwerte gelten keinesfalls für stark verstaubte bzw. länger nicht gereinigte Flächen.

Probenahmen von schon per Auge direkt verschimmelten Oberflächen machen betreffend zahlenmäßiger Angaben wenig Sinn, sondern sind eher zur Artidentifizierung brauchbar und wichtig.

Materialuntersuchungen

Zur Kultivierung auf Nährböden oder zur direkten mikroskopischen Analyse. Mit Nährböden, Verdünnungslösungen, Klebefilmen, Tupfern.

Pilzbefallene bzw. -verdächtige Materialien (Tapeten, Putze, Dämmstoffe, Holz, Teppiche, Akten, Einrichtungen...) werden vor Ort behutsam und ohne Pilze und deren Sporen aufzuwirbeln entnommen (dabei sauberes sowie bei Proben zur Kultivierung steriles Werkzeug einsetzen und möglichst Handschuhe anziehen, um Kontaminationen der Proben und Risiken für den Probennehmer zu vermeiden), in Aluminiumfolie verpackt oder Plastikhüllen eingeschweißt und ins Labor zur Aufarbeitung (Zerkleinerung, Anlage von Verdünnungsreihen) und kulturtechnischen oder mikroskopischen Auswertung überstellt.

Vorsorgliche Materialüberprüfungen von z.B. Baustoffen (Dämmstoffe, Lehmputz...) oder Anstrichen (Wandfarben...) sind sinnvoll, um ein Keimrisiko vor Verarbeitung zu vermeiden. Speziell Wandfarben können - wenn auch selten - mit Bakterien kontaminiert sein und dürfen nicht verstrichen werden.

Die Angaben der Pilz- und Bakterienzahlen erfolgen bei Kultivierung auf Nährböden in koloniebildende Einheiten pro Gramm (KBE/g), bei mikroskopischen Analysen meist als halbquantitative Angabe bzw. Beschreibung der Mengen an Sporen, Hyphen, Sporulationsorganen...

Staubuntersuchungen

Zur Kultivierung auf Nährböden oder zur direkten mikroskopischen Analyse. Mit Nährböden, Verdünnungslösungen, Klebefilmen.

Staub wird durch Absaugen definierter Oberflächen (Böden, Teppiche, Polster, Möbel..., entsprechend nach Fragestellung auswählen und angeben) gewonnen, z.B. per Staubsauger mit entsprechendem Probenahmeverfahren (ALK-Sampler) und Zellulosefiltern oder direkt aus dem Staubbeutel des Saugers (Feinstaubfraktion, gegebenenfalls nach Siebung). Art und Größe der abgesaugten Fläche sind zu dokumentieren.

Staub-Konzentrationen können Hinweise auf Sekundärkontaminationen von Pilzschäden bzw. auf diese selbst liefern. Auch hier auf Nebenbefunde achten: Hautschuppen, Haare, Partikel, Milben, Allergene, Mineralfasern...

Zur Gewinnung von Oberflächenstaub mit Klebefilmen siehe oben unter 'Oberflächenuntersuchungen'.

Die Angaben der Pilz- und Bakterienzahlen erfolgen pro Gramm Staub ($/g$) oder pro Quadratmeter abgesaugter Fläche ($/m^2$).

MVOC-Analysen (Microbial Volatile Organic Compounds)

Zum Nachweis von Pilz- (und Bakterien-) spezifischen Ausgasungen. Mit Probenahmepumpen und Sammelmedien sowie Fachlaboranalysen.

Durch Raumluftprobenahmen auf Aktivkohle- oder Tenax-Röhrchen mit nachfolgender gaschromatografischer und massenspektrometrischer Laboranalyse werden die Konzentrationen flüchtiger chemisch-biologischer Ausgasungen von Mikroorganismen bestimmt. Dabei sind möglichst Pilz-spezifische Substanzen wie Dimethylsulfid, Dimethyldisulfid, Dimethylsulfoxid, Geosmin, 2-Methylfuran, 3-Methylfuran, 1-Octen-3-ol, 2-Pentanol, 1-Decanol, 2-Heptanon, 2-Methyl-isoborneol, 3-Octanol, 3-Octanon heranzuziehen.

