

Strömungsmechanische Untersuchungen an einem belüfteten Steildach, Teil I

Dr.-Ing. Klaus W. LIERSCH

Steilgeneigte Dächer in belüfteter Bauweise sind die bevorzugte Bedachungsart im Ein- und Zweifamilienwohnbau. Über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Luftaustausches zwischen Belüftungszonen und Außenluft stehen bislang kaum wissenschaftlich fundierte Aussagen zur Verfügung. In seinem Beitrag berichtet der Autor über strömungsmechanische und thermische Untersuchungen an einem 48° Satteldach. Nach Gegenüberstellung theoretischer Grundlagen mit den Meßergebnissen werden Hinweise für die Bemessung des Belüftungsquerschnitts sowie der Zu- und Abluftöffnungen gegeben.

1. Vorbemerkungen

Bei der Beratung zur Neufassung der DIN 4108 - Wärmeschutz im Hochbau - und insbesondere beim darin enthaltenen Abschnitt über den klimabedingten Feuchteschutz wurde das Fehlen ausreichender Bemessungshilfen für die Konstruktion belüfteter, steil geneigter Dachflächen offenkundig. Die bislang zur Verfügung stehenden Arbeiten über die Bauphysik belüfteter Dachkonstruktionen beziehen sich entweder ausschließlich auf Flachdächer [1] oder sind nur mit Einschränkungen auf steile Dächer anwendbar, wie z.B. Arbeiten des Verfassers über Asbestzement-Wellplattendächer [2]. Es war deshalb notwendig, an einem in Geometrie und Konstruktion charakteristischen Dach umfassende Untersuchungen vorzunehmen, um die noch offenen Fragen, beispielsweise nach der erforderlichen Querschnittsbemessung der Zu- und Abluftöffnungen, beantworten zu können.

Die für die Untersuchungen erforderlichen Messungen wurden im Sommer 1978 und im Winter 1978/79 am Wohnhaus des Verfassers durchgeführt (Bild 1). Die meßtechnischen Arbeiten übernahm das Ingenieurbüro *Giese-Strömungstechnik GmbH, Berlin*.



Bild 1. Untersuchungsobjekt; Wohnhaus in Berlin-Mariendorf.

Die Untersuchungen erfolgten unter finanzieller Beteiligung nachfolgender Verbände und Unternehmen:

- Wirtschaftsverband Asbestzement e.V., Berlin
- Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Bonn
- Braas & Co. GmbH, Frankfurt/M.
- Grünzweig + Hartmann und Glasfaser AG, Ludwigshafen

Da die Messungen jetzt abgeschlossen sind und ein beträchtlicher Teil der Datenaufbereitung durchgeführt wurde, soll hiermit noch vor Abschluß des eigentlichen Untersuchungsberichtes eine erste kritische Berichterstattung vorgenommen werden.

2. Untersuchungsprogramm

Für die bauphysikalische Beurteilung der belüfteten Dachkonstruktion sind die thermischen Vorgänge und die strömungsmechanischen Zustände, insbesondere die Luftaustauscherraten zwischen Belüftungsraum und Außenluft, von besonderer Bedeutung. Deshalb wurden diese Parameter in das meßtechnische Programm einbezogen. Feuchtigkeitsstechnische Untersuchungen wurden nicht vorgenommen, da mit den thermischen Daten und bei Kenntnis der Strömungsmechanik das hygrische Verhalten des Daches unter Zugrundelegung des tatsächlichen Umgebungsklimas oder fiktiver Randbedingungen beurteilt werden kann.

Für die spätere Auswertung wurden folgende Daten mehrmals stündlich gemessen und auf Magnetband gespeichert:

- Datum und Uhrzeit
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- Außenlufttemperatur
- Dachoberflächentemperatur
- Temperaturen an den Begrenzungsflächen des Belüftungshohlraums
- Lufttemperatur im Belüftungshohlraum
- Temperatur an der Grenzfläche zum Innenraum
- Raumlufttemperatur
- Mittlere Geschwindigkeit des Belüftungsstroms
- Richtung des Belüftungsstroms

Die Lage der Meßstellen wird in Abschn. 4. genauer beschrieben.

Zum Untersuchungsprogramm gehören auch die angezielten Ergebnisse, zumindest in ihrer qualitativen Aussage in Bezug auf bestimmte Fragestellungen. Besonders folgende Fragen waren von Interesse:

- Temperaturen im Belüftungsraum in Abhängigkeit von der Belüftungsstromgeschwindigkeit
- Temperatur im Belüftungsraum in Abhängigkeit von Raumlufttemperatur, Außenlufttemperatur, Dachoberflächentemperatur
- Erwärmungsvorgang im Belüftungsraum
- Einfluß der Temperaturdifferenzen im Dachbereich auf die Belüftungsstromgeschwindigkeit
- Einfluß von Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf die Belüftungsstromgeschwindigkeit

Anhand dieser Ergebnisse sollte es möglich sein, allgemeine Aussagen über die konstruktive Durchbildung steil geneigter Dächer zu treffen und die bislang vorhandenen theoretischen Grundlagen einer kritischen Überprüfung zu unterziehen.

