

# Temperaturverhältnisse und Luftströmungen in Räumen

mit Radiatoren-, Fußboden- und Kachelofen-  
heizung unter Berücksichtigung des  
Fenstereinflusses

Prof. Dr. Philipp Katz\*) \*\*)

*Zur Beurteilung eines Wohnungs-Heizsystems ist entscheidend, in welcher Weise es geeignet ist, den Bewohnern Behaglichkeit herzustellen. Ein sehr guter Beurteilungsmaßstab ist die durch die Heizung hervorgerufene Raumluftströmung, da diese für die Wärmeverteilung im Raum in erster Linie bestimmend ist. Beherrschbare Verhältnisse sind nur zu erwarten, wenn die Strömungen stabil sind. Untersucht wurden die derzeit aktuellen Heizsysteme, die bewährte Radiatorenheizung, die seit mehreren Jahren vielverwendete Fußbodenheizung und die durch die Energiekrise in jüngster Zeit wegen der leichten Verwendbarkeit auch von Holz zur Feuerung und deswegen vermuteter Wirtschaftlichkeit besonders aktuelle Luftheizung in Form von Kachelöfen.*

## 1. Einleitung

Es ist durch eigene Untersuchungen bekannt, daß die Stabilität der Raumströmung auch von der Temperaturdifferenz der Heizung zum Raum abhängt. Sie nimmt bei größerer Differenz zu. Ebenso ist bekannt, daß flächendeckende Anregung von Luftströmungen Schwierigkeiten bringt [5]. In dieser Beziehung ist eine Fußbodenheizung durchaus einer ganz-perforierten Klimadecke vergleichbar. Um die Chance der Fußbodenheizung betreffs des Strömungsverhaltens der Raumluft in Vergleich mit der Radiatorenheizung zu verbessern, wurde letztere mit gegenüber den Normtemperaturen stark verringerter Temperatur betrieben. Die Kachelofentemperaturen sind bei Dauerbrand nicht wesentlich zu beeinflussen.

Die Auswertung der Messungen ergaben:

- Die Radiatorenheizung bringt, wie zu erwarten, die besten Raumströmungsverhältnisse, die gleichmäßigsten Temperaturverhältnisse auch bei Niedertemperaturbetrieb und damit die größte Behaglichkeit.
- Die Kachelofenheizung kann ähnlich stabile Raumströmungsverhältnisse wie die Radiatorenheizung bringen. Für die Raumluftströmung ist aber bei dieser Heizung die Güte der Fenster von wesentlicher Bedeutung.
- Die Fußbodenheizung ist nicht in der Lage, stabile Strömungs- und damit Behaglichkeitsverhältnisse ohne zusätzliche Heizkörper im Fensterbereich zu schaffen.

fen. Die Wohnbarkeit der Räume wird durch Kaltluftströme bis zu 3 m Abstand von der Fensterwand wesentlich gemindert.

Für die Empfindung der Behaglichkeit sind viele Dinge von Bedeutung, für die thermische Behaglichkeit des Menschen spielen Strahlungs- und Konvektionsverhältnisse eine erhebliche Rolle.

Für die Behaglichkeit kommt es nicht nur auf das Verhältnis von Strahlungs- und konvektionellem Wärmeanteil an, sondern auch darauf, daß das Verhältnis am ganzen Körper gleichmäßig stimmt. Starke Einstrahlung, z.B. nur von einer Seite, ist höchst unbehaglich.

Im allgemeinen sind Heizquellen in einem Raum konzentriert angebracht (Radiatoren, Öfen usw.). Die Wärme muß daher im Raum gleichmäßig verteilt werden, um optimale Verhältnisse herstellen zu können. Dies geschieht über die Raumluft, die Wärme an den Heizflächen aufnimmt und im Raum möglichst gleichmäßig so verteilen soll, daß jeder Bewohner sich behaglich fühlt. Für die Beurteilung, in welcher Weise dies geschieht, ist die Luftströmung im Raum von wesentlicher Bedeutung.

Im Institut für Klimatechnik und Umweltschutz in Gießen wurden in dem in Bild 1 gezeigten Prüfraum daher Luftströmungen verschiedener Heizungssysteme untersucht, und zwar:

1. Radiatorenheizung mit Anordnung des Heizkörpers unter den Fenstern
2. Fußbodenheizung, Fensterflächen an gleicher Stelle wie bei der Radiatorenheizung
3. Kachelofenheizung.

Da Kachelöfen praktisch nicht unter den Fenstern angeordnet werden kön-

nen, sondern wegen der Schornsteinlage meist an den Innenwänden stehen, sind bei sonst gleichem Raum hier die Fensterflächen entsprechend verlegt worden.

Bild 2 zeigt die Verhältnisse des Prüfraums mit Meßstellenanordnung, Heizquelle und Fenster am Beispiel der Radiatorenheizung.

Um vergleichbare Untersuchungen durchführen zu können, müssen auch die zu untersuchenden Räume vergleichbar, besser noch identisch sein.

Im vorliegenden Fall sind alle Untersuchungen im gleichen Versuchsraum durchgeführt worden. Bei den Untersuchungen der Radiatoren- und der Fußbodenheizung war der Raum bis ins Detail gleich; die Fensterflächen befanden sich an einer Stirnseite des Raumes. Die strahlenden Fußbodenheizflächen waren bis an die Stirn(Außen-)wand herangeführt, der Radiator befand sich in der Mitte der simulierten Außenwand unter den Fenstern. Bild 3 zeigt die Anordnung des Heizkörpers und die simulierte Außenwand des Prüfraums.

