
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. : 36 630

Luftwechselfmessungen in nichtklimatisierten Räumen
unter dem Einfluss von Konstruktions-, Klima- und
Benutzerparametern

Forschungsarbeit im Auftrag des Eidg. Amtes für Umweltschutz

Bericht II

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
Buchstaben-Symbole	3
Zusammenfassung	5
1. Einleitung	9
2. Theoretische Grundlagen; Kurzübersicht	
Messverfahren	13
2.1. Theoretische Grundlagen	13
2.2. Messtechnische Grundlagen	16
3. Ziele der experimentellen Untersuchungen	24
4. Uebersicht Messobjekte, Messprogramm	25
4.1. Messobjekte	25
4.2. Messprogramm	31
5. Messresultate	34
5.1. Messwerte Luftdurchlässigkeit von Bauteilen	34
5.2. Luftwechsel-Zahlen	38
5.3. Resultate der Untersuchungen über das Benutzerverhalten, Berechnungen zum Einfluss der Benutzer auf die Energie- verluste	55
5.3.1. Grundlagen, Messresultate von Randbedingungen	55
5.3.2. Lüftungsgewohnheiten der Bewohner	58
5.3.3. Beeinflussung der mittleren Luftwechsel- zahl durch die Benutzer	62
5.3.4. Lüftungs-Wärmeverluste im Vergleich zu den Transmissions-Wärmeverlusten	63
6. Auswertung der Messresultate	
Einleitung	66
6.1. Zuverlässigkeit der Messresultate; Vergleich mit Messresultaten aus anderen Publikationen	67

Buchstaben - Symbole

		Ueblicherweise verwendete SI-Einheit
A	Fläche	m^2
a	Absorptionskoeffizient	[-]
a	Fugendurchlasskoeffizient	$m^3_n / h m Pa^{2/3}$
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

Zusammenfassung

Seit dem Jahr 1975 hat die Abteilung Bauphysik der EMPA im Auftrage des eidgenössischen Amtes für Umweltschutz Luftwechselmessungen in ausgewählten Gebäuden durchgeführt.

Während die theoretischen Grundlagen, die Grundlagen zur Messtechnik und die umfassende Literaturübersicht in einem anderen Bericht ("Auszug Bericht I") dargestellt sind, umfasst dieser Bericht II alle wesentlichen Resultate. (Kurzfassungen zu beiden Berichten sind in Zeitschriften veröffentlicht worden.)

Als erstes wesentliches Ziel der Forschungsarbeit war die Beschaffung einer Uebersicht über die Luftwechselverhältnisse in typischen schweizerischen Bauten geplant. Darin einzubeziehen waren erste Beurteilungen der Wirkung von Einflussparametern. Diese beiden Ziele sind mit den Resultatdarstellungen dieses Berichtes erreicht. - Einem weiteren Hauptziel, der Schaffung von besser fundierten Berechnungsregeln für die Lüftungsverluste in Abhängigkeit der Einflussparameter ist man einige Schritte näher gekommen, doch sind hiezu Folgearbeiten notwendig.

Wenn nachfolgend einige der wichtigsten Resultate herausgegriffen werden, so soll betont werden, dass es unter Umständen missverständlich sein kann, wenn einzelne Luftwechselzahlen ohne zugehörige Randbedingungen genannt werden.

Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf eine grössere Zahl von Bauten (mehrheitlich Wohnbauten), die mit Warmwasser-Systemen beheizt werden und in einigen Fällen zusätzliche Abluftanlagen für innenliegende Sanitärräume und Küchen besitzen. Eine Uebersicht über die Messgebäude wird in Kapitel 4. vermittelt, alle Details sind im Anhang zu finden.

In Gebäuden mit durchgehenden vertikalen Oeffnungen (Liftschächte; hohe Räume, die über mehrere Stockwerke reichen; Wendeltreppen ohne Abschlusstüren) wirkt sich der Kamineffekt weit stärker aus und kann u.U. zu Zegerscheinungen führen.

Im Zusammenhang mit möglichen Heizlastveränderungen bei einem Gebäude interessiert, wie sehr die natürlichen Lüftungsverluste zwischen extremen Witterungslagen variieren können. Dazu wurde das Verhältnis der Luftwechselzahlen bei Situationen mit starkem, direkt auf die Fenster auftreffendem Wind und bei Wetterlagen mit ausgesprochen schwachem Wind ermittelt. Diese Verhältniszahl, eine Kenngrösse für die "Windempfindlichkeit" einer Wohneinheit, schwankte bei den beobachteten Bauten zwischen etwa

2 - 5 für geschütztere Windlagen und eher "dichte" Bauten

5 - 8 für Bauten in exponierter Lage oder mit weniger dichter Konstruktion und offener Konzeption der Räume.

Hinsichtlich des möglichen Einflusses von Benutzern auf den Luftwechsel liegt eine grosse Zahl von Untersuchungen bei gestellten Fenster- und Türpositionen vor. Es zeigt sich, dass bereits kleine Spaltöffnungen (wenige cm) zu einer Vervielfachung des Luftwechsels führen können. Damit ist auch die schlechte Regulierbarkeit des Luftwechsels durch normale Drehflügelfenster gezeigt.

Erste Benutzerbeobachtungen (fotografische Beobachtung) liessen erkennen, dass der mittlere Luftwechsel durch die üblichen Benutzergewohnheiten weit über jene Werte erhöht wird, die für geschlossene Räume gemessen werden. Vorläufige erste Resultate zeigen, dass die mittleren Luftwechselzahlen in den beobachteten Wohnungen weit unter den Rechenwerten liegen, wie sie Heizungs-Auslegungsregeln verwenden (SIA 380); durch den Benutzereinfluss werden die Luftwechselzahlen aber so erhöht, dass sie mit den Auslegungswerten gut vergleichbar sind.

1. Einleitung

Dieser Bericht enthält alle wesentlichen Resultate der Forschungsarbeit "Luftwechselfmessungen", die von der EMPA seit dem Jahr 1975 durchgeführt wurde. Die Arbeit erfolgte im Auftrag des eidgenössischen Amtes für Umweltschutz, welches das Projekt auch in periodischen Diskussionen begleitete.

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

Dem Entgegenkommen von dipl.Ing. T. Oezvegyi (Dozent ZTL Horw) ist es zu verdanken, dass ein Student der Abt. Heizungs-, Lüftungs-, Klimatechnik, P. Egolf, in Semester- und Diplomarbeit ergänzende Messungen und Auswertungen zu dieser Forschungsarbeit unternahm, welche Eingang in diesen Bericht fanden.

In Zusammenhang mit diesem Forschungsprojekt liegen folgende Berichte vor:

- 1) Bericht EMPA-Nr. 34020, (interner Zwischenbericht mit wenigen Resultaten, unveröffentlicht)
"Luftwechselfmessungen in nichtklimatisierten Räumen unter Einfluss von Konstruktions- und Klimaparametern"
(Bericht I)
- 2) Auszug Bericht EMPA-Nr. 34020, (stellt zusammen mit Bericht II die ganze Forschungsarbeit dar, Stand Dezember 1977)
"Luftwechselfmessungen in nichtklimatisierten Räumen unter dem Einfluss von Konstruktions- und Klimaparametern"
(Auszug Bericht I)*

* Diese Berichte können ab Frühjahr 1978 bei der EMPA bezogen werden.

Als Einschränkungen zu Bericht II bleibt anzumerken, dass das vollständige Literaturverzeichnis nur in Auszug Bericht I (Anhang) zu finden ist.

Die Motivation für die Forschungsarbeit ist darin zu sehen, dass über die Bedeutung der Lüftungswärmeverluste bezüglich des Gesamtwärmeverlustes zwar Gewissheit bestand, jedoch keine zuverlässigen Messresultate vorlagen.

Deshalb wurde im Jahr 1975 die Arbeit mit folgenden Zielen aufgenommen:

- Gewinn einer detaillierten Uebersicht über bestehende Unterlagen und laufende neue Entwicklungsprojekte durch eine systematische Literaturrecherche und durch den Aufbau von Kontakten zu ausländischen Forschungsinstituten
- Entwicklung einer Messeinrichtung und eines Messverfahrens für die Bestimmung des Luftwechsels, unter Berücksichtigung aller wesentlicher Einflussfaktoren
- Gewinn eines qualitativen Ueberblicks über die Bedeutung der verschiedenen Einflussparameter auf den Luftwechsel:
 - der baukonstruktiven Parameter
 - der Klimaparameter, insbesondere Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur
 - der Benutzereinflüsse (durch bestimmte gestellte Einflussgrößen wie Türpositionen, Fensterpositionen usw.)

In einem Fortsetzungsauftrag ab Ende 1976 wurden die Untersuchungen fortgeführt mit nachfolgenden zusätzlichen Zielen:

- Vergrößerung der Messobjekt-Anzahl, um eine repräsentative Uebersicht zu gewinnen,
- Verfeinerung der Kenntnisse über die Klima-Einflüsse durch eine verbesserte Messtechnik,
- Pilotstudie mit verschiedenen Verfahren zur Erfassung der Benutzereinflüsse und deren Verwertung zu Lüftungsverlust-Berechnungen,

2. Theoretische Grundlagen; Kurzübersicht Messverfahren

2.1. Theoretische Grundlagen

Im Bericht "Auszug aus Bericht I" sind im 2. Abschnitt die theoretischen Grundlagen für Luftaustauschvorgänge im Detail behandelt. Die allerwichtigsten Grundlagen werden hier wiederholt und mit einem Ausblick auf neueste Untersuchungen ergänzt, die erst im Laufe der zweiten Jahreshälfte 1977 bekannt geworden und zum Teil noch nicht veröffentlicht sind.

Luftwechsellmessungen sind von Bedeutung

- einerseits für Lufthygiene-Betrachtungen, wo die Luftwechselzahlen in verschiedenen einzelnen Räumen interessieren ("Einzelraum-Messung"),
- andererseits für Energieverbrauchs-betrachtungen, wobei hier die Luftwechsel-Messung in gesamten Wohneinheiten ("Gesamt-
raum-Messung") zusammen mit der bestehenden Temperaturdifferenz innen/aussen in die Berechnung Eingang findet.

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

- a) - Durchströmung des Raumes (Oeffnungen vorhanden, die auf verschiedenen Druckniveaux 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.

Die Bezeichnung "quasistationär" bringt zum Ausdruck, dass über bestimmte Zeitperioden von konstanten mittleren Randbedingungen ausgegangen wird. Diese Betrachtungsweise gilt auch für die Luftwechsel-Messresultate.

Abschliessend werden die drei wesentlichen Gruppen von Einflussfaktoren auf die Luftaustauschverhältnisse vorgestellt und aus der Sicht des heutigen Standes der Arbeit gewertet:

- Klimabedingungen (innen und aussen, wesentliche Dynamik-effekte)
- Konstruktionsparameter (Gebäude und Heizsystem)
- Benutzer-Einflüsse

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 - oft örtlich sehr begrenzten - Druckunterschieden, ist verständlich.

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.

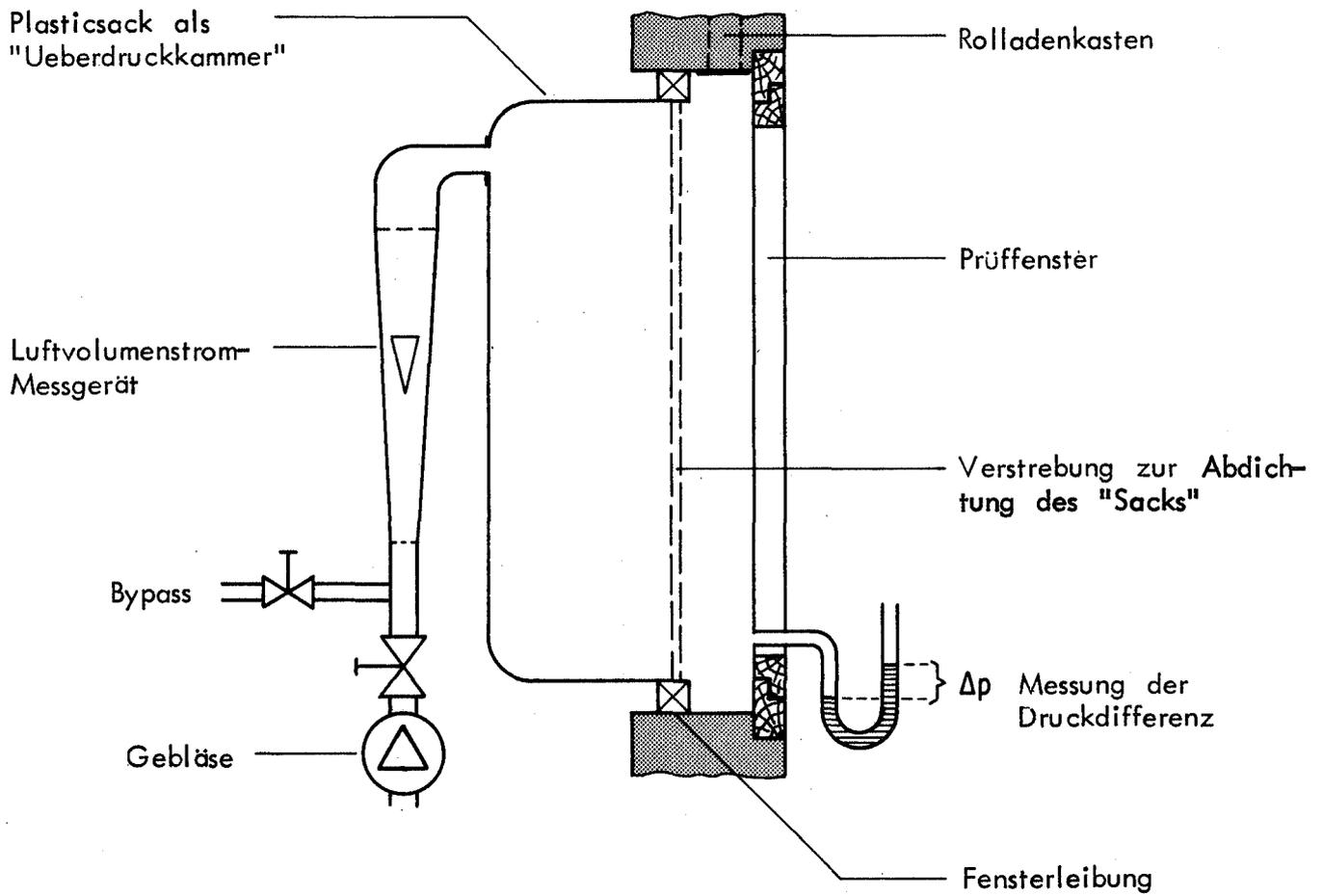


Fig. 1: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Luftdurchlässigkeit eines Fensters am ausgeführten Gebäude

Zu B) Modelluntersuchungen im Windkanal und andere Untersuchungsmethoden

Windkanal-Untersuchungen an Gebäudemodellen eignen sich ausserordentlich gut zur Ermittlung der Strömung um ein Gebäude oder zur Ermittlung von Druckverteilungen an einem Gebäude. Hinsichtlich der Ermittlung des Luftaustausches in Räumen können sie aber immer nur als Hilfsmessungen dienen. Bisher sind uns keine Untersuchungen bekannt, bei denen an einfachen Bauten auch die Strömungen im Modell in die Untersuchung einbezogen worden wären.

Zu C) Luftwechselfmessungen in "geschlossenen Räumen/Bauten"

Für diese wesentlichste aller Messungen hat sich international das Verfahren der Tracer-Gas-Methode durchgesetzt. Es gelangen verschiedene Gase zur Anwendung, etwa He, SF₆, N₂O, Ar. Zu wenig Beachtung findet unseres Erachtens die Ueberprüfung allfälliger Absorption von Testgas durch die im Gebäude vorhandenen Baumaterialien.

Parallelversuche in denselben Räumen mit verschiedenen Tracer-Gasen sind uns bekannt aus dem National Bureau of Standards, Washington. Die eigenen Versuche in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich (Institut für Lufthygiene und Arbeitsphysiologie) zeigen - wie auch die Versuche aus den USA - bei nicht allzu kleinen Luftwechselzahlen keine nennenswerte Unterschiede.

In allerneuesten Publikationen wird über kontinuierliche Luftwechsel-Messungen mittels Tracer-Gas berichtet (z.B in L 3/10). Leider gelingt diese Messtechnik i.A. nur in Gebäuden mit Warmluftheizung, nicht aber in Gebäuden mit Warmwasser- oder Elektro-Heizsystemen, wie sie in Mitteleuropa üblich sind.

Oeffnungs-Beobachtungen müssen zur Ermittlung des Luftwechsels von Zusatzmessungen begleitet sein.

Aus der Erkenntnis heraus, dass das Benutzerverhalten durch sichtbare Messdaten-Erfassungssysteme beeinflusst werden kann, haben einige Forschungsinstitute möglichst unauffällige Aussen-Fernbeobachtungen von Fensterpositionen durchgeführt, begleitet von den notwendigen Zusatzmessungen (z.B. in L 9/2 und L 9/3).

Nachfolgend ist das Messverfahren beschrieben, wie es von der EMPA mit Hilfe von P. Egolf (Technikum Luzern) bei einer Pilot-Messung angewendet wurde.

(Das zugehörige Messobjekt ist in Abschnitt 4., die Resultate in Abschnitt 5.3., eine Auswertung in Abschnitt 7, dargestellt).

Das Verfahren zielte darauf ab, an ausgewählten Tagen eine

- detaillierte Erfassung der Benutzergewohnheiten hinsichtlich der Fensterpositionen (statistische Auswertung),
- Berechnung der Luftwechselraten in den beobachteten Wohnungen
- Berechnung der Lüftungsverluste

zu ermöglichen.

Neben einer detaillierten Erfassung der konstruktiven Daten des Gebäudes umfasste die Untersuchung folgende Messgrössen:

1. Beobachtung der Fensterpositionen von aussen
 - tagsüber in Intervallen von 15 oder 30 Minuten mittels einer Kamera (Diapositiv-Aufnahmen), nachts durch manuelles Notieren der Fensterpositionen
2. Erfassung notwendiger Aussenklimadaten mittels einer Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung)
3. Erfassung des Innenklimas in ausgewählten Wohnungen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit)

Eine weiterführende Bearbeitung führte zu Darstellungen der Oeffnungshäufigkeit bestimmter Fenster und Rolladen über den Verlauf des Tages oder in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren.

3. Mittels der genannten Grundlagen (Berechnungsverfahren) wurde für eine Zeile von Wohnungen (sechs 4-Zimmer-Wohnungen) der Tagesverlauf der mittleren Luftwechselzahlen errechnet.
4. Mit den gemessenen mittleren Luftwechselzahlen wurde in 60-Minuten-Schritten der Lüftungsverlust-Verlauf über dem Messtag berechnet. Diese Lüftungsverluste wurden berechneten Transmissions-Wärmeverlusten gegenübergestellt. Die Summe der so ermittelten Transmissions- und Lüftungswärmeverluste wurde anschliessend mit dem effektiv gemessenen Energieverbrauch verglichen.

Das beschriebene Verfahren hat sich als gangbarer Weg erwiesen, das aufschlussreiche Resultate liefern kann. Die Messresultate können aber niemals als repräsentativ betrachtet werden, solange nicht

- Messungen bei verschiedenen Klimabedingungen,
 - Messungen bei nach statistischen Gesichtspunkten ausgewählten Bewohnern
 - Messungen in Gebäuden verschiedener Konstruktion, mit verschiedenartigem Heiz- und Lüftungssystem
- vorliegen.

In dieser Richtung zeichnen sich vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten ab.

4. Uebersicht Messobjekte, Messprogramm

4.1. Messobjekte

Ein detaillierter Beschrieb aller Messobjekte wird im Anhang vermittelt. In den entsprechenden Abschnitten sind dort enthalten:

- Titel des Messobjektes
- Situationsplan (mit Umgebungsbebauung)
- Stockwerkplan
- Fotos
- Grundriss Messobjekt
- kurzer Baubeschrieb mit Angabe der Fugenlängen von Türen, Fenstern und Rolladenkasten

In komprimierter Form vermögen aber auch die nachfolgenden Tabellen und Kurzbeschriebe eine Uebersicht über die Messobjekte zu geben.

Tabelle 1 a - c beschreibt unter Nr. A + M die Messobjekte, wie sie - zumeist - für Luftwechsellmessungen ohne Benutzereinfluss zur Verfügung standen.

Die grosse Variation der Messobjekteigenschaften ist aus den Tabellen zu erkennen, etwa im Alter (2 - 70 Jahre), in der Windexposition, in der Grösse (kleines Einfamilienhaus bis Wohnblöcke mit über 100 Wohnungen), in der Konstruktion (Holzelementbau, Backsteinbau, Betonbau), Konzeption (kleinräumige Mietwohnungen, Einfamilienhäuser mit durchgehenden Räumen über mehrere Stockwerke).