3. Dachaufbau

Bei der Dachkonstruktion handelt es sich um ein symmetrisches Kehlbalkendach mit 48° Dachneigung. Die Dachform ist mithin ein Satteldach. Entsprechend dem ingenieurmäßigen Charakter der Dachkonstruktion (es handelt sich um ein OKAL-Fertighaus Typ 117-413) sind die Sparren als I-Träger in Leimbauweise und die Kehlbalken zweiteilig ausgebildet. Konstruktive Einzelheiten sind in Bild 2 und 3 enthalten. Die Dacheindeckung besteht aus Asbestzement-Dachplatten 30/30 cm mit Bogenschnitt in brauner Farbe. Die Dacheindeckung ist als sogenannte 'Deutsche Deckung' mit Gebindesteigung ausgeführt. Die Unterkonstruktion ist dementsprechend Vollschalung mit Nut und Feder in 26 mm Dicke. Unterhalb der Schalung liegt in 4 cm Abstand eine Asbestzementzelluloseplatte von 5,5 mm Dicke als Unterdach. Der Abstand zwischen Unterdachplatte und Schalung wurde durch auf den Sparren aufgenagelten Dachlatten 4/6 cm erzielt. Der somit erzielte Zwischenraum stellt den eigentlichen Blüftungsraum dar, der an der Traufe

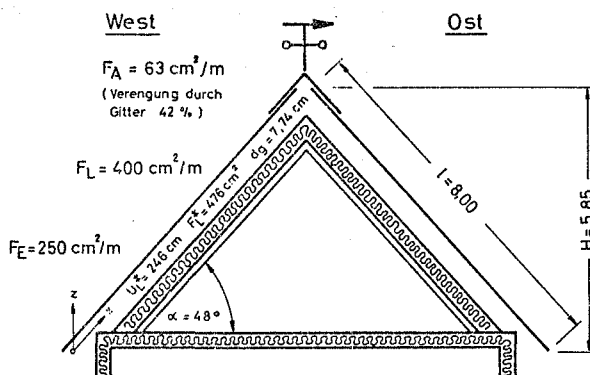
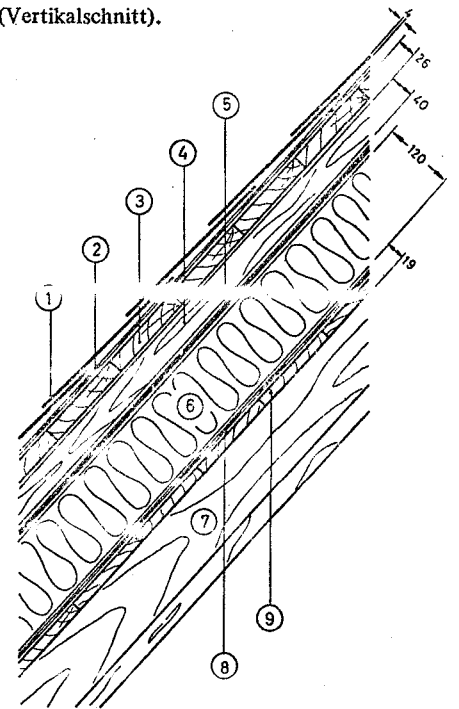


Bild 2. Querschnitt des untersuchten Daches; Hauptabmessungen und strömungstechnische Parameter.

Bild 3. Dachaufbau (Vertikalschnitt).



und am First mit der Außenluft in Verbindung steht (Bild 4 und 5). Direkt unterhalb der Unterdachplatte sind zwischen den Sparren 120 mm dicke Dämmmatten mit raumseitiger Alu-Kaschierung angeordnet. Den Innenraumabschluß bildet eine 19 mm Faserbrett-Schalung. Bei diesem Dachaufbau ist bewußt auf den sonst üblichen Zwischenraum zwischen Wärmedämmung und Unterdach verzichtet worden, um nur einen definierten Belüftungsraum untersuchen zu müssen, und auch, um die Möglichkeit zu nutzen, die Sparren sichtbar zu lassen. Die wärme- und feuchtigkeitstechnischen Daten des Dachaufbaus sind in Tab. 1 zusammengefaßt.