MVOC-Analysen sollten in enger Absprache mit dem auswertenden Labor vorgenommen werden, da aufgrund des Arbeitens im hochempfindlichen Bereich bzw. nah an der Nachweisgrenze leicht Fehler wegen falscher Randbedingungen, Probenahmemedien, Probenhandhabung oder Laborbearbeitung auftreten können. MVOC-Analysen sollten nicht isoliert, sondern nur im Zusammenhang mit weiteren Methoden durchgeführt werden.

Die Konzentrationsangaben der MVOC erfolgen in Nanogramm pro Kubikmeter Luft (ng/m^3).

Mykotoxin-Analysen

Zum Nachweis von Pilz-spezifischen Giften. Anhand von Material- und Staubproben mit Fachlaboranalysen.

Pilzgifte können als schwerflüchtige Substanzen entweder in Materialien oder im Hausstaub nachgewiesen werden. Standardmäßig gibt es bislang nur für einige wenige Mykotoxine Untersuchungsmöglichkeiten (z.B. Ochratoxin A, Trichothecene), obwohl mehrere hundert solcher giftigen Pilzstoffwechselprodukte bekannt sind. Außerdem gibt es noch wenig Referenzwerte.

Die Angaben der Toxine erfolgen in Mikrogramm bzw. Nanogramm pro Gramm Staub oder Material ($\mu g/g$ bzw. ng/g).

Feuchte- und Temperaturmessungen

Zum Nachweis raumklimatischer und bauphysikalischer Ursachen von mikrobiellen Schäden oder zur Risikoabschätzung. Mit geeigneten Thermometern, Hygrometern, Baufeuchtemessgeräten, Klima-Datenloggern, modularen Systemen...

Diesbezügliche Messungen sind mit ausreichend genauen und geeichten Thermometern, Hygrometern und Baufeuchtemessgeräten vorzunehmen.

Bewertungen der Luftfeuchte und von Oberflächentemperaturen sollten - wenn nötig - auf Langzeitmessungen mit Klima-Datenloggern beruhen. Entsprechende Messungen sind in der der Fragestellung angemessenen Jahreszeit bzw. Witterung durchzuführen: Bei der Untersuchung von Kondensationsproblemen an kühlen Außenwandbereichen in oberirdischen Räumen sollten entsprechend kühle Außentemperaturen herrschen, je kühler desto besser; Untersuchungen von Kondensationsproblemen in Keller- bzw. Souterrainräumen sind in der Regel nur im Sommer und Herbst sinnvoll.

Bei Messungen der Luftfeuchte und von Oberflächentemperaturen ist das Nutzerverhalten mit zu beachten bzw. zu protokollieren.

Bei der Raumluftfeuchte sind sowohl die relative als auch die absolute Feuchte zu ermitteln. Bei Kurzzeitmessungen ist auf die ausreichende Akklimatisierung der Sensoren zu achten, speziell beim Überführen der Messgeräte von draußen nach drinnen. Die Geräte sind weit genug vom Körper bzw. dem Mund entfernt zu halten, um Beeinflussungen zu vermeiden.

Oberflächentemperaturen können mit Kontaktthermometern oder -berührungsfrei und bequemer - mit Infrarot-Laserthermometern gemessen werden. Speziell bei letzterem sollten möglichst Vergleiche am selben Material vorgenommen werden, bei Oberflächen mit stark unterschiedlichem Reflektionsverhalten sind die entsprechenden Emissionsgrade zu beachten bzw. einzustellen.

Baufeuchtemessungen sind zunächst orientierend zerstörungsfrei per Hochfrequenzverfahren vorzunehmen, dann an verdächtigen Stellen weiter per Oberflächen- und/oder Einstechelektroden über die elektrische Leitfähigkeit an der Oberfläche und in verschiedenen Tiefen. Bei den Leitfähigkeitsmessungen ergeben sich zumeist Werte in Holzfeuchteäquivalenten oder Geräte-spezifischen Digits. Bei Leitfähigkeitsmessungen zu beachten sind Fehlermöglichkeiten durch versalzete Baustoffe oder Metalle bzw. andere elektrisch leitfähige Schichten, Baustoffe und Anstriche. Hilfreich kann die Messung der Luftfeuchte im Material an frisch angefertigten Bohrlöchern sein, in die der Feuchtesensor eingeführt und zur Raumluft hin abdichtet wird.