Der nachfolgende Kurzbeschrieb stellt die Wohnungen (genannt Messobjekt B₁) dar, welche in der Pilotstudie über den Benutzereinfluss zum Zug kommen. Es sei betont, dass sich diese Wohnungen im selben Wohnblock befinden, in denen die Messwohnungen A, B und C liegen.

Tabelle 1 b: Uebersicht Messobjekte

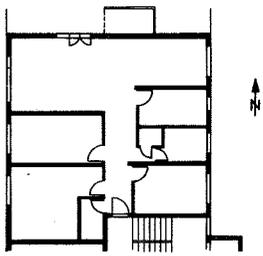
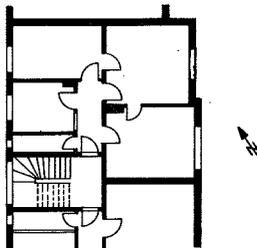
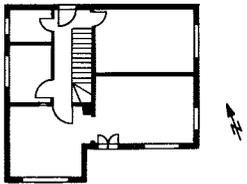
Nr.	Haus- typ	Al- ter [J]	Bebau- ungs- dichte	Baukonstruktion (Gebäudehülle)	Anzahl Stock- werke	Messort (Stock- werk)	Grundriss	Anzahl Zimmer	möb- liert	Bemerkungen
E	MFH Atti- ka	3	expo- niert	analog A + B	7	7		5	nein	Aufriss gestaf- felt
F	MFH	68	ge- schützt	-Holzfenster mit Einfachverglasung (mit Vorfenst.) -Doppelschalen- mauerwerk -Satteldach mit Ziegelabdeckung	5	3		3	nein	
G	EFH		frei	-Holzfenster mit Doppelverglasung -Doppelschalen- mauerwerk -Satteldach mit Ziegelabdeckung	2			5	ja	

Tabelle 1 d: Uebersicht Messobjekte

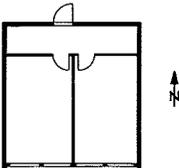
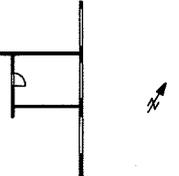
Nr.	Haus- typ	Al- ter [J]	Bebau- ungs- dichte	Baukonstruktion (Gebäudehülle)	Anzahl Stock- werke	Messort (Stock- werk)	Grundriss	Anzahl Zimmer	möb- liert	Bemerkungen
L	Ver- suchs- haus (Pavil- lon)	2	frei	-Holzfenster mit Isolierverglasung -"Durisol"-Element- Bauweise -Flachdach	1	1		(3)	nein	
M	Büro- Haus		ge- schützt	-Holzfenster -Flachdach	6	3		(1)	ja	



Bild 1:

Ansicht der NE-Fassade des Mehrfamilienhauses, das als Messobjekt B₁ zur Verfügung stand. Die Aufnahme stammt aus einer Reihe von periodisch aufgenommenen Diapositiven, die für die Statistikeruntersuchungen über das Benutzerverhalten herangezogen werden.

- Grundriss

In Fig. 3 sind die je Stockwerk beobachteten 4 Wohnungen dargestellt, also je eine 5 1/2-, 2-, 4- und 3-Zimmer-Wohnung.

Ein Beschrieb der Baukonstruktion erübrigt sich, da es sich um dieselbe Konstruktion handelt, wie sie im Anhang (Gebäude A - C) im Detail erläutert ist.

Tabelle 2: Versuchsprogramm

Gebäude		Durchgeführte Messungen					
Typ	Nr.	Luftdurchlässigkeit Einzelbaut.	Luftwechsel, geschlossene Räume / Bauten		Luftwechsel in Räumen, Bauten mit teilw. geöffneten Fenstern und Türen		Benutzerbeobachtungen
			Einzelräume	Raumgruppen	Detailunters. an Einzelr.	Raumgruppen mit gestellten versch. Fenster- und Türpositionen	
Mehrfamilienhäuser Neubauten Alt- bau	A	X	X	X	X	X	(X)
	B		X	X	X		
	C	X	X	X	X	X	(X)
	D	X	X	X	X	X	
	E		X	X	X		
	F	X	X	X	X	X	(X)
Einfamilienhäuser	G		X				
	H			X			
	I			X			
	K	X		X			
Sonderbauten	L		X				
	M		X				
	B ₁						X

Tabelle 3 a: Messresultate Luftdurchlässigkeit Bauteile

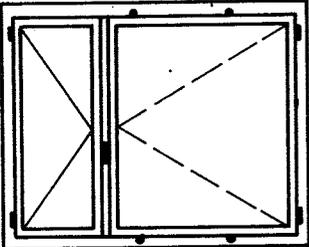
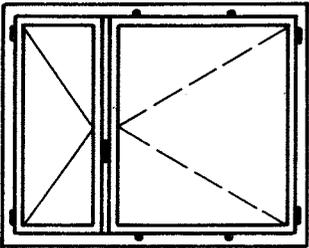
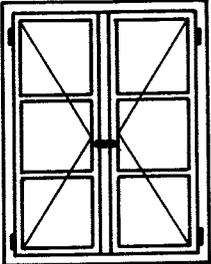
Vers. Nr.	Objekt Nr.	Bauteil/ Ort	Ansicht	Kurzbeschreibung	Fugenlänge [m]	Fläche [m ²]	a-Wert [m ³ /h m Pa ^{2/3}]
a	A	Fenster Küche		Holzfenster mit Doppelverglasung; 2-flügliges un-symm. Drehflügel Fenster, ein Flügel festverschraubt	6,85	1,95	0,42
b	D	Fenster Zimmer B		analog a	6,85	1,95	0,42
c	F	Fenster Zimmer Hofseite		Holzfenster mit Einfachverglasung; 2-flügliges Drehflügel f.; Vorfenster innenseitig	7,41	2,17	0,73 ohne Vorfenst. 0,64 mit Vorfenst.

Tabelle 3 c: Messresultate Luftdurchlässigkeit Bauteile

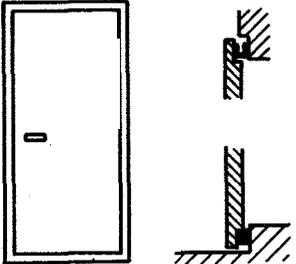
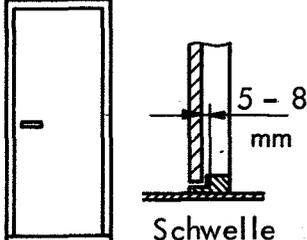
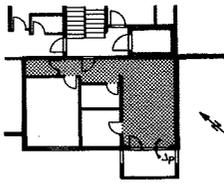
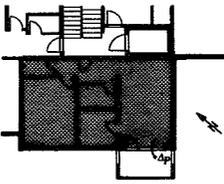
Vers. Nr.	Objekt Nr.	Bauteil/ Ort	Ansicht	Kurzbeschreibung	Fugenlänge [m]	Fläche [m ²]	a-Wert [m ³ /h m Pa ^{2/3}]
f	C	Türe Wohnungseingang		Massive Ausführung mit Alu-Blech und PVC-Folienbeschichtung (mit Profildichtungen)	5,65	1,71	0,04
g	C	Türe Zimmer		Glatte Türblatt mit PVC-Folie, Metalltürzarge, unten grosser Spalt (5 - 8 mm)	5,50	1,54	> 2

Tabelle 4 a: Luftwechselzahlen

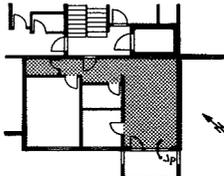
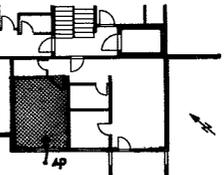
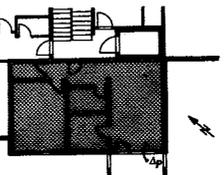
Messobjekt A

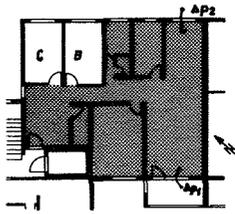
Versuchsnummer	Raum	Bemerkungen	Wind allgemein			$\Delta\vartheta(\text{Luft})$ ($\vartheta_i - \vartheta_a$) [K]	Δp ($p_i - p_a$) [Pa]	φ_i [%]	φ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
			Geschwindigkeit Bereich [m/s]	v_W gesch.MW [m/s]	Richt.					
VW 1 a	Wohnzimmer 	Alle Fenster und Türen zu	0 -7,0	3,5	NE	20,5	1,5	40	73	0,17
1 b			0 -2,5	1,2	E/SE	17,0	0	39	66	0,09
1 c			0 -2,0	1,1	NE/NW	21,0	0,3	39	78	0,15
1 d			0 -3,0	1,4	NW/SW	18,0	0,4*			0,16
VW 2		Küchentüre 45° offen, sonst alle Fenster und Türen zu	0 -3,0	1,2	N	19,0	0,1	38	75	0,13
VW 3	Küchenfenster aufgekippt, sonst alles zu	0 -3,0	1,5	S/SE	18,5	0,6	39	70	0,15	
VW 4	Küchenfenster aufgekippt, Küchentüre 45° offen, sonst alles zu	0 -5,0	2,0	N/NE	19,5	1,3	37	74	0,92	
VG 1 a	Gesamtwohnung 	Alle Fenster zu, Türen innerhalb Wohnung offen	0 -2,6	1,0	N/NE	14,0	-0,4			0,12
1 b			0 -2,5	1,0	S	22,0	-0,1			0,12
1 c			0 -4,0	1,4	NW	13,0	-0,6			0,13
1 d			0 -2,8	1,0	S/E	18,0	0,1	39	64	0,09

* Wechselnde Druckdifferenz

Tabelle 5: Luftwechselzahlen

Messobjekt B

Versuchsnummer	Raum	Bemerkungen	Wind allgemein		Richt.	$\Delta\vartheta(\text{Luft})$ $(\vartheta_i - \vartheta_a)$ [K]	Δp $(p_i - p_a)$ [Pa]	φ_i [%]	φ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
			Geschwindigkeit v_W Bereich [m/s]	gesch. MW [m/s]						
VRW 1 a 1 b		Alle Türen und Fenster zu	0 -7,5	4,5	N/NE	16,5	-0,4	32	57	0,12
			2,0-9,5	5,5	N/NE	14,5	-0,5	28	35	0,20
VRW 2		Türen zu, 1 Fensterfl. 10 cm offen	1,0-9,5	5,0	N/NE	13,0	1,0	30	34	0,73
VRS 1 a 1 b		Alle Türen und Fenster zu	0 -2,0	1,0	NE	9,0	-0,2	30	50	0,15
			0 -4,0	1,6	W	8,0	-1,0	31	52	0,15
VRS 2		Türe zu, 1 Fensterfl. 10 cm offen	0 -1,5	0,8	N	15,5	0,4	30	65	1,53
VRG 1 a 1 b 1 c		Alle Fenster zu, Türen innerhalb Wohnung offen	0 -2,4	0,8	SW	6,5	-1,2	33	50	0,22
			0 -8,0	4,5	N	14,0	-0,8	34	38	0,20
			0 -7,5	3,5	N/NE	8,0	-1,2	32	28	0,22



Gesamtwohnung

Tabelle 6 b: Luftwechselzahlen

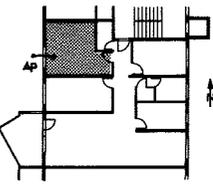
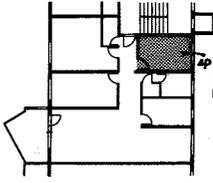
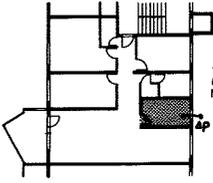
Messobjekt C

Versuchsnummer	Bemerkungen	Wind allgemein			Wind vor SW-Fassade			$\Delta\vartheta(\text{Luft})$ ($\vartheta_i - \vartheta_a$) [K]	Δp_1 ($p_i - p_a$) [Pa]	Δp_2 ($p_i - p_a$) [Pa]	φ_i [%]	φ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
		Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.	Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.						
VG 1 a		0 - 9,0	3,8	S/SW	0 - 8,0	2,0	S/SE	7,0	2,0	0,4*	43	51	0,08
b	Alle Fenster zu, Türen zu; Zimmer	0 - 11,0	3,5	S/SW	0 - 7,0	1,6	S	7,5	2,5	-0,5	42	52	0,08
c	C und B verklebt, alle anderen	0 - 12,0	3,3	S/SW	0 - 9,0	2,2	S/SW	7,5	0,5*	0,4*	42	49	0,10
d	Türen innerhalb der Wohnung offen	0 - 4,5	2,3	SE	0 - 3,0	1,0	NW	9,0	-1,0	0,8*	42	64	0,05
e					0 - 3,5	0,6		9,5	0*	0*	42	69	0,04

* Wechselnde Druckdifferenzen

Tabelle 7 b: Luftwechselzahlen

Messobjekt D

Versuchs- Nummer	Raum	Bemerkungen	Wind allgemein			$\Delta\vartheta(\text{Luft})$ ($\vartheta_i - \vartheta_a$) [K]	Δp ($p_i - p_a$) [Pa]	φ_i [%]	φ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
			Geschwindigkeit v_W Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.					
ASA 1 a	Schlafzimmer A 	Alle Türen und Fenster zu	0 -2,5	1,5	NE	17,0	-0,5	29	48	0,19
1 b			1,5-3,5	2,6	N/NE	21,0	-1,0	27	66	0,15
1 c			0 -2,2	0,8	SW	16,0	-0,6	28	51	0,10
ASA 2		1 Flügel Schlafzimmerfenster 10 cm offen, sonst zu	1,0-4,0	2,0	NE	16,0	0,2	27	47	2,0
ASC 1 a	Schlafzimmer C 	Alle Türen und Fenster zu	0 -2,5	1,5	NE	18,5		25	55	0,37
1 c			1,5-7,5	4,5	N/NE	20,0	-3,0	26	44	0,45
ASC 2 a		1 Flügel Schlafzimmerfenster 10 cm offen, sonst alles zu	1,5-10,0	5,0	SW	14,5		26	60	3,37
2 b			1,0-8,0	4,5	SW	13,0		26	67	3,13
AK 1 a	Küche 	Türe und Fenster zu	1,0-3,0	1,8	NE	18,0	-3,0	25	34	1,54
1 b			0 -5,0	2,2	NE/NW	14,0	-1,0	25	37	1,46
AK 2		Fenster aufgekippt, Türe zu	1,5-6,0	3,8	N/NE	21,5	-0,2	25	63	8,75
AK 3 a		Türe und Fenster zu, Gebläseklappe offen, Gebläse halb (Stufe 1)	2,5-6,0	4,5	NE	27,0	-8,0	25	62	9,7
3 b			2,5-6,0	4,5	NE	26,5	-8,0	25	62	9,0
AK 4 a		Türe und Fenster zu	3,0-5,5	3,6	NE	27,0	-11,0	25	62	14,1
4 b		Gebläseklappe offen	1,0-6,0	3,0	N/E	21,0	-11,0	25	61	11,4
4 c		Gebläse (Stufe 2)	0 -5,0	2,5	NE/E	20,0	-11,0	25	56	13,2
AK 5 a		Fenster aufgekippt, Türe zu, Geblä- seklappe offen a)Stufe 2, b)Stufe 1	1,5-6,0	4,2	NE/E	18,0	-0,5	25	62	12,8
5 b			0 -6,0	3,2	N/NE	15,0	0	25	50	11,8

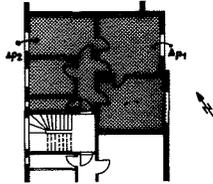


Tabelle 9 a: Luftwechselzahlen

Gesamtraum

Messobjekt F

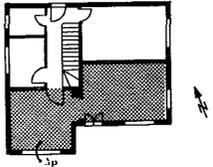
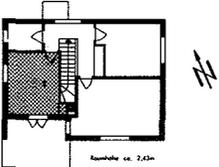
Versuchsnummer	Bemerkungen	Wind allgemein		Wind vor Fassade *			$\Delta\psi(\text{Luft})$ ($\psi_i - \psi_a$) [K]	ΔP_1 ($P_i - P_a$) [Pa]	ΔP_2 ($P_i - P_a$) [Pa]	ψ_i [%]	ψ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
		Gesch. v_W gesch.MW [m/s]	Richt.	Geschwindigkeit. Bereich [m/s]	v_W gesch.MW [m/s]	Richt.						
ZG 1 a		1,2	W/NW	0 - 2,5	1,0	NE	13,0-19,0	-1,2			67	0,46
ZG 1 b		1,2	SW	0 - 3,5	1,6	NE	14,0-20,0	-2,0			73	0,70
ZG 1 c		1,5	SW/W	0 - 1,8	0,9	NE	13,5-15,5	-2,0			66	0,77
ZG 1 d	Alle Fenster zu, mit Vorfenster; Türen innerhalb Wohnung offen	1,0	E	0 - 1,6	0,6	SW	13,5-15,0		0		87	0,64
ZG 1 e		1,4	E	0 - 6,0	1,2	(SW)	7,0- 9,0		-1,3	46	46	0,59
ZG 1 f		1,5	S/SW	0 - 4,0	1,4	(SW)	9,5-11,0		-1,6	46	55	0,52
		2,5	S/SW	0 - 8,0	1,8	(SW)	9,0-10,0		-1,5	45	51	0,55
ZG 1 g		0,6		0 - 1,2	0,6		11,5-13,0	-1,8	-1,0	48	73	0,26
ZG 6	Alle Fenster zu, mit Vorfenster, Türen innerhalb Wohnung offen. Haustüre mit Plastik verklebt	2,5	E	0 - 3,0	1,2	(SW)	13,0-14,5	-8,0	-1,0	47	98	0,31
ZG 7	Küchenfenster offen, alle andern Fenster zu, Küchentüre zu, alle andern Türen innerhalb Wohnung offen	1,7	SW	0 - 3,0	1,2	(SW)	12,5-14,0	-2,0	-0,7	47	85	0,39
ZG 8	Alle Fenster zu; Küchentüre zu, alle andern Türen innerhalb Wohnung offen	1,4	SW/W	0 - 3,0	1,1	(SW)	12,0-14,0	-2,2	-1,0	46	76	0,26

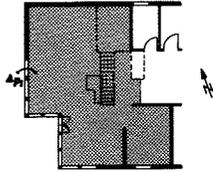
* Wind vor Fassade: ZG 1 a - ZG 1 c vor SE-Fassade
ZG 1 e - ZG 8 vor NW-Fassade

47

Tabelle 10: Luftwechselzahlen

Messobjekt G

Versuchsnummer	Raum	Bemerkungen	Wind allgemein			$\Delta\vartheta(\text{Luft})$ ($\vartheta_i - \vartheta_a$) [K]	Δp ($p_i - p_a$) [Pa]	φ_i [%]	φ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
			Geschwindigkeit. Bereich [m/s]	v_W gesch.MW [m/s]	Richt.					
SW 1 a 1 b	Wohnzimmer 	Alle Türen und Fenster zu	0 -5,5	2,2	NE/SE	3,5	0	36	22	0,23
			0 -1,0	0,6	NE	14,0	-0,5	40	58	0,26
SZ 1 a 1 b	Schlafzimmer 	Alle Türen und Fenster zu * Wechselnde Druckdifferenz	0 -5,0	2,2	W/NW	-5,0	0,5	45	35	0,50
			0 -4,0	1,6	N	-2,0	0,4*	43	19	0,40



Wohnzimmer

Tabelle 12: Luftwechselzahlen

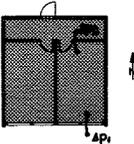
Messobjekt I

Versuchsnummer	Bemerkungen	Wind allgemein			Wind vor SW-Fassade			$\Delta\vartheta(\text{Luft})$ $(\vartheta_i - \vartheta_a)$ [K]	Δp_1 $(p_i - p_a)$ [Pa]	Δp_2^* $(p_i - p_a)$ [Pa]	φ_i [%]	φ_a [%]	n_L [h ⁻¹]
		Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.	Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.						
Se 1 a	Gesamter Wohnraum (Wohnzimmer, Küche und Galerie)	0 - 8,5	4,0	NW	0 - 5,0	2,0	NW	8,0	-9,0	0,8	45	87	0,60
1 b		0 - 5,5	2,8	W/NW	0 - 4,0	1,5	W/NW	8,5	-3,6	0,4	46	73	0,52
1 c		0 - 6,0	2,4	W/NW	0 - 4,0	1,0	W/nW	7,0	-2,5	0,5	45	64	0,42

* Druckdifferenz über SE-Fassade

Tabelle 14: Luftwechselzahlen

Messobjekt L

Versuchsnummer	Raum	Bemerkungen	Wind allgemein			Wind vor S-Fassade			Δp_1 ($p_i - p_a$) [Pa]	Δp_2 ($p_i - p_v$) [Pa]
			Geschwindigk. v_W Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.	Geschwindigk. v_W Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.		
E 1 a	Alle 3 Räume 	Alle Türen und Fenster zu.	0 - 2,5	1,5	SW	0 - 2,0	1,0	SW	0,1	-0,7
E 1 b		Messungen: a,b,c Roll-	0 - 2,50	0,8	NW	0	0	-	0,1	-0,3
E 1 c		laden Raum 1 oben,	0 - 2,0	0,5	SE	0 - 1,5	0,4	SE	0,2	-0,4
E 1 d		Raum 2 unten; d) Raum 1 unten Raum 2 oben	0 - 2,0	1,5	W	0 - 1,4	0,4	W	0,1	-0,5

53

		ϑ_A ($\vartheta_1 - \vartheta_6$) [K]	ϑ_B ($\vartheta_2 - \vartheta_6$) [K]	ϑ_C ($\vartheta_1 - \vartheta_{11}$) [K]	ϑ_D ($\vartheta_2 - \vartheta_{11}$) [K]	ϑ_E ($\vartheta_{11} - \vartheta_{12}$) [K]	φ_i (Raum 1) [%]	φ_a [%]	Raum 1 n_{L1} [h ⁻¹]	Raum 2 n_{L2} [h ⁻¹]	Vorraum n_{L3} [h ⁻¹]
E 1 a		9,0	2,0	9,5	4,5	4,5	36	58	0,08	0,07	0,09
E 1 b		11,0	5,0	9,0	3,5	3,0	42	72	0,05	0,08	0,10
E 1 c		15,5	12,0	8,0	4,0	8,0	44	90	0,09	0,10	0,11
E 1 d		7,0	5,0	6,0	4,0	3,0	46	64	0,05	0,04	0,09

ϑ_1 Raumlufthtemperatur Raum 1
 ϑ_2 Raumlufthtemperatur Raum 2
 ϑ_6 Aussenlufttemperatur

ϑ_{11} Raumlufthtemperatur Vorraum
 ϑ_{12} Aussenluft

p_i Druck im Raum 1
 p_a Druck aussen Südseite
 p_v Druck in Vorraum

5.3.