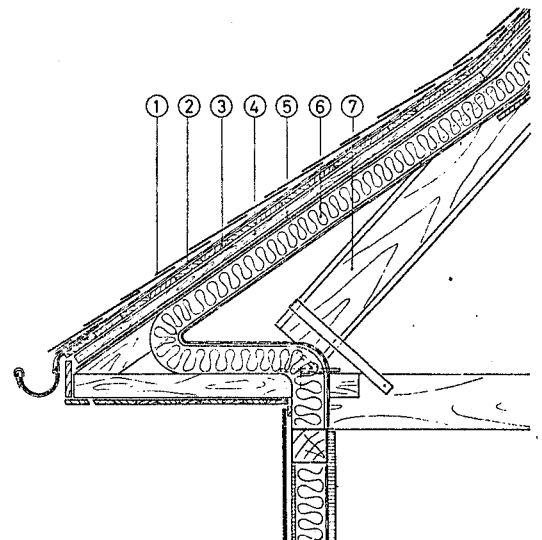


Bild 4. Traufausbildung. Es bedeuten
 1 Dachplatten 30/30 cm braun Deutsche Deckung
 2 Vordeckung (Glasvliesbahn)
 3 Stülpschalung 26 mm
 4 Belüftungsraum 40 mm
 5 Unterdachplatte 5,5 mm (Asbestzementzelluloseplatte)
 6 Mineralfaserdämmung 120 mm mit Alu-Kaschierung
 7 Sparren (I-Leimträger)

Tabelle 1. Wärme- und feuchtigkeitstechnische Daten des Dachaufbaus.

Bauteil	Schicht	d	λ	$\frac{d}{\lambda}$	μ	$r = \mu \cdot d$
		m	W/mK	$m^2 K/W$	–	m
Dachaußenschale	Asbestzement-Dachplatten	0,004	0,5	0,008	50	0,200
	Vordeckung Glasvliesbahn	0,001	0,17	0,006	3000	3,000
	Schalung	0,026	0,14	0,186	40	1,04
				$\frac{1}{\Lambda_a} =$	0,200	$r_a =$	4,240
Dachinnenschale	Unterdachplatte	0,0055	0,26	0,021	15	0,083
	Mineralfaserdämmung	0,120	0,04	3,000	1	0,120
	Alufolie	–	170	–	–	ca. 100
	Schalung	0,019	0,14	0,136	40	0,76
				$\frac{1}{\Lambda_i} =$	3,157	$r_i =$	ca. 100

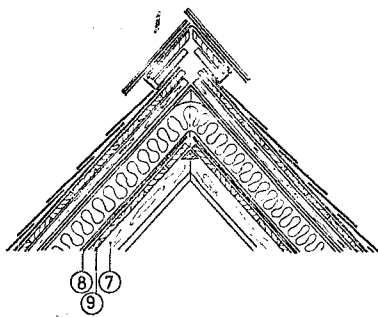


Bild 5. Firstausbildung.
7 Sparren
8 Dampfsperre (Alu-Folie)
9 Stülpchalung 19 mm

Bei der Auswertung muß berücksichtigt werden, daß der gesamte Dachaufbau nur bei den winterlichen Temperaturverhältnissen meßtechnisch untersucht wurde. Während der sommerlichen Untersuchungen waren Wärmedämmung und Innenschalung noch nicht vorhanden.

4. Meßmethode, Versuchsanordnung und Datenerfassung

Die Messungen wurden auf jeder der beiden Dachflächen in einem mittleren Streifen durchgeführt, der für die Ge-

samtfläche als repräsentativ angesehen wurde. Die Lage der Temperaturmeßpunkte im Dachquerschnitt ist Bild 6 zu entnehmen. Hieraus ist ersichtlich, daß für jede Dachseite einmal etwa in der Mitte der Entfernung Traufe – First thermisch der gesamte Dachquerschnitt erfaßt wird. Darüber hinaus sind Temperaturfühler im Bereich der Traufe und des Firstes angeordnet. Wegen der recht genauen Ausrichtung der Gebäudeachse in Nord-Süd-Richtung ist die Abhängigkeit der Temperaturzustände der jeweiligen Dachflächen vom Sonnenstand durchaus eindeutig.

Für die Erfassung der Temperaturen wurden Thermoelemente verwendet, die über einen Meßstellenumschalter nacheinander auf einen Verstärker geschaltet wurden.

Abweichend von bisher üblichen Verfahren, bei denen Luftgeschwindigkeiten mit einer Strömungssonde, beispielsweise mit einem Hitzdrahtanemometer oder mit Thermistorperlen, gemessen wurden, wurde bei den hier beschriebenen Messungen direkt der Luftaustausch erfaßt. Dabei wurde in der Mitte zwischen Traufe und First des untersuchten Dachbereichs ständig eine genau dosierte geringe Menge eines

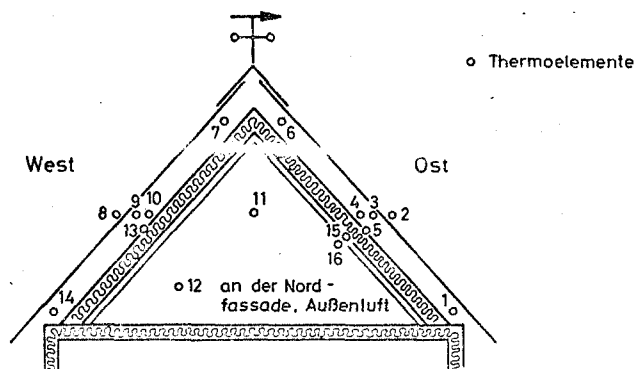


Bild 6. Lage der Temperaturmeßstellen in der winterlichen Meßperiode; im Sommer befand sich noch keine Wärmedämmung im Dachaufbau; Meßstellen 15 und 16 nur Winter.

