
EMPA

Dübendorf



Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
für Industrie, Bauwesen und Gewerbe

Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et institut de recherches
pour l'industrie, la construction et les arts et métiers

Laboratorio federale di prova dei materiali ed istituto sperimentale
per industria, genio civile, arti e mestieri

AIRBASE
N° 986
WTCB/CSTC

EMPA-Bericht Nr. : 34'020

Luftwechsellmessungen in nichtklimatisierten Räumen unter dem Einfluss von Konstruktions- und Klimaparametern

Forschungsarbeit im Auftrag des Eidgenössischen Amtes für Umweltschutz

Auszug Bericht I

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
Buchstabensymbole	4
Sinnbilder in Schemata	6
1. Einleitung	7
1.1. Begriffe	8
1.2. Motivation für die Durchführung der laufenden Forschungsarbeit	10
1.3. Literaturübersicht, Kommentare	12
1.4. Zielsetzung der Forschungsarbeit	17
2. Theoretische Grundlagen	18
2.1. Physikalische Gesetzmässigkeiten im Zusammenhang mit dem Luftaustausch in einem Raum	18
2.2. Grundgleichungen für stationäre Luftaustauschvorgänge am Gebäude	20
2.2.1. Druckverteilung bei einem Gebäude unter dem Einfluss von Wind- und Auftriebskräften	20
2.2.2. Fenster und Türen als Widerstandselemente für Strömungen im Gebäude	24
2.3. Klassierung der Einflussfaktoren auf den Luftaustausch bei einem Gebäude	25
2.4. Grundlagen zur Messtechnik des Luftaustausches in Räumen oder Gebäuden	27
3. Ziele der experimentellen Untersuchungen; vereinfachende Annahmen	31
4. Versuchseinrichtung und Durchführung	33
4.1. Versuchseinrichtung	33
4.1.1. Konzentrationsmessung	33
4.1.2. Windmessung	34
4.1.3. Druckdifferenzmessung	34
4.1.4. Temperaturmessung	40
4.1.5. Luftfeuchtigkeitsmessung	40

4.2. Versuchsdurchführung	40
4.3. Vorversuche	40
4.3.1. Versuchsziele bei Vorversuchen, Auflistung	41
4.3.2. Absorption der Schläuche	41
4.3.3. Absorption von typischen Baumaterialien	43
4.3.4. Erste Messungen in einem Raum	47
4.3.5. Konzentrationsverteilung im Raum	48
4.3.6. Vergleichsmessungen "Uras" / "Miran"-Konzentrations- Messgeräte	51
4.3.7. Dynamik des Konzentrationsmess-Systems	53
4.3.8. Einfluss der Messleitungsdynamik auf die Erfassung von Differenzdruck-Werten	54
4.3.9. Totale Messfehler bei der Bestimmung der Luft- wechselzahl aus Gaskonzentrationsmessungen	55
 6. Messresultate	 61
6.1. Beispiel einer Auswertung	61
6.1.1. Versuchsobjekt	61
6.1.2. Anordnung der Messstellen	65
6.1.3. Auswertebeispiel der Messstreifen	67
6.1.4. Zusammenstellung der Messwerte	74

Anhang: Literaturübersicht

Ausgefallene Seiten aus Bericht I:

3, 7, 58-60, 75 ff

EMPA

Dübendorf

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt**
für Industrie, Bauwesen und Gewerbe**Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et institut de recherches**
pour l'industrie, la construction et les arts et métiers**Laboratorio federale di prova dei materiali ed istituto sperimentale**
per industria, genio civile, arti e mestieri

EMPA-Bericht Nr. : 34'020

AIRBASE

N° 986

WTGB/CSTC

Luftwechsellmessungen in nichtklimatisierten Räumen unter dem Einfluss von Konstruktions- und Klimaparametern

Forschungsarbeit im Auftrag des Eidgenössischen Amtes für Umweltschutz

Auszug Bericht I

Buchstaben - Symbole



















Ueblicherweise verwendete SI-Einheit

A	Fläche	m^2
a	Absorptionskoeffizient	$[-]$
a	Fugendurchlasskoeffizient	$m^3_n / h \ m \ Pa^{2/3}$ $(m^3_n / h \ m \ (mm \ WS)^{2/3})$
C	Konzentration	$[-]$ oder %
c	spezifische Wärmekapazität	$kJ/kg \ K$
c_p	spez. Wärmekapazität bei konstantem Druck für Gase	$kJ/kg \ K$
d	Dicke	m
E	Energie	J
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Höhe, Gebäudehöhe	m
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/m^2 \ K$
l	Länge, Fugenlänge	m
M	Molekularmasse	g/Mol
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n_L	Luftwechselzahl	h^{-1}
p	Druck	$Pa \ (mm \ WS)$
P	Leistung	W
Q	Wärmemenge	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m^2
R	allgemeine Gaskonstante	$J/kg \ K$
T	Temperatur absolut	K
T	Zeitkonstante	s
t	Zeit	$s \ (h)$
V	Volumen	m^3
v	spezifisches Volumen	m^3/kg
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s

v	Luftgeschwindigkeit	m/s
\dot{V}_L	Luftwechselrate	m ³ /h
x	Wassergehalt der Luft	[-] oder g/kg
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
ϑ	Windrichtung	° (360°-Teilung)
Δ	Differenz von	-
η	dynamische Viskosität	Pa.s
ϑ	Temperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m K
v	Dämpfung	-
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
φ	relative Luftfeuchtigkeit	%

<u>Indizes</u>	<u>Bedeutung</u>
a	aussen
eff	effektiv
F	Fenster
ger	gerechnet
ges	gesamt
ho	horizontal
i	innen
L	Luft
O	Oberfläche
st	statisch
tang	tangential
vert	vertikal
Wd	Wand
W	Wind
R	Raum

Sinnbilder in Schemata

	elektrische Signale (Uebertragungsleitung in Blockschaltbild)
	pneumatische Signale
	Gasgemisch-Signale
	Luftkanal
	Flüssigkeitsleitung
	Messgeber für Temperatur
	Messgeber für Feuchtigkeit
	Messgeber für Gaskonzentration
	Messgeber für Windgeschwindigkeit
	Messgeber für Windrichtung
 	Messgeber für Druck und Druckdifferenz
	Pumpe
	Ventilator
	Motor
	Anzeigegerät
	Messgerät allgemein
	Messgerät Registrierung

1. Einleitung

Der vorliegende Bericht ist ein Auszug aus dem Bericht I (z.T. auch Zwischenbericht genannt), EMPA-Bericht Nr. 34020, "Luftwechselfmessungen in nichtklimatisierten Räumen unter dem Einfluss von Konstruktions- und Klimaparametern".

Die Finanzierung dieser Forschungsarbeit liegt beim eidgenössischen Amt für Umweltschutz, das auch die Arbeit in periodischen Diskussionen begleitet.

Sowohl die Konzeption, als auch die Durchführung des Projektes geschieht durch Mitarbeiter der Abteilung Bauphysik der EMPA, 8600 Dübendorf, insbesondere durch R. Sagelsdorff, P. Hartmann und J. Pfiffner.

Im "Auszug Bericht I" sind folgende Gebiete relativ ausführlich behandelt:

- Literatur (Der Planung des Projektes liegt eine umfangreiche Literaturrecherche (Anhang) zugrunde)
- Theoretische Grundlagen (Bedeutung und Zielsetzung von Luftwechselfmessungen, physikalische Gesetzmässigkeiten im Zusammenhang mit dem Luftaustausch)
- Untersuchungen über die Tauglichkeit des Messverfahrens
- Untersuchungen möglicher Einflüsse von Materialien auf Messergebnisse
- Auswertung der registrierten Grössen

Im Bericht I sind die Versuchsergebnisse aus der Messperiode Winter 75/76 enthalten, die nur einen Teil der heute vorliegenden umfangreichen Resultate ausmachen. Deshalb war Bericht I nur in beschränkter Anzahl aufgelegt worden und ist nun auch vergriffen.

Um nun die erste grosse Messphase (Winter 1975/76 und 76/77) mit der Erfassung von realen Luftwechseldaten an verschiedenen Versuchsobjekten umfassend dokumentieren zu können, haben wir uns entschlossen, wichtige Teile des Berichtes I als "Auszug Bericht I" an die Seite des Berichtes II zu stellen. Die im Auszug nicht enthaltenen Abschnitte sind vollumfänglich, in leicht geänderter Form, in Bericht II enthalten.

1.1. Begriffe

In der Fachliteratur, aber auch in den einschlägigen Normen werden die Begriffe des hier behandelten Fachgebietes oft nicht gleichartig verwendet. Aus diesem Grund werden im folgenden all jene

- Begriffe, die im Zusammenhang mit Berechnungen Verwendung finden, mit ihren Symbolen und Einheiten in einer Liste aufgeführt,
- werden einschlägige Begriffe aus den Fachbereichen, Wohnhygiene und Lüftungstechnik nachfolgend so beschrieben, wie sie uns vom physikalischen Verständnis der Probleme her sinnvoll scheinen.

Die gesamte Forschungsarbeit behandelt im allgemeinen Fragen des Luftaustausches unter winterlichen Klimabedingungen, bei beheizten - also nicht klimatisierten - Bauten.

Der Luftaustausch in solchen Bauten kann mehr oder weniger unkontrollierbar erfolgen als sog. natürliche Lüftung (auch Selbstlüftung genannt), im wesentlichen unter dem Einfluss von Wind und Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen. Der Luftaustausch kann auch - hier nur am Rand vermerkt - durch eine Lüftungsanlage bewirkt sein, durch eine sog. "mechanische Lüftung". Eine Zwischenstufe zwischen diesen beiden Extrema ist in Wohngebäuden oft

anzutreffen, wenn innenliegende oder mit starker Geruchsstoff-/Feuchteproduktion belastete Räume mit einer mechanischen (Teil-) Entlüftung versehen sind. Wir wollen in diesen Fällen von Teil-entlüftung sprechen. Diese zusätzliche Entlüftung kann auch durch Schächte mittels Ausnutzung des Kamineffektes erfolgen (sog. Schachtlüftung).

In allen Gebäuden mit Ausnahme von vollständig belüfteten oder klimatisierten Gebäuden wird der Bewohner durch sein Verhalten in jedem Fall den Luftaustausch im Raum mitbestimmen. Diese Einflussnahme kann verschiedenartig, etwa mittels der Inbetriebnahme einer Teilentlüftungsanlage oder dem Öffnen von Fenstern, erfolgen. Sein Eingreifen mittels Fensteröffnen wird Fensterlüftung oder Stosslüftung genannt.

Handelt es sich darum, Luftaustauschvolumen zu beschreiben, die notwendig sind für die Einhaltung von geeigneten Raumkomfort-Bedingungen, so spricht man am besten von einer bestimmten Frischlufttrate pro Person und Zeiteinheit (manchmal auch "Frischluftzufuhr pro Person und Zeiteinheit" genannt). Selbstverständlich hängen diese Frischlufttraten davon ab, wie viel Luftraum pro Person zur Verfügung steht. Für die Frischlufttraten ist in entsprechenden Handbüchern i.a. unterschieden zwischen Mindestwerten (Mindestlufttraten) und empfohlenen Werten, wobei hier nicht auf die Hintergründe zum Fixieren solcher Werte eingegangen wird.

Wird der bei einem Raum ausgetauschte Luftvolumenstrom \dot{V}_L nicht auf die Zahl der anwesenden Personen bezogen, sondern auf den Rauminhalt V_R , so ergibt sich die

$$\text{Luftwechselzahl } n_L = \frac{\dot{V}_L}{V_R} \quad (1/h)$$

Von der Gebäudekonstruktion her ist der Luftaustausch zu einem grossen Teil durch die Luftdichtheit der Bauteile der Gebäudehülle bestimmt, durch die Luftdurchlässigkeit von Wänden, Dach, Fenstern, Türen. Wird diese Luftdurchlässigkeit bei Fenstern und Türen auf die Länge der vorhandenen Fugen (Fugenlänge l) bezogen, sowie auf eine definierte Luft-Druckdifferenz, so ergibt sich der Fugendurchlasskoeffizient a . - Eine für Energiebedarfsbetrachtungen interessante Grösse ist die Luftdurchlässigkeit, welche bezogen wird auf

die Bauteilfläche und einen definierten Differenzdruck (spezifische Luftdurchlässigkeit).

Hinsichtlich der Begriffe im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch, welcher durch den Austausch warmer Innenluft mit kalter Aussenluft entsteht, soll hier Rücksicht genommen werden auf verschiedene übliche Berechnungsverfahren und die einschlägigen Benennungen. Der Ausdruck Lüftungswärmeverluste soll dann Verwendung finden, wenn es bei der Systembetrachtung eines Gebäudes darum geht, die einzelnen Verlust-Wärmeströme zu bestimmen. Aus diesen Verlustströmen entsteht für die Heizanlage ein momentaner Wärmeleistungsbedarf, resp. aufsummiert über eine bestimmte Heizperiode ein entsprechender Heizenergieverbrauch.

Es soll stets vermerkt werden, ob es sich dabei um Lüftungswärmeverluste (oft kurz auch Lüftungsverluste genannt) handelt, die auf natürliche Lüftung, auf mechanische Lüftung oder auf den Einfluss der Benützer zurückzuführen sind.

Der sog. Mindest-Lüftungswärmebedarf ist jener Wärmebedarf, der durch die minimal vorgeschriebene Frischluftzufuhr bei einem Gebäude verursacht wird.

Für die Berechnung der Lüftungswärmeverluste sind die sog. Luftwechsel-Methode ("air-change-methode") und die Fugenverlustmethode ("crack method") geläufig.

1.2. Motivation für die Durchführung der laufenden Forschungsarbeit

Die Durchführung des laufenden Projektes geht zurück auf einen Bundesauftrag der Eidg. Kommission für Lufthygiene vom 23. Juli 1971 sowie ein entsprechendes Sitzungsprotokoll dieser Kommission vom 8. Mai 1972. Darin wurde der EMPA die Aufgabe übertragen, verbesserte Unterlagen über den Luftwechsel in realen Räumen zu beschaffen.

In jener Zeit wurden folgende Tatsachen als Mangel empfunden:
(vgl. auch Literaturangaben in 1.3 und im Anhang)

- in einem entsprechenden Schreiben des Präsidenten der genannten Kommission wird ausgesagt, dass die Luftwechselzahlen in neuen Bauten, solange Fenster und Türen nicht geöffnet werden, nach neuesten Literaturangaben in der Grössenordnung von $0,3 - 0,7 \text{ h}^{-1}$ liegen. Ausnahmsweise könne der Wert auf $1 \div 2,5 \text{ h}^{-1}$ ansteigen. Diese Angaben, ohne genaue Kenntnis der Einflussfaktoren, waren zu vage.
- Einflussuntersuchungen über die Einwirkung des Benutzers auf den Luftwechsel fehlten fast vollständig.
- Untersuchungen über den Luftwechsel in schweizerischen Bauten verschiedener Konstruktion, verschiedenen Alters, verschiedener Windexposition fehlten fast vollständig.
- Ein Zusammenhang zwischen den in unserem "Schlagregenprüfstand" messbaren a-Werten für Fenster und dem in einem Raum mit entsprechenden Fenstern vorhandenen Luftwechsel war noch kaum zu erkennen.

Bereits vor der sog. "Energiekrise" des Herbstes 1973 stellte sich im Laufe einer theoretischen Untersuchung (EMPA-Bericht Nr.18050/2 vom 23. Juli 1973) heraus, welcher bedeutenden Anteil die Lüftungsverluste am Gesamt-Energieverlust ausmachen können. Eine detailliertere, vor allem durch praktische Messungen zu untermauernde Forschung drängte sich deshalb auf, zumal die Transmissionsverluste bereits in jener Zeit weit besser erfassbar waren als die Lüftungsverluste.

Diese Einsicht verdichtete sich im Laufe der nun beschriebenen Forschungsarbeit durch die Aussagen namhafter Fachleute, von denen einige zitiert seien:

- G.K. (Herausgeber) in KI, Nr. 10 / 1976, S. 42:
"Erhöhter Wärmeschutz ist ohne kontrollierte Lüftung sinnlos";
- Dr. K. Fantl in CCI, Nr. 3 / 1977, S. 22:
"Das Fenster hat entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch eines Hauses Neben der Schaffung und Sicherung eines guten Allgemeinzustandes der Fensterkonstruktion muss auch der Handhabung und dem Betrieb des Fensters mehr Beachtung geschenkt werden, als dies oft der Fall ist."
- E.R. Ambrose in HPAC, Nov. 1975 (L 1/37):
"Research and development necessary:
Additional research is needed, to establish factual minimum quantities of outdoor ventilation air for the health and safety of the occupants under various operation conditions for both residential and commercial conditions."

1.3. Literaturübersicht, Kommentare

Es war ein besonderes Anliegen, die Forschungsarbeit auf bereits vorhandenen Literaturangaben aufzubauen, und durch Kontakte mit ausländischen Forschungs-Instituten gegenseitige Anregungen zu vermitteln.

Bereits in der Planungsphase wurde eingehend untersucht, welche Untersuchungen im einschlägigen Fachgebiet bereits bestehen würden. Insbesondere aber während der Durchführung der Arbeit entstand eine weite Literatursammlung, die im Anhang zusammengestellt ist. Um Lesern einen Einblick zu vermitteln, wird nachfolgend zu den einzelnen Gruppen von Literaturstellen ein kurzer Kommentar abgegeben, werden ausserdem im Anhang bei jeder Literaturstelle einzeln Anmerkungen abgegeben.

Die Literaturzusammenstellung ist in nachfolgende Gruppen von Unterlagen aufgeteilt:

- 1 Wohnhygiene-Aspekte zu Luftwechsel, Empfehlungen über notwendige Luftwechselraten
- 2 Luftwechsel, energetische Aspekte
- 3 Luftwechselbestimmung, Messtechnik
- 4 Untersuchungen zu Strömungs- und Druckverhältnissen an der Gebäudehülle
- 5 Untersuchungen über die Strömungs- und Druckverhältnisse in Räumen und Gebäuden
- 6 Theoretische Grundlagen, Berechnungsverfahren für Luftwechselrate
- 7 Untersuchungen zu Detaileinflüssen zu Luftwechsel (Wind, Temperatur, Baukonstruktion)
- 8 Praktische Messresultate für Luftwechsel
- 9 Praktische Messresultate über den Einfluss der Benutzer auf den Luftwechsel
- 10 Berechnungsregeln zu Wärmebedarf unter Einbezug der Lüftungsverluste
- 11 Kontrollierte Lüftung ↔ Freier Lüftungsbetrieb
- 12 Umfassende Literaturverzeichnisse

Die nachfolgenden Kommentare geben in kurzen Zügen an, wie der heutige Stand der Technik auf einem bestimmten Gebiet ist, bei welchen Gruppen die Zusammenstellung umfassend ist, wo in einer späteren Bearbeitung zusätzlich Anstrengungen notwendig sind.

- Die Gruppe 1 (Wohnhygiene Aspekte / notwendige Luftwechselraten) umfasst sehr vielseitige Dokumente unterschiedlicher Provenienz. Manche der Empfehlungen gehen auf Zeiten zurück, in denen einerseits die Luftverschmutzung in Wohngebieten noch nicht so hoch, andererseits die Energiekosten bei hohen Luftwechselraten noch nicht bedeutungsvoll waren.

Als ein Beispiel einer neueren Empfehlung sei der in Fig. 1 dargestellte Zusammenhang zwischen verfügbarem Raumvolumen pro Person und der notwendigen Frischlufttrate, in Abhängigkeit von Rauchgewohnheiten und Nutzung zitiert (aus L 8/14, Kap. 36).

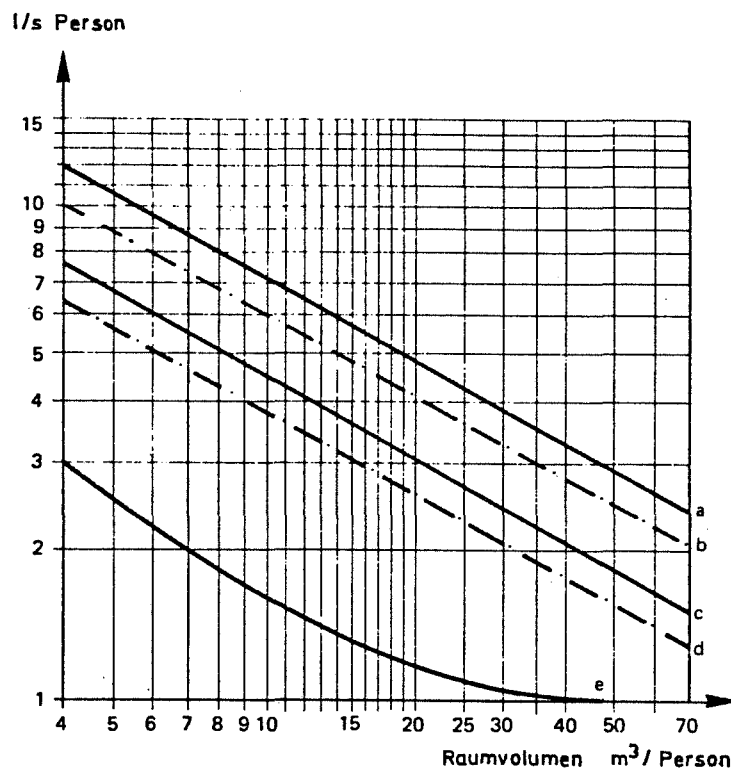


Fig. 1:

Erforderliche Frischluftzufuhr:

Die erforderliche Frischluftmenge wird aus dem Diagramm so ermittelt, dass von der grössten Anzahl gleichzeitig anwesender Personen ausgegangen wird, für die der Raum vorgesehen ist (mindestens aber $0,35 \text{ l/s m}^2$ Bodenfläche).

- Kurve a: Raum, in welchem mit Rauchen gerechnet werden muss
- Kurve b: Raum, in welchem mit Rauchen gerechnet werden muss, vorgesehen für mehr als 20 Personen
- Kurve c: Raum, in welchem nicht mit Rauchen gerechnet werden muss.
- Kurve d: Raum, in welchem nicht mit Rauchen gerechnet werden muss, vorgesehen für mehr als 20 Personen
- Kurve e: Erforderlicher Zuschlag zum Wert des Diagrammes für Arbeitsräume ohne leicht zu öffnende Fenster.
- Die Gruppe 2 (Luftwechsel, energetische Aspekte) vermittelt Grundlagen zum Gebäudeenergiehaushalt unter Einbezug der Lüftungsverluste. Im allgemeinen sind die Betrachtungen ohne Einbezug der Benutzer-Einflüsse durchgeführt, was zu starken Verzerrungen der realen Verhältnisse führen kann. Die Gruppe 10 vermittelt ergänzende Unterlagen zu diesem Abschnitt.

Eine wohl recht vollständige Uebersicht über messtechnische Möglichkeiten zur Erfassung des Luftaustausches vermitteln die Literaturstellen in Gruppe 3. Es sind insbesondere Darstellungen zur Methode der "Tracer-Gas-Technik" wie auch zur Methode der Ermittlung des Luftverlustes von Räumen oder Gebäuden in Funktion eines bestimmten Ueberdruckes, der mittels eines Gebläses künstlich erzeugt wird.

Sowohl die Zusammenstellung in Gruppe 4 als auch in Gruppe 5 hat noch etwas zufälligen Charakter. Immerhin kommt die immer wieder bestätigte Erfahrung eindeutig zum Ausdruck, wie schwierig es ist, bei realen Gebäuden Druck- und Strömungsverhältnisse zu messen. Besonders problematisch im Zusammenhang mit Lüftungsverlust-Berechnungen ist die Angabe vernünftiger Differenzdruckwerte, sei es für Auslegungsberechnungen oder für Momentanwertberechnungen.

In Gruppe 6 (Theoretische Grundlagen, Berechnungsverfahren für Luftwechselrate) sind neben theoretischen Grundlagen Literaturangaben gesammelt, welche versuchen, den Luftwechsel in Räumen in Abhängigkeit gewisser Einflussparameter (z.B. Windgeschwindigkeit, Uebertemperatur) zu berechnen. Allgemein verwendbare Verfahren bestehen nicht, da die bisher beschriebenen Methoden z.B. Koeffizienten enthalten, die auf Messungen an bestimmten Fensterkonstruktionen beruhen, die kaum übertragbar sind.

Sehr vielseitige Einflussuntersuchungen zu den Luftdurchlässigkeiten der Einzelkomponenten der Gebäudehülle so wie zu bestimmten physikalischen Problemen sind in Gruppe 7 zusammengefasst.

Die praktischen Messresultate in Gruppe 8 wurden von uns sehr eingehend bewertet. Oft sind sie mit theoretischen Betrachtungen verknüpft worden. Besonders hervorzuheben ist die kürzlich erschienene Forschungsarbeit Nr. L 8/13 (Prof. Esdorn), die zu ähnlichen Messresultaten führte, wie sie hier nachfolgend beschrieben werden.

Die Gruppe 9 der Untersuchungen über den Einfluss der Benutzer auf den Luftwechsel ist noch klein; es sind wirklich erst wenige Untersuchungen durchgeführt worden, obwohl der Effekt unmässigen Fensterlüftens erwiesenermassen viel grösser ist als die Auswirkungen etwas undichter Fenster.

Die Berechnungsregeln in Gruppe 10 (Berechnungsregeln zu Wärmebedarf unter Einbezug der Lüftungsverluste) sind in vielen Belangen nicht auf neuesten Stand der Technik gebracht, wohl vor allem deshalb, weil die notwendigen Grundlagenuntersuchungen fehlen.

Gruppe 11 enthält Literatur zum aktuellen Thema "Wohnungslüftung, kontrolliert oder unkontrolliert", insbesondere erste Vergleichsmessungen und gerätetechnische Unterlagen.

In Gruppe 12 ist durch die Kopie von Literaturverzeichnissen aus wichtigen Grundlagen-Publikationen der Kreis dieser Literaturzusammenstellung noch erweitert worden (Abgabe auf Anfrage).

1.4. Zielsetzung der Forschungsarbeit

Das im Jahr 1975 begonnene Forschungsprojekt verfolgt folgende Ziele:

- Zunächst sollte ein leistungsfähiges Messverfahren entwickelt werden zur Erfassung des Luftwechsels und aller notwendigen Randbedingungen in Räumen oder Raumgruppen
- Gezielte Messungen in typischen Räumen oder Raumgruppen unter Einbezug der wichtigsten
 - konstruktiven,
 - klimaabhängigen und
 - nutzungsbedingten Einflussgrößensollten neue Erkenntnisse über den effektiven Luftwechsel bringen.
- Der praktische Nutzen der Messresultate soll in der Bereitstellung zuverlässiger Grundlagen für heizungstechnische und bauphysikalische Berechnungsformeln bestehen. Ausserdem dürften die Resultate auch als Entscheidungshilfe bei der Festlegung von Qualitätsnormen für Bauteile wie Wände, Fenster, Türen dienen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Physikalische Gesetzmässigkeiten im Zusammenhang mit dem Luftaustausch in einem Raum

Es sei vorausgeschickt, dass Grundlagen zum nachfolgenden Kapitel den Publikationen Esdorn L 8/13, Malinowski L 6/2, Esdorn L 6/7, Benndorf L 6/11, Warren L 8/8, Rietschel/Raiss L 4/10, Wiedenhoff L 1/16 und Reinders L 1/7 zu entnehmen sind.