Resultate der Untersuchungen über das Benutzerverhalten;
Berechnungen zum Einfluss der Benutzer auf die Energieverluste

Die Resultate der Pilotstudie sind in nachfolgender Reihenfolge festgehalten:

- Erfassung und statistische Auswertung des Benutzerverhaltens,
- Berechnung der Luftwechselraten in den beobachteten Wohnungen,
- Berechnung der Lüftungswärmeverluste.

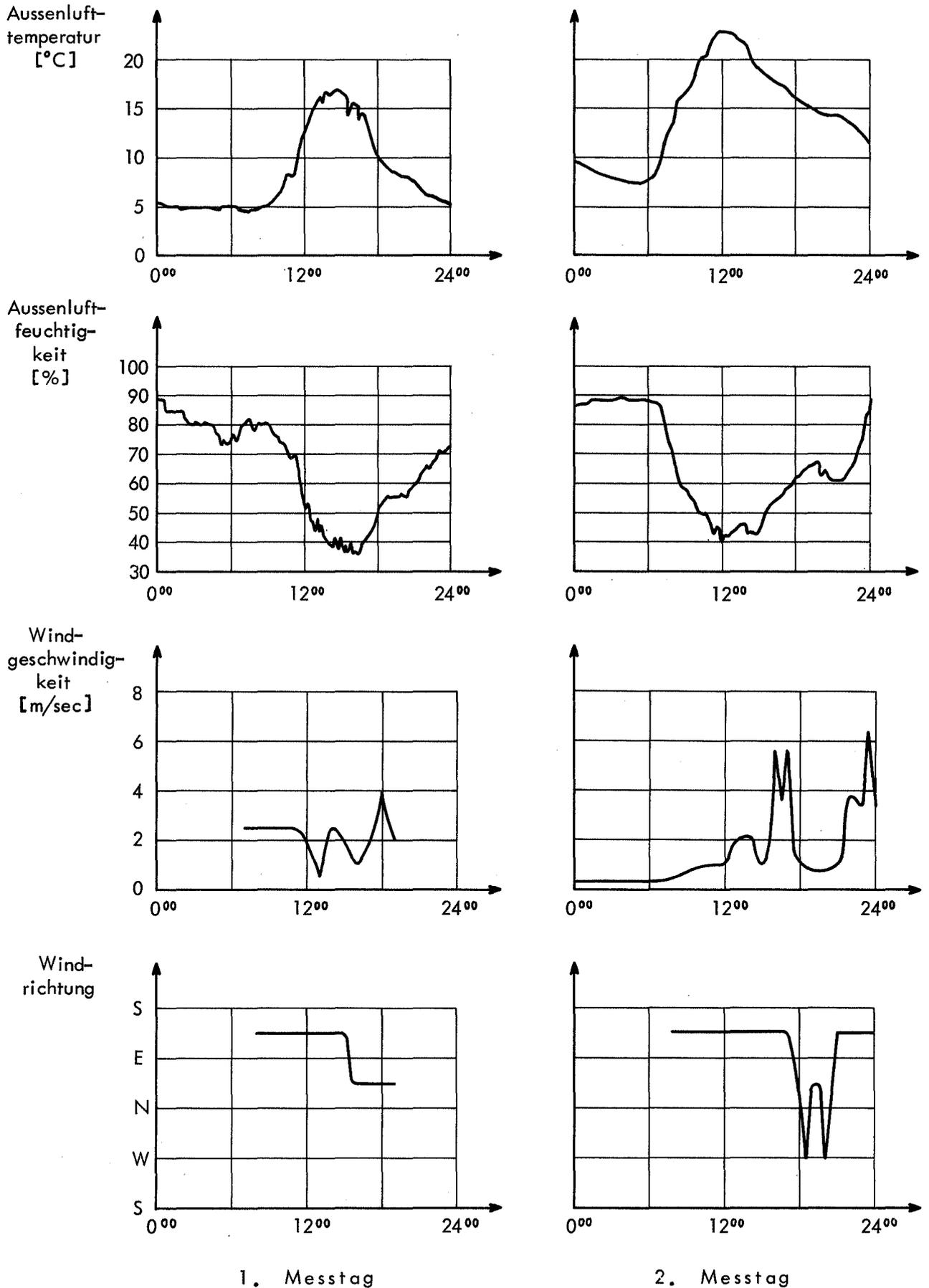
5.3.1. Grundlagen, Messresultate von Randbedingungen

- Bewohner

Die Untersuchung bezieht sich auf 22 Wohnungen. Die Altersstruktur der Bewohner ist aus Tabelle 16 zu erkennen.

Tabelle 16: Alter der Bewohner, Messwohnungen B 1

Wohnungs- typ Alter	2-Zim.- Wohnung	3-Zim.- Wohnung	4-Zim.- Wohnung	5 1/2-Z. Wohnung	Totale Anzahl Bewohner
jünger als 20			7	8	15
zwischen 20 ÷ 40	8	2	12	9	31
zwischen 40 ÷ 60		3		4	7
älter als 60		3		1	4
Totale Anzahl Bewohner	8	8	19	22	57

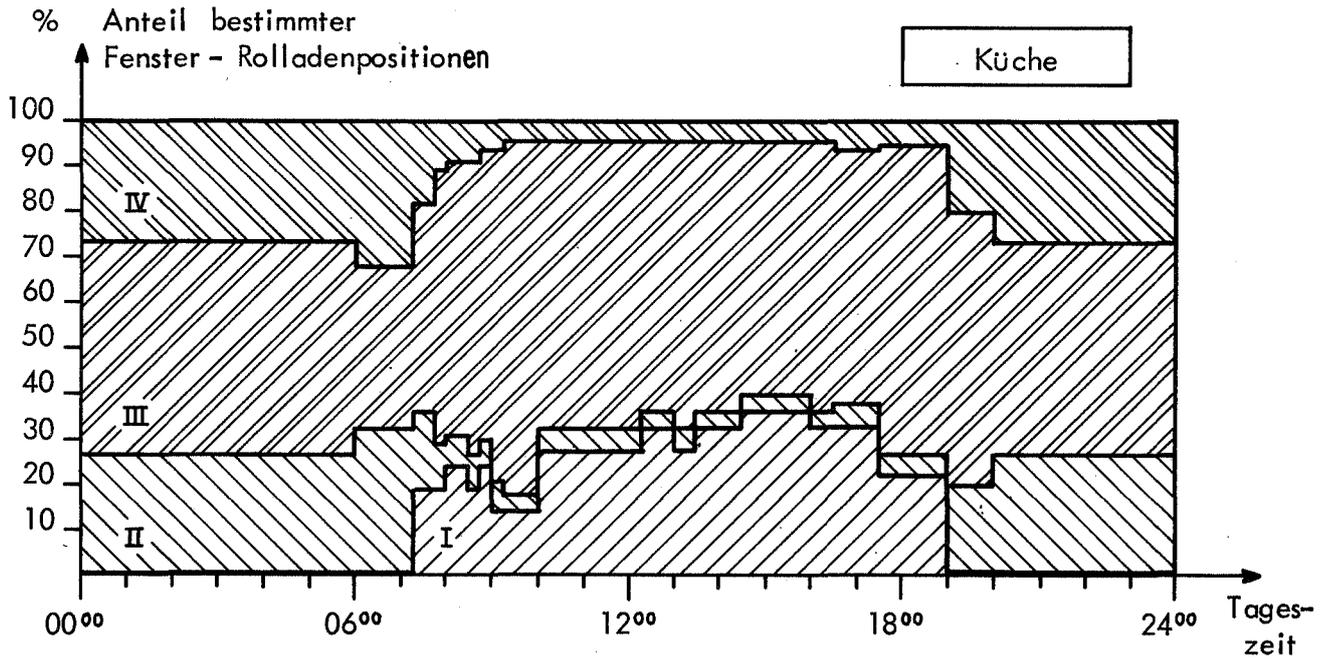


Figur 4 Aussenklimadaten bei Messungen an Objekt B 1

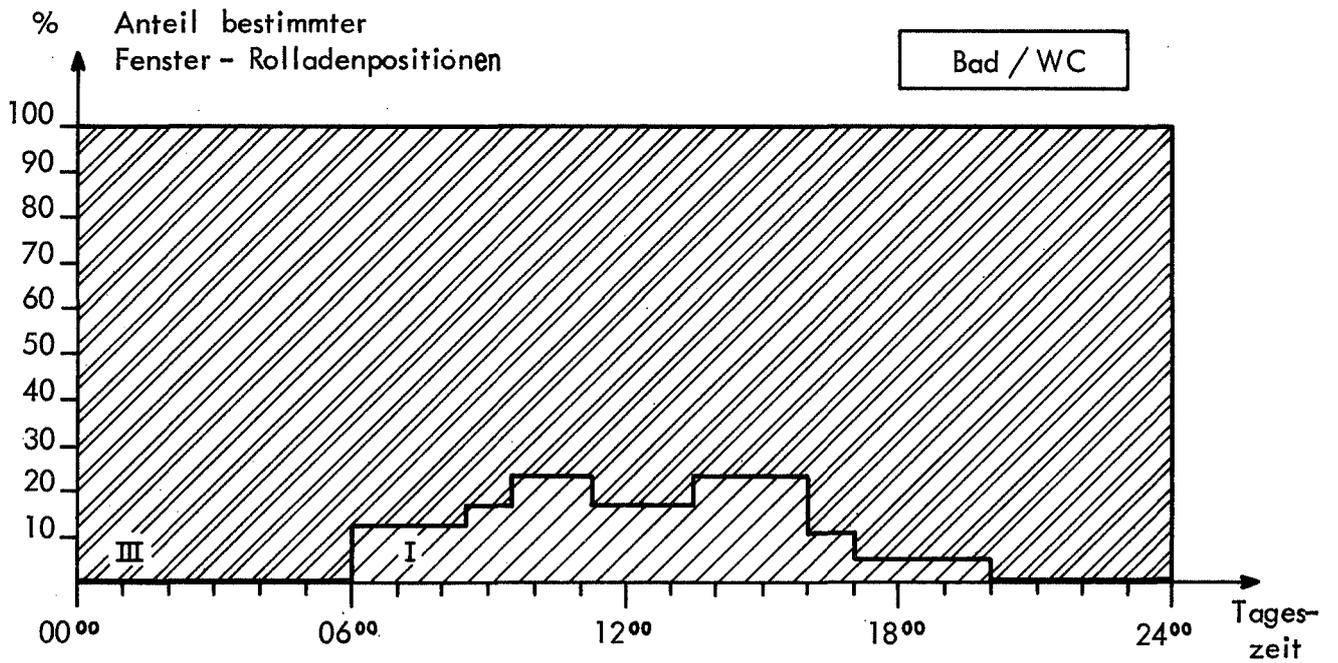
der Zeit zwischen 20.00 und 23.00 in Wirklichkeit noch einige Aenderungen zu verzeichnen wären. An den Schnittstellen der Beobachtungsperioden (06.00 und 20.00) zeigen sich bei den Funktionsverläufen keine wesentliche Sprünge, sodass dennoch die Befragungsergebnisse als genügend zuverlässig gelten können.

In den Figuren 5 a + 5 d sind die Lüftungsgewohnheiten der Bewohner des Objektes B 1 am ersten Messtag zu erkennen. Allerdings musste aus Gründen der Uebersichtlichkeit die Darstellung insofern etwas vereinfacht werden, als leicht geöffnete Drehflügel Fenster, weit geöffnete Drehflügel Fenster oder aufgekippete Fenster alle der Kategorie "offene" Fenster zugeordnet werden mussten. Die Beobachtungen selbst liegen mit den verfeinerten Unterteilungen vor.

Figur 5 c



Figur 5 d



5.3.4. Lüftungs-Wärmeverluste im Vergleich zu den Transmissions-Wärmeverlusten

Anhand der errechneten Luftwechselzahlen und der Differenztemperaturen zwischen Aussen- und Innenluft wurden die Lüftungs-Wärmeverluste berechnet. Anschliessend wurden sie den ebenfalls rechnerisch ermittelten Transmissions-Wärmeverlusten gegenübergestellt.

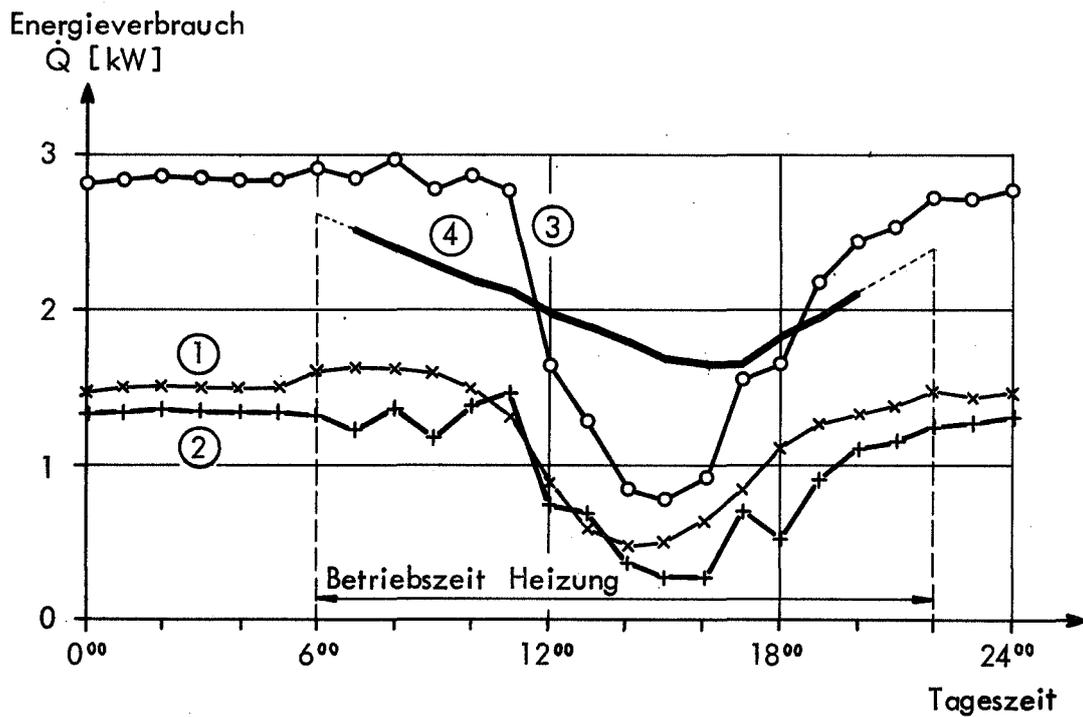
Diese Berechnungen sind in Figur 6 für beide Versuchstage dargestellt.

Ausserdem konnten die errechneten Transmissions-, Lüftungs- und Gesamtwärmeverluste für den 1. Messtag dem gemessenen Gesamtwärmeverbrauch gegenübergestellt werden (Fig. 7).

Figur 7:

Gegenüberstellung von Lüftungs- und Transmissionsverlusten in 6 4-Zimmer-Wohnungen (Messobjekt B 1) an einem sonnigen Februartag (1. Messtag, vgl. Figur 4).

- 1) Transmissionsverluste (stationäre Berechnung)
- 2) Lüftungsverluste (stationäre Berechnung in Schritten von halben Stunden)
- 3) Totale Verluste
- 4) Gemessener Heizenergiebedarf (kann mit Kurve 3, verglichen werden)



6.1. Zuverlässigkeit der Messresultate;

Vergleich mit Messresultaten aus anderen Publikationen

6.1.1. Zuverlässigkeit der Messresultate (Luftwechselzahlen)

Wiederholt ist darauf hingewiesen worden, dass dynamische Effekte die Messung einer mittleren Luftwechselhäufigkeit erschweren. Da andererseits aber die Häufigkeit von Wettersituationen mit stark wechselndem Wind im Winter relativ klein ist, wiegt diese Beeinträchtigung der Messmöglichkeiten nicht so schwer.

Anhand einiger Messbeispielen wird gezeigt, wie die Reproduzierbarkeit von Messungen in der gleichen Wohnung ist, und wie weit sich zwei gleich gebaute Wohnungen im selben Gebäude allenfalls hinsichtlich des Luftwechselerhaltens unterscheiden.

In Figur 8 sind für zwei Messungen Nr. VG 1a und VG 1c, vgl. Kapitel 5.) die gemessenen Konzentrations-Abfallkurven aufgezeichnet. Für die vorliegende - eher ruhige - Winterwitterung sind demnach Messungen bei Räumen mit geschlossenen Fenstern ausgezeichnet reproduzierbar.

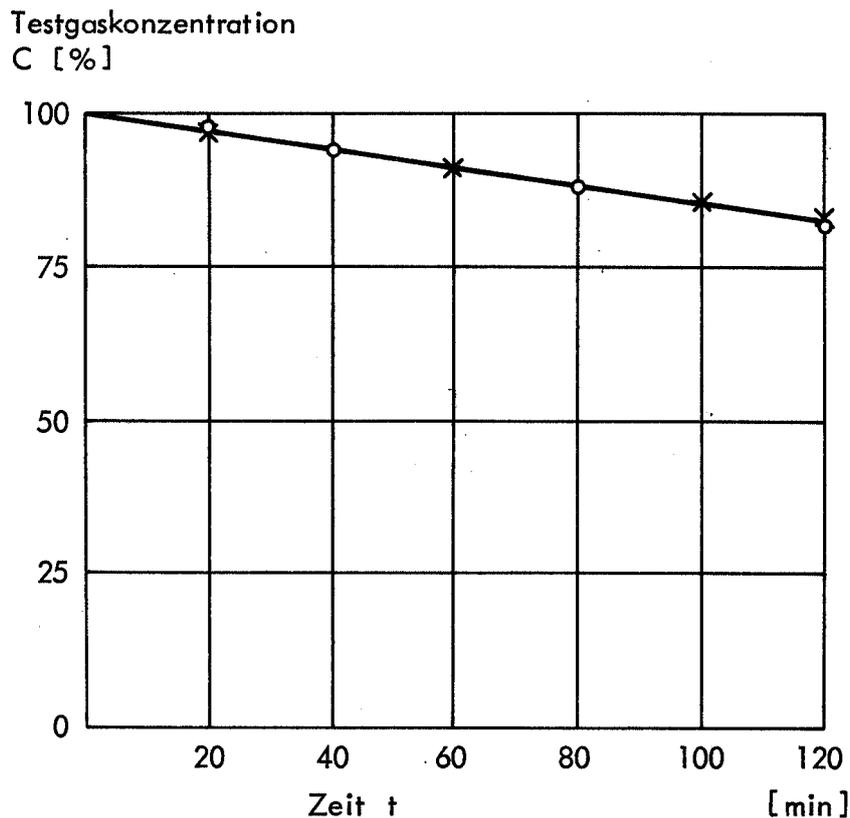


Fig. 8 - Darstellung der Gaskonzentrations-Abnahme bei 2 Versuchen mit gleichen konstruktiven Bedingungen (Messungen VG 1a, VG 1c) und möglichst gleichen Klimabedingungen.