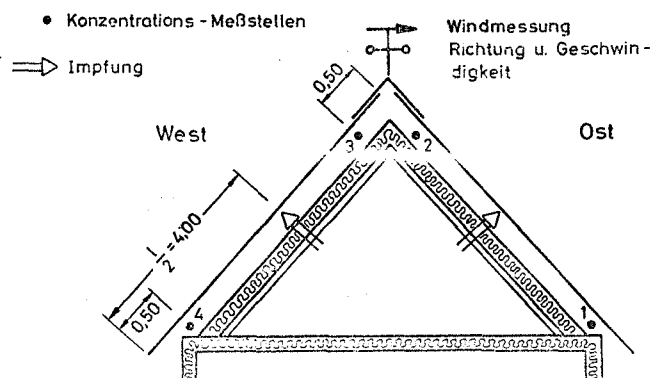


Bild 7. Lage der Indikatorgasimpfung und Meßstellen der Gaskonzentration im Belüftungsraum.

leicht nachweisbaren Indikatorgases (Stickoxydul) durch eine Reihe feiner Düsen eingeblasen (Bild 7). Je nach Richtung der Luftströmung wird das Gas entweder zum First oder zur Traufe transportiert, wobei es sich mit der Luft vermischt. In der Nähe der Traufe und des Firstes wird aus dem Belüftungshohlraum eine geringfügige Luftmenge abgesaugt und hinsichtlich des Gehalts an Indikatorgas analysiert. Damit ist es sofort möglich, die Strömungsrichtung festzustellen.

Aus der Konzentration läßt sich direkt die Größe des Volumenstroms berechnen, wobei niedrige Konzentrationen einem großen Volumenstrom entsprechen und umgekehrt. Bei eindeutiger Festlegung der Strömungsrichtung ergibt sich der Volumenstrom und damit auch die mittlere Belüftungsstromgeschwindigkeit aus folgenden Beziehungen:

Die Indikatorgas-Konzentration p in ppm an der Entnahmestelle ergibt sich aus

$$p = \frac{Q_i}{Q_1} 10^6, \quad (1)$$

wobei Q_i die Impfmenge in m^3/s und Q_1 der Volumendurchsatz in m^3/s bedeuten. Mit der mittleren Luftstromgeschwindigkeit v_1 in m/s und dem Luftstromquerschnitt F_1^* in m^2 ergibt sich

$$Q_1 = v_1 \cdot F_1^*. \quad (2)$$

Aus (1) und (2) folgt

$$p = \frac{Q_i}{v_1 F_1^*} 10^6 \quad (3)$$

bzw.

$$v_1 = \frac{Q_i}{p F_1^*} 10^6. \quad (4)$$

Umgestellt in gebräuchlichere Einheiten für Q_i in ml/h und F_1^* in cm^2 ergibt sich (4) zu

$$v_1 = 2,778 \frac{Q_i}{p F_1^*}. \quad (5)$$

Aus Gl. (5) ist erkennbar, daß die mittlere Belüftungsstromgeschwindigkeit v_1 linear von $1/p$ mit Q_i als Parameter abhängt (Bild 8). Deshalb ist bei der späteren Auswertung die jeweilige untersuchte Variable dem zugehörigen Wert von $1/p$ gegenübergestellt. Aus den Darstellungen läßt sich dann der Einfluß auf die Belüftungsstromgeschwindigkeit sofort ablesen.

Die Konzentrationsmessung selbst wird nach dem Infrarotabsorptionsverfahren durchgeführt. Es beruht auf der mit steigender Konzentration zunehmenden Absorption der Infrarotstrahlung in bestimmten, für das Indikatorgas spezifischen Frequenzbereichen. Das Analysegerät liefert ein elektrisches Signal als Maß für die Konzentration. Die vier Entnahmestellen (oben und unten auf beiden Dachseiten) wurden über Magnetventile nacheinander auf das Analysegerät geschaltet.