Grundsätzlich sind 4 Strömungsphänomene am Austausch der Luft in einem Raum beteiligt:

- a) - Durchströmung des Raumes (Oeffnungen vorhanden, die auf verschiedenen Druckniveaus stehen)
- b) - Pulsierende Strömung bei Oeffnungen (wenn alle Oeffnungen in derselben Fassade, auf demselben Druckniveau liegen, oder wenn der Druck bei einer einzelnen Oeffnung zeitlich stark variiert)
- c) - Luftaustausch durch ins Gebäude hinein wirkende Wirbel (ähnlich Wirbeln, wie sie im Herbst mit rotierenden Blättern auf der Strasse zu sehen sind)
- d) - Diffusionsströmungen durch kleinste Oeffnungen der Umhüllungsflächen.

"Treibende Kräfte" für die Austauschvorgänge sind also entweder Druckdifferenzen oder die Molekularbewegung der Gasmoleküle.

Den entsprechenden Gasströmungen setzen sich die Strömungs-Widerstände der Raumhüllen-Bauteile entgegen (Fenster, Türen, Wände). Ursachen für das Entstehen von Druckdifferenzen über den Hüllen-Bauteilen sind

- Druckkräfte des Windes oder
- Unterschiede in der Temperatur zwischen Aussen- und Innenluft resp. bei verschiedenen Räumen im Haus (→ Kamineffekt).

Selbstverständlich können sich diesen Druckdifferenzen jene überlagern, die z.B. durch Entlüftungsanlagen erzeugt werden.

Für Aspekte der Wohnhygiene wie des Gebäude-Energiehaushaltes ist es sehr wichtig, ob der Austausch der Raumlufte direkt mit der Aussenluft geschieht, oder ob eine Abströmung (oder Zuströmung) in einen oder mehrere Nachbarräume stattfindet. Eine messtechnische Unterscheidung der Vorgänge ist mittels gewissem Aufwand möglich.

In vielen Publikationen sind rauminterne Strömungen nicht im Detail betrachtet, wie sie vor allem durch die in a) und b) genannten Phänomene, dann aber auch durch das Einwirken von Oberflächen ungleicher Temperatur entstehen (Umwälzung bei Heizkörpern). Während bei leeren Räumen der interne Austausch so rasch abläuft, dass er kaum in Betracht gezogen werden muss im Zusammenhang mit Luftwechsel- / Wohnhygieneprobleme, sind diese Aspekte bei möblierten Räumen doch zu beachten.

Für eine stationäre Betrachtung der Vorgänge (Grundgleichungen siehe Kapitel 2.2.) sind die notwendigen Berechnungsgrundlagen vorhanden, vor allem für einfach konzipierte Räume oder Häuser. Nur sind die Vorgänge in Wirklichkeit so von der Dynamik der Einflussfaktoren geprägt, z.B. den dynamischen Schwankungen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und damit verbunden der Lufttemperaturen, den dynamischen Benutzereinflüssen, dass eine stationäre Betrachtungsweise problematisch bleibt (vgl. Warren, L 8/8).

Bei allen nachfolgenden Betrachtungen des "Luftwechsels" handelt es sich um "quasistationäre Betrachtungen", bei denen über einer bestimmten Zeitdauer die Bilanz über die zu- und abgeströmten Luftvolumina zum Ausdruck kommt. Alle Randbedingungen bei solchen Messwerten können also nur als Mittelwerte über dieser Zeitdauer fixiert werden (vgl. Bargetzi, Hartmann, Pfiffner L 8/15).

Grundlagen zur Berechnung der Mindestluftstraten in Abhängigkeit von Feuchtigkeitsabgabe und CO_2 -Produktion der Menschen sind z.B. in der Publikation Wiedenhoff L 1/16, oder Reinders L 1/7 wiedergegeben, sollen hier aber vorläufig noch nicht detailliert werden.

2.2. Grundgleichungen für stationäre Luftaustauschvorgänge am Gebäude

Es kann in diesem Abschnitt nicht darum gehen, jene Vorgänge zu beschreiben, wie sie unter dem realen (dynamischen) Verhalten des Windes am Gebäude ablaufen. Dynamische Betrachtungen besitzen ihre Bedeutung für die Beurteilung maximaler mechanischer Beanspruchungen der Konstruktion. Für die Beurteilung der Lüftungsverluste muss im allgemeinen eine quasistationäre Betrachtung mit

- mittlerer Windgeschwindigkeit
 - mittlerer Windrichtung
 - konstanten Lufttemperatur-Differenzen zwischen innen und aussen
- über der Beobachtungsperiode genügen. Ansätze zu einer dynamischen Betrachtung der Durchlüftung von Bauten sind vorhanden in L 8/8 und L 8/5.

2.2.1. Druckverteilung bei einem Gebäude unter dem Einfluss von Wind- und Auftriebskräften

Für die Ausbildung einer Strömung durch ein Bauelement der Raum- bzw. Gebäudehülle hindurch spielt zunächst einmal die vorhandene Druckdifferenz über dem Element eine Rolle. Druckdifferenzen bauen sich auf aus der Ueberlagerung von Windeinwirkung und thermischen Effekten. Für eine übersichtlichere Darstellung der Phänomene können die genannten beiden Teileinwirkungen voneinander getrennt werden. Es ist auch in der Realität durchaus möglich, dass beispielsweise in der Uebergangszeit keine Auftriebsströmungen stattfinden, sondern ausschliesslich Strömungen unter dem Einfluss des Windes.

Windeinwirkung und Druckverteilung auf den Fassaden eines Gebäudes

Beim Auftreffen des Windes auf ein Gebäude verringert sich die Geschwindigkeit. Ein Teil der kinetischen Strömungsenergie wird in potentielle Druckenergie umgewandelt. Dies führt zur Erhöhung des Drucks an der angeströmten Aussenwand. Im Staubereich vergrössert sich demzufolge der örtliche Druck um den Staudruck der ungestörten Strömung. An den mehr oder weniger parallel beströmten Seitenwänden des Gebäudes nimmt hingegen die Geschwindigkeit zu; es sinkt dort der örtliche Druck.

Die durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten an den Oberflächen erzeugten Druckunterschiede sind im wesentlichen von der Gebäudeform und dem Anströmwinkel abhängig.

Für übliche Gebäudeformen sind die Druckverteilungen in Abhängigkeit des Anströmwinkels bekannt. Diese Kenntnisse fussen auf Modellversuchen im Windkanal wie auch auf Messungen an realen Bauten. - Bei verwinkelten Gebäudeformen, unter dem Einfluss von Balkonen oder vorgesetzter Blenden sowie infolge der Einwirkung von Nachbargebäuden werden die Druckverteilungen so kompliziert, dass in vielen Fällen eine Abschätzung nicht möglich ist.

Druckverteilung in Gebäuden ohne Lüftungsanlagen unter dem Einfluss von thermischen Auftriebskräften

Für einen einzelnen Raum seien die Verhältnisse betrachtet, wenn seine Innentemperatur ϑ_i (T_i) über die Temperatur ϑ_a (T_a) der Umgebung erhöht wird.

Für die Abhängigkeit des Drucks von der Höhe Z gilt die sog. barometrische Höhenformel (ausgehend von ausgeglichener Zone)

$$p(Z) = p_0 \cdot e^{\frac{-\varrho_0}{p_0} \cdot g \cdot Z} \approx p_0 \left(1 - \frac{\varrho_0}{p_0} \cdot g \cdot Z\right)$$

Da die Dichte ϱ von der Temperatur abhängt ($\varrho = \varrho_0 \cdot \frac{T_0}{T}$), entsteht zwischen Innen- und Aussenluft folgende Druckdifferenz (vgl. Fig. 2):

$$\Delta p(Z) = p_i(Z) - p_a(Z) \approx (\varrho_{0a} - \varrho_{0i}) \cdot g \cdot Z = g \cdot Z \cdot \varrho_{0i} \left(\frac{T_i}{T_a} - 1\right)$$

Es sei vorausgesetzt, dass die Wände völlig dicht seien, abgesehen von Oeffnungen O (Fenster), die schematisch in halber Höhe vorliegen.

In Fig. 2 ist die entsprechende Druckverteilung an den Raumwänden aufgetragen:

Unterhalb der Ebene mit den Oeffnungen, der sog. neutralen Zone, besteht ein zunehmender Unterdruck, während sich der Druck nach oben im Raum immer mehr erhöht.

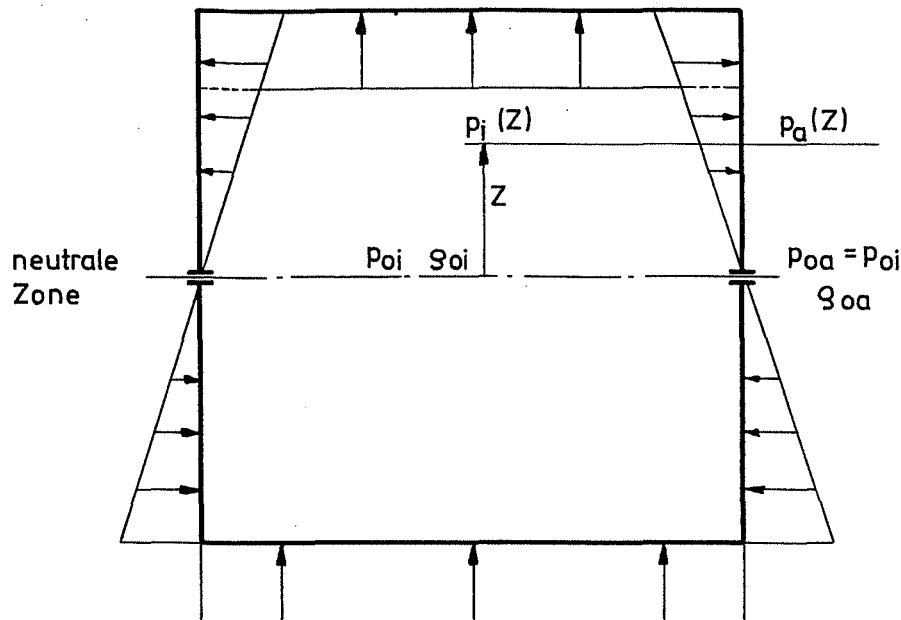


Fig. 2 Vertikalschnitt durch einen beheizten Raum, der geschlossen ist, abgesehen von Oeffnungen in der Ebene 0. Die Differenz-Druckverteilungen über den Umhüllungswänden sind aufgetragen. Pfeile, die nach aussen weisen, zeigen an, dass an jener Stelle ein Ueberdruck gegenüber der kühlen Umgebung besteht (und umgekehrt).

Für ein Gesamtgebäude hängt die Höhe der neutralen Zone von Anzahl, Lage, Grösse und Art der Oeffnungen ab, wenn von einer gleichmässigen Beheizung ausgegangen werden kann.

Im Zusammenhang mit den nachfolgenden Luftwechseluntersuchungen, die zum grossen Teil in Mehrfamilienhäusern durchgeführt wurden, mag die Druckverteilung in einem solchen, typischen Gebäude interessieren. Diese Bauten weisen sehr oft ein durchgehendes Treppenhaus auf, wobei die Wohnungstüren relativ dicht ausgeführt sind.

Die Druckverteilung unter hochwinterlichen Verhältnissen (Aussentemperatur -10°C , Treppenhaus-Lufttemperatur 10°C , Wohnungstemperatur 20°C) ist schematisch in Fig. 3 gezeigt (Abbildung 7.04 in L 4/10). Es sei als Erläuterung wiederum angeführt, dass für einen bestimmten Raum (z.B. das Treppenhaus) "ausserhalb liegende" Pfeile eine Unterdrucksituation kennzeichnen. Aus der Darstellung lassen sich sehr schön die Druckverhältnisse für bestimmte Wohnungen herauslesen: für die Erdgeschosswohnung besteht eine Sogwirkung ins Treppenhaus hinaus, während bei der obersten Wohnung die Luft aus dem Treppenhaus in die Wohnung gepresst wird. Aehnlich wie solche Treppenhäuser wirken Liftschächte oder Lichthöfe bei Warenhäusern. Für ein fünfstöckiges Gebäude ergibt sich unter den dargestellten Temperaturverhältnissen im Erdgeschoss ein Differenzdruck von $\approx 10 \text{ Pa}$.

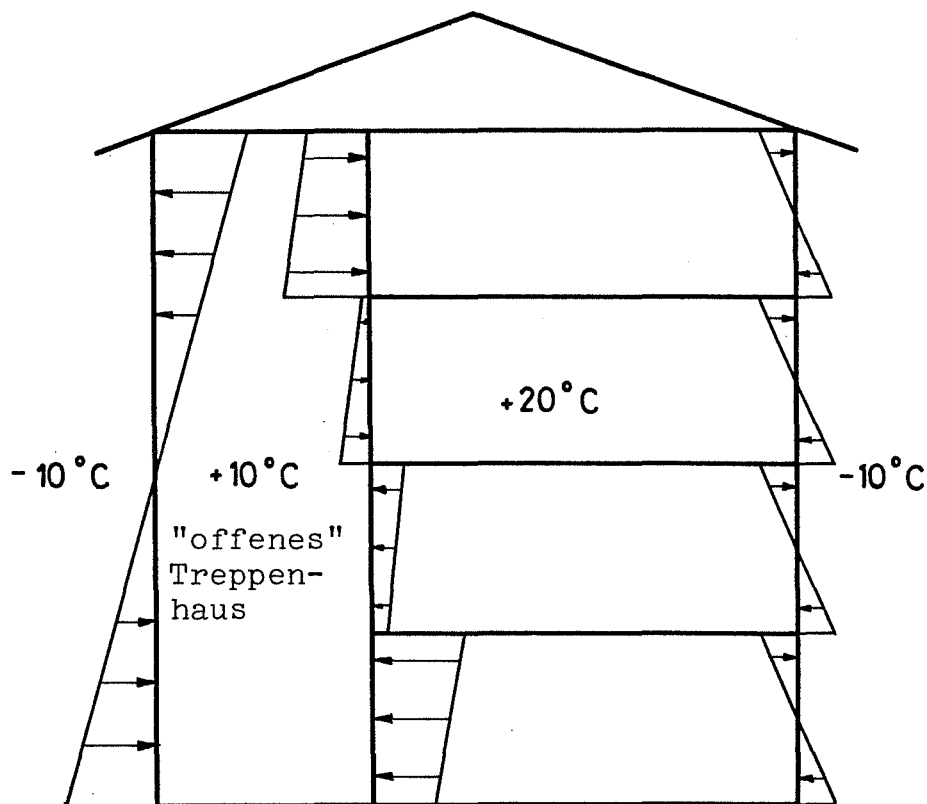


Fig. 3 Druckverteilung in einem Mehrfamilienhaus unter der Wirkung thermischer Auftriebskräfte.

2.2.2. Fenster und Türen als Widerstandselemente für Strömungen im Gebäude

Fenster und Türen stellen dem Durchströmen eines Raumes resp. eines Gebäudes einen bestimmten Widerstand entgegen. Sie erzeugen demnach je nach Bauweise auch einen unterschiedlichen Druckabfall Δp . Dieser ist abhängig von der Strömungsform in den Fenster- und Türfugen. Das Durchströmen der Fugen kann bei kleinen Spalten und Geschwindigkeiten laminar geschichtet oder bei grösseren Abmessungen und Geschwindigkeiten turbulent verwirbelt erfolgen. Bei laminarer Strömung gilt

$$\Delta p \approx v, \quad \text{resp.} \quad \dot{V} \approx \Delta p^1,$$

während bei turbulenter Strömung der Zusammenhang

$$\Delta p \approx v^2, \quad \text{resp.} \quad \dot{V} \approx \Delta p^{0,5}$$

besteht. Möglich ist auch, dass nach kurzer Lauflänge innerhalb des Spaltes eine anfänglich laminare Strömung zur Turbulenz umschlägt.

Als Erfahrungsregel, die durch eine Reihe von Messungen bestätigt ist, verwendet man folgenden Ausdruck für den durchfliessenden Luftvolumenstrom \dot{V} bei Fenstern und Türen:

$$\dot{V} = a \cdot l \cdot \Delta p^{2/3}$$

l = Fugenlänge

a = Fugendurchlasskoeffizient

Δp = Differenzdruck

Beispielsweise ermittelte Esdorn in L 6/7 Exponenten des Differenzdrucks von 0,63 bis 0,78 je nach Fenstertyp und Fugenform. Als Gültigkeitsbereich wurde angegeben:

Δp etwa zwischen 20 Pa und 60 bis 1000 Pa (je nach Typ).

Die angegebenen unteren Grenzen entstehen durch den Uebergang zu laminarer Strömung, die oberen Grenzen durch den Umstand, dass oberhalb bestimmter Grenzen die Fensterflügel örtlich abheben.

Grundsätzlich liesse sich bei einem Raum aufgrund der Fugenlängen, von vorgängig bestimmtem a -Wert und dem realen Differenzdruck die ausgetauschte Luftmenge über den wesentlichen "Öffnungen" berechnen. Wegen der bereits genannten komplizierten Zusammenhänge, welche die effektiven Differenzdrucke aufbauen, dann aber auch wegen der stark wechselnden Windeinwirkungen, gelingt es im allgemeinen kaum, rechnerisch mit dieser Methode "Luftwechselzahlen" zu ermitteln.

2.3. Klassierung der Einflussfaktoren auf den Luftaustausch bei einem Gebäude

Die drei grossen Einflussfaktorengruppen auf die Luftaustauschverhältnisse

- klimatische Bedingungen
- konstruktive Parameter
- Benutzer-Einflüsse

lassen sich in eine grosse Zahl von Detaileinflüssen aufspalten, wie nachfolgende Liste zeigt:

- Klimatische Bedingungen:

aussen: Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, (Strahlungsintensität und Richtung, Niederschläge)

innen: Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit

- Konstruktive Parameter:

Gebäudeform

Gebäudelage (Besonnung, Windanfälligkeit, Umgebungsbebauung)

Raumanordnung, Aufteilung im Gebäudeinnern

Raumumhüllungsflächen (Wände, Böden, Dach, Fenster, Türen)

- Oberflächenform und konstruktive Ausbildung

· Luftdurchlässigkeit

- Verhalten unter Witterungseinflüssen wie Feuchtigkeit, Temperatur, Bestrahlung

- Flächenanteile

Heizsystem (Konstruktionsprinzip, Beeinflussung der Raumströmung und Strömung im Gebäude, Bedarf an Verbrennungsluft), allfällige zusätzliche Lüftungsanlagen

- Benutzer-Einflüsse

Anzahl der Benutzer / Verteilung auf einzelne Räume

Tätigkeit der Benutzer (Wärme- und Feuchtigkeitsproduktion)

Betrieb von Haushaltgeräten mit Wärmeerzeugung / Feuchtigkeitsproduktion

Positionierung von Fenstern, Türen, Rolläden; Anzahl der Positionswechsel

Heizgewohnheiten

Benützung / Betrieb von zusätzlichen Entlüftungsanlagen ("Teil-entlüftung")

Um nun aber mit dieser langen Liste nicht allzu sehr zu verwirren, kann anhand der umfangreichen Literaturangaben und des physikalischen Verständnisses der Vorgänge eine viel kleinere Auswahl von Einflussparametern aufgeführt werden, die entscheidend sind für die effektiv resultierenden Luftwechsel. Die nachfolgenden globalen Aussagen werden weiter hinten durch die Messresultate belegt und vertieft.

Hinsichtlich der klimatischen Einflüsse sind Grösse und Richtung des einfallenden Windes, sowie in hohen Bauten das Vorhandensein einer bestimmten Differenztemperatur aussen / innen entscheidend für die entstehende Luftwechselzahl.

Vor allem Luftdurchlässigkeit und Grösse der Fenster, in kleinerem Mass die Luftdurchlässigkeit der Zwischentüren zwischen Räumen wirken sich von Seiten der Konstruktion auf den Luftwechsel aus. Dass ausserdem die innere und äussere Gebäudeform wesentlichen Einfluss haben auf das Zustandekommen von - örtlichen - Ueberdrücken, ist fast selbstverständlich.

Die Einflussnahme der Bewohner auf den Luftwechsel muss in seiner ganzen Vielfältigkeit als sehr wichtig beurteilt werden. Der Einfluss wirkt sich deshalb besonders stark aus, weil in Zeiten tiefer Aussentemperaturen meist geringe Windgeschwindigkeiten vorherrschen, sodass sich z.B. unmässiges Fensterlüften prozentual noch viel stärker bemerkbar macht.

2.4. Grundlagen zur Messtechnik des Luftaustausches in Räumen oder Gebäuden

Es sei in den nachfolgenden Ausführungen abgesehen von Messproblemen bei Hochbauten, wo sich insbesondere die Auftriebseffekte ("Kamineffekt") auf die Luftaustauschvorgänge auswirken. Ebenso sei abgesehen von Raumströmungsuntersuchungen bei belüfteten oder klimatisierten Gebäuden.

Hingegen sollen jene beiden Methoden dargestellt werden, durch welche Einflüsse der Baukonstruktion und teilweise auch der Benutzer und des Klimas auf den Luftaustausch in Räumen ermittelt werden können. Eine ausserordentlich weitreichende Untersuchung über Testverfahren ist als Literaturstelle L 3/4 aufgeführt. Obwohl die Untersuchung bereits einige Jahre alt ist, besitzt sie in den meisten Punkten weiterhin Gültigkeit. Sie weist auch auf weitere Methoden hin, die nachfolgend in diesem Bericht nicht beschrieben sind.

Die beiden Methoden sind auch im deutschen Sprachgebrauch unter ihrem englischen Namen bekannt, die Tracer-Gas-Methode ("Testgas-Methode") und die Pressurization-Methode ("Ueberdruck-Methode", besser "Differenzdruck-Methode").

Da die Tracer-Gas-Methode in Abschnitt 4 in allen Details beschrieben ist, sei hier nur kurz auf das Prinzip hingewiesen: Vor Versuchsbeginn wird in die zu untersuchenden Räume ein bestimmtes Testgas eingeblasen und möglichst rasch und intensiv vermischt mittels eines Gebläses. Anschliessend wird zu Beginn des Versuches die Gaszufuhr unterbrochen und der Konzentrationsabfall des Tracergases gemessen. Parallel dazu werden die vorhandenen natürlichen Klimabedingungen mitgemessen (vgl. Fig. 4).

Wird während des Versuches eine vollständige Durchmischung des Raumes und eine Konstanz der Randbedingungen angenommen, so entspricht die Konzentrations-Abfallkurve einer e-Funktion. Aus dem Verlauf der Messfunktion lässt sich sehr einfach die Luftwechselzahl ermitteln, z.B. mittels der Seidelschen Formel

$$n_L = \frac{2,303}{\Delta t} \log \frac{C_1}{C_2} \quad [h^{-1}]$$

$$n_L = \text{Luftwechselzahl} \quad [h^{-1}]$$

Δt = Zeitdifferenz [h] zwischen Ablesung der Konzentrationen C_1 und C_2

C_1, C_2 = Testgaskonzentrationen zur Zeit 1 und 2

(Vgl. L 3/2, L 1/7)

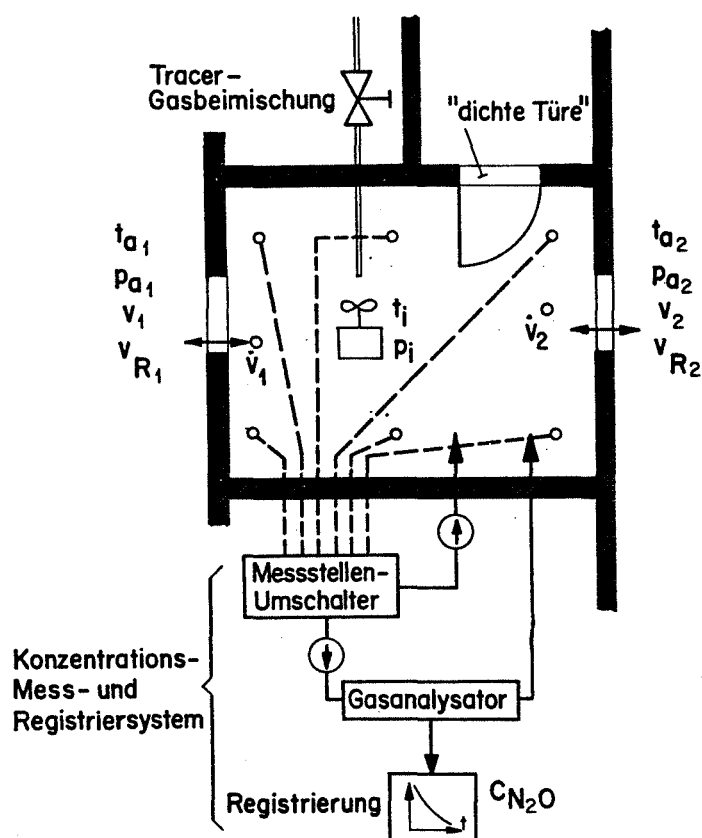


Fig. 4

Messeinrichtung zur Bestimmung des Luftwechsels in einem unbewohnten Zimmer mit gegenüberliegend angeordneten Aussenfenstern und gut dichtender Türe

V_R Raumvolumen

V Luftströme bei einzelnen Komponenten der Raumhülle

①, ②, ③

p Luftdruck

t Lufttemperatur

i Index für Rauminneres

a Index für Nebenräume bzw. Umgebung

v Windgeschwindigkeit

v_R Windrichtung

Diese Methode erfasst die Gesamtheit der realen Einflüsse sehr gut, ist aber wegen des instationären Verhaltens mancher Einflussgrößen auf einen grossen Messaufwand angewiesen, und ihre Resultate sind nicht einfach auf geänderte Verhältnisse zu übertragen. - Die Gültigkeit der Methode wird in Abschnitt 4.3. im Detail abgeklärt.

Die sog. Differenzdruckmethode liefert mittlere Luftdurchlässigkeitswerte der gesamten Raum- / Gebäudehülle unter einer künstlich erzeugten Druckdifferenz.

Die Fig. 5 zeigt das Messverfahren schematisch.

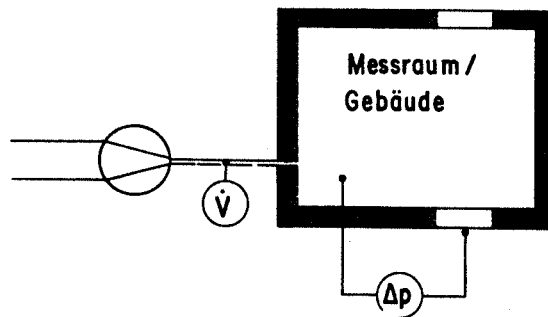


Fig. 5

Schematische Darstellung der Messeinrichtung beim "Differenzdruck-Messverfahren"

Um den Einfluss von Wind und allfälligen Temperaturdifferenzen möglichst auszuschliessen, ist die Messung bei schwachem Wind auszuführen und ist der künstliche Differenzdruck um ein Mehrfaches höher zu wählen als die Schwankungen der vorhandenen Winddrücke.