Untersuchungen des Leitungs- und Trinkwassers oder von Lebensmitteln

Zur Kultivierung und Zählung auf Nährböden. Mit Petrischalen, Eintauchnährböden, Dip Slides, Contact Slides, Keimindikatoren, "Paddeln"...

Bei Wasserproben (Trinkwasser, Leitungswasser, Wasserfilter, -verwirbler, -sprudler, -vorsätze, -vorräte..., Zier- und Springbrunnen...) geht es vornehmlich um Bakterien, ab und zu um Schimmel- und Hefepilze. Für den ersten vergleichenden Eindruck reicht das Einbringen von Eintauchnährböden bzw. "Paddeln" in die Flüssigkeit und die folgende Bebrütung (eventuell bei zwei Temperaturen: Raumtemperatur 20-25 °C und Körpertemperatur 37 °C), Zählung und - wenn sinnvoll bzw. gewünscht - Identifizierung der Keimart(en) im mikrobiologischen Fachlabor.

Bei Verdacht auf mikrobiologische Kontamination der Wasserinstallation des Hauses durch z.B. Biofilme sind zur Eingrenzung des Problems mehrere Proben an verschiedenen Zapfstellen und zu verschiedenen Zeiten sinnvoll und als Referenz mit dem gelieferten öffentlichen Wasser zu vergleichen.

Für genauere Wasseranalysen sind bei der Probenahme und Laborauswertung die Vorgaben der Trinkwasserverordnung zu beachten (abgeflämmt Wasserhähne, Plattengussverfahren...).

Bei Lebensmitteln geht es vor allem um Hefepilze (Gemüse, Obst, Milchprodukte, Wurst, Käse, Aufschnitt, Eingelegtes..., speziell roh und aus offenen Theken, auch Saftpressen, Küchenmaschinen, Keimgeräte, Yoghurtbereiter, Abfälle, Kompost...), manchmal auch um Schimmelpilze (Tees, Nüsse, Getreide, Getreidemöhlen...). Lebensmittel können für orientierende Zwecke direkt für einige Sekunden mit geeigneten Nährböden (Petrischalen, Rodacplatten, "Paddeln") in Kontakt gebracht oder mit Tupfern beprobt und dann bebrütet und ausgewertet werden.

Die Angaben der Keimzahlen erfolgen pro Milliliter Wasser ($/ml$), pro Fläche der Festprobe (z.B. $/cm^2$) oder als Eindruck pro Nährboden ($/Agar$).

4 HAUSSTAUBMILBEN und andere Allergene

Messung bzw. Bestimmung der **Milbenzahl** und **-exkrement, Pollen, Tierhaare, Allergene**

Messung der Konzentrationen im Staub (Mikrogramm pro Gramm, $\mu g/g$), auf Oberflächen (pro Quadratmeter, $/m^2$) oder in der Raumluft (Nanogramm pro Kubikmeter, ng/m^3) mit Vortestverfahren, Mikroskop und Probenahmen mit Fachlaboranalyse

Vortestverfahren: Für Milbenallergene gibt es orientierende Vor-Ort-Tests (Allergen Control, Acarex-Test z.B. aus der Apotheke), mit denen an

Oberflächen bzw. im Hausstaub die Konzentrationen eines milbenspezifischen Stoffwechselproduktes (Guanin) oder der Milbenallergene grob über Teststreifen-Verfärbungen abgeschätzt werden können. Gut für erste Eindrücke bei Nachweisempfindlichkeiten von etwa 100 Milben oder 2 µg Allergene pro Gramm Staub.

Mikroskopie: Milben können bei der Untersuchung von Hausstaub im Mikroskop gezählt werden (100 Milben pro Gramm Staub gelten orientierend als hygienischer Grenzwert). Pflanzenpollen werden mittels Burkhardfalle gesammelt und lichtmikroskopisch ausgezählt, geeignet hierzu sind auch Partikel- bzw. Schlitzsammler mit Klebefilm-Objektträgern (siehe auch unter C).