6.1.2. Vergleich der am Bauwerk gemessenen Luftdurchlässigkeiten (a-Werte) von Bauteilen mit Richtwerten aus anderen Quellen

In der nachfolgenden Tabelle sind die eigenen a-Wert-Messungen jenen aus der SIA-Empfehlung 380 (eher als Rechenwert, d.h. oberer Grenzwert einzustufen) und jenen aus einer Publikation von Krischer / Beck (L 2/1) (als Messwerte für mittlere Verhältnisse in Deutschland einzustufen) gegenübergestellt.

Ein Kommentar zu den eigenen Messungen ist als Stichwort in der Tabelle angefügt.

6.1.3. Vergleich der Luftwechsel-Messresultate mit Messresultaten anderer Autoren

Bei Beginn der Untersuchungen herrschte grosse Skepsis über die eigenen Messresultate. Luftwechselzahlen von $0,15 - 0,2 \text{ h}^{-1}$, wie sie in Wohnungen auftraten, erschienen unwahrscheinlich. Eine Ueberprüfung der eigenen Versuchsdurchführung, z.B. durch Parallelversuche mit einem 2. Gerät (vgl. "Auszug Bericht I", Kapitel 4.3.6.), sowie einige in der Zwischenzeit publizierte Messresultate bestätigen den Sachverhalt.

Ohne auf alle Details einzugehen (teilweise fehlen Details wie Raumvolumen, Fugenlängen, Windexposition, Windstärke leider auch) führen wir einige vergleichbare Resultate auf:

- Prof. Esdorn berichtet in L 8/13 über Luftwechselfmessungen in Wohnhochhäusern (Objekt I, kleine bis mittlere Windgeschwindigkeiten, Holz-Doppelverglasungsfenster, a-Wert über verlangtem Normwert); die entsprechenden Resultate $n_L = 0,2 - 0,5 \text{ h}^{-1}$ sind durchaus vergleichbar mit Messungen im Messobjekt D.
- G. Hausladen beschreibt (HLH, 1978, H.1, S. 21-28), dass bei niedrigen Wohngebäuden während der Heizsaison zu 60 % der Zeit die Luftwechselzahl unter $n_L = 0,2 \text{ h}^{-1}$ liegt, wenn man geschlossene Fenster voraussetzt. Diese Aussage deckt sich mit den Messungen der EMPA.

Tabelle 21 Verschiedene mögliche Messverfahren bei Einzelraum- und Gesamtraum-Messungen;
Einfluss auf Messresultate n_L

Messverfahren	Versuchsbedingungen (X Konzentrations- Messstellen)	Kommentar zu (n_L =Luftw.Zahl Versuchsbe- dingungen Raum 1 V_1 =Vol.Raum 1)	Praktische Bedeutung für
a) "Einzel- raum"		-Bei Versuchsbeginn nur in Messraum Testgas; Türen und Fenster geschlossen	Beurteilung der Luftqualität in stark belegten Einzelräumen (z.B. Schlafzimmer nachts, Wohnzi.abends)
b) "Einzel- raum"		-Bei Versuchsbeginn in allen Räumen gleiche Testgas-Konzentration; Türen und Fenster geschlossen	"gleichmässig belegte" Räume, z.B. einzelner Büros in einem grösseren Bürogebäude
c) "Gesamt- raum" (Raum- gruppe)		-Bei Versuchsbeginn gleiche Konzentration in allen Räumen; Türen und Fenster geschlossen $\bar{n}_L = \frac{n_{L1} \cdot V_1 + n_{L2} \cdot V_2 + \dots}{V_1 + V_2 + \dots}$	Luftwechselfmessung in wenig genutzter Wohnung bei geschlossenen Zwischentüren (z.B. Wohnung werktätiger Ehepaare, tagsüber)
d) "Gesamt- raum" (Raum- gruppe)		-Bei Versuchsbeginn gleiche Konzentration in allen Räumen; -Türen offen, Fenster geschlossen $\bar{n}_L = \frac{n_{L1} \cdot V_1 + n_{L2} \cdot V_2 + \dots}{V_1 + V_2 + \dots};$ oft $\bar{n}_L \approx n_{L1} \approx n_{L2} = \dots$	- genutzte Wohnung oder Wohnung mit relativ undichten Türen

In den Resultaten der Tabelle 23 kommen zwei gegenläufige Phänomene zum Ausdruck:

Bei den Gesamtraummessungen entfallen die Drosselwirkungen der Türen, sodass daher ein leicht höherer Luftstrom durch das Gebäude entstehen kann; andererseits sind in den Einzelraum-Messwerten auch Luftaustausch-Strömungen zum Nachbarraum enthalten, welche die Luftwechselzahl des Einzelraumes erhöhen, aber nicht unbedingt zu Wärmeverlusten führen.

Gesamthaft gesehen ergaben sich für die Gesamtraummessungen nach Methode d) oft Messwerte in ähnlicher Grössenordnung (letztes Beispiel, Tab. 23), wie für die Einzelraum-Messungen nach Methode a), manchmal aber auch wesentlich kleinere Messwerte (erste zwei Beispiele in Tab. 23).

Wo in Messwert-Tabellen des Berichtes nichts anderes vermerkt ist, wurden Einzelräume stets nach Methode a), Raumgruppen nach Methode d) ausgemessen.

6.2. Auswertung von Einzel-Einfluss-Untersuchungen

6.2.1. Konstruktive Einflussparameter

In einer umfassenden Liste wurden im "Auszug Bericht I" (S.25) die konstruktiven Einflussparameter dargestellt. Es sind dies im wesentlichen die

- Gebäudeform, Gliederung
- Gebäudelage (Windexposition, Umgebungsbebauung)
- Raumanordnung im Innern
- Luftdurchlässigkeit der Trennelemente im Gebäude
- Eigenschaften der raumumhüllenden Flächen
- Einflüsse des Heizsystems und allfälliger lokaler Lüftungsanlagen.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit, die Vermittlung einer Uebersicht über die Luftwechselfvorgänge in repräsentativen schweizerischen Bauten, erlaubte es im allgemeinen nicht, bestimmten Einzeleinflüssen in allen Details nachzugehen.

Die beiden Autoren schliessen mit der Folgerung, dass deshalb die Hülle eines Raumes möglichst dicht zu konstruieren und die erforderliche Raumbelüftung durch besondere Lüftungsvorrichtungen vorzunehmen sei. - Unseres Erachtens werden damit die technischen Probleme auf eine andere Ebene geschoben, auch wenn dort bestimmt neue Fragezeichen entstehen werden (Zwangslüftung von Altbauten ? Beeinflussung des Lüftungsbetriebs durch Benutzer, durch Wind ?).

- Luftdurchlässigkeit der Fenster und Türen in den untersuchten Mehrfamilienhäusern

Luftwechsel in Einzel- und Gesamträumen:

Die Luftdurchlässigkeit der Fenster entsprach im allgemeinen den Richtwerten, wie sie z.B. die SIA-Empfehlung 380 angibt (vgl. Tabelle 20, Kapitel 6.1.2.).

Hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit der Wohnungstüren zeigten sich grosse Unterschiede zwischen Alt- und Neubauten; in Altbauten sind die Wohnungstüren oft relativ leicht konstruiert, weisen u.U. auch eine Teilverglasung auf, während die Türen von Neubau-Wohnungen meist dicht und massiv gebaut sind. Auch wenn vor allem schalltechnische Gründe für diese Aenderung verantwortlich sind, so bewirkt die geringere Luftdurchlässigkeit, dass ein Luftaustausch mit dem Treppenhaus fast nur bei einem Oeffnen der Türe stattfindet. Durch den Kamineffekt verursachte Luftströmungen können sich daher nur abgeschwächt bemerkbar machen.

In "geschlossenen" Wohnungen wurden bei kleineren Windgeschwindigkeiten, wie sie im Winter häufig sind, mittlere Luftwechselzahlen zwischen $n_r = 0.10$ und 0.6 h^{-1} gemessen. Untere Grenzwerte sind bei Wohnungen mit "dichter Konstruktion" und schwacher Windexposition zu finden, ohne Grenzwerte bei Wohnungen mit eher undichten Fenstern und undichten Wohnungseingangstüren (vgl. Tabellen 4 - 14).

Bei den vorliegenden Verhältnissen erhöhen sich die Luftwechselzahlen durch das Öffnen des Fensters stark. - Erstaunlicherweise liegen fast gleiche Verhältnisse vor bei eingeschaltetem Ventilator für geschlossenes und offenes Fenster. Hinsichtlich der Erneuerung der Küchenluft unterscheiden sich die beiden Fälle insofern wohl stark, als im einen Fall im wesentlichen Luft aus dem Wohnraum nachgesaugt wird, in andern Fall aus dem Freien.

Jedenfalls bestehen für diese aussenliegende Küche genügende Lüftungsmöglichkeiten; nur sind die Lüftungsverhältnisse nicht im geeigneten Mass regelbar.

-Entlüftung innenliegender Sanitärräume;
Folgerungen aus zwei Einzeluntersuchungen

In einem der Messobjekte wurden in einem innenliegenden Bad-Toilettenraum, der über einem Schacht mittels Gebläse entlüftet wird, folgende Luftwechselzahlen gemessen:

- bei geschlossenem Schacht $n_L \approx 0,2 \text{ h}^{-1}$ (Messmethode a)
- bei offenem Schacht $n_L \approx 0,8 \text{ h}^{-1}$ (Messmethode a)

Bei dieser Lüftungsanlage ist der Lüftungseffekt eindeutig zu gering.

In einem weiteren Objekt wurde rechnerisch ermittelt, welcher Anteil der gesamten Lüftungsverluste auf eine Entlüftung innenliegender Sanitärräume zurückzuführen ist. Der Anteil war recht gross, vor allem für einen zeitlich wenig differenzierten Betrieb der Lüftungsanlage. Unseres Erachtens ist deshalb ein eingehender Vergleich verschiedener Entlüftungsanlagen und Betriebsverfahren sehr am Platz, um nicht anfängliche Einsparungen an Investitionskosten später mit einem Energieverbrauch zu bezahlen.

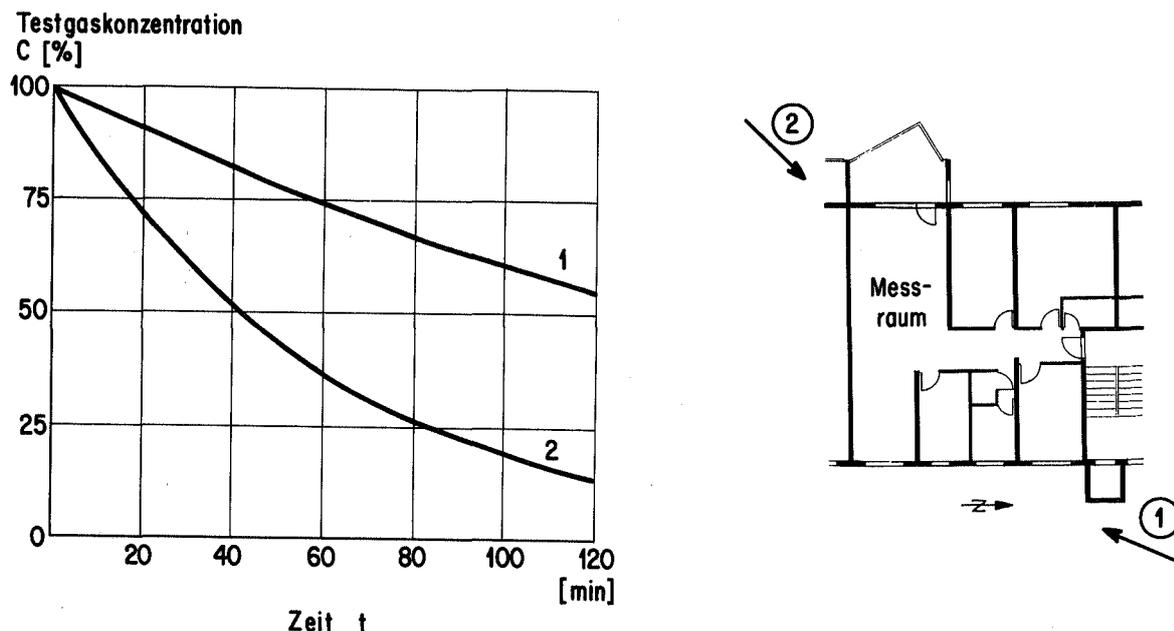


Fig. 9 Qualitativer Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die Luftwechselzahl eines Wohnraumes. In der linken Darstellung ist die Abnahme der Testgas-Konzentration, rechts ein schematischer Grundriss gezeigt; Pfeile 1 und 2 entsprechen den Windrichtungen bei den gezeigten 2 Messungen.

- Einfluss der Raumanordnung im Innern eines Gebäudes auf die Ausbildung von Luftströmungen:

Im bereits beschriebenen Messobjekt K besteht eine offene Wendeltreppe als Verbindung zwischen 4 Stockwerken. Dass sich wegen dieses offenen Treppenhauses ein wirkungsvoller Kaminzug ausbildet, geht aus folgenden Messresultaten hervor: In beiden Fällen wurde der Luftwechsel in den zusammenhängenden Räumen Wohnzimmer/Küche bei etwa gleichen Klimabedingungen gemessen (S-Wind, $1,2 \div 1,5$ m/s, Temperaturdifferenz innen/aussen etwa 13 K bei erster, 9 K bei zweiter Messung).

Wenn bereits bei Gebäuden mit einfacher Form (z.B. "Scheiben-Häusern") auf den Fassaden örtlich stark unterschiedliche Druckverhältnisse auftreten, umso eher sind die Verhältnisse bei heute üblichen, komplizierteren Bauformen (z.B. bei stufenweise versetztem Grundriss) durch Blenden, Kanten, Balkone gestört.

- Vergleich der Luftwechselzahlen in typischen Räumen gemäss Auslegung nach SIA-Empfehlung 380, bei Messung mit geschlossenen Fenstern und in mittleren Winter-Windbedingungen, bei Ermittlung unter dem Einfluss der Benutzer:

Für die Wohnräume der Messobjekte A (entspricht B), C, D, E wurden die Luftwechselzahlen berechnet, wie sie gemäss SIA-Empfehlung 380 der Heizungsauslegung zugrunde zu legen sind (genannt " n_L , Auslegung").

Andrerseits bestanden Messwerte bei typischen winterlichen Windgeschwindigkeiten für den geschlossenen Zustand der Türen und Fenster (Werte " n_L , geschlossen"). Diese Werte beziehen sich auf Windgeschwindigkeiten von etwa 2 - 3 m/s.

Für die Beispiele A - C konnte aufgrund der Benutzerbeobachtungen (Kapitel 5.3.) - zumindest bei eher mildem Winterwetter - die Luftwechselzahlen geschätzt werden, wie sie sich unter dem Einfluss von Klima und Benutzer im Mittel ergeben (Werte " n_L , Benutzer").

Diese Zusammenstellung zeigt Tabelle 24.

Zusammenfassung Klimaeinflüsse - Luftwechsel

- Für moderne, nicht allzu hohe Mehrfamilienhäuser sowie für Einfamilienhäuser mit Kammerbildungen im Innern überwiegt der Windeinfluss den Einfluss der Uebertemperatur.

- Zur Beurteilung der möglichen Variation der Luftwechselzahlen in Räumen bei verschiedenen Wetterlagen werde folgendes Verhältnis gebildet ("Windempfindlichkeit"):

Luftwechselzahl bei starkem, direkt auf die Hauptfenster auftreffendem Wind ($w_L = 10 - 12 \text{ m/s}$) dividiert durch die Luftwechselzahl bei schwachem Wind (ca. 1 m/s). Dieses Verhältnis schwankte bei den beobachteten Bauten zwischen:

2 und 5 für eher geschützte Windlagen und "dichte" Bauten, 5 und 8 für Bauten mit grosser Windangriffsfläche oder mit weniger dichter Konstruktion der Hülle und offener Konzeption der Räume.

- Zwar liegen die Luftwechselzahlen in den untersuchten Objekten bei geschlossenen Fenstern weit unter den erwarteten Werten; wird jedoch der Einfluss der Benutzer einbezogen, so erhöht sich die mittlere Luftwechselzahl in den Bereich von etwa $n_L = 0,7 \div 1,2 \text{ h}^{-1}$, der sich deckt mit jenen Luftwechselzahlen, welche für die Heizungsauslegung verwendet werden (SIA-Empfehlung 380).

6.2.3. Einfluss der Fensterposition auf den Luftwechsel eines Raumes und den Luftwechsel in Nebenräumen

Messungen bei verschiedenen gestellten Fenster- und Türpositionen geben einen ersten Ueberblick über den Umfang möglicher Beeinflussungen durch den Benutzer.

- Beeinflussung des Luftwechsels in Einzelräumen durch verschieden positionierte Fenster,
- Beeinflussung des Luftwechsels in Räumen durch das "Lüften" von Nachbarräumen,

Fig. 11 stellt Resultate aus einer ähnlichen Untersuchung in einem Schlafzimmer dar. Die detaillierten Versuchsbedingungen sind wiederum im Figurentext gegeben, ebenso die entsprechenden Luftwechselzahlen.

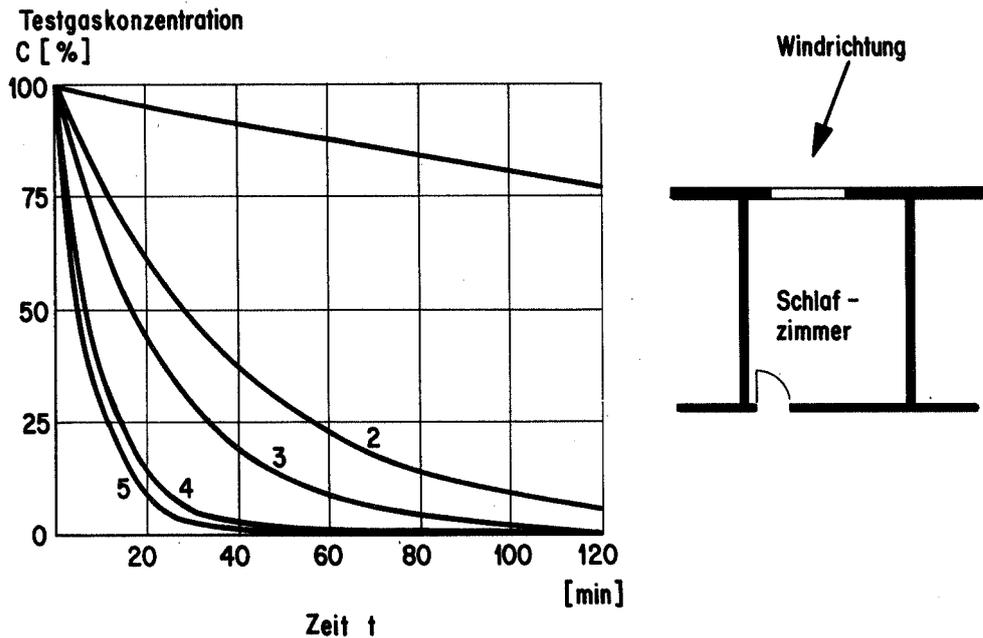


Fig. 11 Einfluss von Fensterstellung und Rolladenstellung auf den Luftwechsel eines Schlafzimmers bei "geschlossener" Türe, bei etwa gleichen Windverhältnissen, bei einer leicht schrägen Windanströmung des einzigen, doppelverglasten Holzfensters, Fasadeneinstellung SSW

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1) Fenster zu | $n_L \approx 0,15 \text{ h}^{-1}$ |
| 2) Fenster 10 cm offen, Rolladen geschlossen | $n_L \approx 1,5 \text{ h}^{-1}$ |
| 3) Fenster 10 cm offen | $n_L \approx 2,5 \text{ h}^{-1}$ |
| 4) Fenster 45° offen | $n_L \approx 6,0 \text{ h}^{-1}$ |
| 5) Fenster ganz offen | $n_L \approx 9,0 \text{ h}^{-1}$ |
- Windgeschwindigkeit 1 - 3 m/s
Temperaturdifferenz innen - aussen rund 13 - 17°C

Durch das Lüften der beiden Nachbarräume wird der Luftwechsel im sehr grossen Hauptraum immerhin auf den doppelten Wert erhöht.

Solche Messungen beweisen, dass ein kurzfristiges, intensives Lüften i.A. einen sehr raschen, vollständigen Luftaustausch bewirkt.

6.3. Gegenüberstellung von Luftwechsel-Messresultaten aus verschiedenen Messobjekten

Aus der Vielzahl von Messresultaten (vgl. Kapitel 5.) wurden jene für Wohnräume und Schlafzimmer (bei geschlossenen Fenstern) in Tabellenform zusammengestellt. (Tabellen 26 a - 26 c für Wohnräume, Tabellen 27 a und 27 b für Schlafzimmer). Aehnliche, zusätzliche Gegenüberstellungen wären möglich für Gesamtraum-Messresultate (teilweise bereits erstellt in Kapitel 6.1.4., Tabelle 22) und einige wenige Messwerte aus Küchen.