Mit diesem Verfahren lassen sich auch die Einflüsse von bestimmten Fensterpositionen schematisch abklären, vor allem aber die Anteile der einzelnen Gebäudekomponenten am Lüftungsverlust abschätzen, indem zeitweise gewisse Partien (z.B. Fenster) abgeklebt werden (vgl. z.B. Messungen des NRC, Ottawa in L 7/4!).

Bisher sind die Resultate aus solchen Untersuchungen erst qualitativ übertragbar auf irgendwelche Luftwechselraten bei natürlichen Druckbedingungen.

In einer Gegenüberstellung seien kurz die besonders günstigen Anwendungsmöglichkeiten beider Methoden gezeigt.

Die Differenzdruckmethode ist einfacher durchzuführen als die Tracergas-Methode. Sie liefert günstige Vergleiche zwischen der Dichtigkeit verschiedener Hauskonstruktionen oder gewisser Bauteile. Die Resultate sind aber erst mit grossem Vorbehalt auf natürliche Luftwechselbedingungen zu übertragen, da dazu aus Versuchen Unterlagen über reale Differenzdrücke vorliegen müssen (z.B. aus Windkanalversuchen, noch besser aus Messungen am realen Bau).

Für Untersuchungen über den Einfluss der Benutzer auf den Luftwechsel eignet sie sich kaum.

Die Tracer-Gas-Methode hingegen vermittelt Luftwechselzahlen unter realen Klima- und Konstruktionsbedingungen. Eine rechnerische Uebertragung auf andere Klimabedingungen (z.B. andere Windgeschwindigkeiten) stösst noch auf Probleme.

Durch eine grössere Zahl von solchen Messungen an realen Bauten lässt sich ein Ueberblick gewinnen über die Luftwechsel-Situation in typischen Bauten. Eine Messung in bewohnten Bauten ist möglich.

3. Ziele der experimentellen Untersuchungen; Vereinfachende Annahmen

Die bereits beschriebenen Unzulänglichkeiten vorhandener Messwerte für Luftwechselzahlen (z.B. Messungen ohne Miterfassung der Einflussfaktoren, Messungen bei völlig andersgearteten Fenstersystemen als in Europa üblich, allzuweite Streuung der Resultate) führten zum Entschluss, neue Untersuchungen (mit aufwendigem Mess-System) über den effektiven Luftwechsel in ausgewählten typischen Räumen durchzuführen.

Im wesentlichen sollten bei den Messungen folgende klimaabhängigen, konstruktiven und nutzungsbedingten Einflüsse variiert werden:

- Einzelräume
- Raumgruppen (Wohnungen, kleine Einfamilienhäuser)
- Alt- und Neubauten
- Wind- und Temperaturverhältnisse
- konstruktive Details (wie Tür-, Fenster-, Ladenpositionen)
- Teilentlüftung

Mit Hilfe dieser Resultate sollte es möglich sein, einen Vergleich anzustellen zwischen den Luftwechselzahlen in typischen schweizerischen Bauten und den Mindestfrischlufttraten aus der Sicht der Wohnhygiene.

Bei der Durchführung der Versuche waren uns Randbedingungen von Seiten der Messtechnik, des finanziellen und zeitlichen Aufwandes auferlegt. Details über die messtechnischen Randbedingungen sind in Abschnitt 4 erläutert.

Bei der Einflussuntersuchung der verschiedenen Parameter liess sich jener optimale Zustand der Variation jeweils nur eines Parameters kaum verwirklichen. Zum einen waren wir auf verfügbare Messobjekte angewiesen, zum andern war die Anzahl der Einflussparameter sehr gross, so dass sich allzuvielen Versuche ergeben hätten. Aus diesem Grunde wird es notwendig sein, durch geeignete Abschätzungen bei der Auswertung die Resultate auf andere Anwendungsfälle zu übertragen.

Während der in diesem Bericht I beschriebenen Messperiode beschränkten wir uns im wesentlichen auf neuere und neueste, meist unbewohnte Räume. Auch werden Untersuchungen über Benutzereinflüsse zur Hauptsache erst im später folgenden Bericht II dargestellt sein.

4. Versuchseinrichtung und Durchführung

4.1. Versuchseinrichtung

Die Messungen erfolgten im wesentlichen mit der Tracergas-Methode, die nachfolgend beschrieben ist.

Die Versuchseinrichtung kann in zwei Hauptelemente unterteilt werden:

- Bestimmung der Luftwechselzahl mit Hilfe des Tracergases;
Registrierung der Konzentrationsabnahme in Funktion der Zeit.
- Messung der Einflussfaktoren Windgeschwindigkeit und -Richtung, Druckdifferenzen, Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten.

Die verschiedenen Mess-Systeme sind anhand von Prinzipschemas kurz beschrieben.

4.1.1. Konzentrationsmessung

(siehe auch Bild 1)

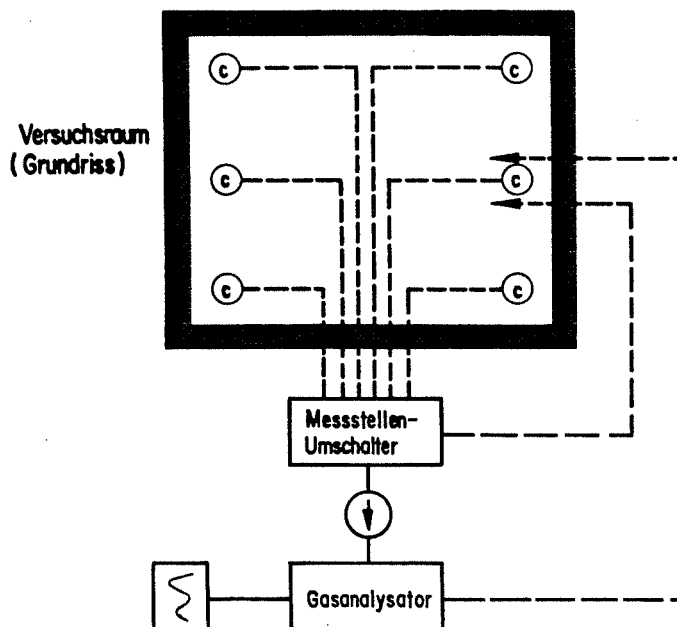


Fig. 6

Schema der Gaskonzentrationsmessung für die Bestimmung der Luftwechselzahl

An sechs bestimmten, und im Raum gut verteilten Stellen werden über Plastikschläuche kontinuierlich kleine Mengen des Luft-Gasgemisches abgesaugt.

Von den sechs Gasgemischen wird im Wechsel jeweils eines dem Gasanalysator zugeführt mittels des Messstellenumschalters. Dessen Umschaltrhythmus ist einstellbar.

Analysator

Bei unseren Untersuchungen wird ein MIRAN II-Gerät verwendet, welches mit einem Punktdrucker kombiniert ist. Das Gerät ist ein Infrarot-Gasanalysator und besteht aus einem "Einstrahl-Zweiwellenlängen-Photometer". Es misst die Infrarot-Transmission durch die Probe mit 2 Strahlungen wenig verschiedener Wellenlänge, wobei die Strahlung der einen durch die Probe absorbiert und die andere (Referenz) nicht absorbiert wird.

Der optische und mechanische Aufbau des Gerätes ist hier schematisch dargestellt.

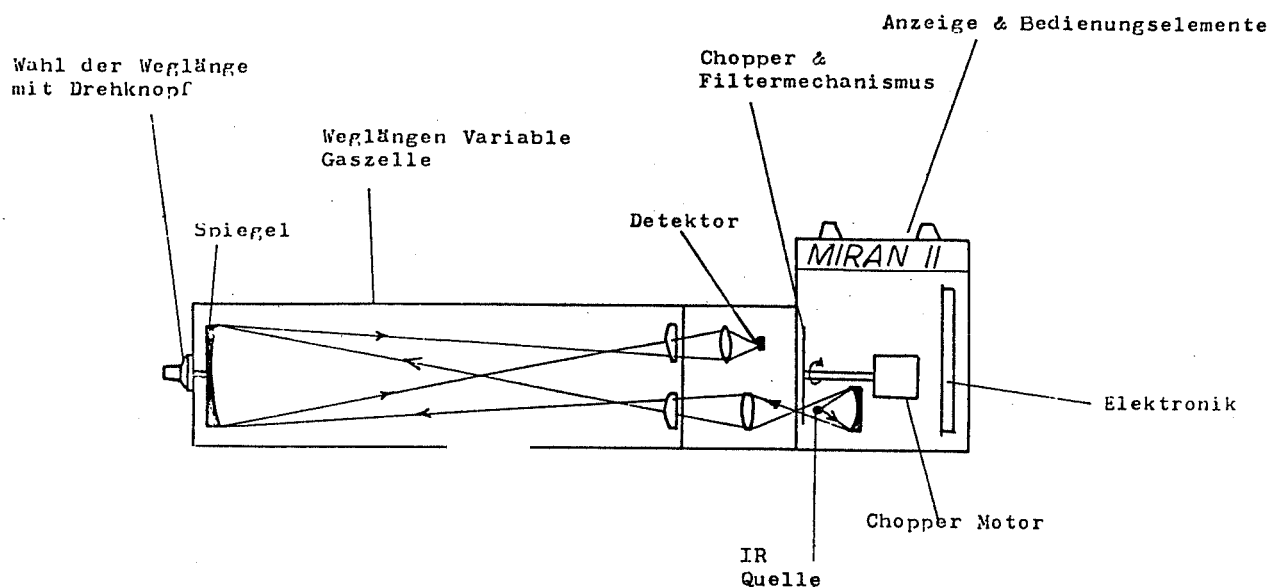


Fig. 7

Schematischer Konstruktionsaufbau des "MIRAN II"-Gasanalysators

Die quantitative Bestimmung der Durchlässigkeit (Transmittance) einer Probe setzt die Messung der Intensität voraus, die den Detektor ohne Absorption des Strahls (I_0) erreicht und jene bei Absorption des Strahls (I):

$$\text{Transmittance } T = \frac{I}{I_0}.$$

Die Anzeige des Gerätes (und auch der entsprechende Spannungsausgang) erfolgt als sog. Absorbance, die wie folgt definiert ist:

$$\text{Absorbance } A = -\log T$$

Der Zusammenhang zwischen der Absorbance A und der Gaskonzentration ist in der nachfolgenden Figur 8 dargestellt. Die schwache Nichtlinearität im Zusammenhang musste bei gewissen Untersuchungen einbezogen werden.

Absorbance

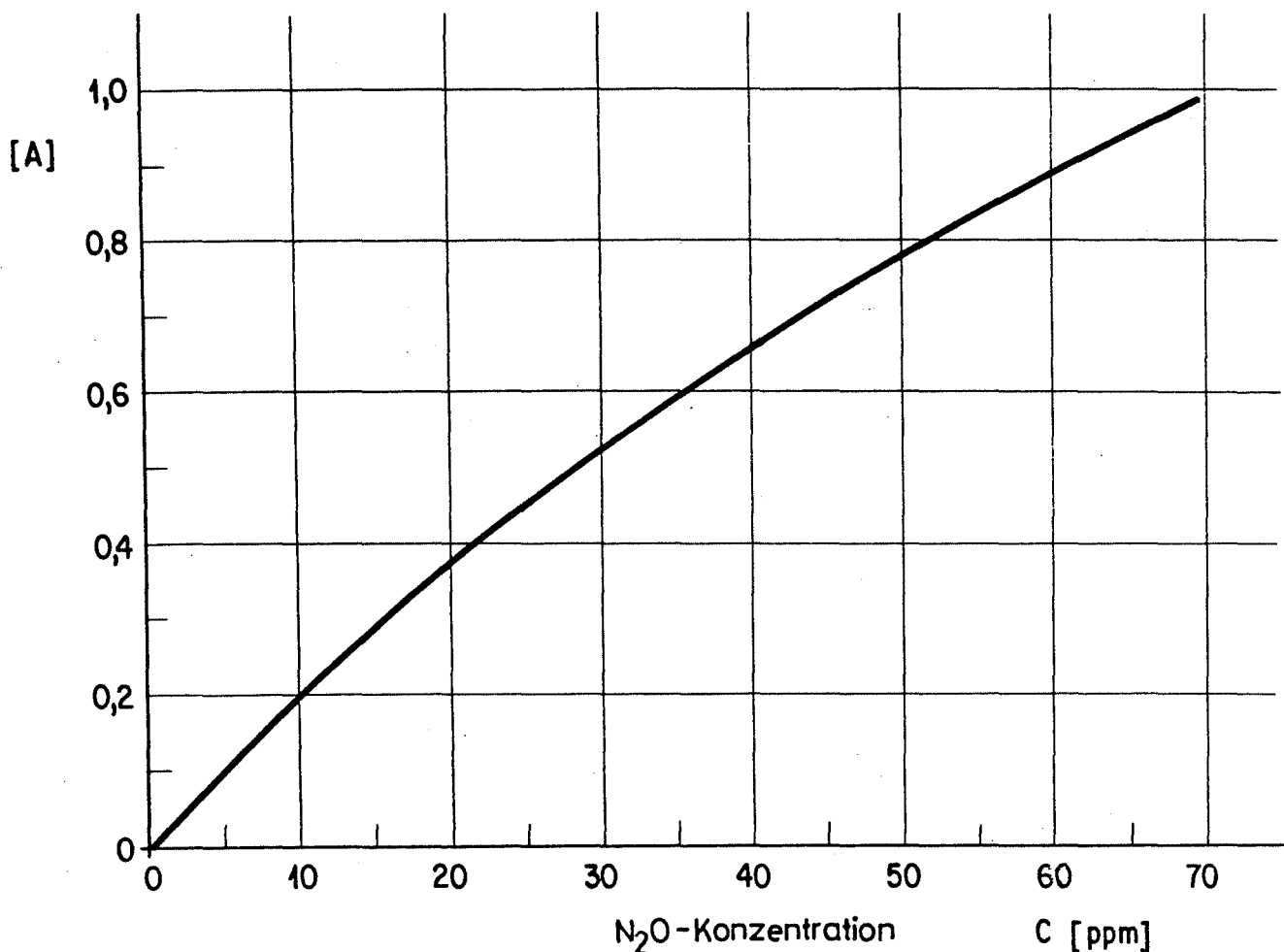


Fig. 8

Eichkurve des MIRAN II-Gasanalysatros

4.1.2. Windmessung

(Siehe auch Bilder 2 und 3)

Die Windverhältnisse werden mit einer Wetterstation "Windmaster Mark II" gemessen. Der Geber besteht aus einem Schalenstern für die Windgeschwindigkeit und einer Windfahne für die Richtung, welcher an einer Anzeigestation angeschlossen ist. Diese überträgt die Signale als Spannung auf ein Registriergerät (Linienschreiber).

Es werden also "nur" die horizontalen Windkomponenten gemessen.

4.1.3. Druckdifferenzmessung

(Siehe auch Bilder 4 und 5)

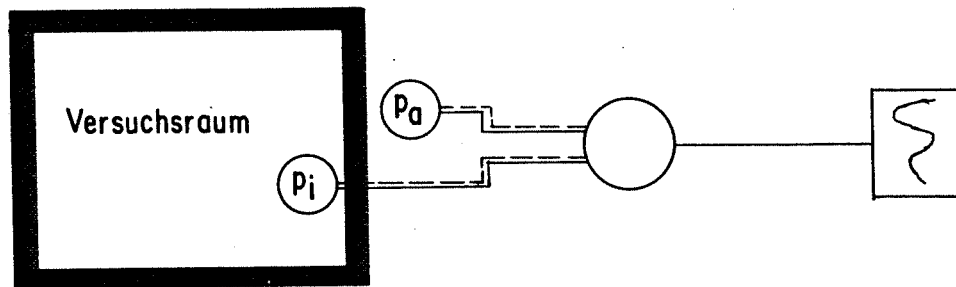


Fig. 9

Schema Druckdifferenzmessung

Die Messung des Differenzdrucks über der Fassade erfolgt als Differenz zwischen dem statischen Druck im Raum und dem Staudruck auf der Fassade. Auch hier werden die Werte auf einem Linienschreiber registriert.

Die Montage des Messfühlers für die Aussenluft ist in Bild 4 ersichtlich.

Die Problematik solcher Differenzdruckmessungen kommt in Kommentaren des Berichtes II zum Ausdruck.

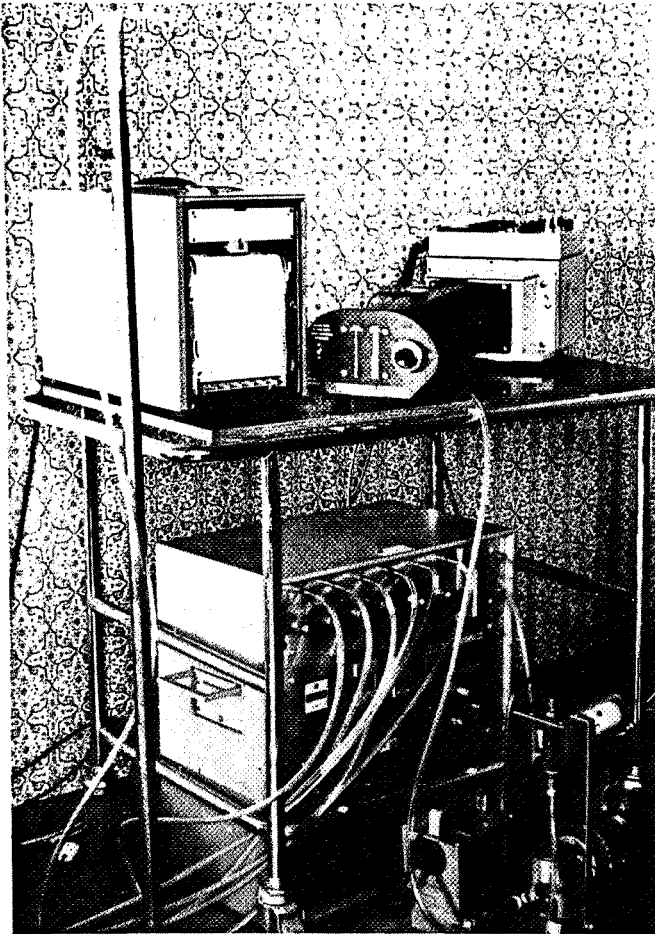


Bild 1 (Foto EMPA-Nr. 75025/17)
Konzentrationsmesseinrichtung für
Lachgas; Analysengerät auf Wagen,
links daneben Punktdrucker für
Registrierung.
Unten hinten Messstellenumschal-
ter, rechts davor Zusatzpumpe
für Messkreislauf.



Bild 2 (Foto EMPA-Nr. 75027/11)
Geber, bestehend aus Schalenstern für
Windgeschwindigkeit und Windfahne für Richtung

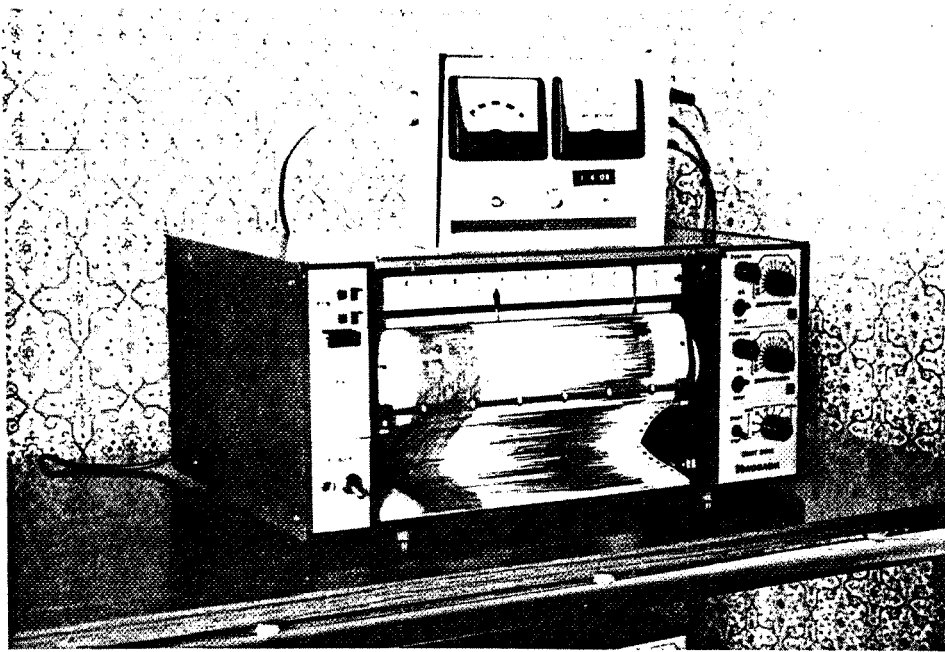


Bild 3 (Foto EMPA-Nr. 75025/8)

Windmesseinrichtung, oben Anzeigestation der
Windgeschwindigkeit und Richtung, unten Linien-
schreiber für Registrierung

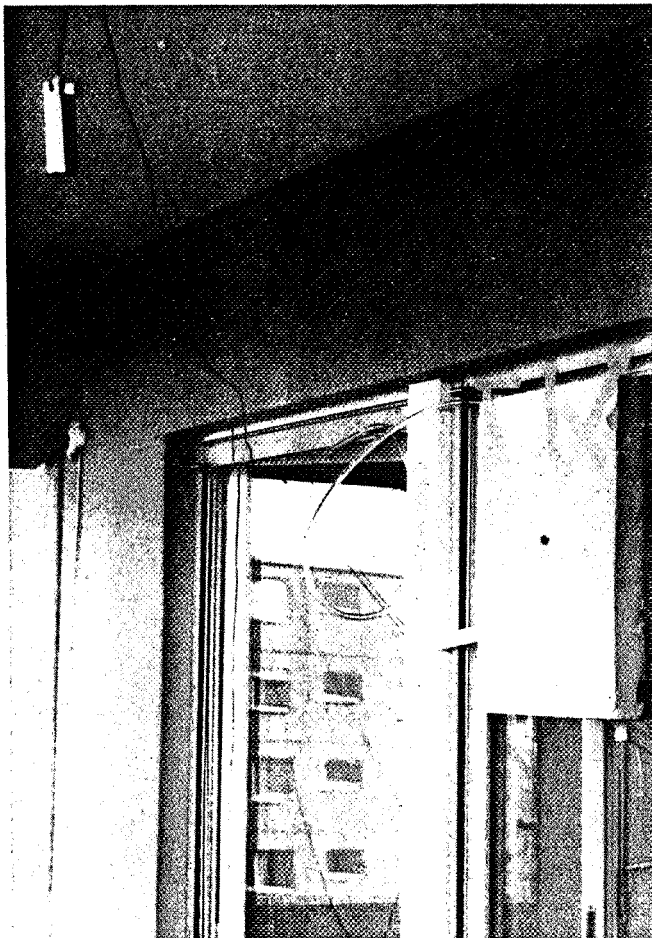


Bild 4 (Foto EMPA-Nr. 75027/13)

Aussendruckmessstelle vor einer
Fassade mit Fenster und Balkon-
türe

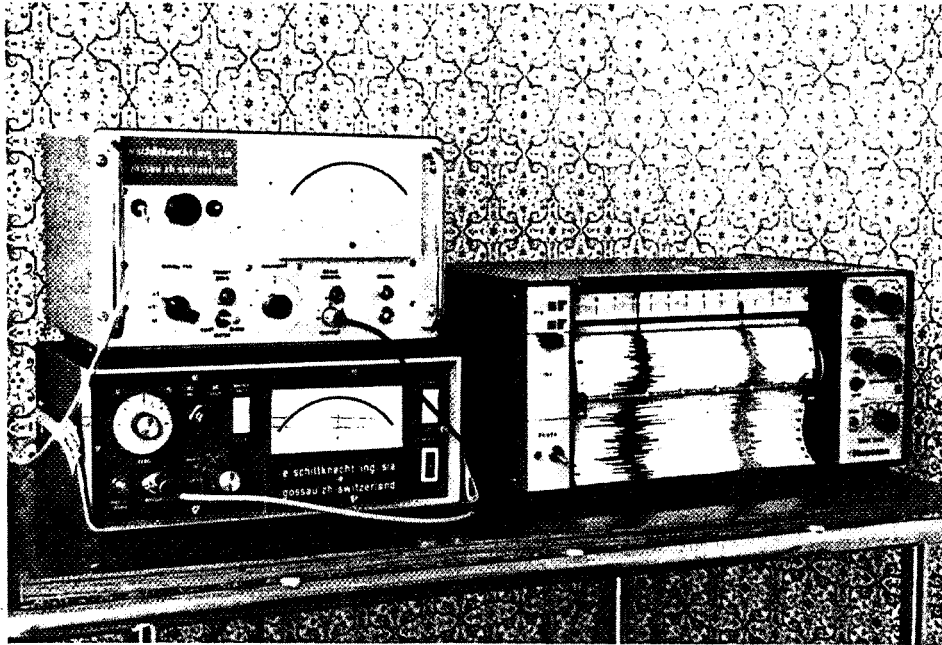


Bild 5 (Foto EMPA-Nr. 75025/4)

Druckmesseinrichtung, links zwei Mikromanometer
und rechts ein Zweilinienschreiber für die Registrierung

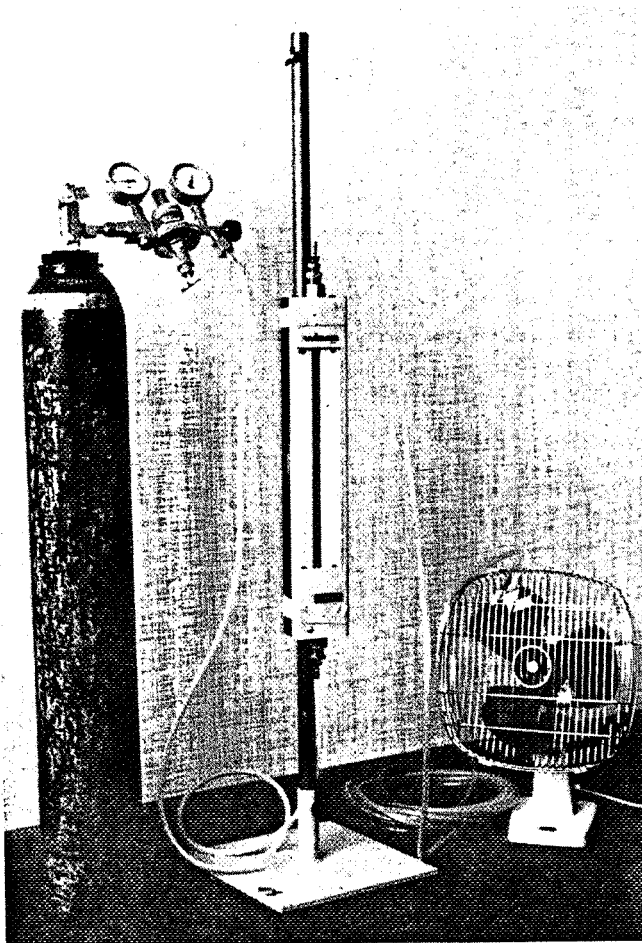


Bild 6 (Foto EMPA-Nr. 75025/20)

Zusammenstellung der Geräte zur
Herstellung des Gas-Luftgemisches.
Links die Gasflasche mit N_2O , in
der Mitte ein Durchflussmesser
und rechts ein Ventilator zur Ver-
wirbelung der Raumluft

4.1.4. Temperaturmessung

Die Temperaturen werden mit Thermoelementen gemessen und mit einem Kompensationsschreiber (Punktdrucker) registriert. Hauptsächlich werden Luft- und Oberflächentemperaturen aufgenommen. Lufttemperaturfühler sind stets gegen Umgebungseinstrahlung abgedeckt.