Staubprobenahme mit Fachlaboranalyse: Hausstaub kann wie bei B3 gewonnen und im Labor per ELISA (enzyme-linked immuno sorbent assay) mit Hilfe von Nachweisantikörpern recht genau auf die Konzentrationen unterschiedlichster Allergene (Milben, Katzen...) hin untersucht werden. Als Resultat erhält man massebezogene Konzentrationsangaben in z.B. Mikrogramm pro Gramm (µg/g).

Luftprobenahme mit Fachlaboranalyse: Mit einer Probenahmepumpe samt Allergensammel- bzw. -filtrieraufsatz wird aus mehreren Hundert bis mehreren Tausend Litern Luft eine Probe auf einem Filter oder einem Mikrotiterstreifen gewonnen und im Fachlabor aufgearbeitet bzw. per ELISA analysiert. Als Resultat erhält man eine volumenbezogene Konzentrationsangabe in Nanogramm pro Kubikmeter (ng/m³).

Der mehrteilige Standard der Baubiologischen Messtechnik nebst Richtwerten für Schlafbereiche wurde in den Jahren 1987 bis 1992 von der **BAUBIOLOGIE MAES** auf Wunsch und mit Unterstützung des Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN entwickelt. Kollegen und Ärzte haben mitgeholfen. Er wurde erstmals im Mai 1992 publiziert. Der Standard mit seinen hierzugehörigen Richtwerten, messtechnischen Randbedingungen, Erläuterungen und Ergänzungen sowie Leitsätzen werden seit 1999 durch eine etwa zehnköpfige Standard-Kommission von erfahrenen baubiologischen Sachverständigen mit zusätzlicher Hilfe von unabhängigen Wissenschaftlern aus den Bereichen Physik, Chemie, Biologie und Architektur sowie von Laboren, Umweltmedizinern und anderen Experten gestaltet.

Die Entwicklung, Gestaltung, Aktualisierung, Komplettierung, Verbesserung... des Standards, der Richtwerte und der messtechnischen Randbedingungen erfolgte bis 2019 federführend durch Wolfgang Maes. Fachlich begleitend und beratend beteiligt waren an erster Stelle die Mitarbeiter der Baubiologie Maes Dr. Dipl.Biol. Manfred Mierau und Dr. Dipl.Chem. Thomas Haumann. Dann die Mitglieder der aktuellen Standardkommission Christian Blank, Dipl.Ing. Joachim Gertenbach, Dr. Dipl.Chem. Thomas Haumann, Bernd Kinze, Dipl.Ing. Friedbert Lohner, Dr. Dipl.Biol. Manfred Mierau, Karlheinz Müller, Johannes Schmidt, Peter Sierck und Stephan Streil. Weiterhin unterstützend und beratend im Laufe der Jahre tätig waren unter anderem Dipl.Ing. Peter Danell, Dipl.Ing. Norbert Honisch, Dipl.Med. Frank Mehlis, Dipl.Ing. Helmut Merkel, Dipl.Ing. Jürgen Muck, Uwe Münzenberg, Dipl.Chem. Jörg Thumulla, Rupert Schneider, Arch. Winfried Schneider und Dr. Dipl.Ing. Martin Virnich.

Der 1. Entwurf der Randbedingungen, Erläuterungen und Ergänzungen wurde auf dem baubiologischen Messtechniker-Workshop im April 2010 in Fulda-Loheland vorgestellt, der 2. Entwurf auf dem Messtechniker-Workshop im Dezember 2011 und die 3. Version auf dem Basis-Seminar zum Thema 'Baubiologische Messtechnik' im Oktober 2012 ebenfalls in Fulda-Loheland, die 4. Version wurde nur in Details überarbeitet und der 5. Entwurf auf dem IBN-Kongress im Mai 2015 in Rosenheim präsentiert.

Der aktuelle SBM-2024 ist die 9. Ausgabe, vorgestellt im August 2024.

Anregungen für Ergänzungen und Aktualisierungen des Standards, der Richtwerte und Randbedingungen von Kollegen aus der baubiologischen Praxis sind willkommen.