Die Wahl fiel nicht nur daher auf Wohnzimmer und Schlafzimmer, weil von fast jedem Messobjekt Resultate vorlagen (Methode a), Tabelle 21), sondern weil sich die beiden Räume in vielerlei Hinsicht markant unterscheiden:

- Wohnräume sind während des Tages und abends genutzt; in ihrem Grundriss sind ausserordentlich grosse Variationen anzutreffen (eine bis 3 Fassaden mit Fenstern oder Türen), aber auch in der Höhe variieren sie sehr stark (vgl. etwa Messobjekt A und I); oft sind sie ohne Zwischentüre verbunden mit Gang oder Küche.
- Schlafzimmer werden nachts und tagsüber höchstens teilweise genutzt; meist besitzen sie Fenster nur in einer Fassade (im Gegensatz zum Wohnzimmer eher nord- und ostwärts als südwärts gerichtet); abgesehen von Ausnahmen reichen sie nur über ein Stockwerk und besitzen eine mehr oder weniger dichte Türe.

Tabelle 26 a

Messwerte verschiedener Wohnräume

Haus Nr.	Grundriss mit Wohnraum	Aussenwände Fenster o. Türen	Fläche [m ²]/ Volumen [m ³]	Wind allgemein			$\Delta\psi_{Luft}$ ($\psi_i - \psi_a$) [K]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 ($p_i - p_a$) [Pa]	n_L [h ⁻¹]
				Geschwindigk. vW Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]	Richt.				
A + B		SW-Wand	28,5/	0 -2,5	1,2	E/SE	17,0	0	0,09	
		(eine Aus- senwand)	71,5	0 -7,0	3,5	NE	20,5	1,5	0,17	
				2,0-9,5	5,5	N/NE	14,5	-0,5	0,2	
C		NE-Wand +	46,6/	0 -2,5	1,3	NE/SE	19,5	1,0	0,06	
		SW-Wand + NW-Wand (drei Aus- senwände)	117	0 -6,5	2,0	NW	11,5	<u>+0,2</u>	<u>+0,2</u>	0,07
D		E-Wand +	47,1/	1,0-4,5	2,2	N/NE	12,5	-2,0	0,33	
		W-Wand	118	2,5-14,0	8,5	SW	17,0	-28	0,97	
		(zwei Aus- senwände)		3,0-14,0	8,5	SW	14,0	-32	1,12	

Tabelle 26 c

Messwerte verschiedener Wohnräume

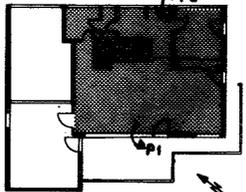
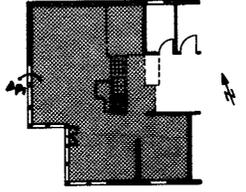
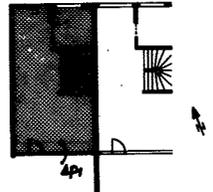
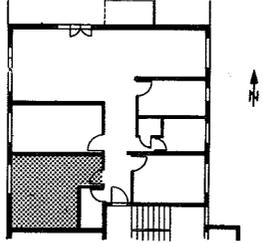
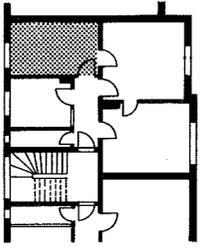
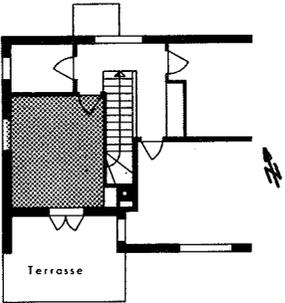
Haus Nr.	Grundriss mit Wohnraum	Aussenwände Fenster o. Türen	Fläche [m ²]/ Volumen [m ³]	Wind allgemein		Richt.	$\Delta\theta_{\text{Luft}}$ ($\theta_i - \theta_a$) [K]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 ($p_i - p_a$) [Pa]	n_L [n ⁻¹]
				Geschwindigk. vW Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]					
H		NE-Wand + SE-Wand + SW-Wand (drei Aus- senwände)	67/ 335	0 -2,0	1,1	SW/W	4,0	-1,5	0,2	0,13
				0 -2,6	1,2	SW	9,0	-5,0	-0,2	0,55
				0 -7,5	3,4	W	12,5	-12,0	0,4	0,86
I		NW-Wand + SW-Wand (zwei Aus- senwände)	74/ 450	0 -6,0	2,4	W/NW	7,0	-2,5	0,5	0,42
				0 -5,5	2,8	W/NW	8,5	-3,6	0,4	0,52
				0 -8,5	4,0	NW	8,0	-9,0	0,8	0,6
K		NW-Wand + SW-Wand (zwei Aus- senwände)	38/ 139	0 -2,0	1,2	S/SW	13,0	-0,5	-3,8	0,35
				0 -1,5	0,8	SW	17,0	-0,6	-5,4	0,44

Tabelle 27 b

Messwerte verschiedener Schlafzimmer

Haus Nr.	Grundriss	Aussen-Wand	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]	Wind allgemein		Richt.	Δv_{Luft} ($v_i - v_a$) [K]	Δp ($p_i - p_a$) [Pa]	n_L [h ⁻¹]
					Geschwindigkeit vW Bereich [m/s]	gesch.MW [m/s]				
E		W-Wand	16,0	41,5	0 -8,0 1,0-7,5 1,8-8,0	3,5 4,5 4,0	SW S/SW SW	3,0 3,0 4,0	-3,0 -4,2 -5,0	0,39 0,42 0,51
F		NW-Wand	12,7	33,0		1,3 1,4	SW SW	10,0 10,0	-1,1 -1,6	0,24 mit Vorfenst. 0,31 ohne Vorfenst.
G		SW-Wand	12,0	29,0	0 -4,0 0 -5,0	1,6 2,2	N W/NW	-2,0 -5,0	+0,4 0,5	0,4 0,5

Bei den Schlafzimmern fallen zwei Merkmale besonders auf:

Ueber 80 % aller Schlafzimmerfenster sind nachts mehr oder weniger geöffnet, in den meisten Fällen mit einem Rolladen überdeckt. Dieses Verhalten gilt nach Befragung der Bewohner für den ganzen Winter, nicht nur für die beiden Messtage. -

Für den Energieverbrauch wesentlich gravierender ist der Umstand, dass während des ganzen Tages etwa ein Drittel aller Schlafzimmerfenster offen stand. Entweder lassen einzelne werktätige Ehepaare die Schlafzimmerfenster ganztags offen oder die Schlafzimmer in manchen Wohnungen werden tagsüber kaum betreten, sodass die mit der Fensteröffnung verursachte Untertemperatur nicht bemerkt wird.

Ein beachtlicher Teil der Küchenfenster bleibt auch nachts (Begründung ?) offen. Eigentliche "Spitzenzeiten" der Fensteröffnung, wie sie um die Essenszeiten 12.00 und 18.00 zu erwarten wären, sind kaum feststellbar.

Bei den beobachteten aussenliegenden Bädern waren keine Läden vorhanden, weshalb in der entsprechenden Figur 5 d) die Kategorien II und IV fehlen.

Die festgestellte Zahl offener Badezimmerfenster während des Tages erscheint vernünftig. Dass - als Resultat der Befragung - alle Badezimmerfenster nachts geschlossen sind, ist eher etwas unwahrscheinlich.

An anderer Stelle wurde bereits vermerkt, wie sehr die mittlere Luftwechselzahl von etwa $n_L = 0,2 \text{ h}^{-1}$ auf $n_L = 1 \text{ h}^{-1}$ erhöht wird durch den Benutzereinfluss. Ein grosser Teil davon ist auf offene Fenster im Schlafzimmer zurückzuführen.

Für die im Vergleich zur Bewohnerzahl grossen Wohnungen ist die mittlere Frischlufttrate reichlich (vgl. Kapitel 5.3.3.).

7. Berechnungsverfahren für Lüftungsverluste in Abhängigkeit von klimatischen, konstruktiven und benutzerbedingten Parametern; Stand der Entwicklung, Vorschläge

7.1. Einleitung

Bereits mehrfach haben wir darauf hingewiesen, dass es notwendig ist, Berechnungsregeln aufzustellen für Lüftungsverluste unter folgenden Randbedingungen:

- A Lüftungsverluste, wie sie der Auslegung der Heizungsanlage zugrunde zu legen sind,
- B mittlere Lüftungsverluste über einer bestimmten Zeitperiode, z.B. der ganzen Heizsaison
- C Momentan-Werte für die Lüftungsverluste, die aufgrund der momentanen Werte alle Einflussparameter zu errechnen sind.

Ein grundsätzliches Problem für alle Berechnungsansätze besteht darin, dass die wesentlichen Einflussfaktorgruppen

- konstruktive Merkmale des Gebäudes
- klimatische Bedingungen
- benutzerbedingte Faktoren

nicht voneinander unabhängig sind. - Zwei Beispiele verdeutlichen diese Schwierigkeit.

- Die Luftdurchlässigkeitseigenschaften der Fenster sind abhängig von Luftfeuchtigkeit und Temperatur, also vom Klima;
- Die Bewohner ändern ihr Verhalten hinsichtlich des Fensterlüftens ausserordentlich stark in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen.

Es hat sich in den letzten Jahren immer deutlicher gezeigt, dass sich mittels einer freien Lüftung die Luftverhältnisse in Räumen keineswegs optimal beeinflussen lassen. Trotzdem scheint uns eine weitere Erforschung dieser Zusammenhänge

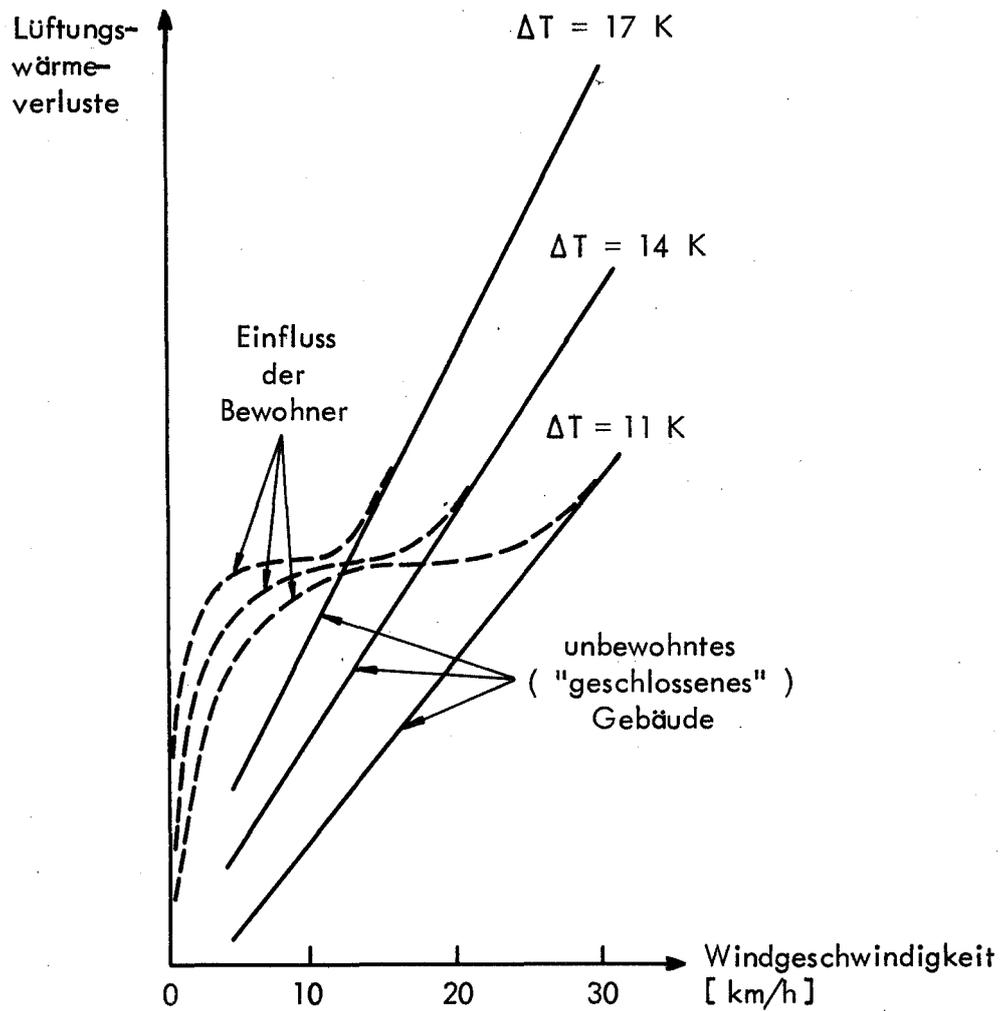


Fig. 12 Zusammenhang zwischen Lüftungsverlusten und Windgeschwindigkeit sowie Differenztemperatur in älteren britischen Einfamilienhäusern (nach Dick in L 8/2).

Baukonstruktion. Uns scheint eine Ueberarbeitung der vorgeschlagenen Zuschläge (z.B. $\Delta n_L = 0,2 \text{ h}^{-1}$ für undichte Rolladen) nötig, die teilweise als additive Therme, teilweise als Multiplikationsfaktoren vorliegen. Auch müsste der Begriff "undichte Bauweise" näher umschrieben werden, damit Heizungsplaner nicht für jeden Fall durch Verwendung dieses Sicherheitszuschlages (Faktor 1,5) die Heizanlagen zu gross auslegen.

- Zu B) Mittlere Lüftungsverluste (resp. mittlere Luftwechselzahlen) während bestimmten Zeitperioden:

Es sind uns keine Publikationen bekannt, in denen in typischen mitteleuropäischen Gebäuden mittlere Luftwechselzahlen über gewisse Zeitperioden gemessen oder fundiert berechnet worden wären.

Zur Beurteilung von Sanierungsmassnahmen in Bauten oder zur Beurteilung der Heizkosten bei zwangsbelüfteten Bauten im Vergleich zu natürlich belüfteten Bauten sind solche Unterlagen notwendig.

Da heute aber sowohl umfangreiche statistische Daten über Klimazustände (Luftgeschwindigkeit, kombinierte Häufigkeit von Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur) vorliegen, als auch Messresultate in verschiedenen Bauten unter verschiedenen Klimabedingungen, erscheint es uns möglich, in nächster Zeit überschlägige, aber doch fundierte Berechnungen auszuführen.

- Zu C) Momentanwerte für die Lüftungsverluste

In den letzten Monaten ist von der IEA (Projekt "Energy Conservation in Buildings and Community Systems"; Air Infiltration in Buildings, Literature survey, Howard D. Ross und David T. Grimsrud, USA, 1977) eine sehr umfangreiche Literaturstudie zu diesen Berechnungsverfahren zusammengestellt worden.

- β_o = Regressions-Koeffizient
 C_t = Aequivalente Fugenlänge über der gesamten Gebäudeoberfläche
 Δp_t = Theoretische Druckdifferenz über die Gebäudehülle auf Grund des Kamineffekts
 Δp_w = Theoretische Druckdifferenz über der Gebäudehülle auf Grund des Windes

Von Seiten der EMPA wurde vor einiger Zeit ein Vorschlag erarbeitet, der sich auf frühere amerikanische Unterlagen abstützte (vgl. L 8/5). Der Berechnungsvorschlag ist angepasst an die Lüftungsverhältnisse in einem grösserem Mehrfamilienhaus, in dem

- keine Heizanlagen mit den Wohnräumen in Kontakt stehen, welche Luft verbrennen,
- keine Abluftgebläseanlagen in Betrieb sind,
- das Oeffnen von Fenstern in einem Raum sich grossteils auf diesen Raum allein auswirkt.

Folgende Berechnung für einen Einzelraum wurde vorgeschlagen:

$$\dot{V}_L = (A + B \cdot v_L + C \cdot \Delta t) \cdot Z_E \cdot Z_B$$

wobei

A, B, C Koeffizienten sind, abhängig von der Konstruktion und Umgebungsbebauung

Z_E Faktor, abhängig von der Situierung der Räume

Z_B Fenster-Oeffnungs-Faktor (abhängig von Nutzung des Raumes und Fenstertyp)

Δt Temperaturdifferenz innen/aussen

v_L Luftgeschwindigkeit

Das hier gezeigte Berechnungsverfahren für die Luftaustauschrate eines Raumes ist in vielen Punkten stark vereinfacht, insbesondere hinsichtlich der Verwendung der Windgeschwindigkeit. Immerhin hat es sich bei guter, auf

Die bekannte gegenseitige Abhängigkeit der wesentlichen Einflussfaktoren, wie sie in Beispielen gezeigt wurde, bringt mit sich, dass ein Berechnungsverfahren für Momentanverluste mathematisch nicht einfach sein kann.

Folgende wesentlichen Einflussfaktoren sind jedenfalls einzubeziehen:

- Strömungscharakteristiken von Gebäudehüllen- und Trennelementen zwischen Räumen
- Gebäudekonzeption (innen und aussen), Nachbarbebauung
- Windparameter (Geschwindigkeit, Richtung)
- Lufttemperatur (Differenz innen, aussen)
- Betriebsdaten von allfälligen Abluftanlagen
- Betriebsdaten von Luft verbrennenden Heizanlagen
- Fensteröffnungs- und Türöffnungsdauer, verursacht durch Bewohner.

In allen drei genannten Vorschlägen sind diese Parameter, soweit sie für die untersuchten Objekte relevant waren, angeführt.

Gesamt zeigt sich, dass

- vielerorts
- dass umfangreiche Messdaten bestehen, die aber weder einheitlich gemessen noch ausgewertet wurden,
- dass es an umfassenden Arbeiten fehlt, welche das Gesamtproblem behandeln und auch auf den umfangreichen, in der Welt erarbeiteten Unterlagen fussen.

Soweit als möglich sollen die Berechnungsverfahren auch vereinfacht werden oder direkt, z.B. für typische Heizungs- auslegungs-Anwendungen, zu Tabellendarstellungen ausgewertet werden.

Erfreulicherweise bahnt sich auf internationaler Ebene auf diesem Gebiet eine Koordination der Forschungstätigkeit an: Im Rahmen des Forschungsprojektes "Energy Conservation in Buildings and Community Systems" der Internationalen Energieagentur (IEA) sind folgende Unterprojekte geplant:

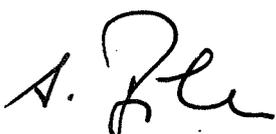
- Schaffung eines Informations- und Resultat-Austauschzentrums für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Lüftungsverluste von Bauten.
- Durchführung koordinierter Forschungsprojekte zur experimentellen Ueberprüfung von Lüftungsverlust-Berechnungsverfahren an typischen Bauten (Bürohäusern, diversen Wohnhäusern), zur Beschaffung von Unterlagen über den Einfluss der Benutzer auf die Lüftungsverluste.

Diese Arbeiten sollen anlässlich eines Seminars demnächst besprochen werden.

Da wegen der i. A. verbesserten Wärmedämmung von Neubauten die Lüftungsverluste immer bedeutungsvoller werden, da auch Vorschläge für grundsätzlich neue Lüftungssysteme für Wohnbauten (Zwangslüftung mit Wärmerückgewinnung) vorliegen, ist die Forschungstätigkeit in den letzten Jahren aktiviert worden. Dank der intensiver werdenden Kontakten zwischen den Forschungsinstituten zeichnen sich Wege ab, eine Entlüftung der Bauten zu schaffen, die nicht nur auf die Komfortbedürfnisse der Bewohner abgestimmt ist, sondern auch mit möglichst geringem Energieverbrauch und wirtschaftlich günstig betrieben werden kann.