4.1.5. Luftfeuchtheitsmessung

Die Luftfeuchtheiten werden mit Thermohygrographen registriert. Im Normalfall sind es die Versuchsraum- und die Aussenluftfeuchtheit.

4.2. Versuchsdurchführung

(Siehe auch Bild 6)

In den Versuchsraum wird eine bestimmte Menge Gas (N_2O , "Lachgas") eingeblasen und mittels eines Ventilators mit der Raumluft durchmischt; dieser Vorgang dauert einige Minuten. (In der Regel wurden maximale Gaskonzentrationen von etwa 100 ppm verwendet, die für Menschen, Tiere, Pflanzen keine Wirkung zeigen.) Anschliessend wird die Gaszufuhr abgestellt. - Nun beginnt der eigentliche Messvorgang, bei dem die Konzentration und die im Abschnitt 4.1. (Versuchseinrichtung) beschriebenen Einflussfaktoren gemessen und registriert werden.

Bei jedem Versuch wurden konstruktive Begleitparameter (z.B. Fenstergrösse, Fugenlänge etc.) sowie allfällige Benutzungsparameter aufnotiert. Entsprechende Angaben sind in Abschnitt 6 zusammengestellt.

4.3. Vorversuche

Es schien uns ausserordentlich wichtig, vor gross angelegten Messungen an diversen Bauobjekten eine Reihe von Detailabklärungen durchzuführen und so die Grenzen des Messverfahrens kennenzulernen.

4.3.1. Versuchsziele bei Vorversuchen. Auflistung

- Absorptionseigenschaften der Gasgemischzuleitungen bzw. -ableitungen hinsichtlich Lachgas
- Absorptionsverhalten von gebräuchlichen Baumaterialien sowie Leckage-Einflüsse oder -Möglichkeiten
- Tauglichkeit der Konzentrationsmeseinrichtung in einem grossen Raum
- Einfluss der Gasabsaugorte auf die Messergebnisse, insbesondere bezüglich der Luftschichtung und "Totzonen" im Raum
- Parallelversuche am selben Objekt mit einem unabhängigen zweiten System (der ETHZ) als Kontrolle des Analysegerätes und des verwendeten Testgastyps
- Dynamik des Konzentrationsmess-Systems
- Eigenschaften der Zuleitungen für die Druckmessungen

4.3.2. Absorption der Schläuche

Schläuche sind bei den Konzentrationsmessungen die wichtigsten Verbindungselemente zwischen Messort und Analysengerät. Es ist daher sehr wichtig, dass sie möglichst wenig Lachgas (N_2O) absorbieren. Ferner müssen die Anschlussverbindungen bei den verschiedenen Geräten dicht sein.

In unserem Fall wurden zwei verschiedene Schlauchtypen untersucht und verglichen, ein PTFE-Schlauch (Teflon, rel. teuer) und ein weicher PVC-Schlauch (billig), beide mit gleichen Abmessungen (Innendurchmesser 6 mm und Wandstärke 1,5 mm).

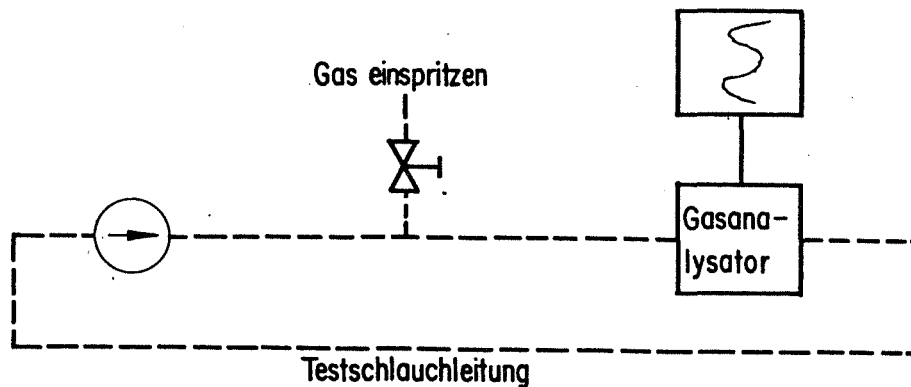


Fig. 10

Versuchsanordnung zur Ueberprüfung der Gasabsorption von Schläuchen

Versuchsanordnung

Die Schläuche wurden zu einem Kreislauf geschlossen. Mit einer Spritze wurde eine bestimmte Menge Gas beigemischt, dann bei ständiger Umwälzung die Konzentrationsabnahme während mehr als zwei Stunden gemessen.

Versuchsergebnisse

Tabelle 1: Messresultate der "Schlauchversuche "

Schlauch- typ	Versuchs- nummer	Länge ca. [m]	Konzentrationsabnahme während einer Stunde %
PVC	Sch A 1	10	0,80
	Sch A 2	10	0,43
	Sch A 4	20	1,24
PTFE	Sch A 3	10	0,70

Es wurde vorausgesetzt, dass alle metallischen Verbindungsteile (Nippel etc.) keine Absorption für Lachgas aufweisen.

Die Messwerte zeigen, dass zwischen den beiden Schlauchtypen keine Unterschiede bezüglich des Absorptionsverhaltens bestehen. Wie später ersichtlich wird, liegen diese Konzentrationsabnahmen im Bereich der Messgenauigkeit des Messgerätes (Einfluss der Erwärmung des Gas-Luftgemisches). Somit wurden für die Messungen die relativ billigen PVC-Schläuche verwendet.

Es wurden also keine Korrekturfaktoren wegen der Absorption von Geräten oder Schläuchen vorgesehen; selbstverständlich gehen diese kleinen Fehler in den Gesamtfehler des Systems ein.

4.3.3. Absorption von typischen Baumaterialien

Analog zu den Schläuchen muss auch von den Baumaterialien der Räume das Absorptionsverhalten bekannt sein, weshalb einige typische Materialien untersucht wurden. Diese Versuche stellen eine Erweiterung der vorhergehenden dar, indem eine grössere Blechboxe in den Kreislauf einbezogen wurde (Dimension 86,0 x 55,0 x 40,5 cm).

(Zusätzlich wird mit einem Thermoelement die Lufttemperatur nach dem Analysator gemessen).

Versuchsanordnung

(Siehe auch Bild 7)

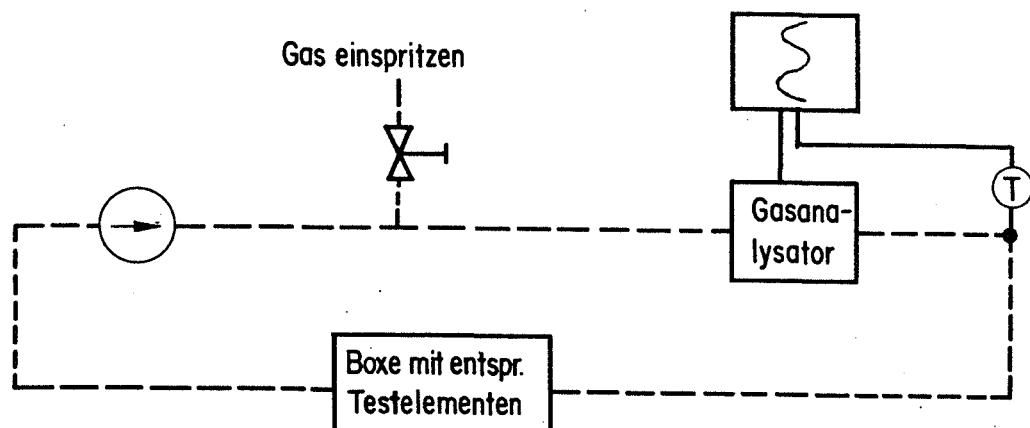


Fig. 11

Versuchsanordnung zur Messung der Lachgas-Absorptionseigenschaften von Baumaterialien

In die Boxe wurden je Versuch 2 gleichartige Bauelemente eingelegt, welche nachfolgend kurz beschrieben werden. Die Versuchsdurchführung war analog wie bei den Absorptionsmessungen der Schläuche. Die Fläche der absorbierenden Probeplatten im Vergleich zum Luftvolumen der Boxe war mindestens so gross, wie diejenige von Raumboothfläche zum Raumvolumen in realen Räumen.

Versuchsmaterialien

(Siehe auch Bild 8)

Material 1: Spanplatte; Oberfläche lackiert, Rand mit Kleber abgeklebt.

Abmessungen: Länge	62 cm
Breite	40 cm
Dicke	19 mm

Material 2: Gipsplatte; Rand mit Klebband abgeklebt,

Abmessungen: Länge	62 cm
Breite	40 cm
Dicke	33 mm

Material 3: Tapeten auf Spanplatte aufgezogen (beidseitig),
Rand mit Klebband abgeklebt,

Abmessungen: Länge	62 cm
Breite	40 cm
(Dicke	19 mm)

Material 4: Spannteppich auf Spanplatte aufgeklebt (beidseitig),
Rand mit Klebband abgeklebt,

Abmessungen: Länge	62 cm
Breite	40 cm
(Dicke	30 mm)

Material 5: Sperrholzplatte (3-schichtig)

Abmessungen: Länge	62 cm
Breite	40 cm
Dicke	8 mm

Material 6: Zeitungspapier - Beige,

Abmessungen: Länge	34 cm
Breite	24 cm
Dicke	8 cm

Material 7: Plasticfolie (um Blech gewickelt),

Abmessungen: Länge	60 cm
Breite	49 cm
(Dicke	2 mm)

Versuchsergebnisse

Vorausgehend wird kurz das zeitliche Betriebsverhalten von Mess- und Registriereinrichtungen gezeigt. Dann werden die eigentlichen Absorptionsergebnisse dokumentiert:

Fig. 12 Kennlinie der Mess- und Registriereinrichtung infolge Temperaturänderung (keine weitere Gasinjektion)

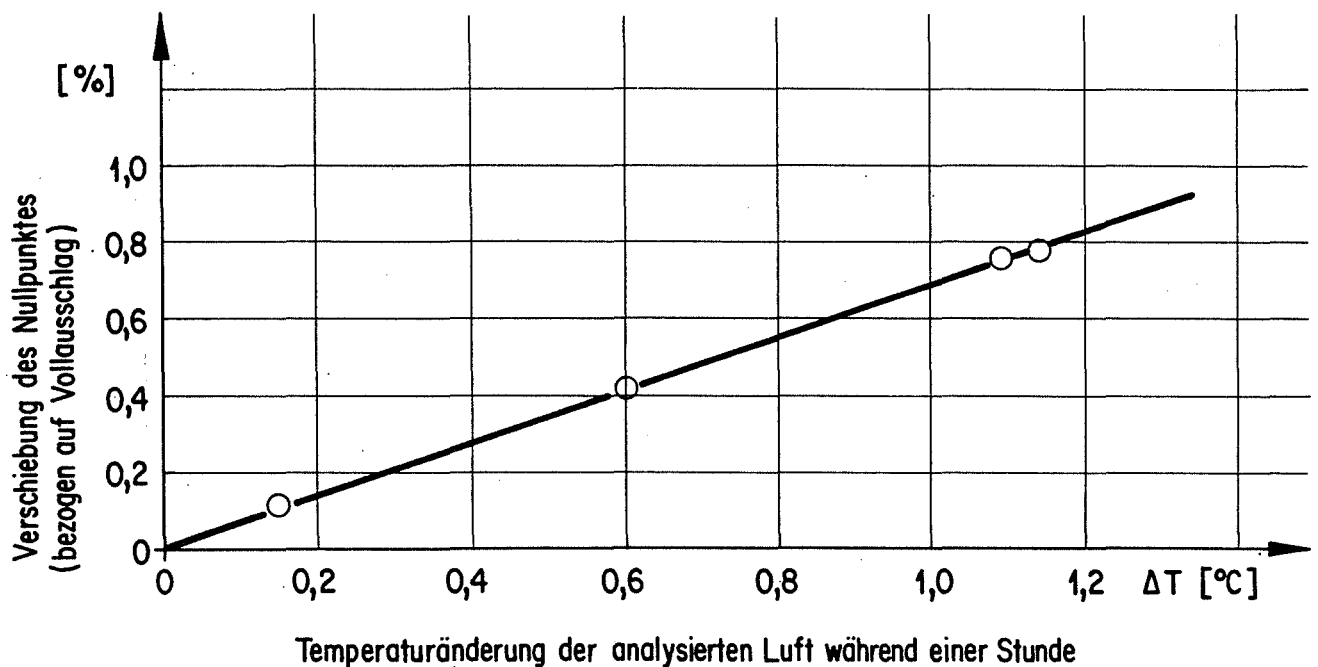
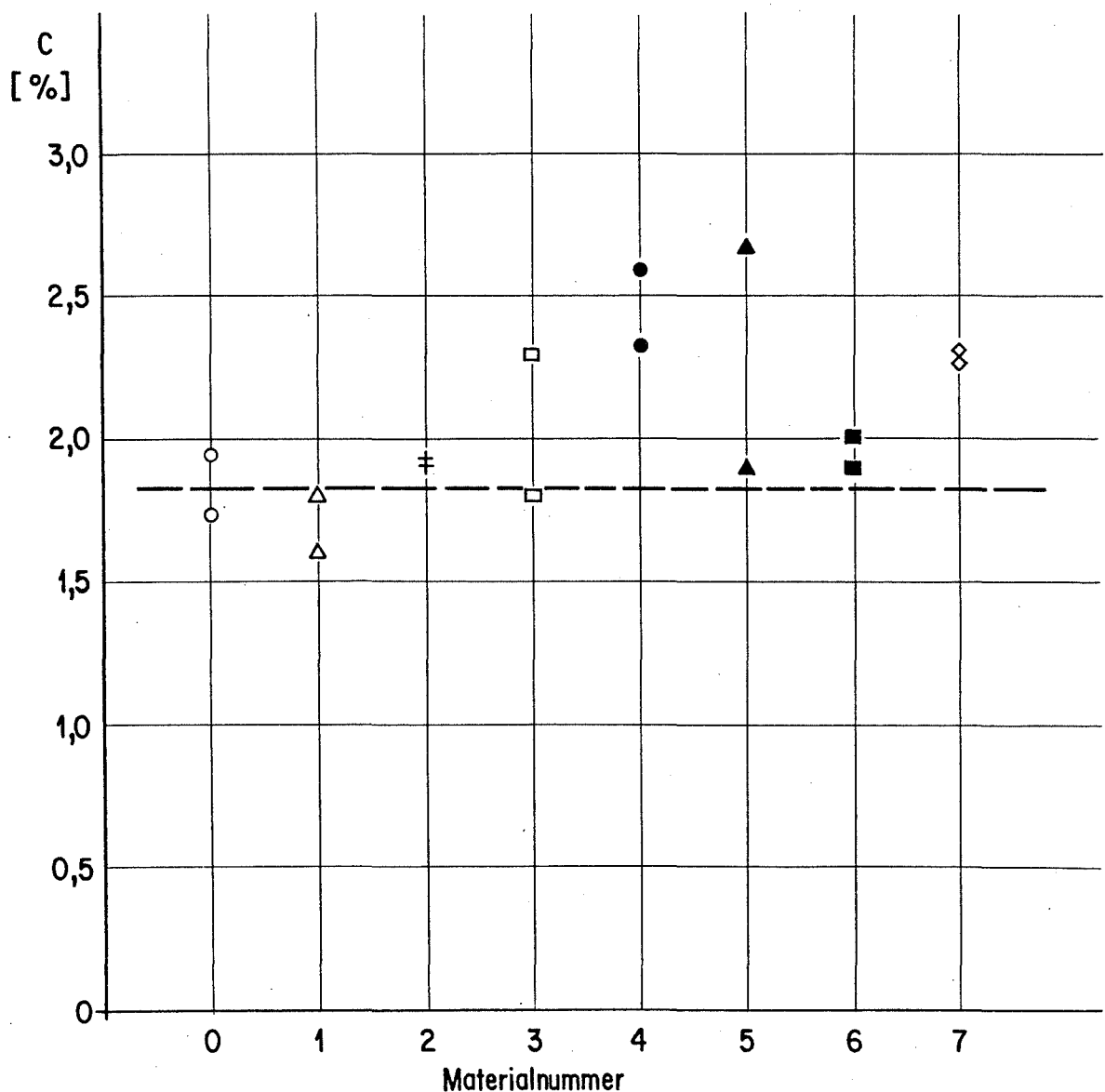


Fig. 12 zeigt, dass bei Temperaturveränderungen des zu analysierenden Gasgemisches relativ starke Beeinflussungen des Messwertes stattfinden können ("Nullpunktdrift").

Die Verschiebung kann hauptsächlich auf die Erwärmung der Geräte und des Gases zurückgeführt werden. Bei diesen Versuchen war das umgewälzte Luftvolumen verhältnismässig klein und somit die Lufttemperatur rasch ansteigend. Dieser Effekt macht sich in Grossversuchen i.a. nicht bemerkbar! - In nachfolgender Fig. 13 sind diese Temperatureffekte eliminiert.

Fig. 13 Konzentrationsabnahme während einer Stunde bei verschiedenen Materialien infolge Absorption und Leckage
(Legende siehe nächste Seite)



Legende:

Zeichen	Material	Nr.
○	Leere Boxe	0
△	Spanplatte	1
+	Gipsplatte	2
□	Tapete	3
●	Spannteppich	4
▲	Holzplatte	5
■	Papier	6
◇	Plastic	7

Die Versuchsergebnisse zeigen grundsätzlich, dass alle Materialien keine wesentliche Absorption von Lachgas aufweisen.

Betrachtet man die Ergebnisse der leeren Boxe (Materialnummer 0), so ist ersichtlich, dass im Mittel der beiden Messungen eine Konzentrationsabnahme von ca. 1,8 % während einer Stunde erfolgt. Das ist ein Zeichen dafür, dass das "geschlossene" Mess-System nicht ganz leakfrei war oder die Farbe etwas Lachgas absorbiert. Nimmt man nun den mittleren Wert der leeren Boxe (gestrichelte Linie) als Referenz der Absorptionsmessungen, so ist zu erkennen, dass die grösste Abweichung kleiner als 1 %, nämlich 0,85 % (Materialnummer 5) beträgt. Ferner liegt die zweite Messung des gleichen Materials sehr nahe am Wert der leeren Boxe.

Die Streuungen bei 2 gleichartigen Versuchen liegen also im Bereich der Messgenauigkeit des Mess-Systems. Obwohl die Abdichtung der Boxe sehr sorgfältig gemacht wird, können trotzdem kleine Unterschiede der Leckagen auftreten.

4.3.4. Erste Messungen in einem Raum

Um die Tauglichkeit des Mess-Systems in grösseren Räumen zu erfahren, wurden innerhalb der EMPA in einem einfachen Raum die ersten Messungen durchgeführt. Vor allem wurde ermittelt, wie rasch die

Verteilung des Gases im Raum möglich ist. Für diese ersten Versuche wurde die Ansaugstelle des Luft-Gas-Geschisches in Raummitte gebracht.

Versuchsobjekt:

Der Raum besitzt eine Fensterfront; in zwei Wänden ist je eine Türe angebracht. Die Bodenfläche ist nahezu quadratisch und beträgt $32,7 \text{ m}^2$. Die Raumhöhe beträgt $3,5 \text{ m}$ und somit das Volumen $114,5 \text{ m}^3$.

Es wurden zwei Versuche durchgeführt:

Versuch 1: Alle Fenster und Türen zu

Versuch 2: 1 kleines Drehflügelfenster 10 cm offen, andere Fenster und Türen zu.

Starke Windbelastung auf Fenster-Fassade.

Versuchsergebnisse:

Versuch 1: $n_L = 1,0 \text{ h}^{-1}$

Versuch 2: $n_L = 3,4 \text{ h}^{-1}$

Die Resultate dieser Messung schienen uns in vernünftiger Grössenordnung zu liegen, so dass mit auswärtigen Messungen begonnen wurde. Eine genauere Kontrolle des Mess-Systems wurde später durchgeführt und wird in Abschnitt 4.3.6. beschrieben.

4.3.5. Konzentrationsverteilung im Raum

Ein wichtiger Teil der Voruntersuchungen besteht darin, den Einfluss der Absaugorte des Luft-Gas-Gemisches auf die Messergebnisse, insbesondere bezüglich der Luftschichtung und "Totzonen" im Raum, zu ermitteln. Dazu wurde ein normaler Raum (Volumen ca. 40 m^3) ausgemessen, wo die Absaugleitungen an sehr extremen Stellen montiert wurden.

Im Raum waren allerdings keine Möbel aufgestellt.

Versuchsobjekt und Anordnung der Messstellen

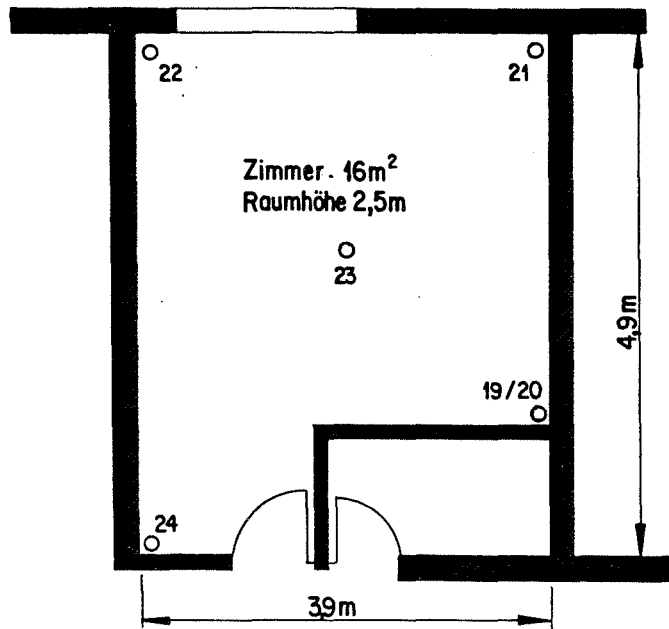


Fig. 14

Grundriss des Versuchsraumes

○ Konzentrations-Absaugstellen (Nr. 19-24)

Nr. 19: ca. 20 cm ab Boden

Nr. 20: ca. 10 cm unter Decke

Nr. 21: ca. 16 cm ab Boden

Nr. 22: ca. 10 cm unter Decke

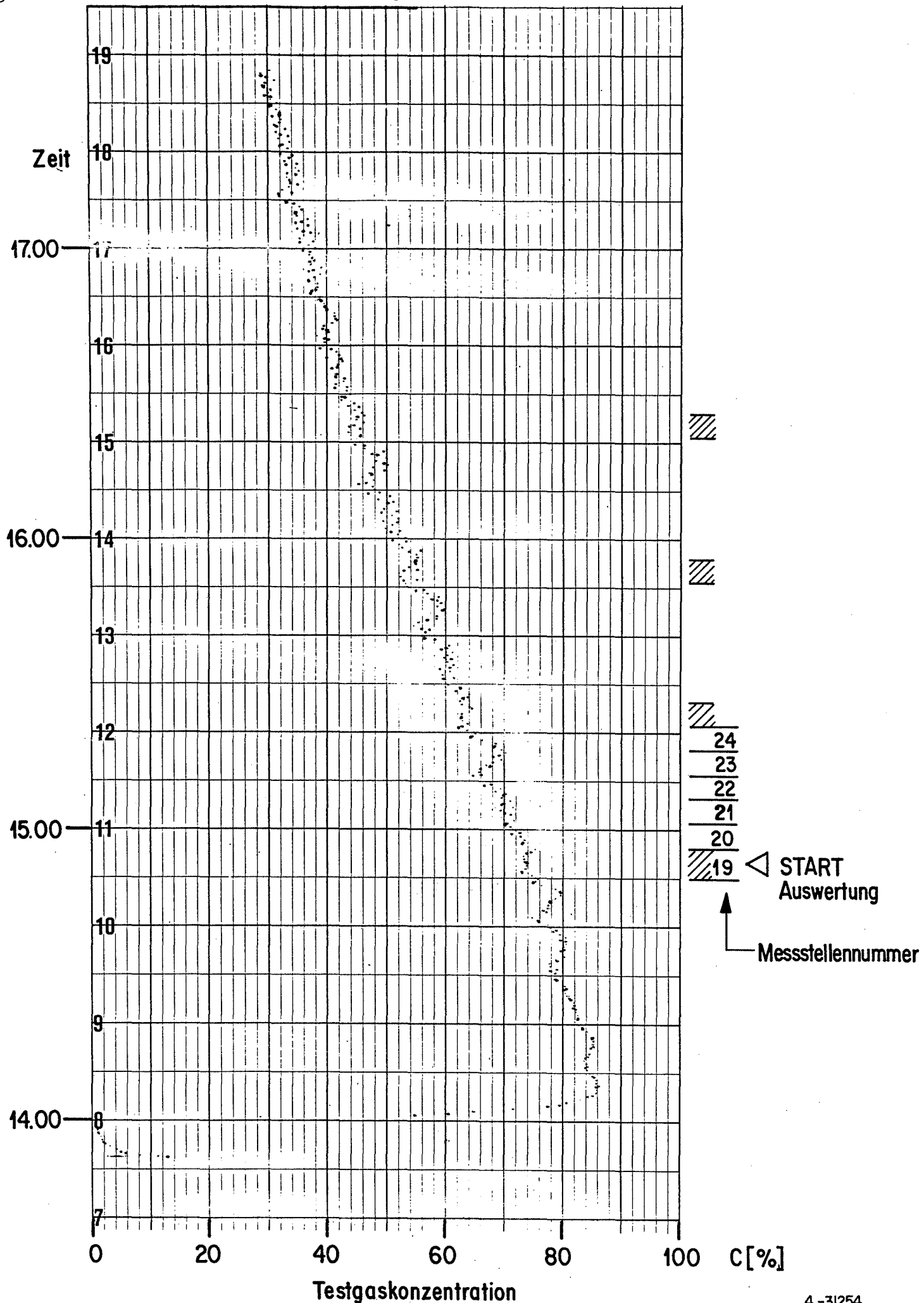
Nr. 23: 1,5 m ab Boden

Nr. 24: ca. 10 cm unter Decke

Der Raum besitzt ein 2-flügliges Holzfenster mit Doppelverglasung, wobei der eine festverschraubt ist. Der Rolladenkasten ist raumseitig und auf die ganze Raumbreite durchgezogen. Ferner besitzt der Raum eine mit PVC-Folien beschichtete Türe mit einer Metalltürzarge. Der Türspalt unten misst ca. 5 mm.