Bei der Untersuchung des Kachelofens befand sich dieser an der gleichen Stelle, an der bei der Vergleichsuntersuchung der Radiator angebracht war. Der Realität entsprechend mußten aber die kalten Fensterflächen verlegt werden, und zwar an die linke Seite einer Längswand des Raumes (Bild 4).

Die Untersuchungen erfolgten bei folgenden Temperaturverhältnissen:

1. Radiatorenheizung  
Niedertemperaturbereich:  
a) Vorlauf 70°C; Rücklauf 50°C  
b) Vorlauf 65°C; Rücklauf 55°C
2. Fußbodenheizung  
Oberflächentemperatur auf der ganzen Fläche 27,6°C

\*) Prof. Dr. Philipp Katz ist Leiter des Instituts für Klimatechnik und Umweltschutz Gießen an der Hochschule für Technik und Wirtschaft

\*\*) Unter Mitarbeit von H.J. Diederich, Wolfgang Hoellner, Dieter Kaatz, H.R. Katz, Klaus Klein, Rudolf Knierim und Joachim Ledewig. Die Arbeiten wurden durchgeführt im WS 1978/79 und im SS 1983.

### 3. Kachelofenheizung

Temperaturverhältnisse wie bei dem mit festen Brennstoffen beheizten Original, das im Institut derzeit untersucht wird.

Durch die bekannte Energiesituation tendiert die Entwicklung zu den sogenannten alternativen Energien, d.h. zur Solarenergie und zu Wärmepumpen. Diese sind, wenn überhaupt, nur im niederen

Temperaturbereich wirtschaftlich einsetzbar. Aus diesem Grunde wurde die Untersuchung der Radiatorenheizung für einen mit Wärmepumpen soeben noch erreichbaren Temperaturbereich durch-

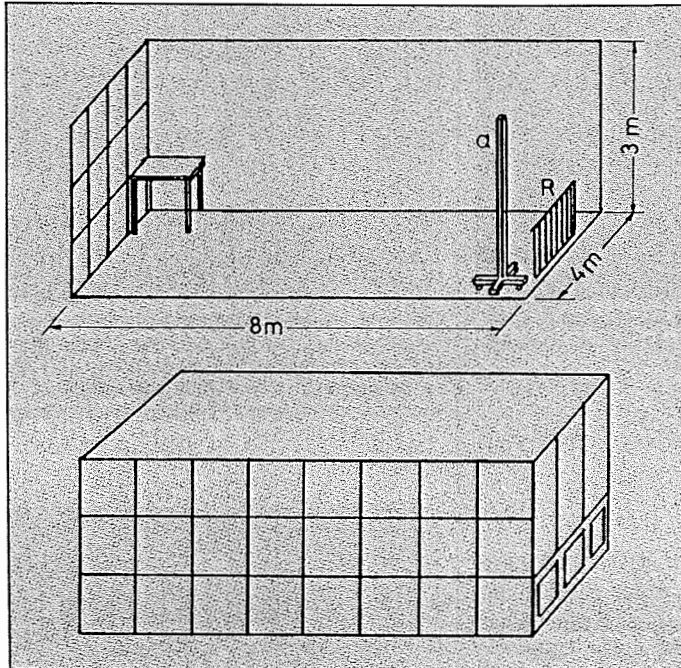


Bild 1: Prüfraum mit Radiator (R) – a Stativ zur Aufnahme der Meßsonden

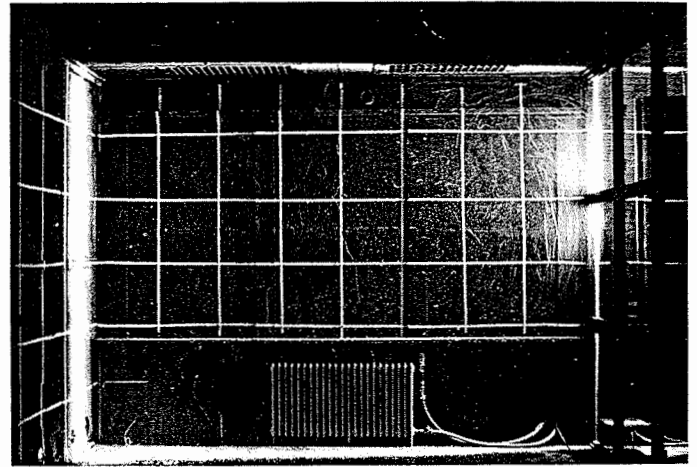
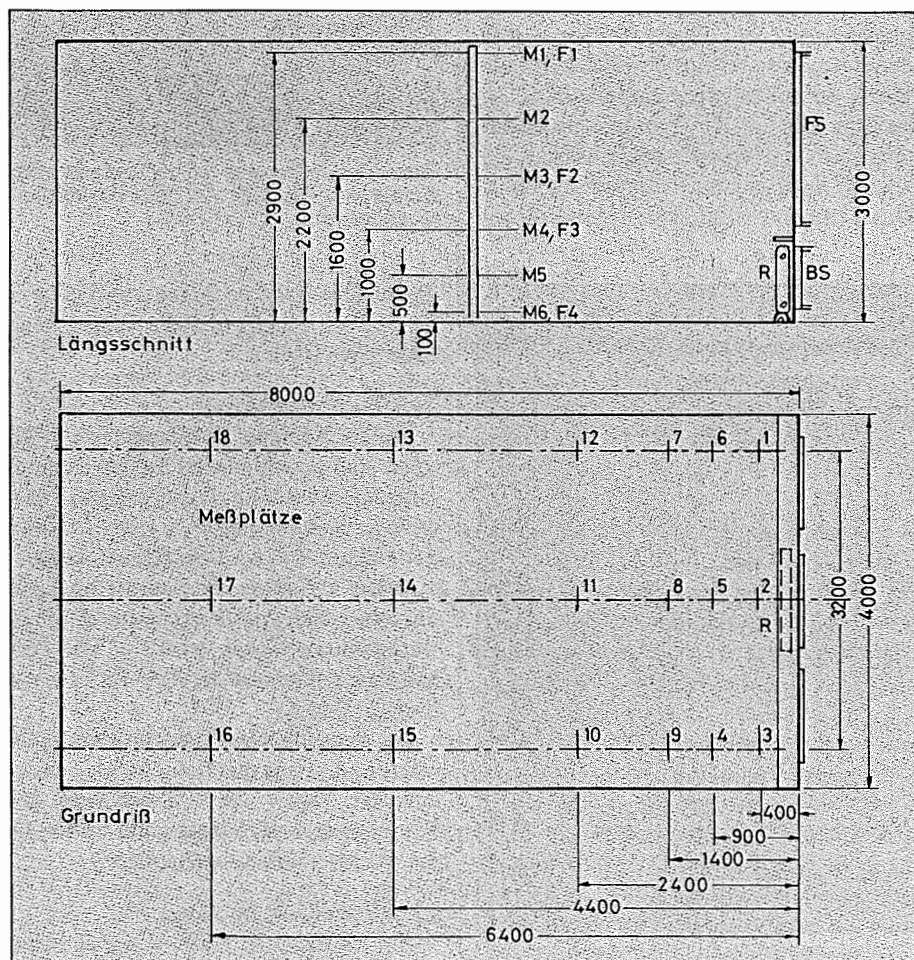