Dübendorf, im März 1978

Der Sachbearbeiter:



Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
Abteilung Bauphysik
Der Abteilungsvorsitzher:

i. V. J. Lehmann

A 1

A N H A N G

Messobjekt - Beschreibungen

Tabelle A 1

Uebersicht Anhang

Messobjekt	Mehrfamilienhäuser					
	A 2-Zimmer- Wohnung	B 2-Zimmer- Wohnung	C 5 1/2-Zimmer- Wohnung	D 5-Zimmer- Wohnung	E 5-Zimmer- Attikaw.	F 3-Zimmer- Wohnung
Situationsplan	Fig.A 1	Fig.A 1	Fig.A 1	Fig.A 3	Fig.A 3	Fig.A 9
Stockwerkplan	Fig.A 2	Fig.A 2	Fig.A 2	Fig.A 4	Fig.A 4	Fig.A10
Bilder	A 1	A 1	A 1	A 2, A 3, A 4, A 5	A 2, A 4, A 6, A 7	A 8, A 9
Grundriss	Fig.A 5	Fig.A 5	Fig.A 6	Fig.A 7	Fig.A 8	Fig.A 11

Messobjekt	Einfamilienhäuser				Spezialbauten	
	G	H	I	K Reihen- haus	L Versuchs- pavillon	M Büro- raum
Situationsplan	Fig.A12	Fig.A15	Fig.A19	Fig.A22	-	Fig.A26
Stockwerkplan	-	Fig.A18	Fig.A21	Fig.A25	-	-
Bilder	A10, A11	A 12, A 13, A 14, A15	A 16, A 17, A 18, A19	A 20, A 21, A 22	A23, A24	-
Grundriss	Fig.A13, A 14	Fig.A16, A 17	Fig.A20	Fig.A24	Fig.A25	Fig.A27

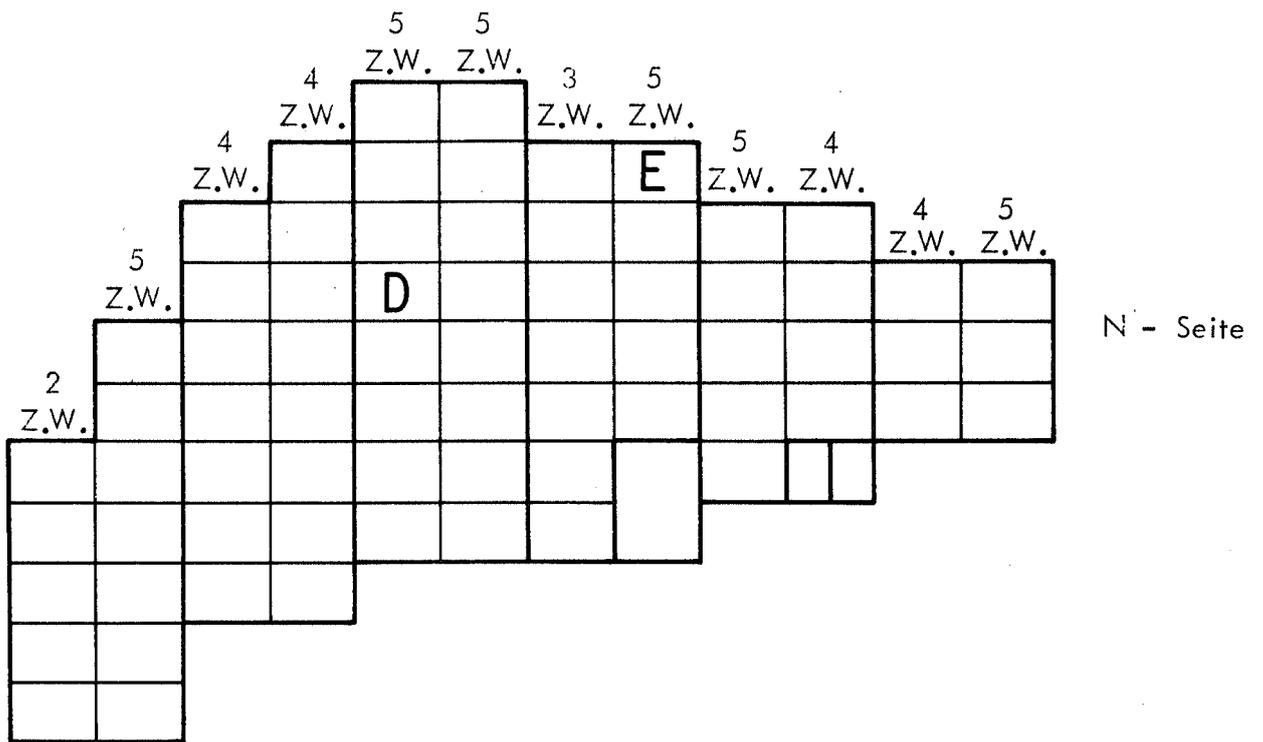


Fig. A 4 - Stockwerkplan für Wohnungen D und E



Bild A 2 (Foto EMPA-Nr. 72928/7)

Ostfassade des Gebäudes in dem sich Wohnungen D und E befinden.

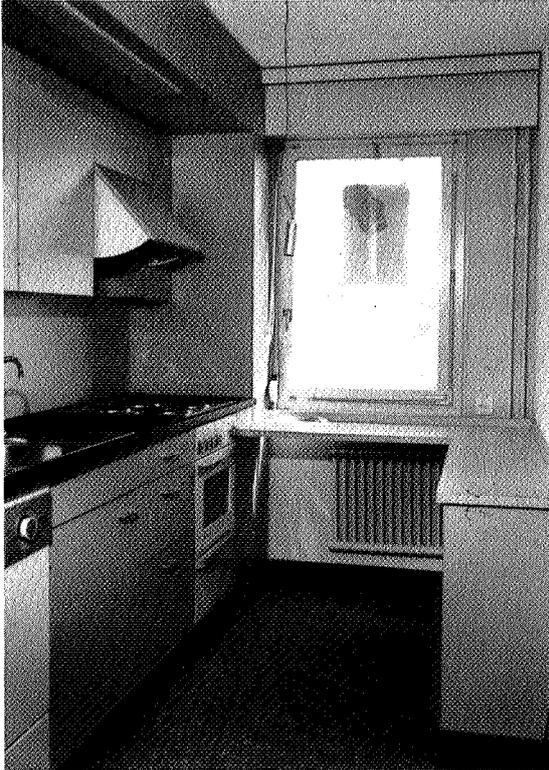


Bild A 5
(Foto EMPA-Nr. 72928/26)
Küche der Wohnung D;
links im Bild offene
Abzugklappe

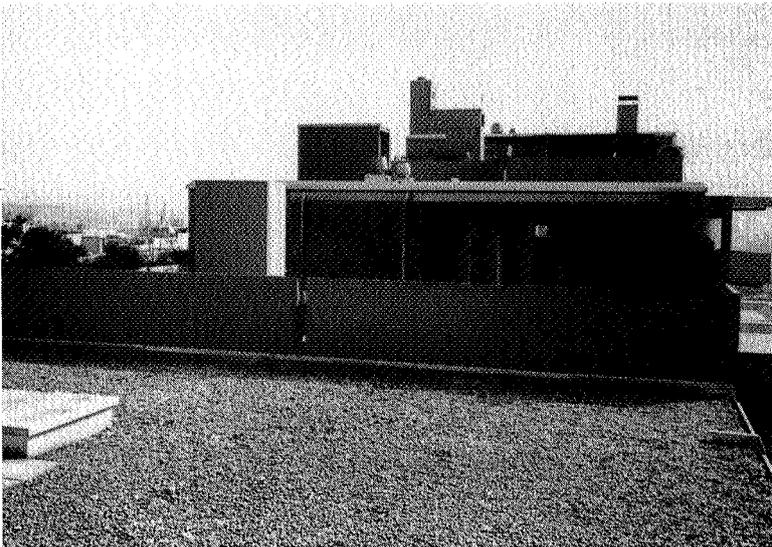


Bild A 6 (Foto EMPA-Nr. 72931/11a)
Ansicht der Wohnung E (Attika-5-Zimmer-
wohnung) aus Nordrichtung

Grundrisse und Zimmerflächen für die einzelnen Wohnungen

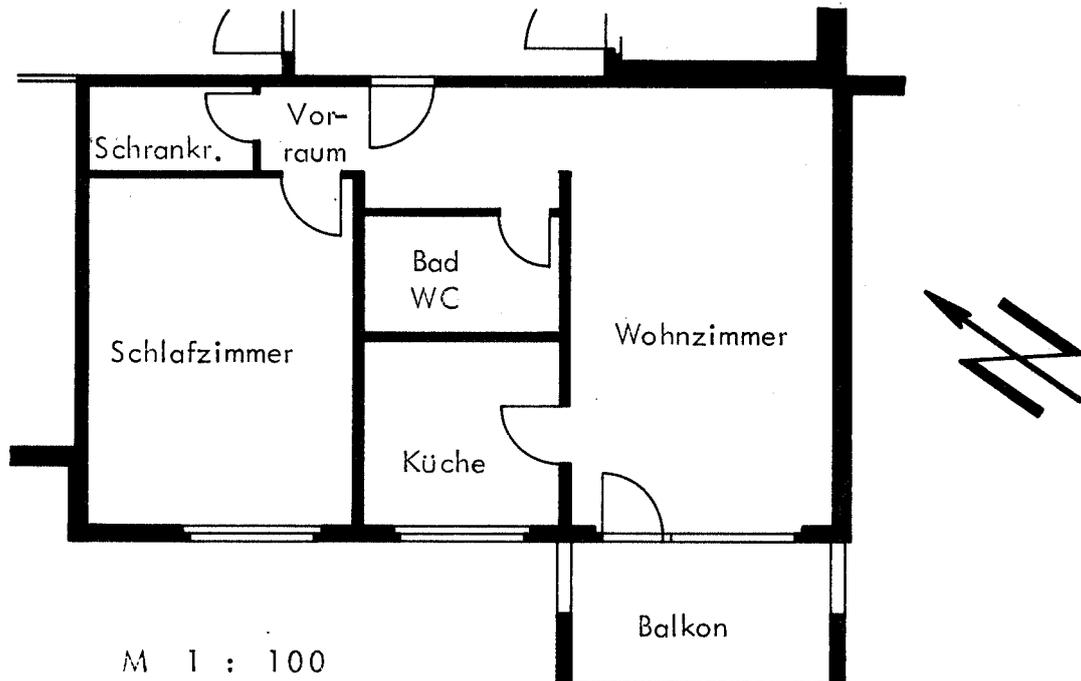


Fig. A 5 - Grundriss der Wohnungen A und B

2-Zimmer-Wohnung (A und B), Zimmerflächen:

Vorplatz	5,90 m ²
Küche	6,30 m ²
Wohnzimmer	20,10 m ²
Schlafzimmer	15,90 m ²
Bad/WC	3,70 m ²
Schrankraum	2,50 m ²
<hr/>	
Total nutzbare Fläche	54,40 m ²
Balkon	5,80 m ²
Raumhöhe	ca. 2,51 m

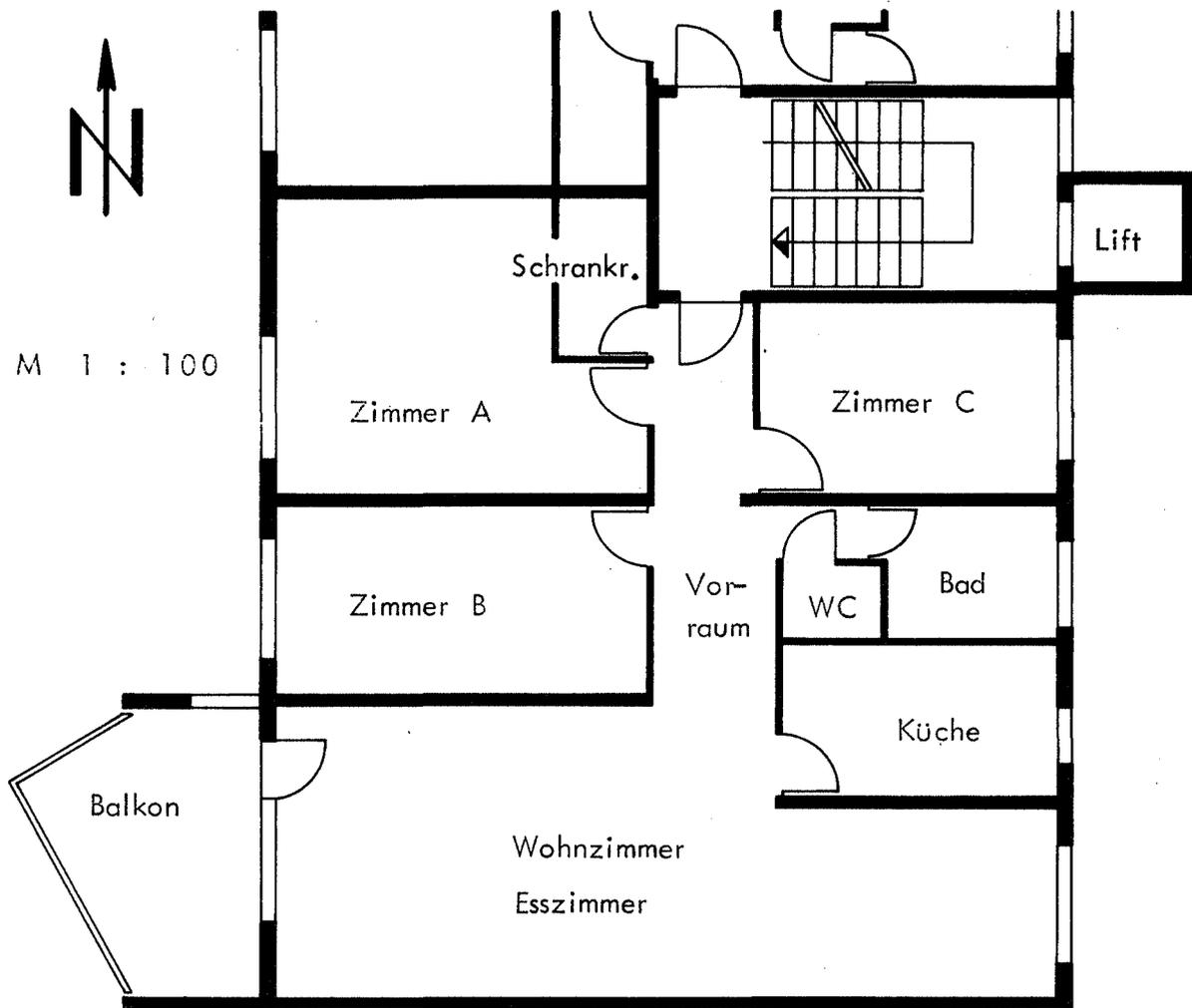


Fig. A 7 - Grundriss der Wohnung D

5-Zimmer-Wohnung (D), Zimmerflächen:

Wohnzimmer/Esszimmer	35,50 m ²
Zimmer A	16,00 m ²
Zimmer B	12,50 m ²
Zimmer C	10,00 m ²
Vorraum	9,10 m ²
Küche	6,60 m ²
Bad	4,30 m ²
WC	1,30 m ²
Schrankraum	2,50 m ²
<hr/>	
Total nutzbare Fläche	97,80 m ²
Balkon	8,90 m ²
Raumhöhe	ca. 2,51 m

Kurzer Baubeschrieb:

Allgemeine Ausführung:

- Elementbauweise
- Tragkonstruktion aus Eisenbeton
- Fassaden mit dreischichtigem Sandwich-Aufbau
(Beton / Wärmedämmung / Beton)
- Boden-, Wand- und Deckenbeläge gemäss nachfolgender Tabelle

Tabelle A 2

Boden-, Wand- und Deckenbeläge der Wohnungen A, B und C

Materialien für:	Böden		Wände				Decken	
	Aufgeklebter Teppichboden «PRIM REPS» (Teppichfabrik Ennenda), Eichensockel	PVC-Belag mit Dämmschicht Kunststoffsockel	Sandspritzplastik durchgefärbt (Längsfassade) «Tasporim» Tapeten abwaschbar	Sandspritzplastik durchgefärbt (Langfassade und Cheminée wand) Raufasertapete (für Wohnungen mit Dachterrassen)	Sandspritzplastik durchgefärbt	Sandspritzplastik mit Dispersions- auftrag	Glasmosaik (gemäss Detailbeschrift)	Sandspritzplastik durchgefärbt
Wohnzimmer	●		●	●				●
Esszimmer	●		●	●				●
Vorplatz	●		●	●				●
Elternzimmer	●		●					●
Kinderzimmer	●		●					●
Schrankraum		●			●			●
Küche		●				●		●
Badezimmer		●				●	●	●
Sep. WC		●				●	●	●
Duschenraum		●				●	●	●

Türtypen:

- T 1 Wohnungsabschlusstüre in massiver Ausführung mit Alublech- und PVC-Folienbeschichtung, kunstharzgestrichene Metalltürzarge, seitlich und oben im Falz des Rahmens eine Profildichtung (Lippendichtung), unten an der Türe ein Weichgummi-Profil
- | | |
|-------------|---------------------|
| Fläche: | 1,71 m ² |
| Fugenlänge: | 5,65 m |
- T 2 Türe mit glattem Türblatt und heller PVC-Folienbeschichtung; kunstharzgestrichene Metalltürzarge
- | | |
|--------------------|---------------------|
| Fläche: | 1,54 m ² |
| Fugenlänge: | 5,50 m |
| Spaltbreite unten: | 3-5 mm |
- T 3 Türe mit glattem Türblatt und heller PVC-Folienbeschichtung; kunstharzgestrichene Metalltürzarge
- | | |
|--------------------|---------------------|
| Fläche: | 1,44 m ² |
| Fugenlänge: | 5,40 m |
| Spaltbreite unten: | 3-5 mm |
- T 4 Türe mit glattem Türblatt und heller PVC-Folienbeschichtung; kunstharzgestrichener Holzrahmen
- | | |
|--------------------|---------------------|
| Fläche: | 1,20 m ² |
| Fugenlänge: | 5,17 m |
| Spaltbreite unten: | 3-5 mm |
- T 5 Türe mit glattem Türblatt und heller PVC-Folienbeschichtung; kunstharzgestrichene Metalltürzarge
- | | |
|--------------------|---------------------|
| Fläche: | 1,35 m ² |
| Fugenlänge: | 5,34 m |
| Spaltbreite unten: | 3-5 mm |

F 5 Drehkipplügel Fenster

Fläche:	0,90 m ²
Fugenlänge:	3,89 m

Rolladenkasten - Typen:

R 1 Fugenlänge	5,58 m
R 2 Fugenlänge	3,67 m
R 3 Fugenlänge	1,91 m
R 4 Fugenlänge	4,05 m
R 5 Fugenlänge	5,41 m

Rolladen-Typen:

Kunststoff-Kettenprofile mit einstellbaren Lüftungsschlitzen, Gurtenzug mit aufgesetztem Gurtenroller.

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

Heizung: Die Häuser werden über eine Fernheizung von einer Heizzentrale versorgt, welche mit Gas betrieben wird. Die Wohnungen werden mit Radiatoren beheizt, welche im allgemeinen unter den Fenstern plaziert sind.

Lüftung: Innenliegende Badezimmer und WC sind mit automatischen Abluftventilationsanlagen ausgerüstet, deren Betrieb zentral über eine Zeitschaltuhr gesteuert wird.

Die Küchen der Wohnungen D und E sind zusätzlich mit automatischen Abluftventilationsanlagen ausgerüstet, wobei in der Küche eine Schliessklappe montiert ist.

Messobjekt F

3-Zimmer-Wohnung (Altbau)

in geschützter Lage, unbewohnt

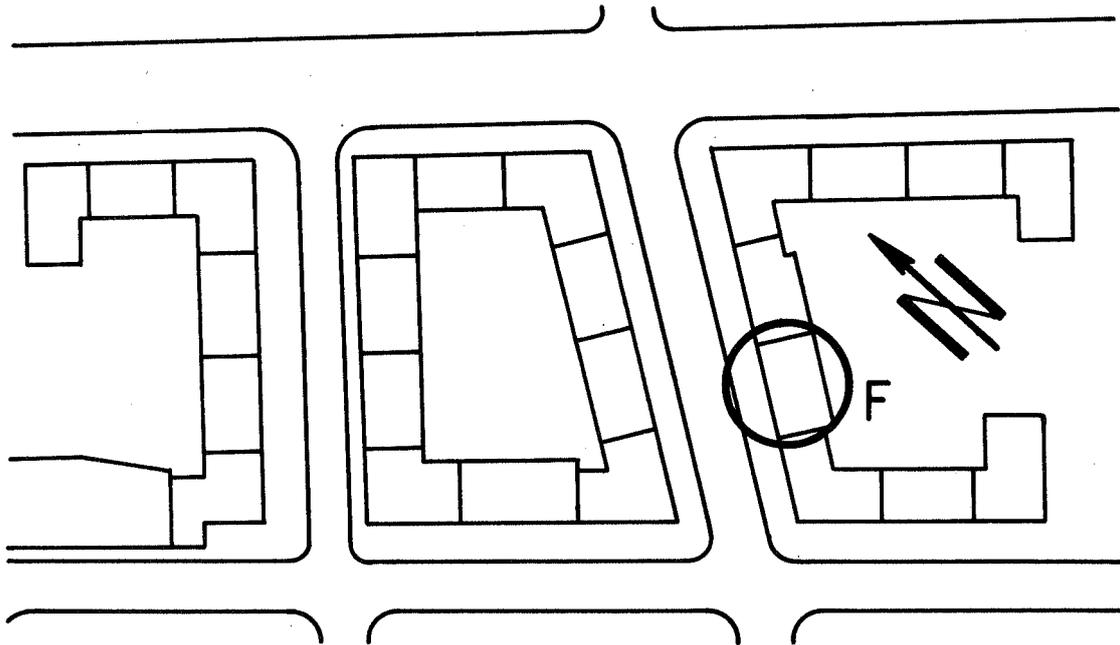


Fig. A 9 - Situationsplan "Altbausiedlung" F
(Baujahr 1908)



Bild A 8
(EMPA-Nr. 74127/32)
Strassenfassade des
Messgebäudes (F)



Bild A 9
(EMPA-Nr. 74127/30)
Hoffassade des Mess-
gebäudes (F)

Kurzer Baubeschrieb:

Allgemeine Ausführung:

Böden aus Holz; Wohnraum mit Spannteppich; Küche, Vorraum und WC mit Linoleum-Bodenbelag; Decken mit Gips-Glattstrich

Türen:

nicht sehr stabile, "dünne" Holztüren (auch Eingangstüre);

Wohnungs-Eingangstüre:	Fläche	2,0 m ²
	Fugenlänge	6,17 m

Zimmertüren:	Vorraum - Wohnraum	} je Türe:	Fläche	1,80 m ²	Fugenlänge	5,98 m
	Wohnraum - Zimmer A					
	Wohnraum - Zimmer B					
	Vorraum - Zimmer A					
	Vorraum - Zimmer B					
	Vorraum - Küche					
	Vorraum - WC	Fläche	1,51 m ²	Fugenlänge	5,71 m	

Fenster:

Holzfenster mit Einfachverglasung; im Winter Vorfenster auf Innenseite.