Fig. 15

Registrierstreifen einer Messung:



Auswertungen: Luftwechselzahlen n_L $[h^{-1}]$

Tabelle 2: Luftwechselzahlen der einzelnen Messstellen im Raum

Versuchs- nummer	Messstellen						MW
	19	20	21	22	23	24	
1	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43	0,41	0,42
2	0,19	0,20	0,19	0,22	0,21	0,19	0,20
3	0,61	0,55	0,58	0,61	0,59	0,57	0,59

Der Messstreifen zeigt wohl zwischen den einzelnen Messstellen verschiedene Konzentrationsniveaus, hingegen ist die Konzentrationsabnahme pro Zeiteinheit, aus der ja die Luftwechselzahl bestimmt wird, nahezu gleich. Die Ergebnisse der Versuche 1 und 2 liegen im Bereich der Zeichen- und Auswertegenauigkeit. Während Versuch 3 lagen ziemlich starke Windgeschwindigkeiten vor. Für diesen Fall zeigt es sich, dass bei dieser extremen Messstellenanordnung die Ergebnisse etwas unterschiedlich sein können. Vergleicht man aber die Messstelle Nr. 23 der Raummitte mit dem Mittelwert, so treten keine wesentlichen Unterschiede auf.

Bei kleineren Luftwechselzahlen ist also die Anordnung der Konzentrations-Absaugstellen unproblematisch, falls die Raumströmung nicht durch Möbel oder Einbauten allzu sehr behindert wird.

4.3.6. Vergleichsmessungen "Uras"/"Miran"-Konzentrations-Messgeräte

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie an der ETH Zürich waren einige Vergleichsmessungen mit zwei Tracer-Gas-Mess-Systemen möglich. Einerseits war unser Mess-System mit dem Miran II Gasanalysengerät und andererseits ein Mess-System des Institutes mit einem Uras 2 Gasanalysator beteiligt; so war es nun möglich, Messungen parallel mit dem gleichen oder aber mit verschiedenen Gasen durchzuführen, da das Uras-System für N_2O oder CO Messmöglichkeiten bietet.

Die Versuche wurden in einer Klimakammer und in einem Hörsaal am Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie durchgeführt.

Die Versuchsräume werden hier nicht näher beschrieben, da sie nur für Vergleichsmessungen herangezogen wurden.

Versuche im Hörsaal und Klimakammer

Im Hörsaal wurden Messungen mit verschiedenen Tracer-Gasen durchgeführt.

Mit dem "EMPA-Mess-System" (Miran II) wurde die Konzentrationsabnahme von Lachgas (N_2O) und mit dem "ETH-Mess-System" (Uras 2) die Konzentrationsabnahme von Kohlenmonoxid (CO) gemessen. Die beiden Gase wurden gleichzeitig in den Raum eingeblasen und mit der Raumluft durchmischt. Nachfolgend sind kurz die Ergebnisse zusammengestellt (Tabelle 3).

In der Klimakammer sind die beiden Mess-Systeme mit dem gleichen Tracergas (N_2O) eingesetzt worden (Resultate in Tabelle 4).

Tabelle 3: Luftwechsel-Messresultate in Hörsaal, "Miran"- und "Uras"-System

Versuchs- nummer	$n_L \quad [h^{-1}]$	
	Uras CO-Messung	Miran N_2O -Messung
HS 1	2,24	2,26
HS 2	2,17	2,02
HS 3	2,43	2,06
	1,97	2,08
	1,89	2,10
HS 4	1,70	1,93
HS 5	1,93	2,03
	2,05	1,99
	2,35	2,13

Tabelle 4: Luftwechsel-Messresultate in Klimakammer, "Miran"-
und "Uras"-System

Versuchs- nummer	Uras	n_L $[h^{-1}]$
	N_2O -Messung	Miran N_2O -Messung
KK 1	0,28	0,22
	0,32	0,25
KK 2	0,40	0,44
	0,49	0,48

Die Messresultate der beiden Systeme zeigen keine wesentlichen Unterschiede. Besonders die Ergebnisse (Tabelle 3) der Messungen mit unterschiedlichen Tracer-Gasen, streuen nur sehr wenig. Aus den Resultaten kann auf eine sinnvolle Geräte-Messgenauigkeit geschlossen werden.

Da die Vergleiche bei Verwendung desselben Testgases eher mehr streuen, müssen kleine Unstimmigkeiten bei der Eichung des Uras-Gerätes mit Lachgas-Testkopf vermutet werden.

Die Resultate liegen bei sehr kleinen Luftwechselzahlen innerhalb etwa $\pm 25\%$. Bei den mittleren und in der Anwendung üblichen Werten ($0,5 - 3,0 h^{-1}$) liegen sie innerhalb $\pm 10\%$.

4.3.7. Dynamik des Konzentrationsmess-Systems

Das dynamische Verhalten des Konzentrationsmess-Systems wurde so bestimmt, dass Sprungantworten des Systems gemessen wurden (Umschaltung von einer Messstelle mit bestimmter, konstanter Konzentration im Raum auf eine Messstelle im Freien, wo die Konzentration verschwindend klein ist). Die Antwortfunktion wurde mit einer Totzeit T_t und einer Zeitkonstanten T approximiert:

Tabelle 5: Auswertung der Dynamik-Eigenschaften des Konzentrationsmess-Systems (Sprungantworten auf positive und negative Konzentrations sprünge).

Messung	Konzentrations- zunahme		Konzentrations- abnahme	
	T _t [s]	T [s]	T _t [s]	T [s]
1	(5-8)	85	5	95
2	8	82,5	(5-8)	97,5

Bei der gegebenen Trägheit des Systems, die nicht durch die Leitungsdynamik, sondern vor allem durch das endliche Füllvolumen der Messkammer gegeben ist, schien uns eine Umschaltung in Taktzeiten von 5 Minuten notwendig zu sein ($> 3 T$). Diese scheinbar grossen Taktzeiten hätten durch ein vergrösserten Absaug-Strom zwar herabgesetzt werden können, doch wäre damit eine vermehrte Beeinflussung der Raumströmungen zu befürchten gewesen.

4.3.8. Einfluss der Messleitungsdynamik auf die Erfassung von Differenzdruck-Werten

Es wurden Abklärungen durchgeführt,

1. ob bei schwachem Wind Beeinflussungen der Messwerte stattfinden würden durch allzu lange Messleitungen oder Messleitungsdurchmesser unter 6 mm,
2. wie sehr hohe Druckspitzen bei böiger Windlage durch die Messleitungsdynamik ausgefiltert würden.

Die nachfolgende Tabelle 6 zeigt einige Vergleichsmessungen mit verschiedenen Schlauch-Abmessungen bei sehr geringer Windaktivität. Die angegebenen Druckdifferenzen betreffen Mittelwerte, wie sie von Auge aus den Schreiberstreifen ermittelt wurden.

Es zeigt sich also, dass die Messleitungsdynamik (Schlauchlänge und Durchmesser im Rahmen der verwendeten Werte) für Messungen bei geringen Windgeschwindigkeiten nicht ins Gewicht fällt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Vergleichsmessungen von Druckmessleitungen in Abhängigkeit des Leitungsquerschnittes und der Leitungslänge bei geringer Windgeschwindigkeit

Zuleitungen von				Druckdifferenzen $\Delta p = p_i - p_a$	
Innenraum		Aussenluft		[Pa]	[mm WS]
Innen Ø [mm]	Länge [m]	Innen Ø [mm]	Länge [m]		
-	-	6	14	-1,2	-0,12
-	-	6	2,3	-1,2	-0,12
-	-	4	9	-1,2	-0,12
6	11	4	9	-0,8	-0,08
6	11	6	2,3	-0,8	-0,08
6	11	6	14	-0,8	-0,08

Bei starker Böentätigkeit treten dynamische Druckspitzen auf, die nicht nur durch die Leitungsdynamik, sondern auch durch die Gerätedynamik gedämpft werden.

Da aber im Zusammenhang mit den Luftwechsel-Messungen eine Erfassung des ungefähren Bereichs von Staudruck- resp. Windgeschwindigkeit am Gebäude interessieren, zusammen mit einem Mittelwert über einer bestimmten Messperiode, wurde diesem Problem keine weitere Beachtung geschenkt. - Für Detailmessungen der dynamischen Effekte beim Luftaustausch oder für Detailmessungen der Druckverhältnisse in und an Gebäuden müssten geeignete Vorkehrungen getroffen werden, um diese Filterungseffekte zu verringern.

4.3.9. Totale Messfehler bei der Bestimmung der Luftwechselzahl aus Gaskonzentrationsmessungen

Für die Beurteilung der auftretenden Messfehler standen folgende Unterlagen zur Verfügung:

- Abklärungen, beschrieben in Kapitel 4.3.1. bis 4.3.8.
- Ergebnisse von Mehrfachdurchführungen von Versuchen bei möglichst gleichen Bedingungen

- Angaben anderer Autoren (insbesondere Esdorn in L 4/2, Hitchin/Wilson in L 3/4).

Daraus war ersichtlich, dass bei mittleren Windgeschwindigkeiten und Luftwechselzahlen über etwa $n_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$ mit einer relativen Genauigkeit von $\pm 10 \%$ gerechnet werden kann. Unter ungünstigen Verhältnissen kann dieser Fehler, etwa bei sehr kleinen Luftwechselzahlen, auf $\pm 15 - 20 \%$ anwachsen.

Hauptursachen für die Messfehler sind wohl

- Variationen der Einflussgrößen während der Messperiode,
- Driften des Mess- und Registrier-Systems (O-Punkt, Verstärkung),
- Leckage- und Absorptionseffekte
- Inhomogenitäten der Gaskonzentration in Räumen

Die oben genannten Fehler sind nur durch viel grösseren Geräteaufwand teilweise zu eliminieren. Dieser Aufwand lohnt sich keinesfalls, wenn man die sehr starke Beeinflussung der Luftwechselzahlen in realen Bauten durch den Benutzer bedenkt.

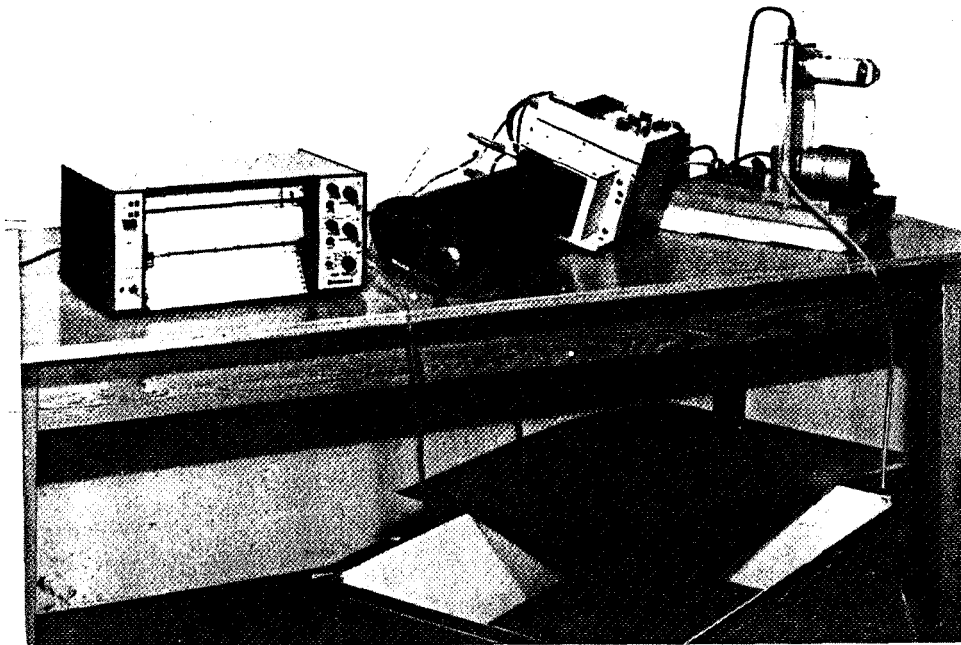


Bild 7 (Foto EMPA-Nr. 72515)

Einrichtung für die Absorptionsmessungen typischer Baumaterialien. Unten Testboxe zum Einbau von Testelementen, oben Mitte Gasanalysator, rechts daneben die Pumpe und links das Registriergerät

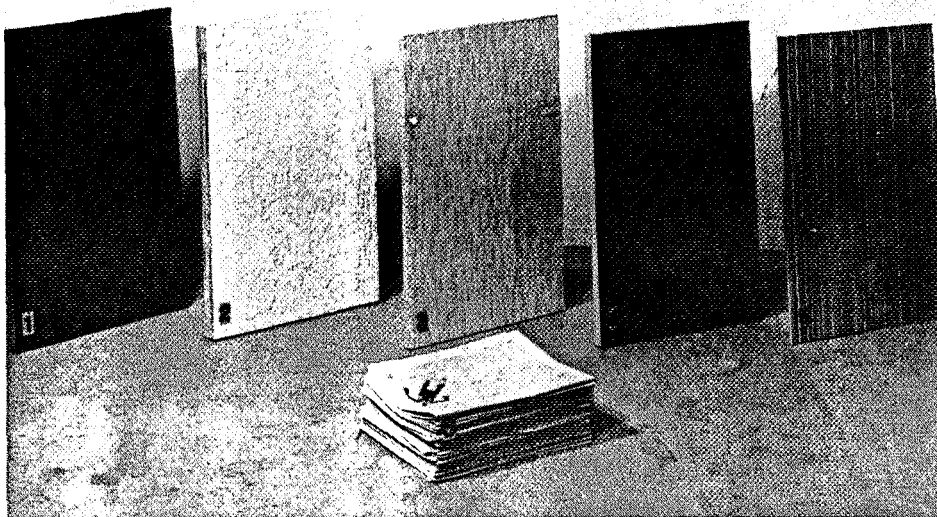


Bild 8 (Foto EMPA-Nr. 72517)

Typische Baumaterialien-Proben für Absorptionsmessungen:

Nr. 1: Spanplatte

Nr. 2: Gipsplatte

Nr. 3: Tapeten (auf Spanplatte
aufgezogen)

Nr. 4: Spannteppich (auf Span-
platte aufgezogen)

Nr. 5: Sperrholzplatte

Nr. 6: Papierbeige

6. Messresultate

6.1. Beispiel einer Auswertung

Zuerst wird kurz das Versuchsobjekt mit den baulichen Daten beschrieben. Dann wird die Auswertung der registrierten Messgrößen dargestellt. Im Vordergrund steht die Bestimmung der Luftwechselzahl anhand der Konzentrationsänderung pro Zeiteinheit. Der theoretische Zusammenhang ist schon im Kapitel 2 vorgestellt worden. - Ferner sind parallel dazu die Messungen von Einflussparametern auszuwerten, wie sie hier kurz beschrieben werden.

6.1.1. Versuchsobjekt

(Siehe auch Bilder 11 u. 12, 5-Zimmerwohnung im Haus 59, 4. Stock)

Fig. 16 Situationsplan

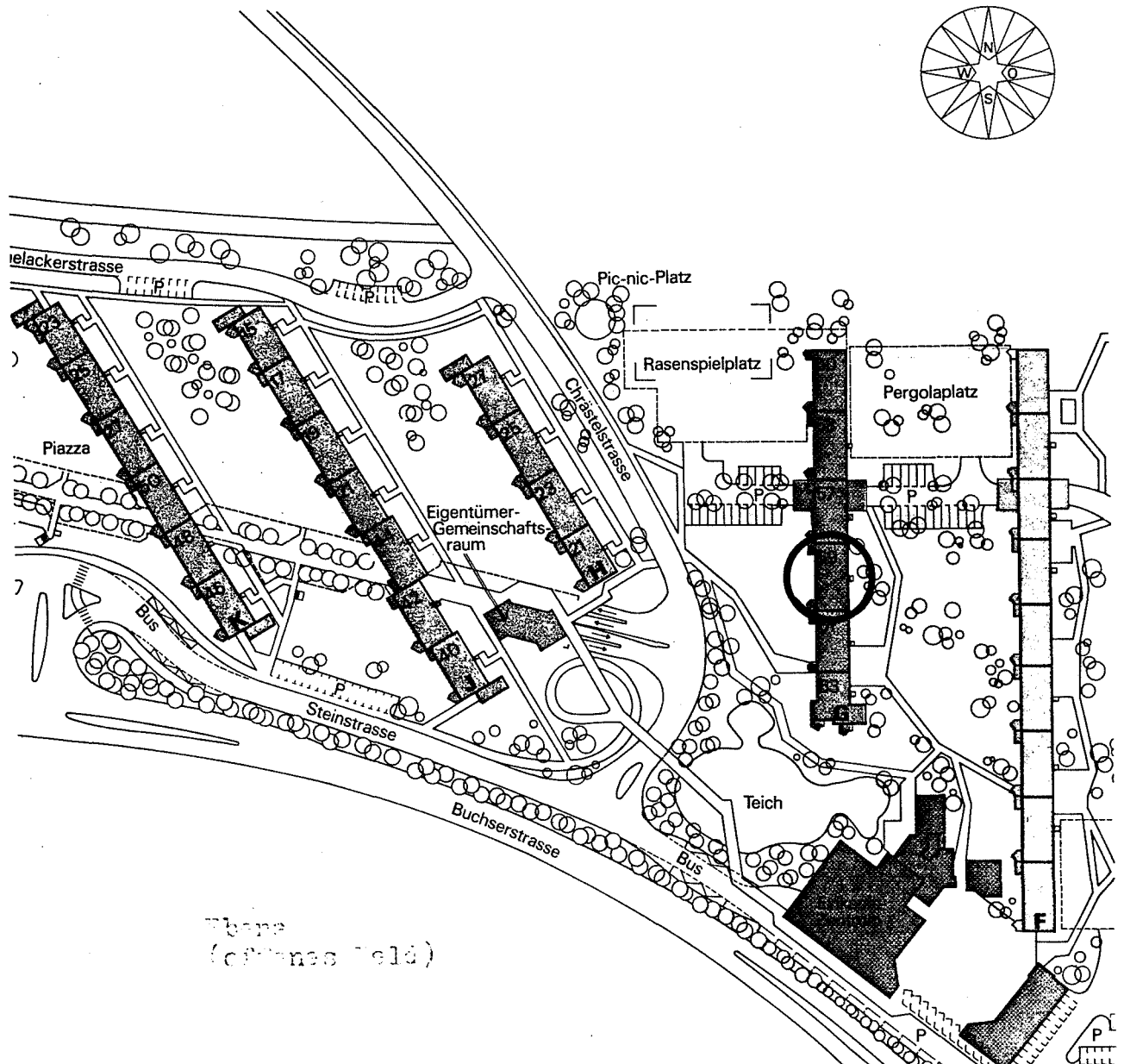
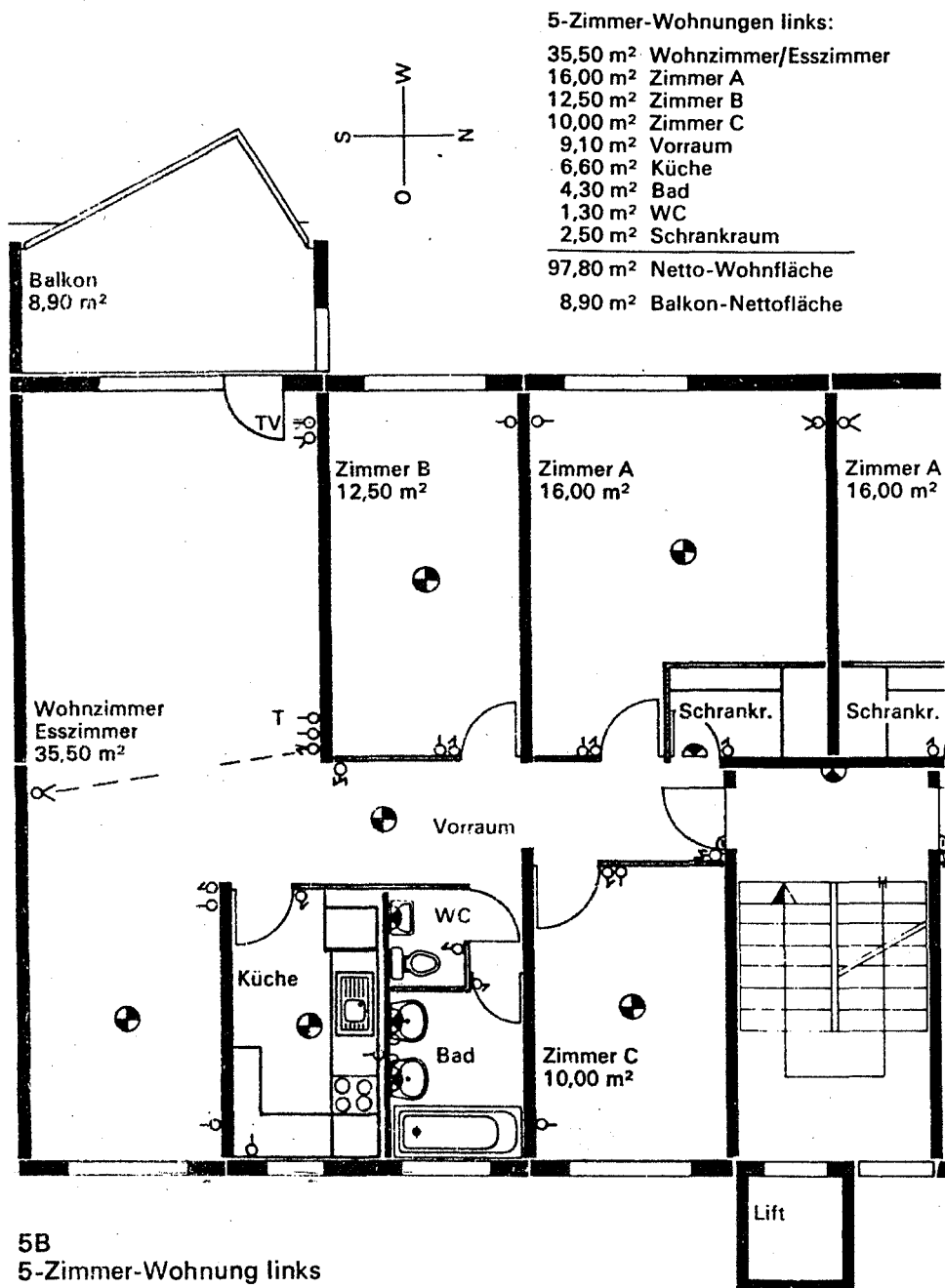


Fig. 17 Grundriss der Gesamtwohnung (M 1:100)
(Beton-Element-Bauweise; Alter 2 Jahre; Raumhöhe 2,51 m)



Für dieses Beispiel wird nur die Konstruktion des Wohnzimmers (mit Vorraum) beschrieben.

Wandbeläge:

Wohnzimmer im "Rohbau" (Betonwände und Unterlagsboden), abgesehen von Aussenwänden (West- und Ostwand), die auf der Innenseite mit Sandspritzplastik überzogen sind.

Türen:

Wohnungseingangstüre in massiver Ausführung mit Alublech- und PVC-Folienbeschichtung, kunstharzgestrichene Metalltürzarge.

Seitlich und oben ist im Falz des Rahmens eine Profildichtung (Lippendichtung) angebracht, unten an der Türe ein Weichgummi-Vollprofil. Türen innerhalb der Wohnung aus glatten Türblättern mit heller PVC-Folienbeschichtung, Metallzargen und aufgesetzten Schwellen.

Fenster:

In West- und Ostfassade je ein 2-flügliges Holzfenster mit Doppelverglasung. Beide Flügel sind Drehflügel, wobei der eine festverschraubt ist. In Westfassade zusätzlich Balkontüre aus Holz, mit Doppelverglasung.

Rolladen:

Kunststoff-Kettenprofil

Rolladenkasten raumseitig und auf die ganze Raumbreite durchgezogen.

Heizung:

Radiatoren, 2 Säulen-Röhrenradiator;

unter Ostfenster (L = 57 cm, H = 50 cm)

unter Westfenster (L = 124 cm, H = 50 cm)

Für Fenster, Türen und Rolladenkasten gelten noch folgende Massangaben (berechnet aus den Lichtmassen)

Türen:	Wohnungstüre	Fläche	1,71 m ²
		Fugenlänge	5,65 m
	zu Zimmer B	Fläche	1,54 m ²
		Fugenlänge	5,50 m
		Spaltbreite unten	3-5 mm
	zu Zimmer A und C abgeklebt		
	zu Küche	Fläche	1,43 m ²
		Fugenlänge	5,39 m
		Spaltbreite unten	4-5 mm
	zu Bad	Fläche	1,20 m ²
		Fugenlänge	5,17 m
		Spaltbreite unten	3-5 mm

	zu WC	Fläche	1,14 m ²
		Fugenlänge	5,09 m
		Spaltbreite unten	3-6 mm
	zu Schrankraum (immer offen !)		
	Balkontüre	Fläche	1,52 m ²
		Fugenlänge	5,51 m
Fenster:	in Westfassade	Fläche	2,21 m ²
		Fugenlänge	7,33 m
	in Ostfassade	Fläche	1,94 m ²
		Fugenlänge	6,84 m
Rolladenkasten:	Westwand	Fugenlänge	3,67 m
	Ostwand	Fugenlänge	3,67 m

Alle Türen im Wohnraum besitzen grosse Schlüssellöcher.

Bei der Ermittlung der Fugenlängen an den Rolladenkasten wurde einzig der Umfang des Abschlussdeckels einbezogen.

Die Durchführöffnungen für die Rolladengurten waren knapp bemessen, angepasst an ihre Funktion.



Bild 11 (Foto EMPA-Nr. 72928/7)

Ostfassade des Gebäudes in dem sich Messwohnung III (5-Zimmerwohnung) links des mittleren Kamins im 4. Stock befindet (Weisse Körper vor den Fenstern).