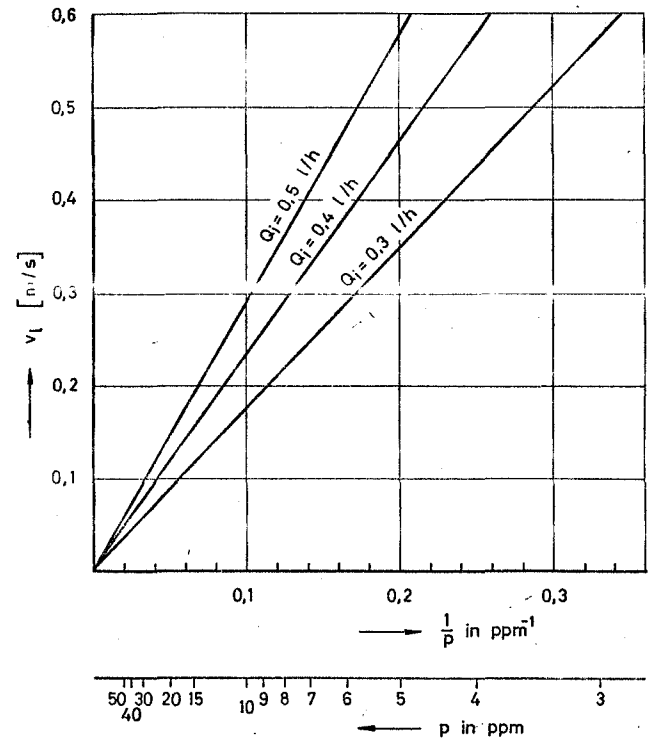


Bild 8. Ermittlung der mittleren Belüftungsstromgeschwindigkeit v_1 von der Gaskonzentration p in Abhängigkeit der Indikatorgasimpfmenge Q_i .

Windstärke und Windrichtung wurden mit einem Schalenkreuzanemometer und einer Richtungsfahne gemessen, die die Meßwerte ebenfalls in Form elektrischer Signale zur Verfügung stellten. Die Meßgenauigkeit der Anlage zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit lag, wie bei derartigen Einrichtungen durchaus üblich, bei etwa $0,8 m/s$. Hieraus resultiert allerdings die Problematik, daß unterhalb dieses Wertes die Windgeschwindigkeit nicht mehr erfassbar ist. Deshalb mußten für die Datenselektierungen für den Fall „Windstille“ die Datengruppen mit $v_w \leq 1 m/s$ einbezogen werden. Die sich daraus ergebenden Streuungen aus der an und für sich unerwünschten Windwirkung sind durch statistische Methoden herausgefiltert worden.

Zur Steuerung der gesamten Meßanlage sowie zur Umrechnung der elektrischen Impulse auf physikalische Meßgrößen sowie zur Speicherung dieser Werte auf Magnetband wurde der elektronische Rechner HP 9825 A benutzt. Bei der Erfassung der Daten wurden bereits Bündelungen vorgenommen. So wurden alle Temperaturen als 10 min-Mittelwerte erfaßt. Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden in ihre Nord-Süd- und Ost-West-Anteile vektoriell zerlegt und ebenfalls als 10 min-Mittelwerte gespeichert. Darüber hinaus wurden jedoch die Quadrate der Einzelwerte zusätzlich gespeichert, um späterhin ein Maß für die Turbulenzintensität erhalten zu können. Entsprechend der Meßdauer wurden im Sommer 3624 und im Winter 6144 Datengruppen gespeichert.

5. Aufbereitung der Meßdaten

Nach Beendigung der Messungen wurden die Daten zunächst in Klarschrift sowie teilweise in Diagrammform für

Tabelle 2. Statistische Auswertung der Meßergebnisse für Strömungsverlauf I.

SOMMER-WERTE:

VARIABLE	N	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE
N	1584				
T	1584	20.20	5.71	1.0	32.0
M	1584	5.46	0.49	5.0	6.0
S	1584	12.36	8.03	0.0	23.0
MI	1584	27.08	17.26	0.0	59.0
X	1584	0.58	0.42	0.0	2.9
Y	1584	0.66	0.46	0.0	3.2
T1	1584	15.85	6.41	0.0	31.5
T2	1584	14.14	10.08	-6.2	51.8
T3	1584	18.76	7.49	0.9	39.3
T4	1584	18.43	6.56	1.9	34.3
T5	1584	19.73	6.42	3.6	35.0
T6	1584	19.93	7.08	2.6	36.9
T7	1584	20.53	7.20	3.4	39.9
T8	1584	16.91	14.01	-6.4	62.0
T9	1584	20.04	8.80	1.1	42.9
T10	1584	19.11	7.04	2.3	36.8
T11	1584	20.54	5.81	5.5	34.0
T12	1584	14.39	4.88	5.5	27.8
T13	1584	19.88	6.90	3.3	36.9
T14	1584	16.14	6.57	0.1	32.7
T15					
T16					
K1	1584	0.58	0.41	0.0	2.0
K2	1584	18.08	8.86	2.4	50.0
K3	1584	12.63	5.65	3.4	37.5
K4	1584	0.67	0.41	0.0	2.0