Bild 3: Radiator während des Betriebs. Rechts ist der Verlauf der Strömung zu erkennen.

Bild 2: Verhältnisse des Prüfraums mit Meßstellenanordnung, Heizquelle (R) sowie Fenster-(FS) und Brüstungs-Simulator (BS) am Beispiel der Radiatorenheizung – M Meßfühler für Temperaturmessung; F Meßfühler für Luftströmungsmessung; Meßplätze = Standorte des Stativs für M und F



geführt. Die Fußbodentemperaturen liegen ohnedies in diesem Bereich.

Um die für die wissenschaftliche Untersuchung erforderlichen Beharrungszustände herzustellen – dabei aber gleichzeitig die realen Bedingungen einzuhalten –, wurden die Heizleistungen der Radiatoren- und der Fußbodenheizung exakt auf den Wärmeverlust des Raumes an der Versuchs-Außenwand mit den Fenstersimulatoren eingestellt. Die Fenstertemperaturen entsprachen bei den verschiedenen Untersuchungsreihen denen bei Einfach-, Doppel- und Dreifachverglasungen.

Durch entsprechende Klimatisierung des Umraums wurden die übrigen Raumwände auf die Verhältnisse gebracht, die Innenwänden entsprechen (Bild 5 zeigt die Temperaturverhältnisse bei der Untersuchung der Fußbodenheizung).

Auch bei der Untersuchung des Kachelofens wurde der Wärmebedarf des Raumes an die Heizleistung des Ofens angepaßt und umgekehrt, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Regelbarkeit eines Kachelofens außer durch Verstellen der Warmluftgitter im wesentlichen nur durch die Feuerung erfolgen kann.

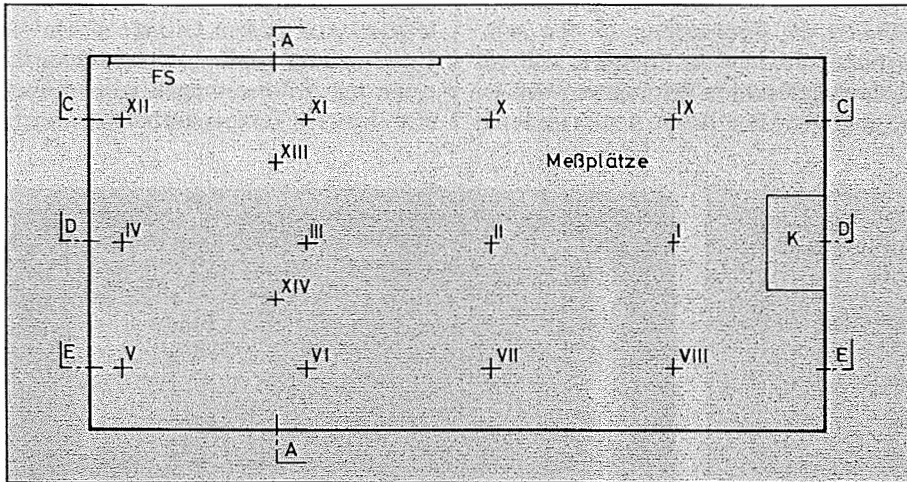


Bild 4: Verhältnisse des Prüfraums mit Meßstellenanordnung, Heizquelle (K) sowie Fenster-Simulator (FS) der Kachelofenheizung – die Zahlen geben die Meßplätze für die Temperatur- und Luftströmungsmessung an

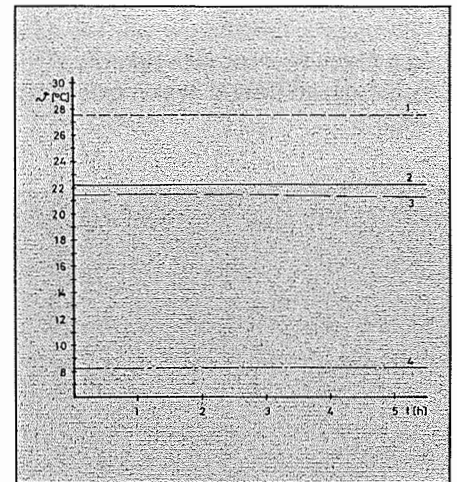


Bild 5: Mittelwerte der Umgebungstemperaturen und der Fußbodentemperaturen über die Versuchszeit bei der Untersuchung der Fußbodenheizung – 1 Fußbodentemperatur; 2 Innenwandtemperatur; 3 Außenwandtemperatur; 4 kaltes Fenster