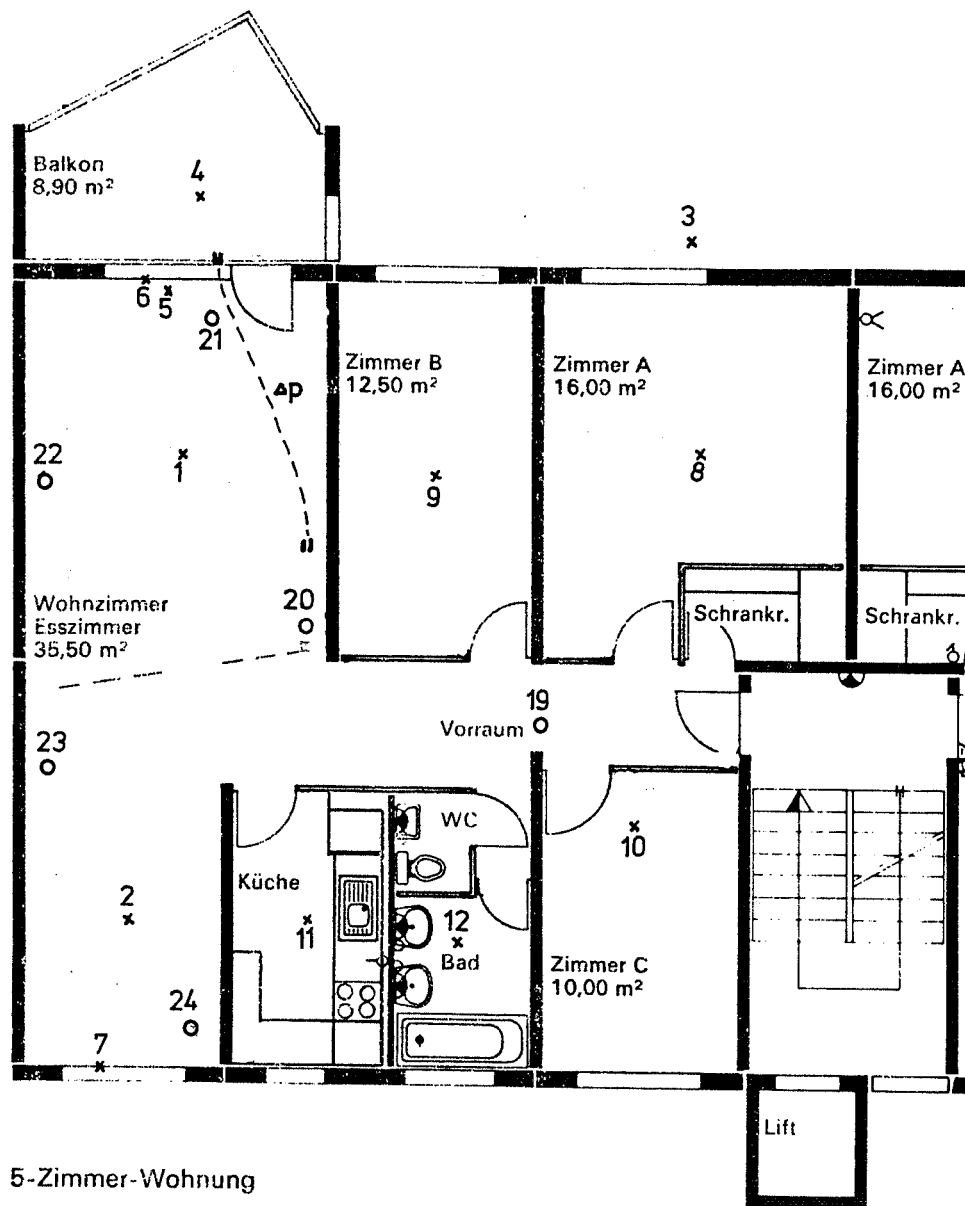


Bild 12 (Foto EMPA-Nr. 72929/6)

Westfassade des Gebäudes in dem sich die Messwohnung III neben der ersten Doppelbalkonreihe im 4. Stock befindet.

6.1.2. Anordnung der Messstellen

Fig. 18 Grundriss der Messwohnung mit den entsprechenden Messstellen



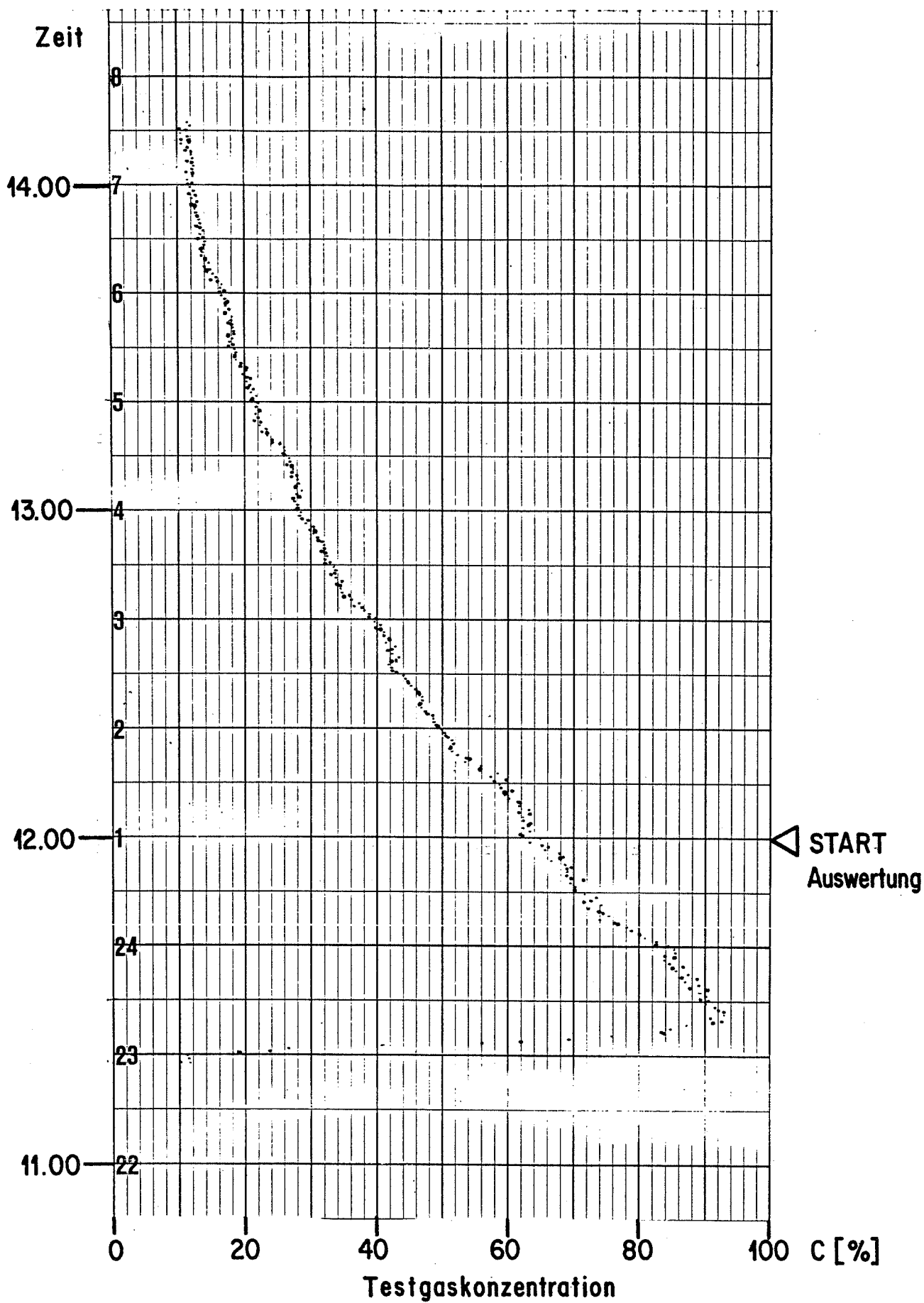
- Konzentrationsmessstellen (Nr. 19-24) ca. 1,5 m ab Boden
- × Temperaturmessstellen

- Nr. 1, 2 Wohnzimmer Lufttemperaturen 1,5 m ab Boden
- Nr. 3, 4 Aussenlufttemperaturen
- Nr. 5 Lufttemperatur ob Heizkörper 1,5 m ab Boden
- Nr. 6, 7 Fensteroberflächentemperaturen innen, Mitte Scheibe
- Nr. 8 - 12 Verschiedene Raumlufttemperaturen 1,5 m ab Boden
- " Druckmessstelle für
 Δp =Differenzdruck über Westfassade

Windmesser auf Dach für "ungestörte Windlage", Geber ca. 4,5 m ob Dach.

6.1.3. Auswertbeispiele der Messstreifen KONZENTRATIONSMESSUNG :

Fig. 19 Registrierstreifen einer Konzentrationsmessung



Die wegen der Gerätekennlinie korrigierten Messwerte werden auf ein logarithmisches Papier übertragen:

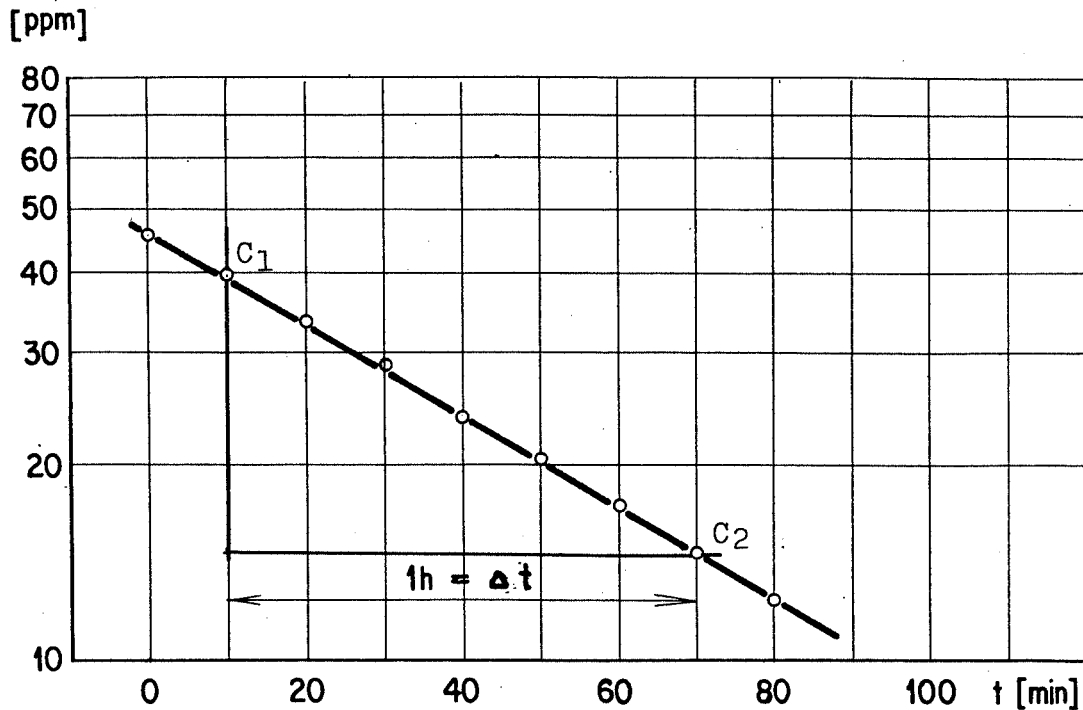


Fig. 20 Beispiel einer Auswertung der Luftwechselzahl in logarithmisches Papier

Auswertung im logarithmischen Papier:

Gemäss Formel von Seidel (vgl. Seite 28) ist

$$n_L = 2,3 \cdot \frac{(\log C_1 - \log C_2)}{\Delta t}$$

Die entsprechenden Strecken $(\log C_1 - \log C_2)$ und Δt sind in Fig. 20 abzulesen; allerdings ist der entsprechende Massstabsfaktor einzu- beziehen (für log. Skala: 83,3 mm/Einheit; resp. 60 mm/Stunde).

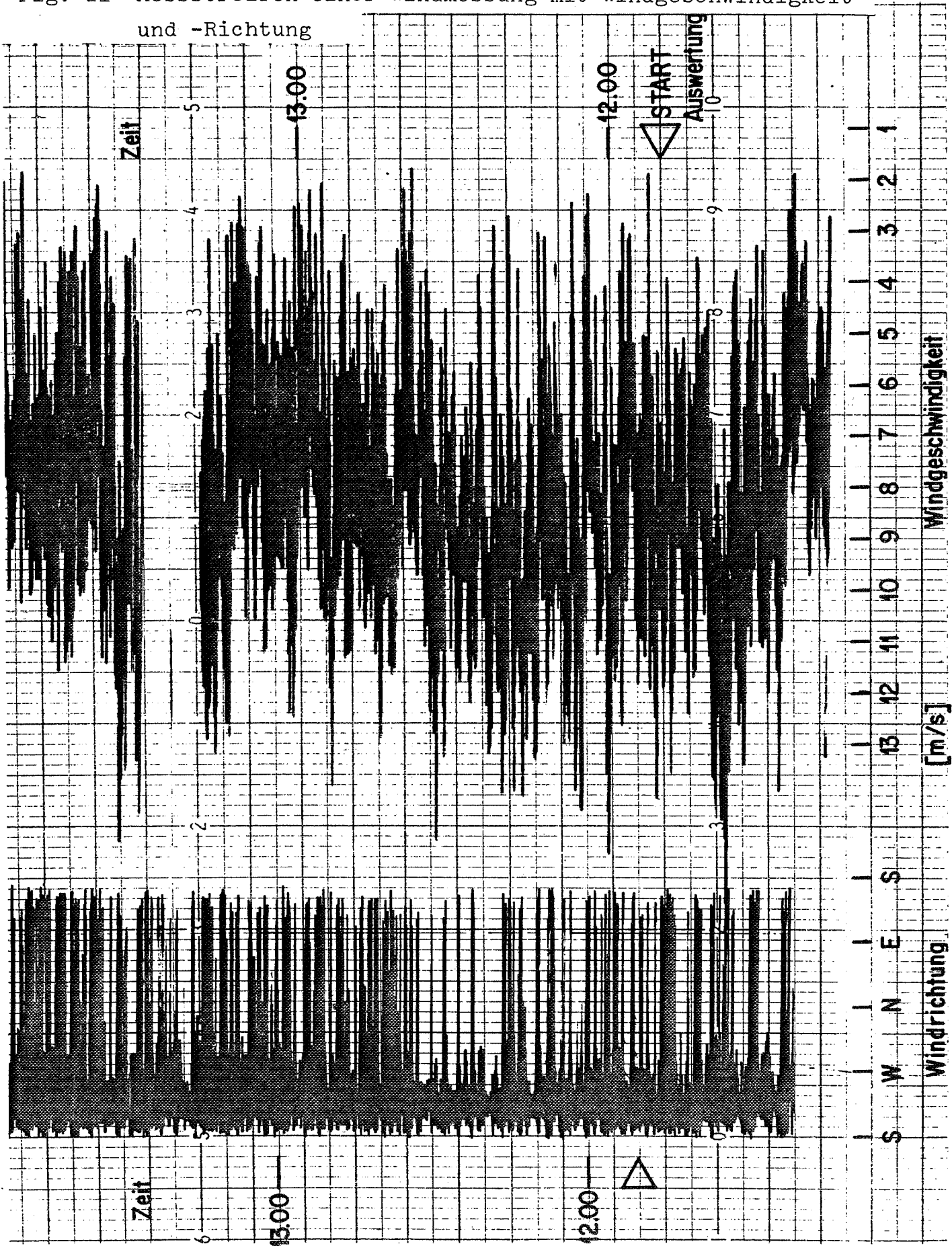
Resultat rechnerisch:

$$n_L = 2,3 \cdot \frac{(\log 40 - \log 15)}{1} = 0,97 \quad h^{-1}$$

=====

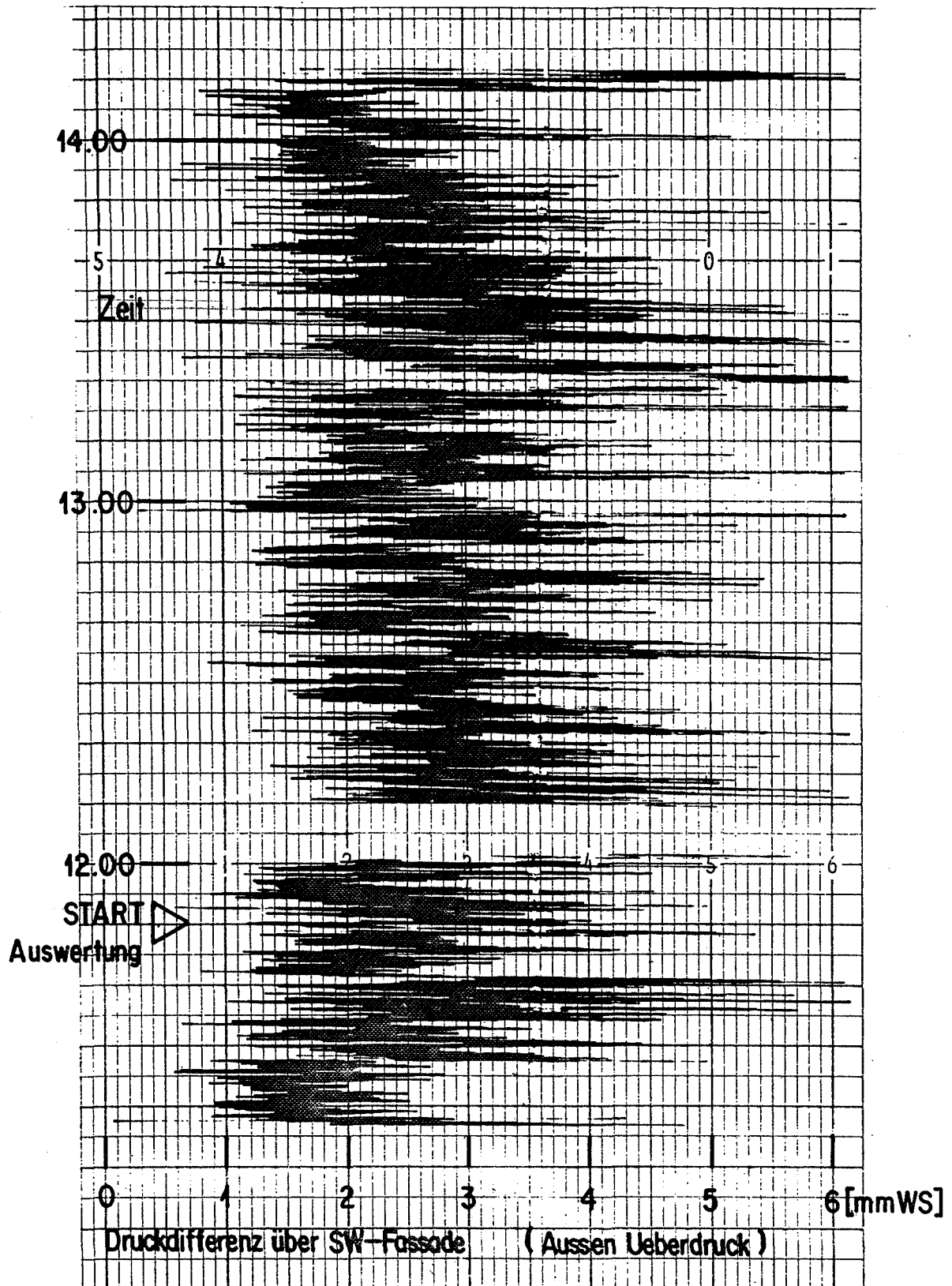
Windmessung

Fig. 21 Messstreifen einer Windmessung mit Windgeschwindigkeit und -Richtung



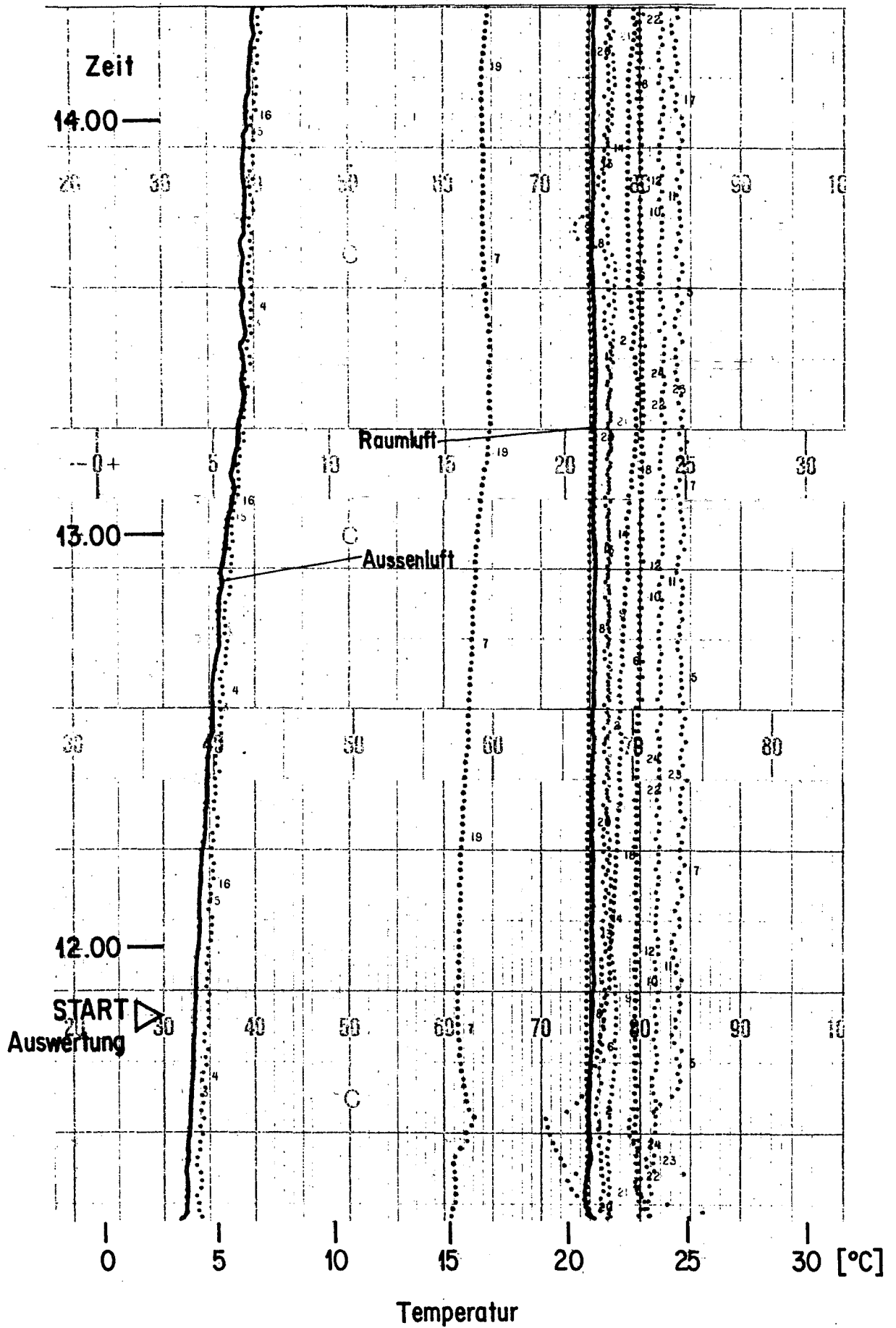
Druckmessung

Fig. 22 Messtreifen einer Druckdifferenzmessung



Temperaturmessung

Fig. 23 Messstreifen der Temperaturmessung



Streifenauswertungen:

Windmessung:

Bei der Windgeschwindigkeit geben wir den Bereich und einen geschätzten Mittelwert während der entsprechenden Versuchszeit an.

Windgeschwindigkeit v_L :

Bereich: 2,5 - 14,0 m/s

geschätzter Mittelwert: 8,5 m/s

Windrichtung: SW

Druckmessung:

Auch bei der Druckmessung muss ein Mittelwert während des Versuches abgeschätzt werden.

hier z.B. $\Delta p = -2,8$ mm WS, wobei

$$\Delta p = p_i - p_a$$

Temperaturmessung:

Es werden hier vor allem die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenluft ausgewertet. Auf dem Messstreifen sind eine Reihe von Temperaturen aufgezeichnet, wobei die Nummerierung / Platzierung der Fig. 18 zu entnehmen ist.

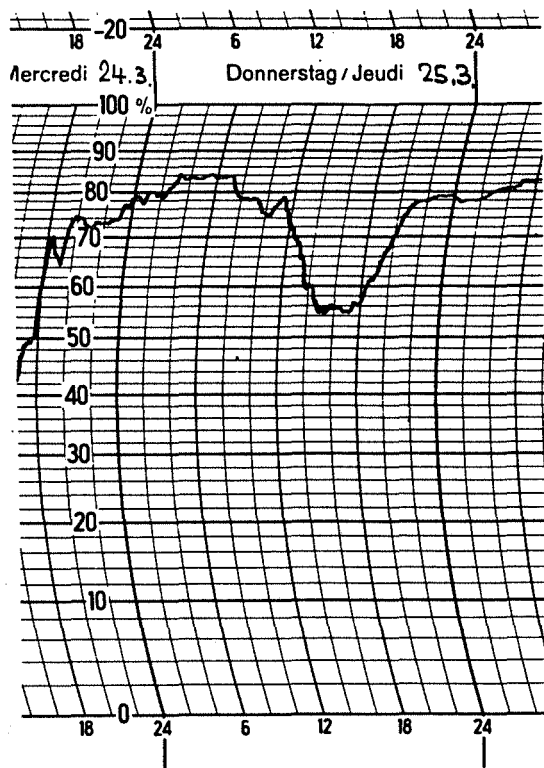
(Die Messwerte 13 - 24 entsprechen den Werten 1 - 12)

Auswertung:

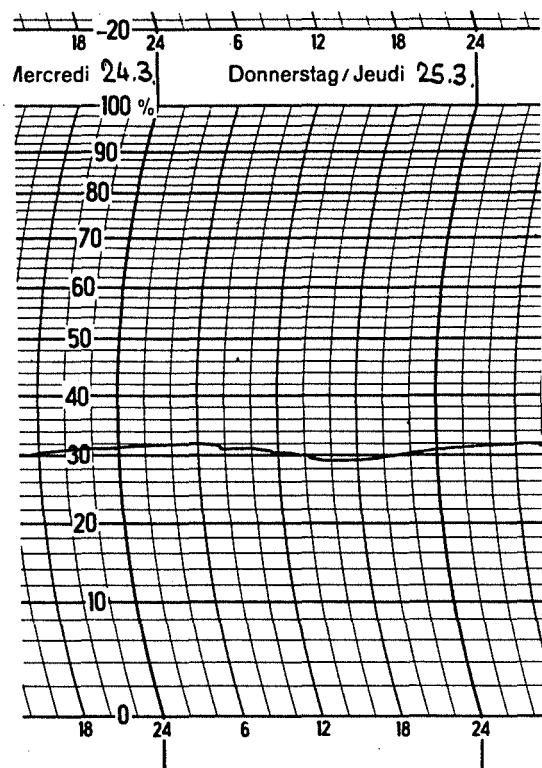
$$\Delta \vartheta = 17 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ wobei } \Delta \vartheta = \vartheta_i - \vartheta_a$$

Feuchtigkeitsmessung

Aussenluft



Innenluft



$$\varphi_a \approx 74 \%$$

$$\varphi_i = 30 \%$$

Fig. 24 Messstreifen von Feuchtigkeitsmessungen

6.1.4. Zusammenfassung der Messwerte

Die ausgewerteten Messergebnisse werden wie folgt in Tabellenform zusammengefasst:

Tabelle 8: Zusammenstellung der Messwerte

Windgeschwindigkeit v_L Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Wind- richtung	Δp ($p_i - p_a$) [mm WS]
2,5 - 14,0	8,5	SW	-2,8

$\Delta \psi$ ($\psi_i - \psi_a$) [°]	φ_a [%]	φ_i [%]	n_L [yh]
17,0	74	30	0,97

Anmerkung:

Es wird im ganzen Bericht darauf verzichtet, bei Messwerten von Luftgeschwindigkeit v_L , Differenzdruck Δp etc. durch eine spezielle Kennzeichnung anzudeuten, dass es sich um Mittelwerte einer bestimmten Messperiode handelt.