Wohnraum:	2 zweiflüglige Drehflügelfenster	
	Fläche total	2,80 m ²
	Fugenlänge	12,77 m

Zimmer A:	zweiflügliges Drehflügelfenster	
	Fläche	2,17 m ²
	Fugenlänge	7,41 m

Zimmer B:	zweiflügliges Drehflügelfenster	
	Fläche	1,79 m ²
	Fugenlänge	6,91 m

EinfamilienhäuserMessobjekt G (Einfamilienhaus)

Etwa fünfundzwanzigjähriges, dreistöckiges Haus in freier Lage auf kleiner Geländeanhöhe; bewohnt.

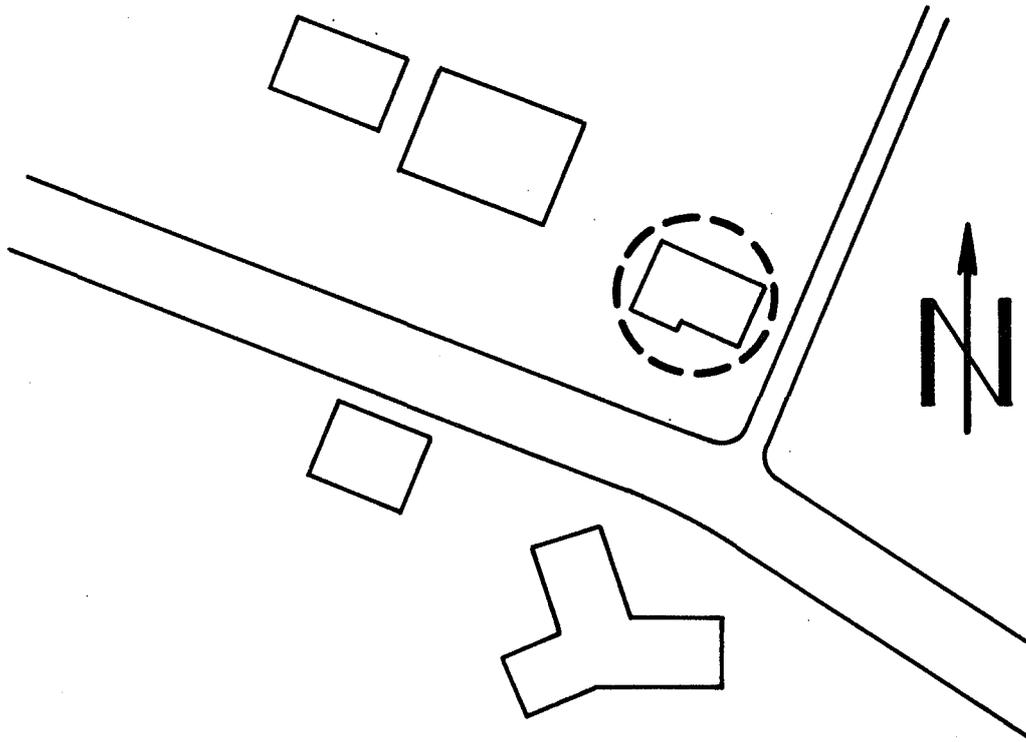


Fig. A 12 - Situationsplan Messobjekt G

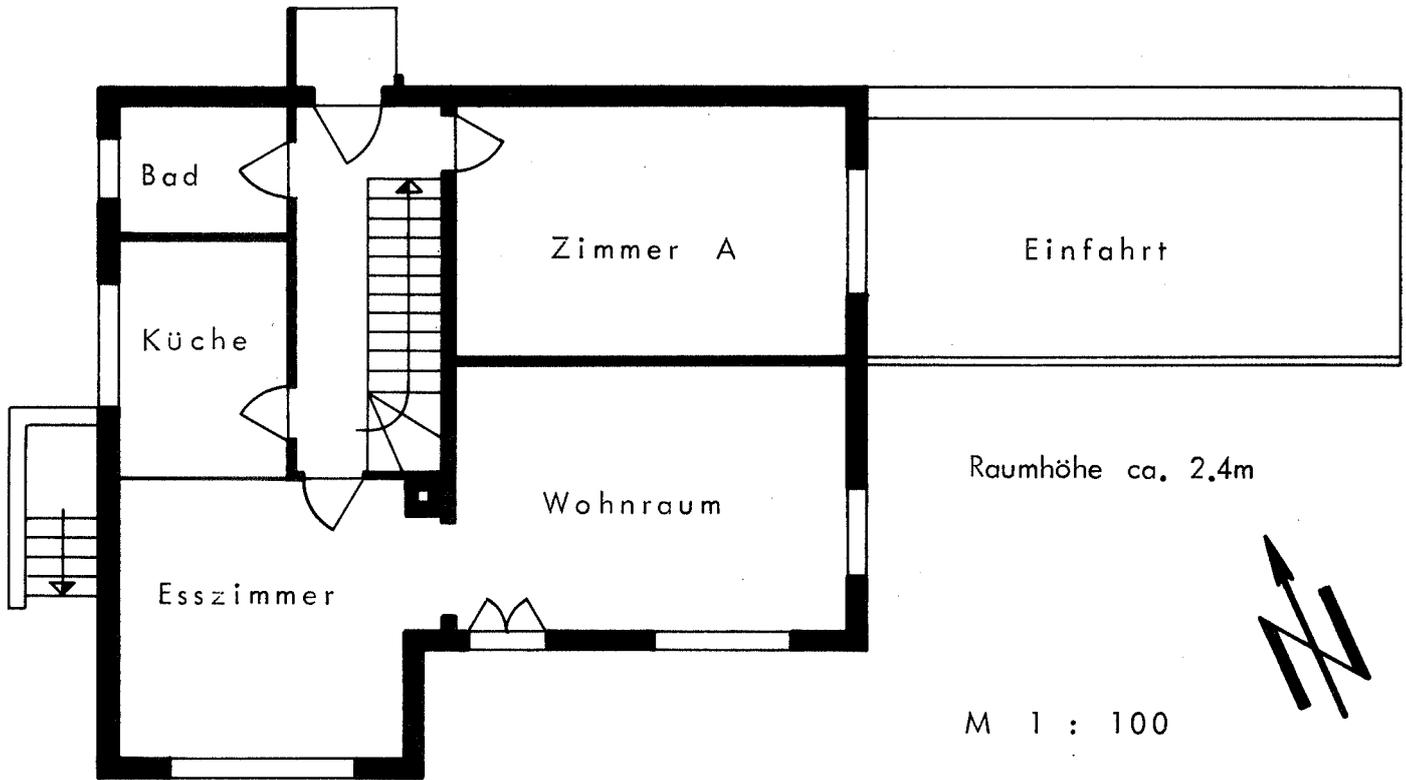


Fig. A 13 - Erdgeschoss von Messobjekt G (Einfamilienhaus)

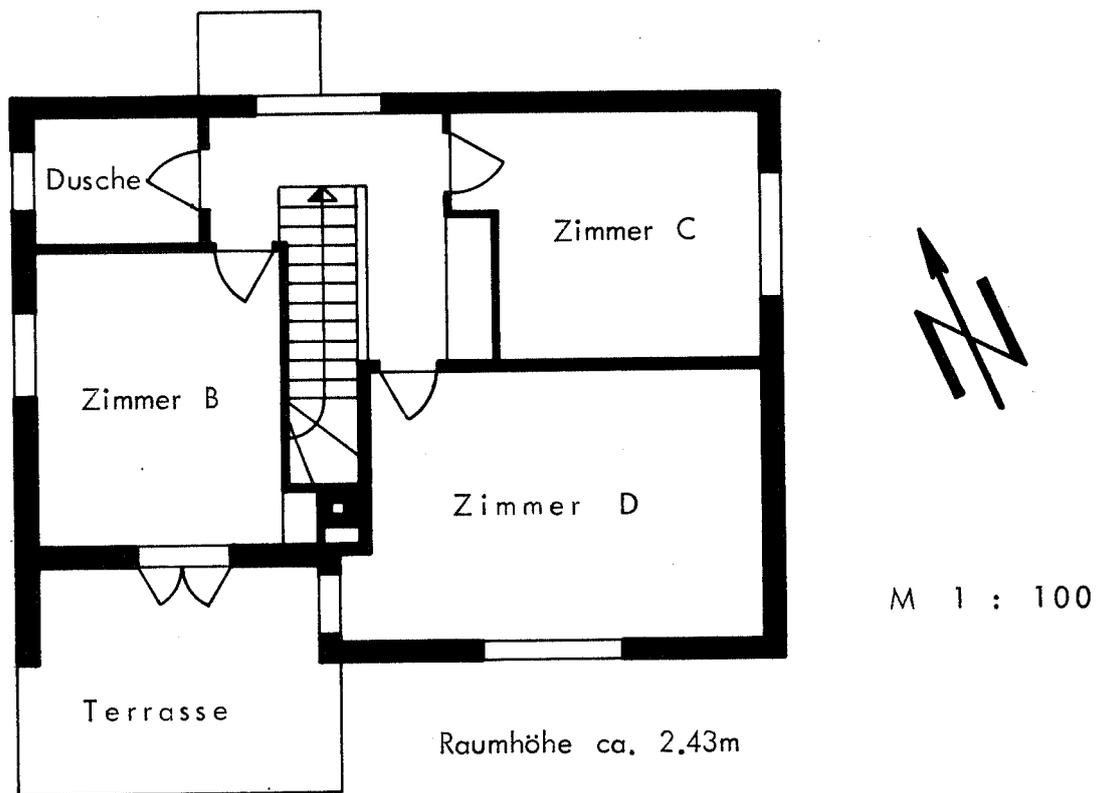


Fig. A 14 - Obergeschoss von Messobjekt G (Einfamilienhaus)

Terrassentüre: Unten im Falz eine Schaumgummidichtung.

Fläche 2,04 m²
Fugenlänge 8,10 m

Balkontüre: Fläche 2,04 m²
(Zimmer B) Fugenlänge 8,10 m

Zwischen Esszimmer und Küche besteht eine Durchreiche mit einer Holztüre

Fläche 0,31 m²
Fugenlänge 2,29 m

Fenster:

Holzfenster mit Doppelverglasung

Wohnraum dreiteiliges Fenster, jeder Flügel ein Drehflügel; Bei beiden äusseren Drehflügeln im Falz unten und an der Verschluss-Seite je eine Schaumgummidichtung

Fläche 2,20 m²
Fugenlänge 8,47 m

Blumenfenster (in NE-Fassade)

Fläche 1,31 m²
Fugenlänge 4,65 m

Esszimmer: dreiteiliges Fenster; Mittelteil mit Festverschraubung, beidseitig je ein Drehflügel. Beim linken Drehflügel (von innen) im unteren Falz eine Schaumgummidichtung, beim rechten Drehflügel unten und auf der Verschluss-Seite eine Schaumgummidichtung.

Fläche 2,96 m²
Fugenlänge 9,74 m

Zimmer B: zweiflügliges Drehflügelfenster

Fläche 0,76 m²
Fugenlänge 4,28 m

Läden:

Fenster, Terrassen- und Balkontüre haben Klappläden; Ausnahme: Fenster im Esszimmer besitzt aussenliegende Sonnenstoren.

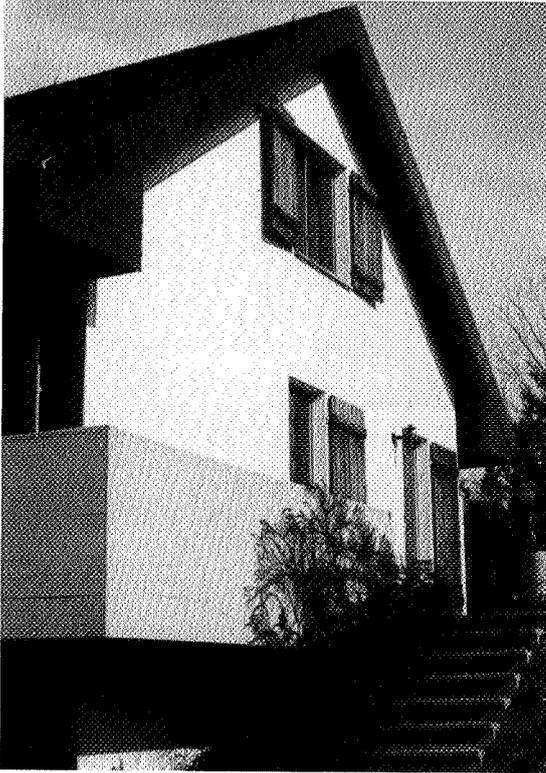


Bild A 13
(Foto EMPA-Nr. 74658/33)
Ansicht der SE-
Fassade Messobjekt H

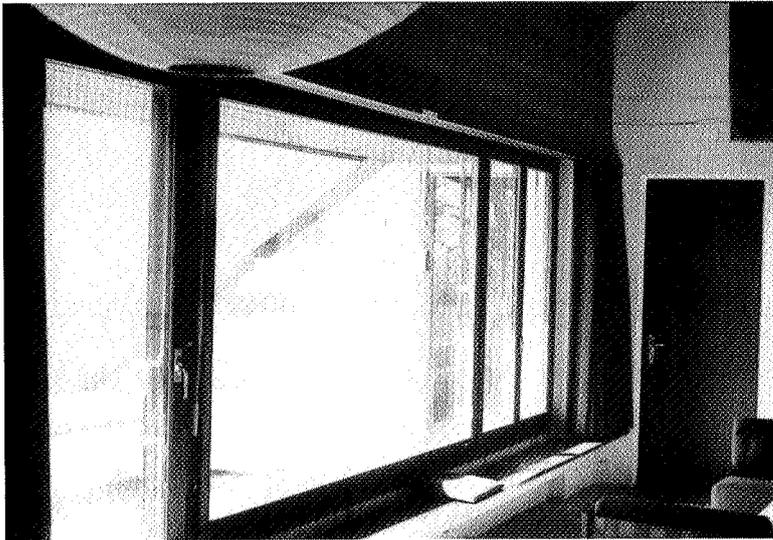


Bild A 14 (Foto EMPA-Nr. 74658/18)
Innenaufnahme: Fensterfront des Wohnraumes
in Messobjekt H

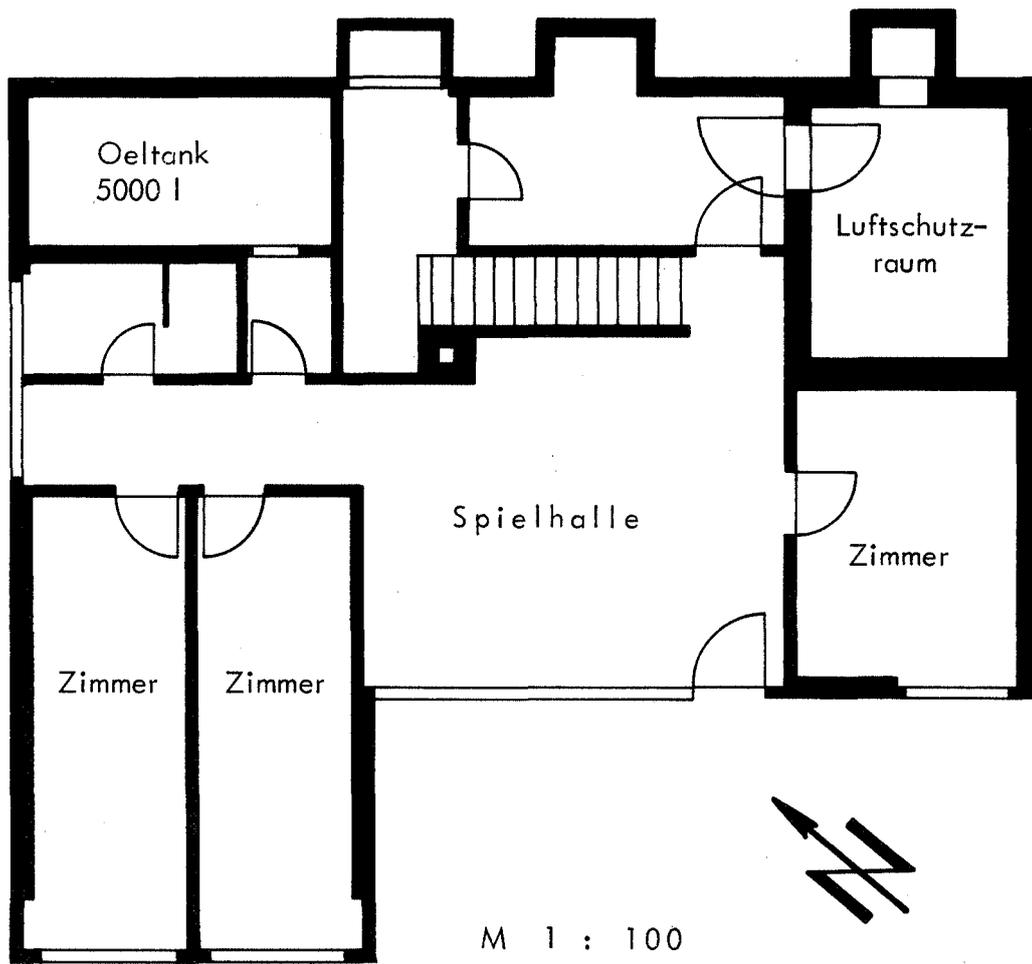


Fig. A 17 - Grundriss des Kellergeschosses, Messobjekt H

Boden im Wohnbereich mit Klinkerplatten belegt. Der Spielraum besitzt einen Inlaid-Boden.

Wände im Wohnraum weiss gestrichen (ohne Verputz).

Wände im Vorraum und im Kellergeschoss mit weissem Verputz versehen.

Decke im Wohnbereich mit Holztäfer verkleidet.

Türen:

Haustüre aus Massiv-Holz

Fläche	1,81 m ²
Fugenlänge	5,85 m

Innenliegende Zimmertüren mit glatten Türblättern, grosse Schlüssellöcher

Elternzimmer

Küchentüre

2 Zimmertüren in Obergeschoss

3 Zimmertüren in Untergeschoss

Kühlraumtüre

}	je Türe:	
	Fläche	1,58 m ²
	Fugenlänge	5,68 m

WC-Türe (Erdgeschoss)

Bad-Türe (Erdgeschoss)

WC-Türe (Untergeschoss)

Abstellraum(Untergeschoss)

}	je Türe:	
	Fläche	1,28 m ²
	Fugenlänge	5,32 m

Die Türen zu den Zimmern (ausgenommen Kühlraumtüre und Abstellraumtüre) weisen unten Spaltbreiten von 8 - 18 mm auf !

Balkontüren aus Holz, mit Doppelverglasung

Wohnraum: Balkontüre in SW-Fassade mit einer Messingdichtung im Falz

Fläche	1,76 m ²
Fugenlänge	5,76 m

Balkontüre in SE-Fassade mit Schaumgummistreifen im Falz

Fläche	1,57 m ²
Fugenlänge	5,58 m

In NW-Fassade: Kippflügel Fenster

Fläche 0,64 m²

Fugenlänge 3,39 m

Festverglasung:

Neben Eingangstüre zweiteilige Festverglasung

Fläche total 0,48 m²

Läden:

In NW- und SE-Wand: Fenster und Balkontüre mit Klappläden.

In SW-Fassade: Rolläden mit aussenliegenden Rolladenkasten;
Ausnahme: Zimmer im Kellergeschoss mit innenliegenden Rolladenkasten.

Im Vorraum besteht eine Oeffnung zwischen Wohngeschoss und Kellergeschoss von 26 x 37,5 cm für Wäscheabwurf. Dieser Schacht besitzt keine eigentliche Abdichtung.

Im Wohnraum steht ein Cheminée.

In einem Küchenfenster ist ein Ventilator montiert.

Heizung:

Die Räume werden mit Radiatoren beheizt.