WINTER-WERTE:

VARIABLE	N	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE
N	890				
T	890	15.12	8.07	2.0	28.0
M	890	9.08	4.73	1.0	12.0
S	890	11.77	7.63	0.0	23.0
MI	890	29.82	17.25	1.0	59.0
X	890	-0.53	0.91	-3.1	1.2
Y	890	0.10	0.99	-2.3	3.5
T1	890	-1.25	6.15	-15.4	10.8
T2	890	-3.08	6.51	-17.3	10.0
T3	890	0.09	5.73	-13.2	12.2
T4	890	1.02	5.60	-12.5	12.6
T5	890	1.59	5.34	-11.0	12.9
T6	890	4.32	4.95	-8.7	13.3
T7	890	5.11	5.61	-8.1	13.2
T8	890	-3.06	7.27	-19.3	11.7
T9	890	-0.12	5.80	-12.5	11.1
T10	890	0.53	5.70	-11.7	11.2
T11	890	23.18	2.07	17.6	27.8
T12	890	-2.55	6.48	-17.3	9.8
T13	890	1.04	5.50	-10.6	11.4
T14	890	-1.10	6.18	-14.7	11.2
T15	890	19.92	1.34	0.0	22.6
T16	890	21.36	1.55	0.0	24.6
K1	890	0.96	0.25	0.5	2.0
K2	890	28.93	5.74	6.4	61.2
K3	890	26.86	6.24	7.1	50.5
K4	890	1.25	0.19	0.9	2.0

Tabelle 3. Statistische Auswertung der Meßergebnisse für Strömungsverlauf III.

SOMMER-WERTE:

VARIABLE	N	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE
N	1125				
T	1125	20.05	6.86	2.0	31.0
M	1125	5.41	0.49	5.0	6.0
S	1125	10.00	5.27	0.0	23.0
MI	1125	27.69	17.47	0.0	59.0
X	1125	0.78	0.55	0.0	3.4
Y	1125	0.95	0.58	0.0	3.1
T1	1125	18.09	6.22	0.5	32.5
T2	1125	29.52	15.79	-4.5	61.6
T3	1125	23.06	8.43	2.5	39.9
T4	1125	20.00	6.42	2.4	35.0
T5	1125	20.94	6.27	4.1	35.2
T6	1125	21.36	6.77	3.4	37.6
T7	1125	20.54	6.28	4.3	38.8
T8	1125	20.91	12.10	-4.9	61.6
T9	1125	19.50	7.20	2.5	42.9
T10	1125	19.43	6.25	3.2	39.0
T11	1125	20.05	5.25	5.7	34.2
T12	1125	16.07	4.37	5.8	27.6
T13	1125	19.24	5.88	3.8	36.8
T14	1125	18.10	6.33	1.8	38.0
T15	0	.	.	.	.
T16	0	.	.	.	.
K1	1125	0.67	0.45	0.0	2.0
K2	1125	9.44	6.44	2.2	44.1
K3	1125	6.84	4.91	2.1	45.0
K4	1125	11.88	7.48	2.1	50.0

WINTER-WERTE:

VARIABLE	N	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE
N	547				
T	547	15.49	8.37	1.0	30.0
M	547	11.59	2.01	1.0	12.0
S	547	11.15	6.68	0.0	23.0
MI	547	30.00	17.05	1.0	59.0
X	517	-0.14	1.78	-3.7	4.7
Y	517	1.38	1.46	-3.0	5.1
T1	547	1.73	3.69	-9.0	13.5
T2	547	0.89	4.14	-12.2	13.6
T3	547	2.96	3.68	-7.3	15.8
T4	547	3.42	3.48	-6.4	15.2
T5	547	4.00	3.48	-5.4	15.5
T6	547	5.81	3.05	-4.1	15.1
T7	547	7.07	2.95	-5.2	13.7
T8	547	1.78	4.26	-13.1	17.5
T9	547	3.67	3.68	-10.3	13.3
T10	547	4.87	3.47	-10.1	12.9
T11	547	22.18	1.65	17.4	28.4
T12	547	0.72	3.68	-11.3	12.5
T13	547	4.74	3.50	-9.4	12.9
T14	547	3.10	4.13	-10.8	12.9
T15	547	19.54	1.64	0.0	23.8
T16	547	20.77	1.75	0.0	25.7
K1	547	1.17	0.37	0.7	2.0
K2	547	19.15	8.52	6.2	41.6
K3	547	15.75	9.65	3.9	49.4
K4	547	13.83	8.95	2.1	60.8

Tabelle 4. Statistische Auswertung der Meßergebnisse für Strömungsverlauf IV.