Dübendorf, 12. Dezember 1977

Der Sachbearbeiter:

[Handwritten signature]

Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
Abteilung Bauphysik
Der Abteilungsvorsteher:

i. V. *[Handwritten signature]*

A N H A N G

Literaturübersicht

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
1	WOHNHYGIENE - ASPEKTE ZU LUFTWECHSEL, EMPFEHLUNGEN UEBER NOTWENDIGE LUFTWECHSELRATEN		
L 1/1	Wohnphysiologie; Grundlagen gesunden Wohnens	Etienne Grandjean, Verlag für Architektur Artemis, Zürich, 1973	Weitreichendes Grundlagenwerk
L 1/2	Physiologische Grundlagen des Wohnungsbaues	S. Huser, E. Grandjean, M. Suchantke Eidg. Drucksachen- u. Materialzentrale Bern, Schriftenreihe Wohnungsbau 14 d, 1971	Enthält Empfehlungen über Luftwechselzahlen infolge natürlicher Lüftung, Fensterlüftung, Schachtlüftung und mechanische Lüftung in typischen Räumen
L 1/3	Luftverunreinigung und Gesundheit	Etienne Grandjean, Neue Zürcher Zeitung, Nr. 46, 29. Januar 1973	Übersichtsbetrachtung, allgemein verständlich
L 1/4	Wohnphysiologische Forderungen an die Heizung	Etienne Grandjean, Schweizerische Blätter für Heizung und Lüftung, 1970	Spezifische Formulierung der Anforderungen an die Heizung (verschiedene Systeme) aus der Sicht der Wohnhygiene
L 1/5	Keimgehalt der Raumluft in Abhängigkeit des Luftwechsels	H.J. Russenberger u. H.U. Wanner, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, Zürich Clausiusstr. 25, 1974	Kurzfassung zu L 1/6
L 1/6	Keimgehalt der Raumluft in Abhängigkeit der Belegung und des Luftwechsels	H.J. Russenberger, ETH Zürich, Diss. Nr. 5230, 1975	Experimentell/theoretische Untersuchung an Test-Klimakammer, saubere Darstellung messtechnischer Grundlagen
L 1/7	Mensch und Klima	H. Reinders, VDI Verlag, Düsseldorf, 1969	Vielseitiges Grundlagenwerk
L 1/8	Ueber die Selbstlüftung von Wohnräumen	H.W. Georgii, Univ.-Institut für Meteorologie und Geophysik, Frankfurt a.M. Feldbergstrasse 47, 1954	Im Zeitpunkt der Veröffentlichung wegweisender Aufsatz
L 1/9	Heiz- und Klimatechnik, Abschnitt Wärme-physiologische und hygienische Grundlagen	Rietschel/Raiss, Verlag Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 15. Auflage, 1968	Grundlagenwerk Heizung-/Klimatechnik im weitesten Sinn (speziell S. 29-35 und 327 ff, Bd. I)
L 1/10	Hygiene	J. Borneff, Thieme Verlag, Stuttgart, 1974	Kurzgefasste Grundlagen (S. 300-303, ab. 320)
L 1/11	Hilfsbuch für raum- und aussenklimatechnische Messungen	F. Bradtke u. W. Liese, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 2. Auflage, 1952	Formel von Seidel zur Ermittlung des Luftwechsels aus Messungen mit CO ₂ in Räumen
L 1/12	Die Messung des CO ₂ -Gehaltes als Indikator für die hygienische Beurteilung der Raumluft	U. Lutz-Dettinger, W. Wundt und U. Eppenstein, Archiv für Hygiene und Bakteriologie, München-Berlin-Wien, Band 151, Heft 1/2, 1967	
L 1/13	Luftverunreinigende Stoffe in Innenräumen	Helmut Kettner, Klima-Kälte-Technik, Heft 1, 1973	Kurzgefasste Grundlagen
L 1/14	Ueber die Kohlendioxid-Konzentration der Luft innerhalb und ausserhalb von Arbeitsräumen	Albert Köhler, Klima-Kälte-Technik, Heft 3, 1974	Zusammenhänge CO ₂ -Konzentration mit Tageszeit, Aussenkonzentration, Belegung von Räumen

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 1/15	Zulässige Werte am Arbeitsplatz - Gesundheits-schädliche Stoffe (MAK-Werte) - Physikalische Einwirkungen	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern, Form 1903 d, Ausgabe 1974	Vorschrift
L 1/16	Die Selbstlüftung von Wohnungen aus hygienischer Sicht	R. Wiedenhoff, "Gas und Wärme international", Heft 7/8, 1976	Zusammenfassung des heutigen Wissensstandes, Betrachtung speziell im Hinblick auf Gas-feuerungsgeräte in Wohnräumen
L 1/17	FGK-Vorträge während der ish	ish Berichterstattung, CCI, Mai 1975	Hinweis auf Vortrag Prof.Steimle; Problematik der Grenzzustände, wo Klimatisierung / Lüftung unbedingt nötig ist
L 1/18	The Ventilation of Buildings; Fresh Air Requirements	Technical Data Note 19, Printed for H.M. Stationery Office by Courrier Printing Co. Ltd., Tunbridge Wells., 1970	Grundlagen, Theorie, dann Richtwerte für ver-schiedene industrielle Räume; Richtlinie brit. Arbeits-Ministerium
L 1/19	Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Abschnitt Berechnung der Lüftungs- und Klimaanlageanlagen	Recknagel-Sprenger, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 57. Ausgabe, 1972, S. 1053-1054	Richtlinie für die Bestimmung der notwendigen Luftmenge in belüfteten (klimatisierten) Bauten
L 1/20	Klimakursus	F. Steimle, Verlag C.F.Müller, Karlsruhe, 1969, S. 23-25	Erfahrungswerte für Luftwechsel in belüfteten Räumen mit verschiedener Nutzung
L 1/21	Leitfaden zur System-Auslegung, Kühl- und Heizlastberechnung	Carrier, Schulungskurs Band 4, Ventilation SA, Stäfa, Kap. 6., Tabelle 45	Empfohlene Lüftungsraten für Räume verschiedener Nutzung in m3/h Person, teilweise in m3/h m2
L 1/22	Regeln für die "Kühllastberechnung"	Verband Schweiz. Heizungs- und Lüftungs-firmen, Zürich, 1969, Figur 31	Empfohlene Minimal-Aussenluftraten
L 1/23	Wohnungshygienische Bewertung	Sanitär- und Heizungstechnik, Nr. 8, 1972	Anforderungen an geeignete natürliche / künstli-che Lüftung im Hinblick auf die Gesamtbewertung einer Wohnung
L 1/24	Neubearbeitung der DIN 4701 "Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden"	H. Esdorn, HLH, Heft 12, 1972	Hinweise auf neueste deutsche Berechnungsregeln, dort verwendete Minimal-Luftraten
L 1/25	Lüftung von Wohnungen	VDI-Richtlinie Nr. 2088 (Entwurf) Mai 1975	Richtlinie für dauernd be- resp. entlüftete Räume, Minimal-Luftraten für verschiedene Räume aufge-listet (teilweise Angabe von nL, teilweise von m3/h)
L 1/26	Ventilatie van woongebouwen	NEN 1087, 1e druk, Normalisatie-Instituut Nederlands, december 1975	Richtlinie für belüftete Wohnbauten, als Anhang kurzgefasste Grundlagen

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 1/27	Klima und Behaglichkeit	H. Spegele und F. Steimle, Klima-Kälte-Technik, Heft 4, 1973	Gute Zusammenstellung aller Einflussparameter auf die Behaglichkeit
L 1/28	Lüftung von Bädern und Spülaborten ohne Aussenfenster	DIN 18017, Blatt 3, August 1970	Anforderungen an Volumenströme in WC und Bädern, an Leistung des Gebläses
L 1/29	Lüftungstechnische Anlagen, Grundregeln	DIN 1946, Blatt 1, April 1960, S. 5	Minimale Aussenluftströme für Lüftungs- und Klimaanlagen
L 1/30	Mechanische Be- und Entlüftung in der Industrie	H. Küspert und H. Reuter, Haustechnische Rundschau, Heft 10, 1973	Kommentare zur Neufassung DIN 4701 hinsichtlich Mindest-Aussenluftströme
L 1/31	Luftverschlechterung, Raumgrösse und Luftwechsel	Oel- und Gasfeuerung, Heft 9, 1976	Zusammenhang zwischen Zuluftstrom und notwendiger Lüftungshäufigkeit bei zeitweiser Lüftung in Räumen bestimmter Nutzung
L 1/32	Die "Neue Energiekonzeption"	L. Rado, Gas Wärme international, Heft 7/8, 1976	Speziell S. 334: Problematik der Festlegung von a-Werten und der Auswirkung auf die entstehenden Innenraumzustände
L 1/33	Die Luftqualität in klimatisierten Räumen	J.J.Kowalczewski, Schweiz. Bauzeitung, Heft 32, 10. August 1972	Probleme der Luftverschmutzung in klimatisierten Räumen, Betrachtung heute üblicher Auslegungsregeln für Anlagen
L 1/34	Aktuelles aus Haustechnik & Umweltschutz Klimatisierung am Arbeitsplatz	Steimle, Gesundheits-Ing., Heft 9, 1976	Welche Luftzustände sind an einem Arbeitsplatz zumutbar / wann muss klimatisiert werden (Gefahr CO ₂ , CO-Gehalt)
L 1/35	Klimatologie	Literaturübersicht, HLH, Heft 7, 1975	keine sehr vollständige Sammlung
L 1/36	Luftbehandlung ist notwendig	J. Paul, GCI, Heft 3, 1977	Paul versucht zu beweisen, dass im heutigen Klima fast nur noch eine Zwangslüftung zu erträglichen Innenluftzuständen führt
L 1/37	Excessive infiltration and ventilation air	E.R.Ambrose, HPAC, Heft 11, 1975	Feststellung, dass die meisten Auslegungsregeln auf veralteten Untersuchungen beruhen; Forschung hinsichtlich Minimal-Luftstraten seien dringend nötig!
L 1/38	Allgemeine Lüftungsanforderungen an Wohnungen aus hygienischer, physiologischer und bakteriologischer Sicht (Gutachten)	W.Müller-Limmroth, Lehrstuhl und Institut für Arbeitsphysiologie der Technischen Universität München, München 1977, unveröffentl.	Untersuchung der erforderlichen Frischluftmengen (Luftwechsel) aus hygienischer, physiologischer und bakteriologischer Sicht.
L 1/39	Untersuchungen über den Frischluftbedarf von Wohnräumen (Theoretische Studie)	Battelle-Institut e.V. Frankfurt, Januar 1977, unveröffentlicht	Theoretische Studie über Frischluftbedarf aus wohnphysiologischen und wohnhygienischen Erkenntnissen

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
2	LUFTWECHSEL, ENERGETISCHE ASPEKTE		
L 2/1	Die Durchlüftung von Räumen durch Windanriff und der Wärmebedarf für die Lüftung	O.Krischer und H.Beck, VDI Berichte, Bd.18, 1957, S. 29-59	Ganz wesentliche Grundlagenuntersuchung zu Lüftungs-Wärmeverlusten; kürzlich erweitert durch Publikation von H. Esdorn (vgl. Lit.Liste 8)
L 2/2	Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Fensterbauarten	W.Raiss und K.Simon, VDI Berichte, Bd. 18, 1957, S. 5-27	Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, in der Methodik noch gültig und interessant; alles Zahlenmaterial überholt; Benutzereinflüsse überspielen Konstruktionseinflüsse !
L 2/3	Home energy use gets thorough analysis	Electrical World, July 1, 1974	Interessante Zusammenhänge Wind / Benutzer auf Energiebedarf während Tagesablauf
L 2/4	Heat loss in buildings as a result of infiltration	P.J.Jackmann, B.S.E, April 1974	Kommentare zur Wahl geeigneter Auslegungswerte (Wind, Temp.) für das Heizsystem; Neue Wege werden beschritten in dieser Arbeit
L 2/5	Analysis of infiltration	Hittman Associates, Inc.Columbia, Contract No H-1654, March 1973	Aus Messungen an Bauten wird durch Regression ein Zusammenhang zwischen WLuft, Δt und nL gefunden (Auszug aus L 8/6)
L 2/6	Calculation of infiltration, and transmission heat loss, in residential buildings, by digital computer	J.Gabrielsson and P.Porra, J.I.H.V.E, March 1968	Beschreibung Berechnungsprogramm, wohl nicht mehr auf aktuellstem Stand der Technik
L 2/7	Energy targets for office buildings and barrack blocks	A.A.Cornell and P.W.Scanlon, B.S.E, September 1975	Neue Regeln für Berechnung der Energieverluste in Bürogebäuden und Barracken (Kasernen)
L 2/8	Some effects of thermal insulation on design	G.W.Brundrett, Applied Energy (GB), 1975, S. 7 ff	Als Teilaspekt wird die Vermeidung von Kondensation durch Lüftung sowie die geeignete Bestimmung der Lüftungsverluste behandelt
L 2/9	Der Einfluss der Lüftung auf den optimalen Wärmeschutz und den Wärme komfort von Wohnungen	W.Kunz, K.Petzold, Luft- und Kältetechnik, Heft 1, 1975	Petzold betont, dass im Gegensatz zu bisher üblichen Auffassungen insbesondere in Aussenräumen die Lüftungsverluste gegenüber Transmissionsverlusten dominieren
L 2/10	Energiebilanz für das Versuchsauditorium der ETH Zürich	H.H.Thomann und P.Merkli, Gesundheits-Ingenieur, Heft 8, 1971	Klimatisiertes Versuchsauditorium; Methodik der Energiebilanzbildung
L 2/11	Transmissions- und Lüftungswärmebedarf in Hochhäusern	K.Späthe, Sanitär- und Heizungstechnik, Heft 4, 1973	Ergänzungen zu DIN 4701, speziell für Windeinfluss bei Hochhäusern

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 2/12	Temperaturen angrenzender, unbeheizter Nebenräume	Eckert, Schweiz. Blätter für Heizung und Lüftung, 1961	Probleme der Wärmeverluste in ungleich beheizten Räumen
L 2/13	Grundlagendaten für Energiesparmassnahmen	Eidg.Kom.für eine Gesamtenergiekonzeption, Eidg.Amt für Energiewirtschaft, 19.2.1976	Ueberschlägige Berechnungen zu Wärmeverlusten, Massnahmen zur Einsparung von Energie bei Gebäuden
L 2/14	Wärmelast und Raumtemperatur - Stand und Tendenzen	K.Petzold, Luft- und Kältetechnik, Heft 5, 1975	Ueberblick über den Stand der Kenntnisse zur Ermittlung des Wärmebedarfs aus ostdeutscher Sicht, 1975
L 2/15	Auswertung klimatologischer Beobachtungen für die Klimatechnik	R.Reidat, Heiz.-Lüft.-Haustechnik, Heft 6, 1969	Geeignete Methode der Wahl von Auslegungsdaten aufgrund statistischer Klimadaten
L 2/16	Net annuel heat loss factor methode for estimating heat requirements of buildings	G.P.Mitalas, National Research Council of Canada, Ottawa, Nov. 1976	Interessante Methode, um jährlichen Energiebedarf nicht nur aufgrund der Heizgradtage, sondern unter Einbezug von Lüftungsverlusten und Sonneneinstrahlungsgewinn zu ermitteln
L 2/17	Erhöhter Wärmeschutz im Hochbau - Einfluss auf Heizenergieeinsparung, Baukonstruktion und Baukosten	H.Ehm, Styropor Zeitschrift, 1976	Umfassende Vorschau auf die neue DIN 4108, auch mit Einbezug der Lüftungsverluste; kein Hinweis auf Komfortprobleme bei fixer Vorgabe des a-Wertes
L 2/18	Erhöhter Wärmeschutz ist ohne kontrollierte Lüftung sinnlos	G.K., Klima + Kälte-Ingenieur, Heft 10, 1976, Teil 2	Aufruf, diese Gesichtspunkte vermehrt zu erfordern, zu beachten
L 2/19	FGK-Vorträge während der ish	CCI, Nr. 5, 1975	Vortrag Dr.Terhaag: Probleme bei gleichzeitigem Vorhandensein von Staub und CO ₂ ; Vortrag Prof.Steimle: in stark industrialisierten Zonen, in Städten, ist eine Luftbehandlung nicht mehr zu umgehen
L 2/20	"Wir brauchen die kontrollierte Lüftung"	K.Pantl, CCI, Nr. 4, 1977, S. 31	Ehe man sich mit Energieeinsparungen bei der Fassade befasst, muss man sich vor allem mit dem Fenster befassen !
L 2/21	First Canadian Building Congress, Energy and Buildings	National Research Council Canada, Proceedings 1976, p.41	Grundlagen über Energieverbrauch in Abhängigkeit von Komfortbedingungen in Räumen, auch unter dem Aspekt verschiedener Luftwechselraten
L 2/22	A New Approach to Space Heating Requirements in Houses	J.B.Siviour, Electricity Council Research Centre, Capenhurst, Chester, 1976	Energieverbrauchbetrachtung in Abhängigkeit von verschiedenen baulichen Parametern, abgestützt auf intensive Messungen
L 2/23	Die Stosslüftung aus energetischer Sicht	R.Wiedenhoff, Joh.Vaillant KG, Remscheid, unveröffentlicht	Vergleich kontinuierliche Lüftung mit Stosslüftung, aus hygienischen Gesichtspunkten

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 2/24	Energieeinsparung durch Anwendung von Erkenntnissen der Bauphysik	H. Reinders, HLH, Heft 4, 1977	Verwertung neuerer bauphysikalischer Forschungsergebnisse zu energiewirtschaftlich sinnvollen Umstrukturationsprinzipien, die guten Wohnkomfort bieten
L 2/25	Wärmeschutzverordnung	G.K., CCI, Nr. 5, 1977	Vorwurf, dass deutsche Wärmeschutzverordnung für Energieeinsparung zu einseitig ohne Betrachtung der Lüftungsverluste

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
3	LUFTWECHSELBESTIMMUNG, MESSTECHNIK		
L 3/1	Measurement of Ventilation Using Tracer Gas Technique	J.B.Dick, Garston, Watford, Herts., Building Research Station, GB (1948 ?)	Saubere Darstellung früher Luftwechselmessungen mittels Tracergas
L 3/2	Die Technik der Luftwechselbestimmung mit radioaktivem Krypton-85 und ihre Anwendung auf Untersuchungen in Ställen	K.Göttling, H.Domberg, H.G.Hilliger, H.Vogg, Gesundheits-Ing., Heft 1, 1972	Grundlagen zu genannter Messmethode
L 3/3	Building Physics: Heat, Chapter 7, Ventilation	Billington, Pergamon Press, 1967	Knappe Grundlagendarstellung. Angaben zu Berechnung/Messung Lüftungsverluste anhand el. Analogiemodell (Harrison)
L 3/4	A Review of Experimental Techniques for the Investigation of Natural Ventilation in Buildings	E.R.Hitchin, C.B.Wilson, Building Sci. (Pergamo Press GB), 1967, S.59-82	Sehr umfangreiche, gründliche Studie
L 3/5	Grundkurs der Messtechnik, Teil II: Das elektrische Messen nichtelektrischer Größen, Abschnitt Messfühler für automatische Analysengeräte	Ludwil Merz, R.Oldenbourg Verlag, München, Wien, 3. Auflage, 1973	In S. 205 ff Beschreibung Gasanalysatoren, geeignet für Luftwechselbestimmungen
L 3/6	An Innocuous Tracer Technique for Testing the Performance of Ventilation Systems	A.David Fraser, American Industrial Hygiene Association Journal, Nr.5, Sept.-Oct.1965	Beschreibung der Verwendung von Natrium-Chloride-Teilchen in Lüftungsuntersuchungen, zusammen mit einem Flammenfotometer und teilchenspezifischen Gelatine-Streifen als Detektoren
L 3/7	Hilfsbuch für raum- und aussenklimatische Messungen. Kap. IV. Anwendungsbereich der Messmethoden	F. Bradke u. W.Liese, Springer Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 2. Auflage 1952	leicht veraltete Messmethoden; Empfehlungen zu Lüftungsraten
L 3/8	Tracergas Techniques and Requirements	The Dallas Laboratories, P.O.Box 15705, Dallas, Texas, 75215, Feb. 1972	Interne Studie dieses Labors; interessante Beurteilung verschiedener Testgase
L 3/9	Use of gas and particle tracers in the study of infection transmission	N.Foord, Cross-Infection Reference Laboratory, Central Public Health Laboratory, London	--
L 3/10	A tracer gas method for the continuous monitoring of ventilation rates	J.B.Siviour, A.E.Mould, Meeting at Holzkirchen, Munich, 28.-30. Sept., 1977	Beschreibung kontinuierlicher Luftwechselmessung mit CO ₂ als Tracergas, mit einigen Messresultaten
L 3/11	Ventilation and heat recovery	P.Warren, Energy research and buildings, BRE News 34	Beschreibung einer mobilen umfassenden Messeinrichtung für Luftwechselmessungen

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
4	UNTERSUCHUNGEN ZU STROEMUNGS- UND DRUCKVERHAELTNISSEN AN DER GEBAEUDEHUELLE		
L 4/1	S I A 160 (Art. 26 ff)	Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, Ausgabe 1975 (ab S.11)	Berechnungsregeln für Windlasten an Gebäuden (teilweise als Unterlage für die Bestimmung der Lüftung unter Windeinfluss verwendbar)
L 4/2	Lüftungswärmeverluste und Druckverteilung in Wohnhochhäusern unter dem Einfluss von Wind- und Auftriebskräften	H. Esdorn, Dokumentationsstelle für Bautechnik der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart, 1976 (Bericht einer Arbeit der TU Berlin)	Sehr ausführliche Studie mit detaillierter Literaturrecherche zu diesem Problemkreis
L 4/3	Beeinflussung von Gasfeuerstätten durch Wind	R.Frimberger, M. John, A. Höss, DVGW-Schriftenreihe, Gas Nr. 12, 1975	Enthält div. strömungstechnische Unterlagen für den Zusammenhang Wind - Druckverteilung bei verschiedenen Gebäuden
L 4/4	Die Windbelastung	C.A.M.Bos, Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, Delft, April 1973	Manuskript zu Windlastberechnung an Gebäuden, wohl als Grundlage zu Norm wie L 4/1 gedacht
L 4/5	Airflow around buildings	J.H.Clarke, ASHRAE Journal, March, 1975	Kurze Uebersicht über Forschungsprobleme; Hinweis, wie notwendig entsprechende Forschung sei
L 4/6	Windwirkung auf Hochhäuser	H.Thomann, Schweizerische Bauzeitung, Heft 8, Februar 1974	Neue Erkenntnisse der Forschung unter Beobachtung dynamischer Effekte
L 4/7	Luftströmungen und Druckhaltung in Krankenhäusern	H.Esdorn, Gesundheits-Ingenieur, Heft 10, 1973	In ersten Abschnitten Grundlagen über Druck- und Strömungsverhältnisse in und an Gebäuden
L 4/8	Ueber die Windgeschwindigkeitsverhältnisse und den Einfluss der natürlichen Luftbewegung auf den Wärmebedarf von Hochhäusern	Ph.Katz, Heizung, Lüftung, Haustechnik, Heft 6, Juni 1969	Besonders interessant ist die Untersuchung der Umgebungseinflüsse auf die Geschwindigkeitsverteilung an einem Gebäude; gewisse Aussagen ev. etwas zu absolut ausgedrückt
L 4/9	Natürliche Lüftung von Werkshallen	B.Litonski, Heizung, Lüftung, Haustechnik, Heft 8, August 1969	Winddruckverhältnisse um und in Werkhallen
L 4/10	Heiz- und Klimatechnik, Abschnitt: Die Bedeutung des Windes bei der Gebäudeheizung	Rietschel / Raiss, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968, S.54-56	Gewisse Aussagen über den Zusammenhang zwischen Luftwechsel und Energieverbrauch sind zu überdenken
L 4/11	Witterungsbeanspruchung von Hochhausfassaden	B.Schwarz, HLH, Heft 12, 1973	Interessante messtechnische, bauphysikalische Arbeit über Winddruck, hinterlüftete Fassaden, Schlagregenbeanspruchung

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 4/12	Modellversuche zu Ventilation und Klimatisierung	G. Wohllebe, Luft- und Kältetechnik, Heft 5, 1975	Hinweise auf entsprechende Untersuchungen eines Budapester-Hochschulinstitutes
L 4/13	Wind speed and differential pressure data processing programm	G.P.Mitalas, D.Jassby, CP 13, NRC, DBR, Ottawa, 1962	Typisches Beispiel eines Mess-Auswerteprogramms (älteren Datums)
L 4/14	Beeinflussung v.Heizungs- und Lüftungsanlagen durch Wind	R. Frimberger, München	Aerodynamische Modelluntersuchungen verschiedener Bauelemente (Kamine, Fenster) ihrer Lage und der Grösse im Hinblick auf die Luftdruckverhältnisse im und um das Gebäude
L 4/15	Einwirkung von Regen und Wind auf Gebäudefassaden	W. Frank, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Bericht aus der Bauforschung, Heft 86, 1973	Umfassende Literaturstudie

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
5	UNTERSUCHUNGEN UEBER STROEMUNGS- UND DRUCKVERHAELTNISSE IN RAEUMEN UND GEBAEUDEN		
L 5/1	Untersuchungen der natürlichen Strömung infolge einer am Boden eines Modellraumes angeordneten Heizfläche	K.Michael, Luft und Kältetechnik, Heft 1, 1975	Aussagen über Strömung in Räumen infolge Temperatur- resp. Dichteunterschieden
L 5/2	Thermischer Auftrieb in Industriehallen	F.Hell, Heizung Lüftung Haustechnik, Nr. 8, 1969	Formeln für die Strömungsgeschwindigkeit bei Dachaustrittsöffnungen in Industriehallen
L 5/3	Pressure differences caused by chimney effect in three high buildings and building pressures caused by chimney action and mechanical ventilation	G.T.Tamura, A.G.Wilson, Transactions, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Vol. 73, Part. II, 1967	Praktische Messungen an Hochhäusern
L 5/4	Pressure differences for a nine-story building as a result of chimney effect and ventilation system operation	G.T.Tamura, A.G.Wilson, Transactions, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Vol. 72, Part. I, 1966	Praktische Messungen an anderen Hochhäusern
L 5/5	Movement of air streams indoors	L.F.Daws, J.I.H.V.E. Vol.37, Febr. 1970	Untersuchungen über Mischung der Eintrittsluft mit der Raumluft, Aussagen über Raumströmungen unter verschiedenen Kräften
L 5/6	Wärmebedarf von Häusern für Transmission und Selbstlüftung	O.Krischer, VDI-Berichte, Bd. 21, 1957, S. 5-14	Wichtige Grundlagenuntersuchung zur Beziehung Winddruck-Infiltration-Energieverluste
L 5/7	Strömungsmechanische Prozesse und ihre numerischen Lösungsmethoden	R.Schenk, Luft- und Kältetechnik, Heft 3, 1973	Numerische Lösungsmethoden für gleichzeitig ablaufende Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge (z.B. im Raum)
L 5/8	Raumströmungsuntersuchungen für das Projekt Stadthalle Aachen	W.Moog, F.Sodec, HLH, Heft 11, 1976	Interessante Hinweise über die Grenzen von Modelltheorien bei Strömungsproblemen
L 5/9	Experimentelle Strömungsuntersuchungen im Versuchsauditorium der ETH Zürich	H. Sprenger, Gesundheits-Ingenieur, Heft 8, 1971	Untersuchungen mit neuartigen (Bankkanten)-Einblasesystemen, welche nur gerade im Aufenthaltsbereich die notwendige Frischluft mit sich bringen
L 5/10	Luftströmungen und Druckhaltung in Krankenhäusern	H.Esdorn, Gesundheits-Ingenieur, Heft 10, 1973	Vgl. L 4/7
L 5/11	Technische Strömungslehre; Experimentelle Möglichkeiten zur Sichtbarmachung von Strömungen	B.Eck, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1966	Sehr interessante Hinweise, praktische Kniffe