## 2. Ergebnisse

Kurz gefaßt waren die Ergebnisse der Untersuchung folgende:

### 2.1 Temperaturverhältnisse im Raum

#### 2.1.1 Radiatorenheizung

Wie zu erwarten, ist die höchste Lufttemperatur in der Nähe des Heizkörpers. In einem Abstand von 2 m von der Außenwand ergaben sich sehr gleichmäßige Temperaturen im gesamten Raum, die lediglich unmittelbar vor der Rückwand, bedingt durch die Raumströmung der Luft, wieder etwas anstiegen. Im Hauptraum waren die Temperaturdifferenzen in aller Regel kleiner als 0,2 K.

Bild 6 gibt ein Beispiel des Temperaturverlaufs im Raum.

#### 2.1.2 Fußbodenheizung

Die Lufttemperatur im fußbodenbeheizten Raum war ab einer Entfernung zwischen 2 und 3 m von der Außenwand ebenfalls relativ gleichmäßig (Bild 7), schwankte aber nicht nur in einer Meßebene teilweise um mehr als 0,5 K, sondern sie war auch im Gegensatz zur Radiatorenheizung bei Querschnitten durch den Raum, also von Innenwand zu Innenwand, erheblich ungleichmäßiger. Zum Fenster hin fiel die Temperatur erwartungsgemäß teilweise erheblich ab (ca. 2,5 K), im Gegensatz zur Radiatorenheizung. Das Temperaturverhalten insgesamt war

Meßpunkte	Fensterinnentemperatur in °C					
	15		10		5	
	Höhe des Meßfühlers in m					
	0,5	1,0	0,5	1,5	0,5	1,5
	Lufttemperatur in °C					
III	23	23	21	23	18	22
IV	23	23	22	23	20	23
VII	23	24	23	24	23	24
X	23	24	23	24	21	23
XIII	21	23	20	22	18	21
XIV	23	23	21	23	19	22

Tabelle 1: Lufttemperaturen bei Kachelofenheizung in Abhängigkeit von den Fensterinnentemperaturen

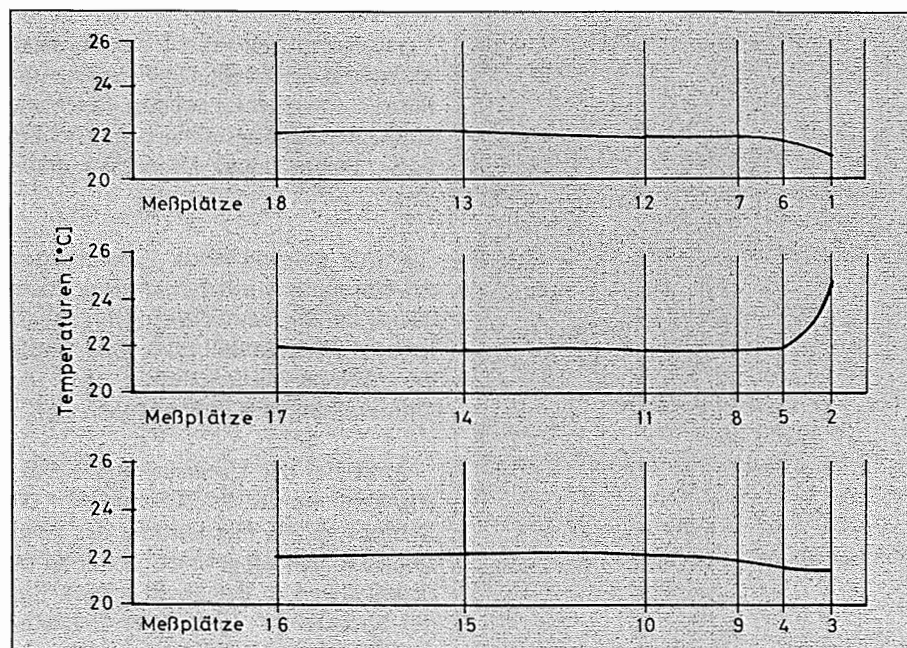


Bild 6: Beispiel des Temperaturverlaufs im Raum bei Radiatorenheizung in der Meßebebene der Meßstelle M 3

ungleichmäßiger, bedingt durch die instabile Luftströmung, auf die später noch eingegangen wird.

#### 2.1.3 Kachelofenheizung

Bei der Kachelofenheizung traten zwischen den verschiedenen Stellen Temperaturdifferenzen auf. Dabei gab es Unterschiede in Abhängigkeit von der Qualität der Fenster. Bei der Fensterinnentemperatur von 5°C waren die Raumtemperaturen wesentlich ungleichlicher als bei der Fensterinnentemperatur von 15°C. Die Verhältnisse gehen aus der Tabelle 1 hervor (s. auch Bild 4).

Bei den höheren Fensterinnentemperaturen, d.h. bei qualitativ guten Isolierfenstern, waren die Unterschiede der Temperaturen allerdings nicht höher als die bei der Fußbodenheizung.

### 2.2 Luftströmung im Raum

Zur Beheizung eines Raumes muß raumerfüllende Strömung herrschen. Die

dafür erforderliche Energie muß von den vorhandenen Heizflächen der Luft zugeführt werden, die durch thermische Differenzen in Bewegung gesetzt wird. Es darf dabei keine thermische Schichtung im Raum entstehen, weil sonst eine einwandfreie Heizung unmöglich wird.