SOMMER-WERTE:

VARIABLE	N	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE
N	431				
T	431	20.09	6.23	2.0	31.0
M	431	5.33	0.47	5.0	6.0
S	431	13.89	5.88	0.0	23.0
MI	431	27.64	17.13	0.0	59.0
X	431	0.74	0.52	0.0	3.0
Y	431	0.74	0.54	0.0	4.2
T1	431	19.29	7.22	-2.4	32.6
T2	431	18.39	9.99	-2.7	46.6
T3	431	21.13	8.08	1.5	36.3
T4	431	20.78	7.50	2.6	34.3
T5	431	21.46	7.29	3.7	34.5
T6	431	22.28	8.29	2.9	37.0
T7	431	22.65	8.78	2.7	39.8
T8	431	26.77	17.28	-4.5	58.6
T9	431	24.38	11.13	1.0	42.9
T10	431	21.66	8.81	1.7	37.9
T11	431	21.84	6.96	5.1	34.1
T12	431	16.39	5.41	5.3	27.0
T13	431	22.30	8.53	3.0	37.1
T14	431	18.78	8.14	0.5	34.2
T15	0	.	.	.	.
T16	0	.	.	.	.
K1	431	9.91	8.66	2.1	50.0
K2	431	10.09	8.25	2.4	50.0
K3	431	8.22	4.36	2.6	34.6
K4	431	0.73	0.48	0.0	2.0

WINTER-WERTE:

VARIABLE	N	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE
N	2011				
T	2011	18.27	8.78	1.0	30.0
M	2011	9.50	4.11	1.0	12.0
S	2011	12.04	6.93	0.0	23.0
MI	2011	29.69	17.31	0.0	59.0
X	1901	-0.30	1.72	-4.2	4.4
Y	1901	-1.33	1.75	-4.7	4.4
T1	2011	5.17	5.47	-9.9	15.0
T2	2011	3.30	6.18	-12.5	20.2
T3	2011	5.64	5.04	-9.4	16.3
T4	2011	6.66	4.67	-8.1	15.3
T5	2011	6.81	4.58	-7.6	15.5
T6	2011	7.50	4.30	-5.1	19.6
T7	2011	7.30	5.34	-6.2	19.8
T8	2011	5.11	5.00	-14.4	17.7
T9	2011	4.46	5.81	-9.8	15.1
T10	2011	4.83	5.66	-8.3	14.4
T11	2011	21.31	2.67	13.2	28.7
T12	2011	3.39	6.08	-12.0	14.3
T13	2011	5.23	5.47	-8.2	14.7
T14	2011	4.02	5.98	-11.0	14.4
T15	1985	18.71	4.75	0.0	24.9
T16	1985	19.65	5.04	0.0	26.1
K1	2011	16.54	9.46	2.1	67.7
K2	2011	17.32	9.11	3.5	66.6
K3	2011	18.95	8.31	4.9	59.6
K4	2011	1.23	0.30	0.7	2.0

24-h-Perioden dokumentiert. Ferner wurden für die jeweiligen Meßwerte Häufigkeitsdarstellungen in Form von Histogrammen sowie Berechnungen statistischer Kennwerte vorgenommen. Damit war es möglich, besonders interessante Zustände für die weitere Auswertung herauszufiltern. Die statistischen Untersuchungen wurden mittels eines Spezialprogramms auf der IBM-Rechananlage der Eternit AG, Berlin durchgeführt.

Beispiele für die Aufbereitung sind die 24-h-Aufzeichnungen der Temperaturen wie sie in den Bildern 9 und 10 dargestellt sind. Deutlich ist hierin das Strahlungsverhalten der Dachoberfläche bei sommerlicher Sonneneinstrahlung bzw. winterlicher Wärmeabstrahlung in kalten klaren Nächten erkennbar.

Bei der Datenüberprüfung der Indikatorgas-Konzentration fiel auf, daß relativ häufig an mehr als zwei Meßstellen nennenswerte Gaskonzentrationen auftraten. Hieraus ergibt sich, daß der Belüftungsstrom nicht nur von unten nach oben gerichtet war, wie es infolge thermischen Auftriebs zu vermuten wäre, sondern auch eine Umkehrung des Belüftungsstroms auftritt. Die Häufigkeiten der Strömungsverläufe sind in Bild 11 mit den zugehörigen mittleren Windgeschwindigkeiten und Belüftungsstromgeschwindigkeiten zusammengefaßt.

Damit konnte mit diesen Untersuchungen nachgewiesen werden, daß auch beim steil geneigten Dach nicht selten Strömungsumkehrungen auftreten. Vermutungen hierüber, allerdings ohne meßtechnische Bestätigung, hatte der Autor in [2] geäußert.

Zur Aufbereitung gehörte ferner die Ermittlung statistischer Kennwerte innerhalb der Datengruppen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den Tab. 2, 3 und 4 vertafelt.