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 5/12	Messung kleiner Luftgeschwindigkeiten in klimatisierten Räumen	R.Gasser, Technische Rundschau Sulzer, Heft 2, 1974	Beispiel eines neuzeitlichen Hitzdrahtanemometers hoher dynamischer Qualität, mit Kompensation von Temperaturschwankungen; Uebersicht über andere Typen
L 5/13	Stalllüftungstechnik und Störfaktoren	W.Göbel, A.Schmidlin, Blätter für Landtechnik, März, 1973	Anwendungsbeispiel für Tracergastechnik in anderen Bereichen
L 5/14	Numerical calculation of room air movement -Isothermal turbulent two-dimensional case-	T.Tsuchiya, Building Research Institut, Tokyo, BRI Research Paper No. 62, January 1976	Numerische Lösungen von Strömungsproblemen; wenig Praxisnähe (Möbel, Benutzereinflüsse)
L 5/15	Die Luftwechselzahl - Sinn oder Unsinn ?	P.Katz, Klima-Kälte-Technik, Heft 1, 1974	Katz vertritt die Meinung, dass n _L nicht geeignet sei für die Ermittlung des erforderlichen Luftstroms in Lüftungsanlagen
L 5/16	Bemerkungen über die Strömung von Gasen und überhitzten Dämpfen durch poröse Wände	W. Geisler, Gesundheits-Ingenieur, Heft 11, 1975	Beschreibung von Versuchseinrichtungen und Durchführungen der Diffusions-, bzw. Effusionsvorgänge in Materialien und mehrschichtigen Elementen
L 5/17	Etude experimentale sur l'efficacite de la ventilation mecanique controlée dans un local d'habitation	L.Laret, J. Lebrun, D.Marret, P.Nusgens, C.S.T.C.-Revue, Nr. 2, 1977	Untersuchung über Strömungsverhältnisse in einem Einzelraum in Abhängigkeit der Einblasbedingungen

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
6	THEORETISCHE GRUNDLAGEN, BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR LUFTWECHSELRATE		
L 6/1	Dynamic characteristics of air infiltration	J.E.Hill, T.Kusuda, National Bureau of Standards, No. 2337, 1974/75	Theoretische Arbeit, unterstützt durch Messungen, welche insbesondere an einfachen Beispielen die dynamischen Effekte des Windes auf den LW einbezieht; interessant
L 6/2	Wind effect on the air movement inside buildings	H.K.Malinowski, University of Guelph, Ontario, Canada, 1971	Theoretisch-praktische Arbeit zu den Teilaspekten des Windes, welche Einfluss haben auf den LW (Geschwindigkeit, Turbulenz); interessante Grundlage
L 6/3	Environmental factors in the heating of buildings	L.E.Anapol'skaya, L.S.Gandin, Keter Publishing House, Jerusalem LTD, 1975	Russisches Grundlagewerk, siehe speziell Abschnitte 4.4., wo allgemeine Lüftungsverluste behandelt werden; keine Neuigkeiten
L 6/4	The natural ventilation of tall office buildings	P.J.Jackmann, H.Ph.L.den Ouden, Building Research Station/Delft, 10.5.68	Vergleichende Untersuchungen zwischen realen Strömungen an einem Gebäude und einem entsprechenden el. Analogiemodell
L 6/5	Heat and moisture flow through openings by convection	W.G.Brown, A.G.Wilson, K.R.Solvason, ASHRAE Journal, Vol.5, No.9, 1963	Gute Grundlagenarbeit, leider englische Einheiten
L 6/6	Prediction of the anticipated air volume passing through buildings by means of the air current analogue	H.Ph.L.den Ouden, Research Institute for Public Health, Delft, Publication No.272 (1968 ?)	ähnlich L 6/4
L 6/7	Luftdurchlässigkeit der Fenster und Druckverteilung im Gebäude	H.Esdorn, aus: Das Hochhaus der BASF, Monographie, Hoffmann Verlag, Stuttgart, 1958	Untersuchungen zur Qualität von Fenstern bezüglich Luftdurchlässigkeit; Richtlinien für geeignete Ausbildung von Hochhausfenstern und inneren Unterteilungen
L 6/8	Untersuchung über den Luftaustausch zwischen Wohnräumen und Aussenluft	H.W.Georgii, Universitätsinstitut für Meteorologie und Geophysik, Frankfurt/M.	Umfassende Grundlage betr. Luftwechsel infolge Temperaturdifferenz und Wind; praktische Untersuchungen mittels Aerosol (ohne Diffusion) und CO ₂
L 6/9	Berechnung des Filtrationsluftaustausches in Gebäuden	A. Zöld, HLH, Heft 8, 1973	Berechnungsverfahren auf Netzwerktheorie aufgebaut; geeignet, falls Druckverteilung, Kennlinien alter Fugen, hydraulische Eigenschaften der Lüftungsanlageteile bekannt
L 6/10	Luftdurchlässigkeit von Fenstern	W. Schüle, Gesundheits-Ingenieur, Heft 6, 1961	Praktisch-theoretische Untersuchung, Aussagen über Fensterqualität
L 6/11	Zur Luftdurchlässigkeit von Fensterfugen	D. Benndorf, Luft- und Kältetechnik, Heft 2, 1975	Entsprechende Untersuchung wie L 6/10

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 6/12	Untersuchungen über die Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern	W. Schüle, Gesundheits-Ingenieur, Heft 6, 1962	Gute Grundlageuntersuchung zum Gesamtproblem Fenster
L 6/13	How to determine building infiltration rates at low Reynolds numbers	M.Meckler, Heating, Piping & Air-Conditioning, March 1967	Kritische Gegenüberstellung eines Berechnungsverfahrens, das den üblichen Verfahren für turbulente Spaltströmungen entgegengesetzt wird; interessant
L 6/14	Das Fenster als wärmeschutztechnisches Bauelement	W. Caemmerer, Heizung Lüftung Haustechnik, Heft 8, April 1966	Uebersichtsbetrachtung verschiedener bauphysikalischer Probleme des Fensters
L 6/15	Predicting air leakage for building design	G.T. Tamura, NRC, DBR, Ottawa, Technical Paper 437, 1975	

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
7	UNTERSUCHUNGEN ZU DETAIL EINFLÜESSEN ZU LUFTWECHSEL (WIND, TEMPERATUR, BAUKONSTRUKTION)		
L 7/1	Infiltration and Natural Ventilation	ASHRAE Handbook of Fundamentals, ASHRAE, New York, 1972 (Chapter 19)	Umfangreiche Detailangaben, wohl teilweise älteren Datums, schwierig auf europ. Verhältnisse übertragbar
L 7/2	Measurement of air leakage of houses	S.Stricker, Ontario, Hydro Research Quarterly, fourth quarter, 1974	Beschreibung einer Methode, wie durch Messungen des Leckagestroms bei bestimmtem Differenzdruck (Ventilator) Hauskonstruktionen qualifiziert werden können
L 7/3	Air leakage characteristics of some brick and concrete block walls	J.R.Sasaki, National Research Council of Canada, technical note No. 525, Sept. 1968	Detailuntersuchung Luftdurchlässigkeit Wände
L 7/4	Measurement of air leakage characteristics of house enclosures	G.T.Tamura, ASHRAE Transactions, Vol.81, Part 1, 1975	Untersuchungen zur Luftdurchlässigkeit der Komponenten der Gebäudehülle anhand einiger Beispiele (Empfehlung, dass "overall leakage area" gutes Qualifizierungsmerkmal sei)
L 7/5	Ventilation of dwellings and its disturbances	Hiroshi Honma, Dissertation Tekniska Högskolan, Stockholm, 1975	Interessante theoretisch-praktische Arbeit, insbesondere unter dem Aspekt der Wohnungslüftung
L 7/6	Tabelle zur Ermittlung des L-Wertes für verschiedene Fenstertypen	ISAL, Fenster- und Fassadenkonstruktionen, Aesch	L-Werte sind bestimmte qualitative Kennzahlen über die Lüftungsverluste bei best. Fenstern/Fensterpositionen
L 7/7	Untersuchung über Wärmedurchgang und Luftdurchlässigkeit von Fenstern	EMPA No. 47165, Dübendorf, 1969	Umfangreiche Untersuchungsserie an Fenstern verschiedener Konstruktion
L 7/8	Klassifizierung von Fenstern	Institut für Fenstertechnik e.V. Rosenheim, Mai 1974	Umfangreiche Untersuchungsserie (a-Wert, Schlagregensicherheit, mech. Beanspruchung), detaillierte Aussagen
L 7/9	Untersuchung des Luftwechsels und der Temperaturverteilung an Fenstern	Institut für Fenstertechnik e.V. Rosenheim; ELEREVA AG Zug (vertraulich)	Umfangreiche Detailuntersuchung an Fenstern verschiedener Konstruktionen hinsichtlich Bewegungsmöglichkeit
L 7/10	Window air leakage	J.R.Sasaki, A.G.Wilson, NRC, DBR, Ottawa, CBD 25, January 1962	Faustregel über die leakage von kanadischen Fenstern (cfm/ft) abhängig von Material und Konstruktion
L 7/11	Energiesparen in Gebäuden	R.Olsson, Fläkt, Stockholm, 25. / 26.5.1976 (Brief)	Maximale Luftleckagemengen (m ³ /m ² h) aus schwedischer Norm (sinnvollerweise bezogen auf m ² !)
L 7/12	Fenster, Schalldämmung und Lüftung	C.I.Mitter, Haustechnische Rundschau, Heft 12, 1972	Detailuntersuchung zum aktuellen Problem der Lüftungseigenschaften von Schallschutzfenstern
L 7/13	Das Fenster als wärmeschutztechnisches Bauelement	W. Caemmerer, Heizung Lüftung Haustechnik, Heft 4, 1966	Grundlagen, gute Uebersicht

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 7/14	Studies on exterior wall air tightness	G.T.Tamura and C.Y.Shaw, NRC, DBR, Ottawa, DBR Paper 706, 1976	Interessante theoretisch-experimentelle Arbeit; Angabe über Lüftungsverluste in Funktion von Wandkonstruktion, Gebäudehöhe
L 7/15	Combined thermal and air leakage performance of double windows	T.Burse, G. Green, ASHRAE, Transactions, 1970	Untersuchungen an typisch kanadischem Schiebefenster; statischer Überdruck und entsprechender Energieaustausch
L 7/16	The Effect of Wind on Energy Consumption in Buildings	E.A.Arens, P.B.Williams, Energy and Buildings, 1, 1977, p.77-84	Gute Darstellung der Lüftungsverluste bei bewohntem/unbewohntem Haus. Theoretische Angaben über 4 verschiedene Windeinflüsse auf Energieverbrauch
L 7/17	An Overview of Energy Conservation Research at Lawrence Berkeley Laboratory	A.H.Rosenfeld, Energy and Buildings, 1, 1977, p. 3-6	Übersicht über laufende Arbeiten LBL, die u.a. Studien hinsichtlich optimaler Gebäudelüftung und theoretische Grundlagen einschließen
L 7/18	Modeling Natural Energy Flow in Houses	E. Dean, A.H.Rosenfeld, Energy and Buildings, 1, 1977 p. 19-26	Modellberechnungen für Energieverbrauch eines Gebäudes, besonders in Abhängigkeit der Fensteranteile in verschiedenen Fassaden
L 7/19	Forced Convection; Thermal Performance of Insulated Building Elements as Influenced by Wind and Workmanship	C.G.Bankvall, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund 1973	Einfluss von Wind und Ausführungsqualität (Fugen) auf den Wärmedurchgang bei Bauelementen
L 7/20	Natural Ventilation of dwellings	W.F.de Gids, J.A.Ton, L.L.M.van Schijndel, Research Institute for Environmental Hygiene TNO, Pub. 620	Luftwechseluntersuchungen an Wohnung vorwiegend in Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit
L 7/21	Ventilation through Openings on one Wall only	P.R.Warren, Building Research Establishment, Garston GB, 1977	Theoretische Studie zu turbulenzbedingten Lüftungsverlusten

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
8	PRAKTISCHE MESSRESULTATE FÜR LUFTWECHSEL		
L 8/1	Ventilation research in occupied houses	J.B.Dick, D.A.Thomas, Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers, October 1951	Wegweisende frühe Untersuchung zu Luftwechsel in realen Bauten
L 8/2	Experimental studies in natural ventilation of houses	J.B.Dick, Building Research Station, Garston GB, 1949	Früheste bekannte Untersuchung zum genannten Thema; insbesondere auch Messung von Benutzereinflüssen
L 8/3	Statistical analyses of air leakage in split-level residences	R.R.Laschober, J.H.Healy, Presented at ASHRAE 71 st Annual Meeting, Ohio, June 29 - July 1, 1964	Messungen an mehreren Bauten, statistische Auswertung unter Einbezug von Windstärke, Richtung, Konstruktion, Temperatur
L 8/4	Air change and air transfer in a Hospital ward unit	G.Baird, Building Sciences (Pergamon Press), Vol. 3, 1969	Untersuchungen in einem Randgebiet; gewisse Aussagen (Fensterbenutzung, Türbenutzungshäufigkeit) interessant
L 8/5	Air infiltration measurements in a four-bedroom townhouse using sulfur hexafluoride as a tracer gas	M.Hunt, M.Burch, National Bureau of Standards, Gaithersburg, USA, Nr. 2338	Interessante Messungen an einem Haus typischer USA-Konstruktion; Ansätze für Berechnungsregeln für Infiltrationsverluste infolge Wind und Uebertemperatur
L 8/6	Residential energy consumption single family housing final report	Hittman Associates, Inc.Columbia, Contract No. H-1654, March 1973 (Report HUD-HAI-2)	Im Gesamtbericht ist der Aspekt der Lüftungsverluste detailliert einbezogen; neuartige Berechnungsmethoden, basierend auf Messungen (ab S.71)
L 8/7	Studies on exterior wall air tightness and air infiltration of tall buildings	G.T.Tamura, C.Y.Shaw, ASHRAE Transactions, Vol. 82, Part 1, 1976	entspricht L 7/14
L 8/8	Natural infiltration routes and their magnitude in houses - Part 1 - Preliminary studies of domestic ventilation	P.R.Warren, Building Research Establishment, Garston GB, February 1976	Interessante neue Untersuchung in englischen Verhältnissen, unterstützt durch theoretische Ueberlegungen
L 8/9	Ventilation: a behavioural approach	G.W.Brundrett, Electricity Council Research Center, Chester, ECRC/M 902, February 1976	Neueste praktische Messungen unter Einbezug von Klimadaten, Konstruktion und Benutzereinflüsse
L 8/10	Zusammenhang zwischen der Fugendurchlässigkeit von Fenstern und dem Luftwechsel im Raum	Uebersicht zu laufendem Forschungsauftrag, Institut für Bauphysik, Stuttgart	Vorabklärungen im Juli 76, Abschluss wohl 77/78
L 8/11	Luftbewegung und Luftwechsel in Räumen bei verschiedenen Arten der Belüftung	Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 1977	Untersuchungen in belüfteten Räumen, insbesondere im Zusammenhang mit Schallschutzmassnahmen

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 8/12	Lüftungswärmeverlust in Wohnhochhäusern abweichend von Normalhäusern	Sanitär- und Heizungstechnik, Heft 1, 1977	Kurzer Hinweis auf L 8/13
L 8/13	Lüftungsverluste und Druckverteilung in Wohnhochhäusern unter dem Einfluss von Wind- und Auftriebskräften	H.Esdorn, Hermann-Rietschel-Institut Berlin, 1976	entspricht L 4/2
L 8/14	Kommentarer till Svensk Byggnorm, 1977:3, Energihushållning mm	Liber Förlag, Allmänna Förlaget Stockholm, statens planverk, 1977	
L 8/15	Messung des natürlichen Luftwechsels in nichtklimatisierten Wohnräumen	S. Bargetzi, P. Hartmann, J. Pfiffner, Schweiz. Bauzeitung, Heft 14, 1977	
L 8/16	A tracer gas method for the continuous monitoring of ventilation rates	J.B.Siciour, A.E.Mould, Meeting at Holzkirchen, Munich, 28-30 September, 1977	Siehe L 3/10
L 8/17	Natural Ventilation of Dwellings	W.F.de Gids, J.A.Ton, L.L.M.van Schijndel, Research Institute for Environmental Hygiene TNO, Pub. 620	Siehe L 7/20
L 8/18	The Prediction of Ventilation Rates in Houses and the Implications for Energy Conservation	D.W.Etheridge, P.Phillips, British Gas Corporation, Watson House, Heating Division, London, 1977	Vorschlag eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der windbedingten Lüftungsverluste
L 8/19	Luftskiftet i boligerne mindre end hidtil antaget	P.F.Collet, Ingeniøren 10/11, 1977	Bericht über umfangreiche Messungen der Lüftungsverluste bei dänischen Bauten verschiedenen Alters

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
9	PRAKTISCHE MESSRESULTATE UEBER DEN EINFLUSS DER BENUTZER AUF DEN LUFTWECHSEL		
L 9/1	Experimental studies in natural ventilation of houses	J.B.Dick, Journal of the Institute of Heating and Ventilation Engineers, Vol.17, No. 173, December 1949	siehe L 8/2
L 9/2	Reducing housing's share of the energy budget	A.A.Field, Heating, Piping, Air Conditioning, May 1976	Hinweis auf Untersuchungen zum Thema Benutzereinflüsse / Lüftungsverluste in England
L 9/3	Ventilation: a behavioural approach	G.W.Brundrett, Electricity Council Research Center, Chester, ECRC/M902, February 1976	siehe L 8/9

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
10	BERECHNUNGSREGELN ZU WAERMEBEDARF UNTER EINBEZUG DER LUEFTUNGSVERLUSTE		
L 10/1	Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden (Heizlast-Regeln); SIA Empfehlung 380	SIA, Zürich, 1976	In der Schweiz gültige Heizlastregel
L 10/2	Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden, DIN 4701	Beuth Verlag, Berlin, Januar 1959	In Uebersarbeitung begriffene Heizlastregel, gültig für BRD
L 10/3	Neubearbeitung der DIN 4701, Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden	H. Esdorn, HLH, Heft 8, Dezember 1972	Hinweise zu L 10/2
L 10/4	Infiltration and natural ventilation	ASHRAE Handbook of Fundamentals, ASHRAE, New York, 1972	Grundlagen und Berechnungsmethoden, gültig in USA und Canada
L 10/5	The computation of heat requirements of buildings	IHVE (GB)	Britische Berechnungsregeln Wärmebedarf
L 10/6	Wärmebedarf	Schrifttumhinweis, HLH, Heft 8, August 1975	
L 10/7	Analysis of infiltration		Auszug aus L 8/6
L 10/8	The calculation of the heat requirements of rooms	E. Harrison, B.S.E, Volume 43, May 1975	Kommentar zu brit. Berechnungsregeln, ohne Bezugnahme auf Lüftungsverluste
L 10/9	Leitfaden zur System-Auslegung Kühl- und Heizlastberechnung	Carrier, Syracuse, USA (Kapitel 6, Infiltration, Aussenluft)	Vereinfachte Berechnung, basierend auf L 10/4.
L 10/10	XVIII. Kongress für Heizung, Lüftung, Klimatechnik	L.A.Klepzig-Verlag, Düsseldorf, 1964	Neuere Forschungsergebnisse aus jener Zeit
L 10/11	Problémy výpočtu tepelné ztráty infiltračí	J.Cihelka, Zdravotní technika a vzduchotechnika 18, Nr. 4, 1975	Kommentare zur Berechnung der Infiltrationsverluste in der neuen tschechoslowakischen Norm CSN 060210
L 10/12	Lüftung von Wohnungen	VDI-Richtlinien Nr. 2088 (Entwurf) Mai 1975	siehe L 1/25
L 10/13	Lüftung von Bädern, Spülaborten ohne Aussenfenster	DIN 18017, Blatt 3, August 1970	siehe L 1/28
L 10/14	Natural and Mechanical Ventilation (ASHRAE Standard, Nr. 62-73)	ASHRAE, New York, (1973 ?)	Neue Lüftungsbedarf-Regeln, gültig in USA / Canada

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 10/15	Neuausgabe VDI-Richtlinie 2082 "Lüftung von Geschäftshäusern und Verkaufsstätten"	H.Lenz, HLH, Heft 10, 1977	Kurze Zusammenfassung über den Inhalt der Richtlinie
L 10/16	Ermittlung des windbedingten Lüftungswärmebedarfs bei Hochhäusern	W.Rögelein, Heiz.-Lüft.-Haustechnik, Heft 12, 1967	Modelluntersuchung und Berechnung des Lüftungswärmebedarfs nach DIN 4701, untermauert durch theoretische Grundlagen
L 10/17	The Prediction of Ventilation Rates in Houses and the Implications for Energy Conservation	D.W.Etheridge, P.Phillips, British Gas Corporation, Watson House; Heating Division, London, 1977	Siehe L 8/18

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
11	KONTROLLIERTE LUEFTUNG ↔ FREIER LUEFTUNGSBETRIEB		
L 11/1	Ventilation studies in Belgium	Building research establishment, BRE NEWS 41, 1977	Hinweis auf Messungen des Luftwechsels in Einfamilienhäusern, die teilweise natürliche Lüftung, teilweise Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung besitzen. Interessanter Vergleich (Bericht folgt 1978)
L 11/2	Three experimental energy houses in Östersund	K.E.Munther, Swedish Building Research Summaries, S. 25: 1977	Vergleich des Energieverbrauches in gleichartigen Gebäuden mit verschiedenen Lüftungssystemen, teilweise mit Wärmerückgewinnung, teilweise mit Benutzereinfluss
L 11/3	Control of Air-Leakage is Important	G.K.Garden, NCR, DBR, Ottawa, December 1965	Hinweis auf die Bedeutung der Verhinderung von Lufteinströmung durch Fugen aller Art
L 11/4	Economie d'energie par équipement de Ventilation avec recuperateurs de chaleur	J.Ptacek, M. Guillaume, C.S.T.C.-Revue, Nr. 2, Juin 1976	Wirtschaftliche und energietechnische Bedeutung von Wohnungslüftungen mit Wärmerückgewinnung
L 11/5	Vierzehn Regeln für die Wohnungslüftung	Ebersbach, Fils, CCI-Technik, Nr. 1, 1976	Regeln für energiesparende wirtschaftliche Lüftung aus der Sicht eines Herstellers für Wohnungslüftungen
L 11/6	Lüftung und Wärmerückgewinnung im Einfamilienhaus	J.F.Kruse, B.V.Utrecht, ithema, CCI, Nr. 3, 1977	Etwas mit Reklame durchsetzte Beschreibung von Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung für Einfamilienhäuser
L 11/7	Kontrollierte Lüftung bietet neue Möglichkeiten zur Energieeinsparung	G.Emmerling, ithema, CCI, Nr. 3, 1977	Beschreibung von Zweistrom-Regenerationsventilatoren im Einsatz bei Wohnungslüftungen
L 11/8	Klimatisierung auch im Zeichen des Energiesparens: Interesse an kontrollierter Wohnraumlüftung, Ueberangebot bei Ventilatoren, Trend zum Baukastensystem	H.Bley, Bericht zur 9. ish, CCI, Nr. 5, 1977	Hinweise auf gerätetechnische Tendenzen bei Wohnungslüftungen
L 11/9	Energiesparende Heizungs- und Klimaanlage: Eine Aufgabe von öffentlicher Bedeutung	CCI, Nr. 6, 1977	Erläuterung und Uebersicht zu Energiesparmöglichkeiten bei kontrollierter Lüftung
L 11/10	Das Fenster und seine Rolle bei einer rationellen Energieverwendung in Wohnhäusern	K.Fantl, CCI, Nr. 3, 1977	Aktuelle Charakterisierung der Forschungsergebnisse im Fensterbau. Hinweis auf die Bedeutung einer Lüftungskontrolle
L 11/11	Kein Anzeichen für ein rosiges Jahr 1977; Energiesparen ist viel zu teuer; Uraltanlagen früher eliminieren	Kühnel, Läge, Schromm, H.Steinbauer, H.Uschwa, CCI-Interview, CCI, Nr. 3, 1977	Probleme der Installationskosten für energietechnisch günstigere Heizungssysteme
L 11/12	Wir brauchen die kontrollierte Lüftung	K.Fantl, CCI-Veranstaltungen, CCI, Nr. 4, 1977	Siehe L 2/20
L 11/13	Lüftung von Wohnungen	VDI-Richtlinien Nr. 2088 (Entwurf) Mai 1975	Siehe L 1/25

Nummer	Titel	Autor, Erscheinungsort, Erscheinungsdatum	Bemerkungen zum Inhalt
L 11/14	Wohnungslüftung in Schweden	CCI 9, 1969	Beschreibung, der in Schweden üblichen Wohnungslüftungssysteme
L 11/15	DGW-Entschiessung zur Wohnraumklimatisierung	CCI 8, 1971	Diskussion aus der Sicht der Mediziner hinsichtlich der Frage: Klimaanlage in Wohnräumen ja oder nein.
L 11/16	Energiesparen durch Baumassnahmen; Aufgabe unserer Politiker	E. Attlmayr, Die Industrie, Nr. 41, 1977	Betonung, dass heutige Fenster eine schlechte Regelung des Luftwechsels erlauben und Aufruf zu einem Wettbewerb für geeignete Fensterkonstruktionen
L 11/17	Elektroheizung und Wohnungslüftung setzen Akzente	P.Göhringer, HLH, Nr. 8, August 1977	Situationsbericht von Interklima in Paris: Siegeszug von Wohnungslüftungen in Frankreich
L 11/18	Entwicklungstendenzen bei Lüftungs- und Klimageräten im Sinne der Energieeinsparung und Energierückgewinnung	G. Schmidt, CCI, Nr. 3, 1977	Situationsbericht aus der Sicht eines Herstellers, relativ umfassend
L 11/19	Vergleichsmessungen über Lüftungsverluste/ Energieverbrauch in EFH-Bauten mit natürlicher Lüftung und gleichen Bauten Lüftung/Wärmerückgewinnung	P.Warren, Energy research and buildings, Veröffentlichung 1978	

12 UMFASSENDE LITERATURVERZEICHNISSE

In den folgenden, bereits zitierten Werken, sind grössere Literaturzusammenstellungen enthalten:

L 3/1, L 6/2, L 7/5, L 8/3, L 8/5, L 8/6, L 8/13, L 10/4

Diese Verzeichnisse sind bei der EMPA auf Anfrage hin einzeln erhältlich.