Für die Beurteilung der Güte einer Heizung ist das Strömungsbild im Raum von wesentlicher Bedeutung. Ein Gütemerkmal ist, ob beständige, stabile Strömung herrscht, oder ob instabile Verhältnisse auftreten. Die stabile Strömung *muß keine* guten Verhältnisse herstellen, die instabile *kann es* meist nicht.

Die untersuchten Heizungen haben jede für sich ein typisches Strömungsbild hervorgerufen, das zum Vergleich der Güte geeignet ist. Dabei war es bei der Untersuchung der Radiatoren- und der Fußbodenheizung ausreichend, die Luftströmung nur in Längsrichtung des Raumes zu untersuchen, da sich raumerfüllende Strömungswalzen einstellen, die im wesentlichen von den Fensterflächen in ihrer Richtung bestimmt sind. Bei der Kachelofenheizung mußten auch Querströmungen beachtet werden, da sich Heizkörper und Abkühlflächen naturgemäß nicht unmittelbar nebeneinander befinden konnten.

Strömungen im Raum sind wie folgt festgestellt worden:

### 2.2.1 Radiatorenheizung

Es ergibt sich eine stabile Strömung, die ihren Ausgangspunkt am Heizkörper hat (Bild 8).

Durch die vorhandene Fensterbank, aber auch durch die abwärts gerichtete Luftströmung an den kalten Fenstern wird der Warmluftstrom zum Raum zu schräg nach oben abgelenkt, ist aber stabil bis zum Ende des 8 m langen Raumes und bewegt sich an der Rückwand nach unten.

Im Raum treten vier charakteristische, aber stabile Wirbel auf, nämlich:

- An der Fensterfläche ein Kaltluftwirbel, der zum Raum zu durch den aufsteigenden Warmluftstrom begrenzt wird.
- Ein Wirbel, der durch den Warmluftstrom des Heizkörpers verursacht wird und der sich von diesem schräg zur Decke des Raumes bis zur Rückwand und von dort nach unten bewegt. Etwa in halber Raumhöhe kehrt er in Richtung Außenwand zurück, einen langgestreckten, aber großen Wirbel bildend, der eine charakteristische Wirbelkette in sich birgt, die im Bild 8 eingezeichnet ist. Dieser Wirbel ist der Primärwirbel des Raumes.

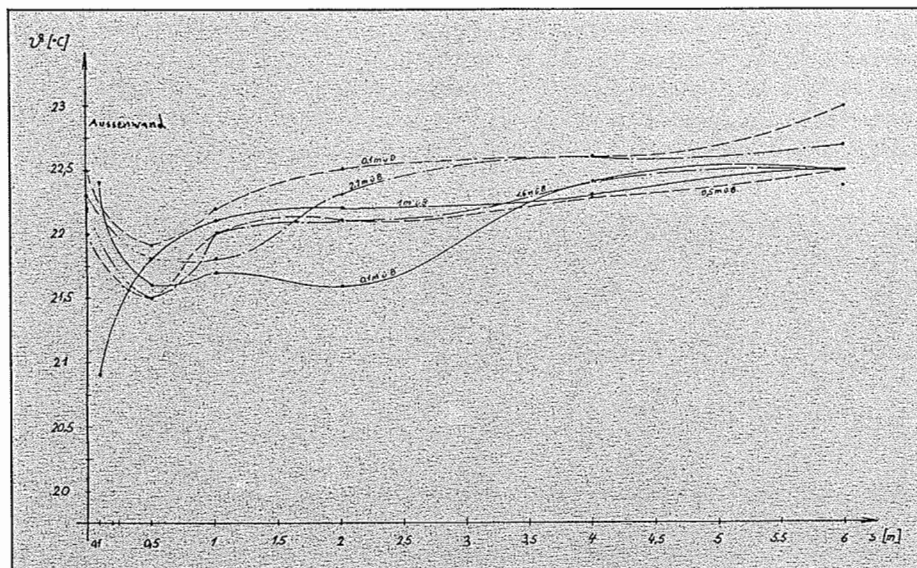


Bild 7a: Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen als Funktion des Abstandes von der kalten Fensterfläche bei der Fußbodenheizung; Meßpunkte nach Bild 2, Meßebeine I, Meßstellen 1-18