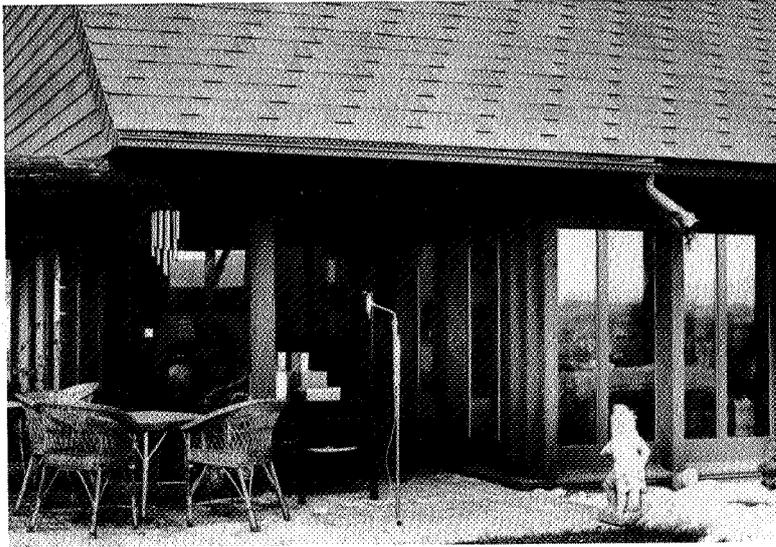


Bild A 17 (Foto EMPA-Nr. 74727/26)

Teilansicht SW-Ecke Einfamilienhaus Messobjekt I



Bild A 18

(Foto EMPA-Nr. 74727/3)

Innenaufnahme: NE-Ecke
des Wohnraumes, Messobjekt I

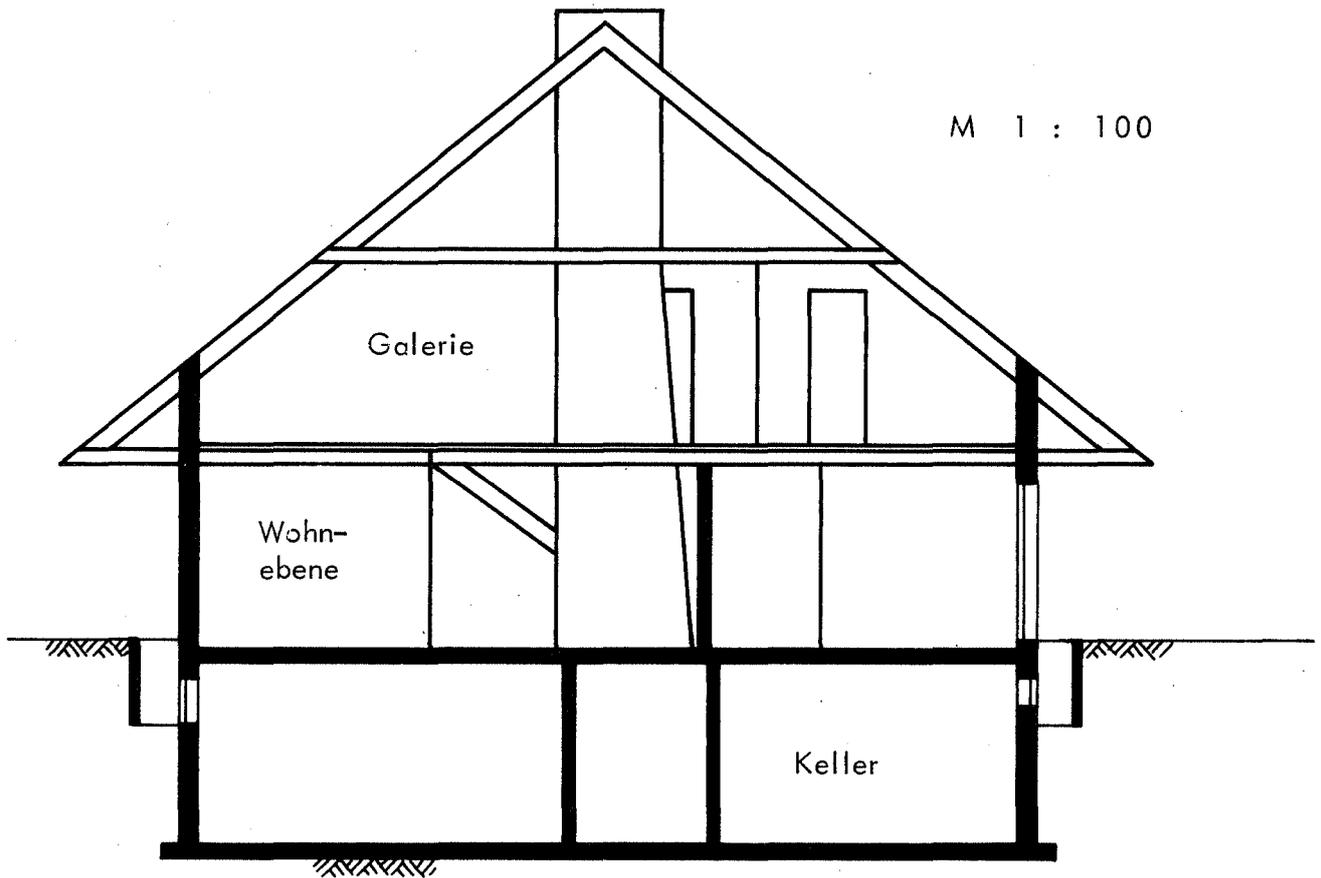


Fig. A 21 - Stockwerkplan Einfamilienhaus (Messobjekt I)
mit Schnitt durch Wohnraum

Kurzer Baubeschrieb: (Wohnbereich)

Allgemeine Ausführung:

Holz-Leichtbauweise

Zwischen Kellergeschoss und Erdgeschoss offene Treppenverbindung.

Der "Wohnbereich" wird gebildet durch Halle, Küche, Essteil und Wohnteil im Erdgeschoss und Galerie im Obergeschoss. Dieser Raum wird durch die schräge Dachfläche nach oben abgeschlossen. Die maximale Raumhöhe beträgt 7,5 m, das Volumen etwa 450 m^3 . Die Holzbalken im Wohnraum sind durch die Wände hindurchgeführt.

Bodenbelag im Wohnbereich mit Tonplatten

Innere Wandoberflächen mit rauhem Verputz.

Messobjekt K (Einfamilien-Reihenhaus)

Vierstöckiges Haus in geschützter Lage an leicht geneigtem Nordhang; bewohnt.

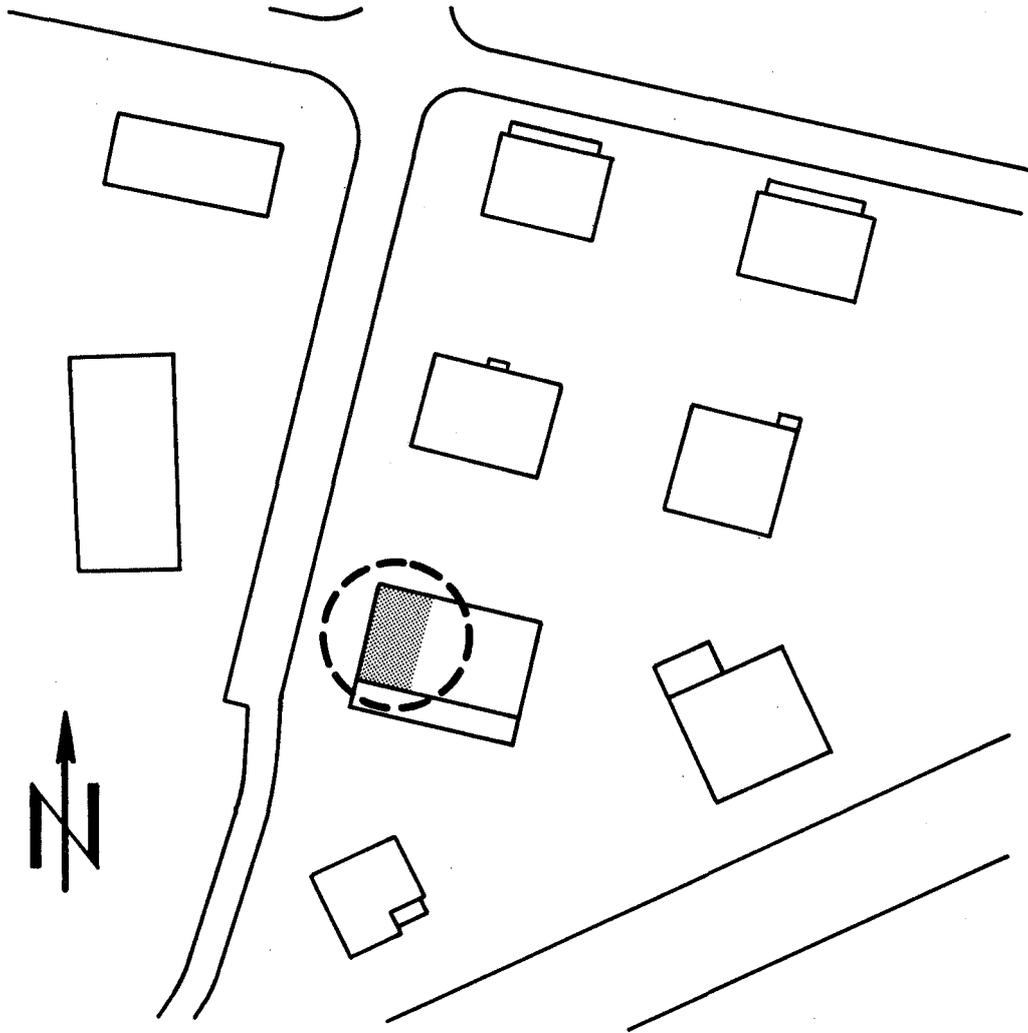


Fig. A 22 - Situationsplan Messobjekt K

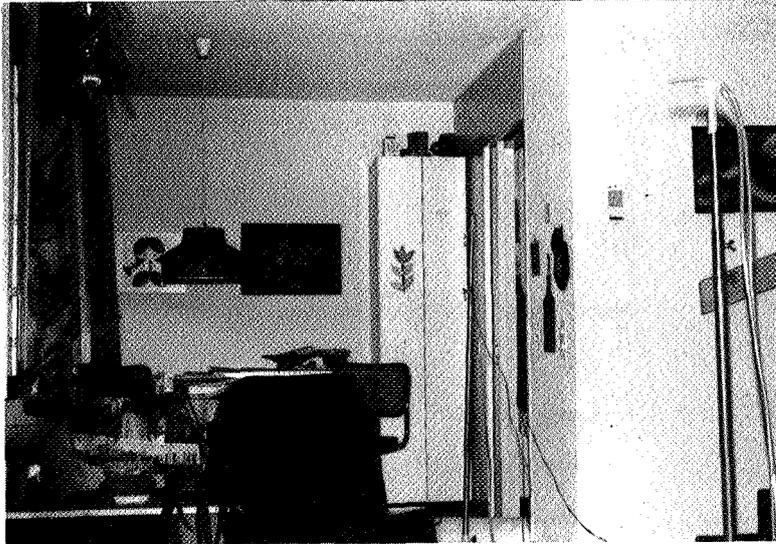


Bild A 22 (Foto EMPA-Nr. 74546/14)

Essecke in Wohnraum des Hauses K; die rechts-
stehende Türe führt zur Küche

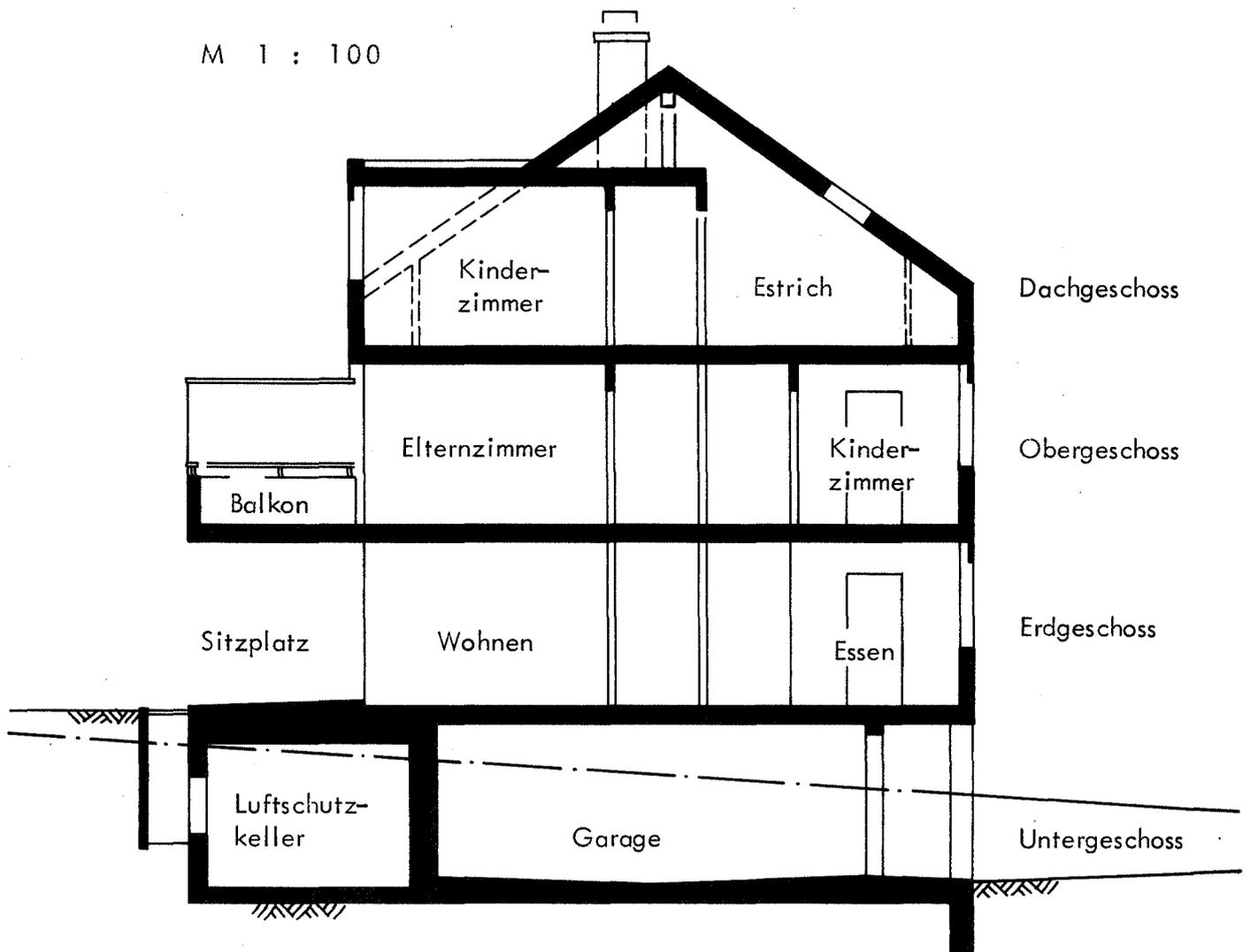


Fig. A 23 - Stockwerkplan Gebäude K, Schnitt durch Wohnraum

Türen:

Eingangstüre aus massivem Holz mit Weichgummidichtung, seitlich und oben im Blendrahmen mit Alu-Schiene geschützt; unten Weichgummidichtung in Alu-Schiene an der Türe (Türe stark verzogen, daher örtliche Spaltöffnungen von einigen mm).

Fläche	2,11 m ²
Fugenlänge	6,21 m

Terrassentüre aus Holz mit Isolierverglasung

Fläche	1,62 m ²
Fugenlänge	5,83 m

Küchentüre; Schiebetüre mit heller PVC-Folienbeschichtung mit grossem Führungsspiel

Fläche	1,58 m ²
Fugenlänge	5,56 m
Spaltbreiten unten und oben	5 - 6 mm

Innenliegende Türen mit heller PVC-Folienbeschichtung, mit grossen Schlüssellöchern

Elternzimmer: Fläche	1,56 m ²
Fugenlänge	5,55 m
Spaltbreite unten ca.	10 mm

2 Kinderzimmer:	Fläche	1,66 m ²	} je Türe
	Fugenlänge	5,65 m	
	Spaltbreite unten ca.	10 mm	

Bad und WC:	Fläche	1,26 m ²	} je Türe
	Fugenlänge	5,25 m	
	Spaltbreite unten ca.	10 mm	

Abstellraum:	Fläche	1,66 m ²
	Fugenlänge	5,65 m
	unten mit Rohrgummidichtung	

Keller:	Fläche	1,44 m ²
	Fugenlänge	5,29 m

Spezialbauten (Büroräume)

Bei den Spezialbauten handelt es sich um einen eingeschossigen Versuchspavillon mit einem Vor- und zwei Büroräumen sowie um ein mehrgeschosses Gebäude mit Büro- und Geschäftsräumen.

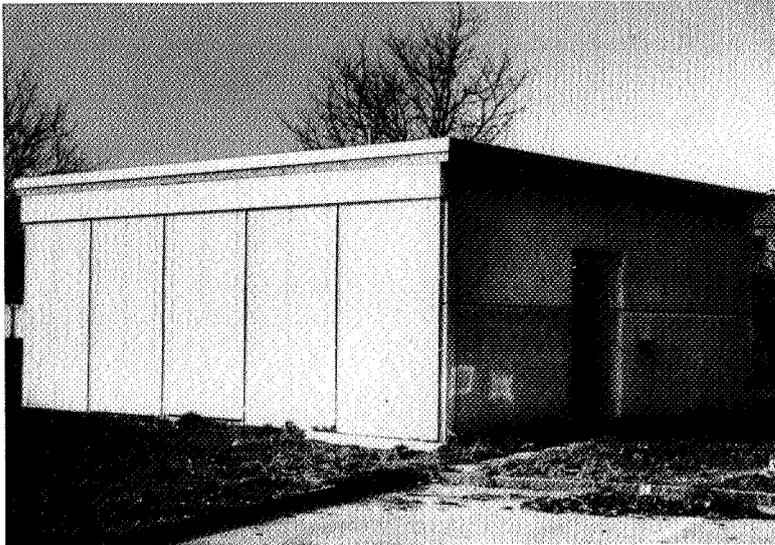
Messobjekt L (Versuchspavillon)

Bild A 23

N- und W-Fassade des Versuchspavillons (Messobjekt L)
Die Westfassade wird durch Lamellenstoren von Sonnenstrahlung geschützt (hat soweit keinen Einfluss auf Lüftungsverluste)

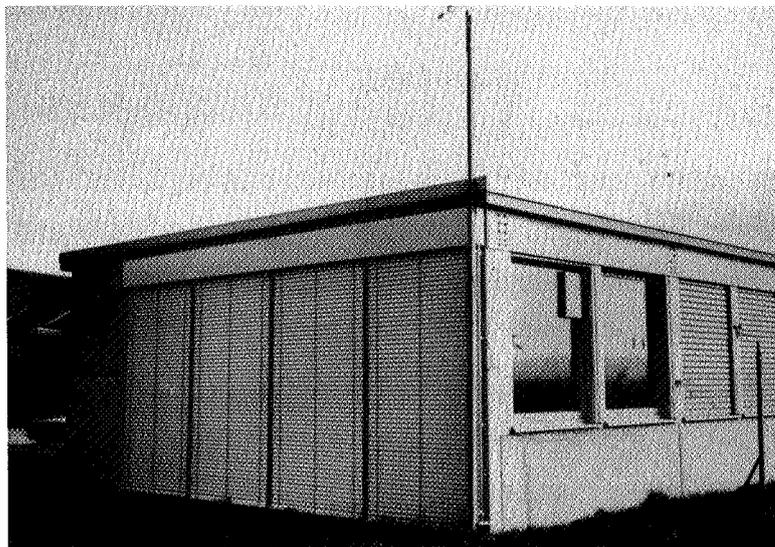


Bild A 24

S- und E-Fassade des Messobjektes L. Die Ostfassade ist analog der Westfassade ausgebildet.

Innenliegende Türen aus Holz mit Holzrahmen. Seitlich und oben im Falz der Rahmen ist ein Kompriband aufgeklebt. Unten am Türblatt je ein Rohrgummiprofil; auf dem Boden ein gewölbtes Eisenband aufgeschraubt; trotzdem unten eine Spaltbreite von 1 - 3 mm.

Fläche	1,76 m ²	} je Türe
Fugenlänge	5,76 m	

Fenster:

Holzfenster mit Isolierverglasung

Pro Raum 2 festverschraubte Drehflügelfenster (total 4 Fenster)

Fläche	2,45 m ²	} je Fenster
Fugenlänge	6,27 m	

Läden:

Rolläden mit innenliegenden Rolladenkasten, die auf ganze Raumbreite durchgezogen sind.

Der Boden besteht aus Parkettriemen.

Wände und Decken sind mit weisser Farbe gestrichen.

Türe:

Raumeingangstüre aus Holz

Fläche	1,59 m ²
Fugenlänge	5,58 m
Spaltbreite unten ca.	7 mm

Fenster:

Holzfenster mit drei Drehflügeln

Fläche	3,09 m ²
Fugenlänge	10,09 m

Rolladenkasten mit Fugenlänge	4,56 m
-------------------------------	--------