(wird fortgesetzt)

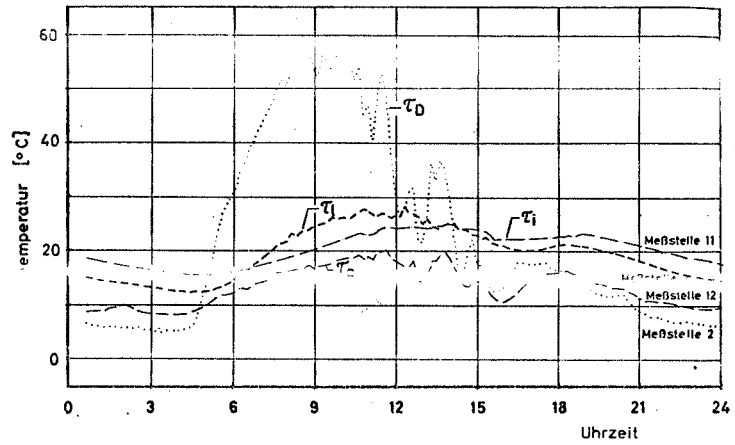


Bild 9. Temperaturverlauf an der Ostdachseite am 25.6.1978.

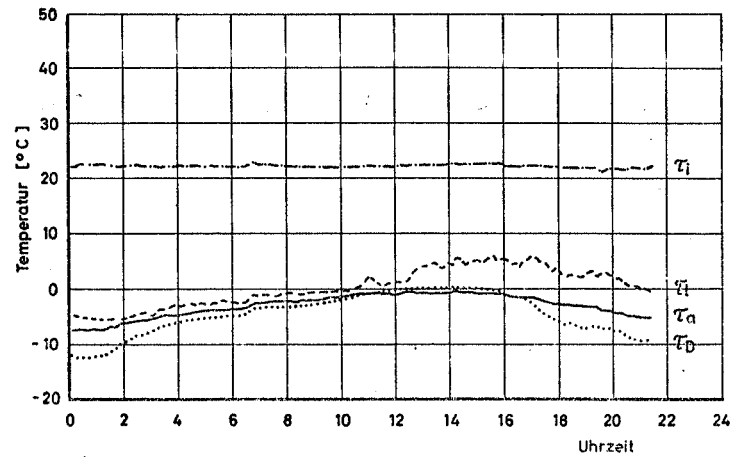


Bild 10. Temperaturverlauf an der Westseite am 6.12.1978.

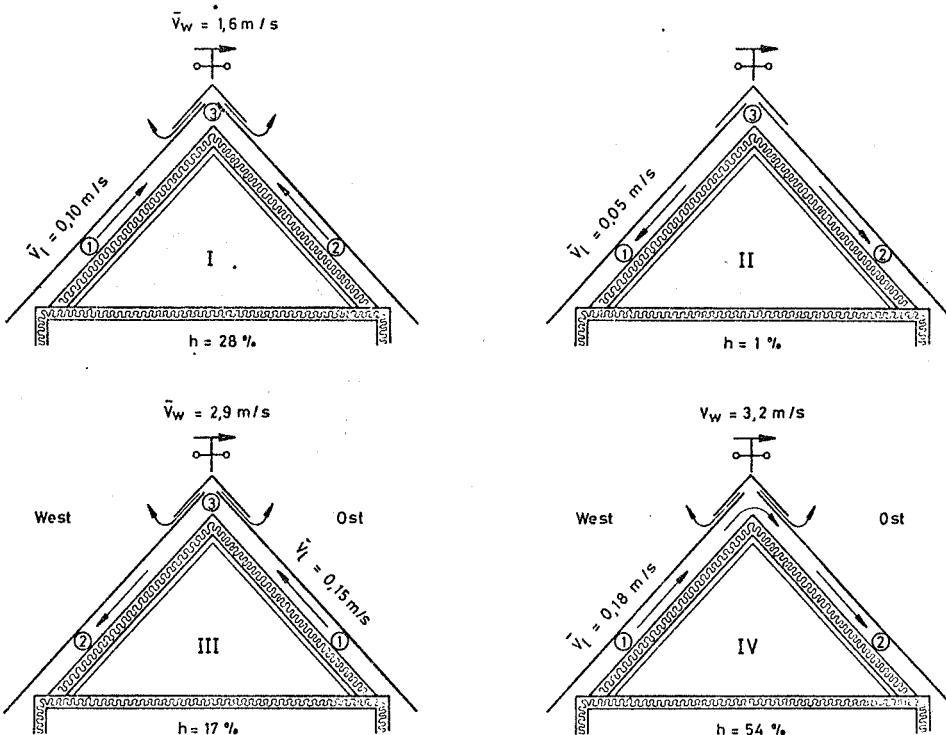


Bild 11. Strömungsverläufe; auftretende Häufigkeiten mit zugehörigen Mittelwerten von Windgeschwindigkeit und Belüftungsstromgeschwindigkeit.