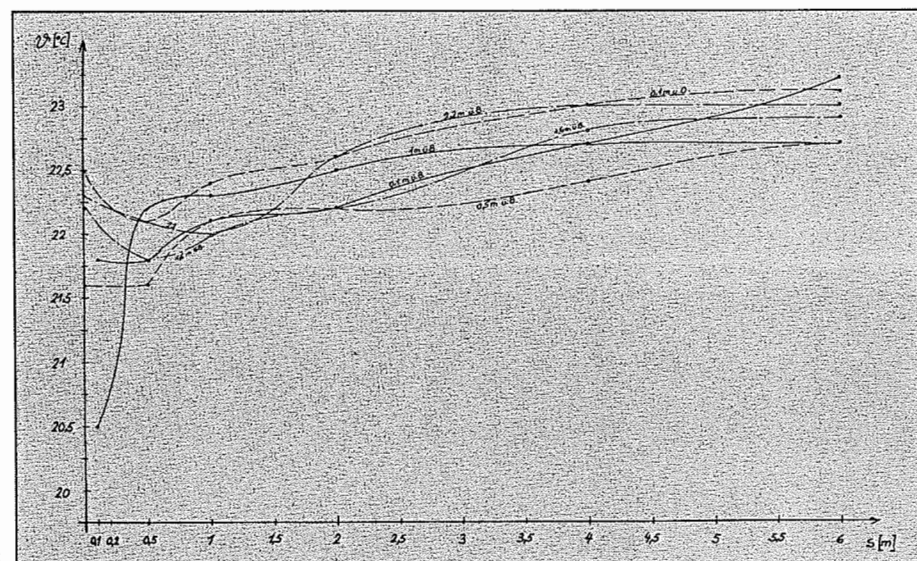


Bild 7b: Wie Bild 7a, jedoch Meßebeine II, Meßstellen 2-15

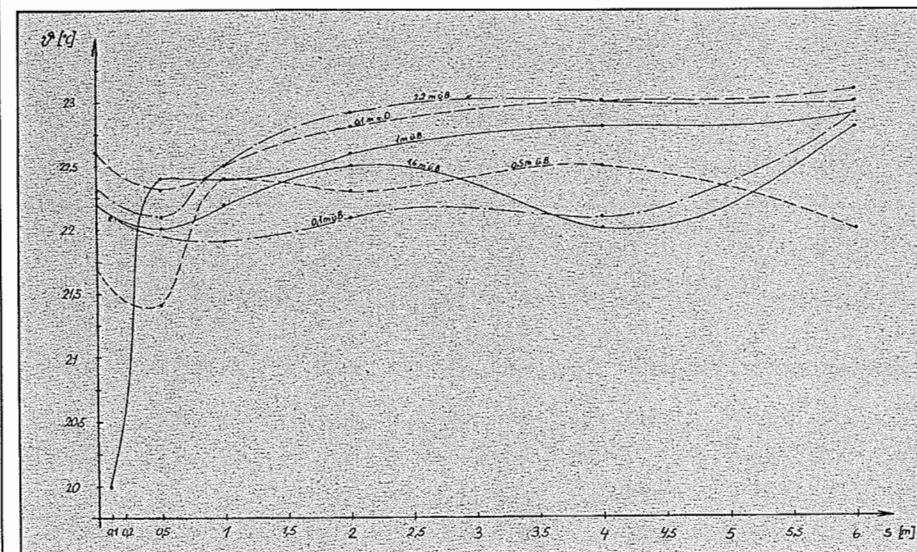


Bild 7c: Wie Bild 7a, jedoch Meßebeine III, Meßstellen 3-16

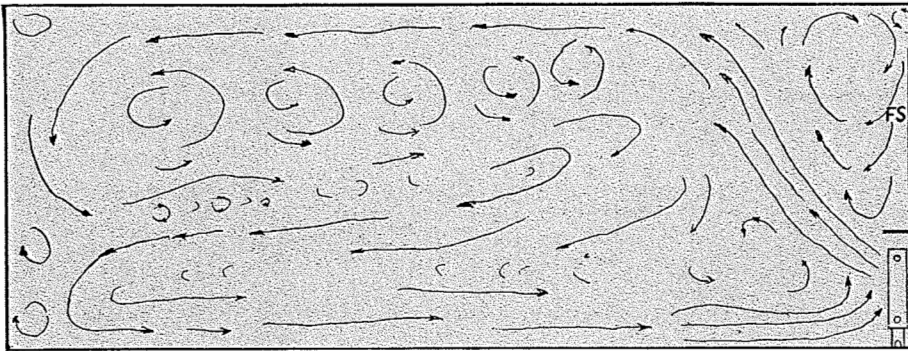


Bild 8: Strömung im Raum bei Radiatorheizung in der Ebene der Meßplätze 2, 5, 8, 11, 14, 17; FS = kaltes Fenster

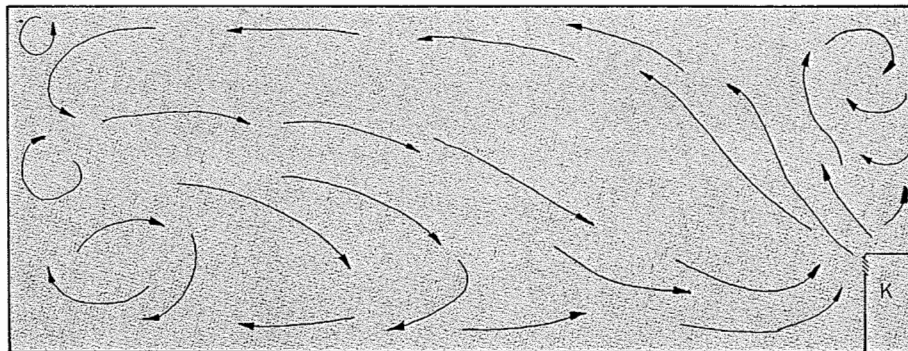


Bild 9: Strömung im Raum bei Kachelofenheizung, Schnitt Ebene D-D

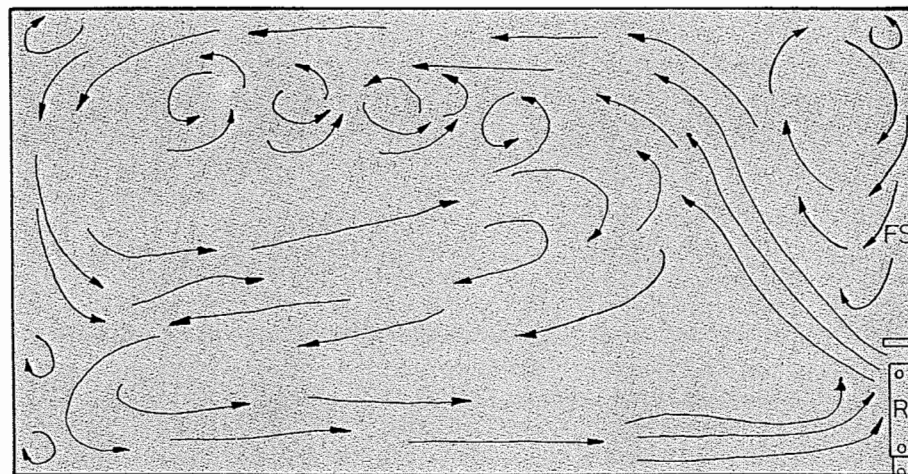


Bild 10: Strömung im Raum bei Kachelofenheizung, Schnitt Ebene C-C, identisch mit Schnitt Ebene E-E

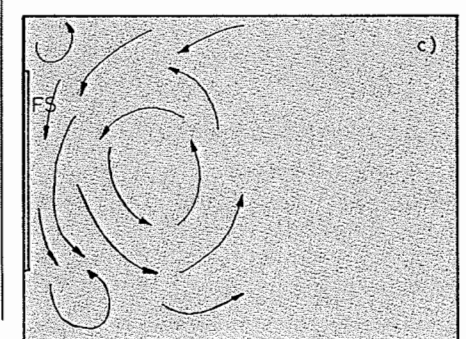
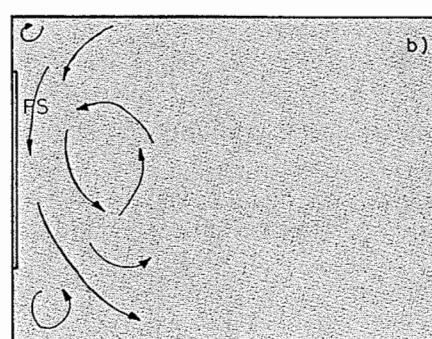
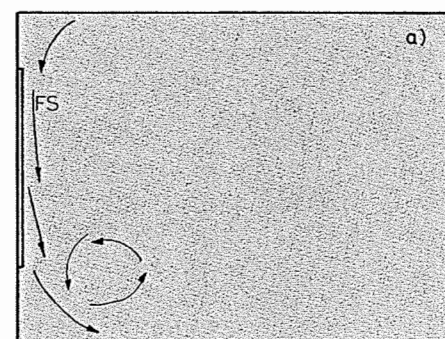


Bild 11: Strömung im Raum bei Kachelofenheizung, Schnitt Ebenen A-A, bei Fensteroberflächentemperaturen innen von 15°C (a), 10°C (b) und 5°C (c)

- Unter der Mitte bildet sich ein etwa Viertel Raum hoher, ebenso langgestreckter Wirbel. Bei diesem sind die charakteristischen inneren Wirbelketten nicht eingezeichnet, weil dieser Sekundärwirbel in der Geschwindigkeit so niedrig liegt, daß es nicht mehr zur sichtbaren Ausbildung von Wirbelketten kommt.
- Ein weiterer Sekundärwirbel bildet sich über dem Fußboden. Auch er hat etwa ein Viertel Raumhöhe und ist ebenfalls beständig. Die Luft strömt über dem Fußboden zum Heizkörper zu und in etwa 80 cm Raumhöhe wieder zur Rückwand zurück. Das Strömungsbild ist stabil, die Wärmeverteilung ist, wie die Temperaturkurven zeigen, in Ordnung. Damit sind im Raum gute thermische Verhältnisse erreichbar.

### 2.2.2 Kachelofenheizung

Die vom Kachelofen hervorgerufenen Luftströmungen sind in mehreren Ebenen dargestellt. Bild 9 zeigt die Längsströmung beim Schnitt durch den Kachelofen (Schnitt Ebene D-D), Bild 10 die Strömung rechts und links neben dem Ofen (Schnittebenen C-C und E-E) - s. auch Grundriß (Bild 4).

Zur Längsströmung ist zu sagen, daß der Kachelofen bei der Schnitt Ebene D-D d.h. durch den Ofen, ein Strömungsbild zeigt, das dem ähnelt, das auch von einem Radiator hervorgerufen wird. Wegen der geringeren Breite und der höheren Temperatur des Kachelofens gegenüber dem Radiator ist dieses Bild aber nicht - wie beim Heizkörper - über die gesamte Raumbreite erkennbar. Vielmehr stellt sich an den Seiten ein anderes Strömungsbild ein (Bild 10).

Im Schnitt durch den Kachelofen (Schnitt Ebene D-D) ergibt sich ebenfalls ein Wirbel über diesem, der aber diesmal nicht aus kalter, sondern aus warmer Luft besteht, da die Abkühlfläche ja nicht über dem Ofen ist. Ein langgestreckter Primärwirbel, ziemlich entsprechend

dem des beim Radiator, bildet sich in ganzer Länge des Raumes aus, der, im Gegensatz zu der Radiatorströmung, aber nicht zwei, sondern nur noch einen Sekundärwirbel provoziert, der auch nur die halbe Raumtiefe erreicht, aber von der Gegenwand her. Zum Kachelofen zu erweitert sich der Primärwirbel so, daß er auch bis zum Fußboden reicht.

Die Strömung neben dem Kachelofen (Schnittebenen C-C und E-E) zeigt ebenfalls den Primärwirbel, der aber bis zur Wand geht, an der der Ofen aufgestellt ist, weil hier der unmittelbare Auftrieb über dem Ofen fehlt. Dieser langgestreckte Wirbel geht nicht ganz bis zur Gegenwand, sondern fällt etwas früher ab. Ferner bildet sich nicht ein Sekundärwirbel, sondern deren zwei, die aber etwa so lang sind wie der Sekundärwirbel in der Schnittebene durch den Kachelofen.

Bei gut isolierten Fenstern (Oberflächentemperatur innen  $15^{\circ}\text{C}$ ) ergibt sich eine Strömung nach unten (Bild 11 a), die zu einem relativ kleinen Primärwirbel über dem Fußboden führt. Eine Querrotation im Raum wird aber dabei nicht bewirkt. Der Einfluß der abfallenden Kaltluft geht etwas über 1 m in den Raum ein.

Bei schlechter isolierten Fenstern (Oberflächentemperaturen innen  $10^{\circ}\text{C}$  - Bild 11 b - und  $5^{\circ}\text{C}$  - Bild 11 c) zeigen sich mit absinkender Fenstertemperatur stärkere Einflüsse. Aber auch bei einer Fen-

stertemperatur von nur  $5^{\circ}\text{C}$  ergibt sich noch kein die ganze Raumbreite erfüllender, von der kalten Fensterfläche provozierter Wirbel. Dieser reicht vielmehr bis in den halben Raum. Dabei ist die Vermischung recht stark, so daß Kaltluft von annähernder Fenstertemperatur nicht in den Aufenthaltsbereich gerät. Bei der höheren Fenstertemperatur von  $10^{\circ}\text{C}$  ist der Einfluß entsprechend geringer.

### 2.2.3 Fußbodenheizung

Im Gegensatz zur Radiatoren- und Kachelofenheizung zeigt das Strömungsbild bei der Fußbodenheizung völlig andere Verhältnisse. Eine stabile Strömung herrscht nur bis ca. 3 m Abstand von der Fensterfläche über dem Fußboden, wo eine stabile Abwärtsströmung in den Raum hinein, sowie bis ca. 2 m Abstand von der Fensterfläche an der Decke auftritt. Weiter gibt es beständige Wirbel unter den Fenstern und in den Ecken an der Rückwand. In allen übrigen Bereichen ist die Strömung instabil und stark örtlich und zeitlich veränderlich (Bild 12). Die Kaltluft von den Fenstern tritt ohne wesentliche Vermischung erheblich weit in den Raum ein.

## 3. Beurteilung der Luftströmung im Raum

Die durch Kachelofen und Heizkörper hervorgerufenen Raumströmungen

ähneln sich, sie sind stabil und bei entsprechender Auslegung und Gestaltung der Heizkörper bzw. Öfen in der Lage, ein beherrschbares Strömungs- und Temperaturverhalten im Raum auszulösen. Die Fußbodenheizung ist nicht in der Lage, stabile Strömungen herzustellen. Instabilitäten sind in hohem Maße gegeben. Die Fußbodenheizung ist nach den Untersuchungen nicht in der Lage, in einem Abstand bis ca. 3 m vor den Fenstern behagliche Verhältnisse herzustellen. Aus diesem Grund versucht man ja, durch Anordnen von zusätzlichen Heizflächen unter den Fenstern die Verhältnisse zu verbessern.

Im Gegensatz dazu sind Radiatoren und auch Kachelöfen in der Lage, auch in unmittelbarer Fensternähe behagliche thermische Verhältnisse herzustellen, wobei es beim Kachelofen im wesentlichen auf die Qualität der Fenster ankommt.

### Schrifttum

- [1] Forschungsbericht Nr. 114 A: Bestimmung der Volumenströme erwärmter Luft an einem Simulations-Kachelofen. Institut für Klimatechnik und Umweltschutz Gießen, Mai-Juni 1983.
- [2] Katz, Knieriem, Ledwig: Strömungs- und Temperaturverhalten in einem mit Radiatoren beheizten Raum. Institut für Klimatechnik und Umweltschutz Gießen, Studienarbeit 1979.
- [3] Diederich, Hoellenriegel, Katz: Untersuchung der Luftströmung und Temperaturverteilung in einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum. Institut für Klimatechnik und Umweltschutz Gießen, Studienarbeit WS 77/78.
- [4] Klein: Einfluß von kalten Fensterflächen auf die Luftströmung in einem mit Kachelofen geheizten Raum. Institut für Klimatechnik und Umweltschutz Gießen, Diplomarbeit 1983.
- [5] Arbeitskreis der Klimaprofessoren: Lehrbuch der Klimatechnik, Bd. 1 Abschn. 6 Luftströmung im Raum, Bd. 3 Abschn. 6 Luften- und -auslässe, Klimadecken und Klimaleuchten. □

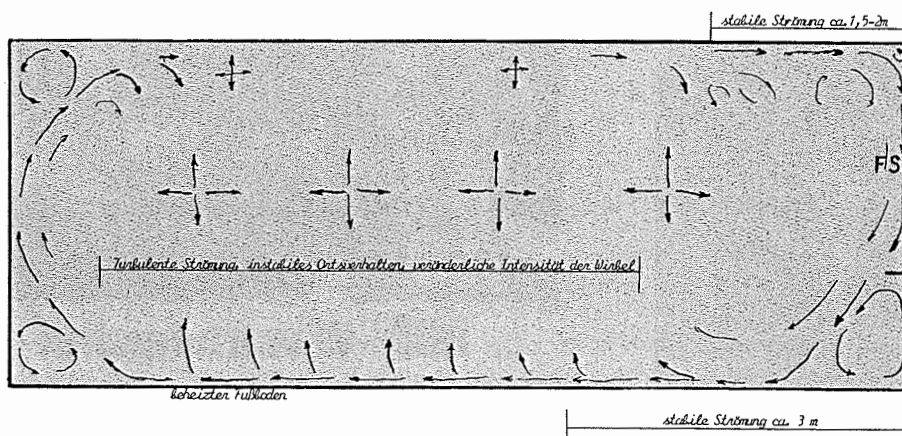


Bild 12: Strömung im Raum bei Fußbodenheizung; FS = kaltes Fenster