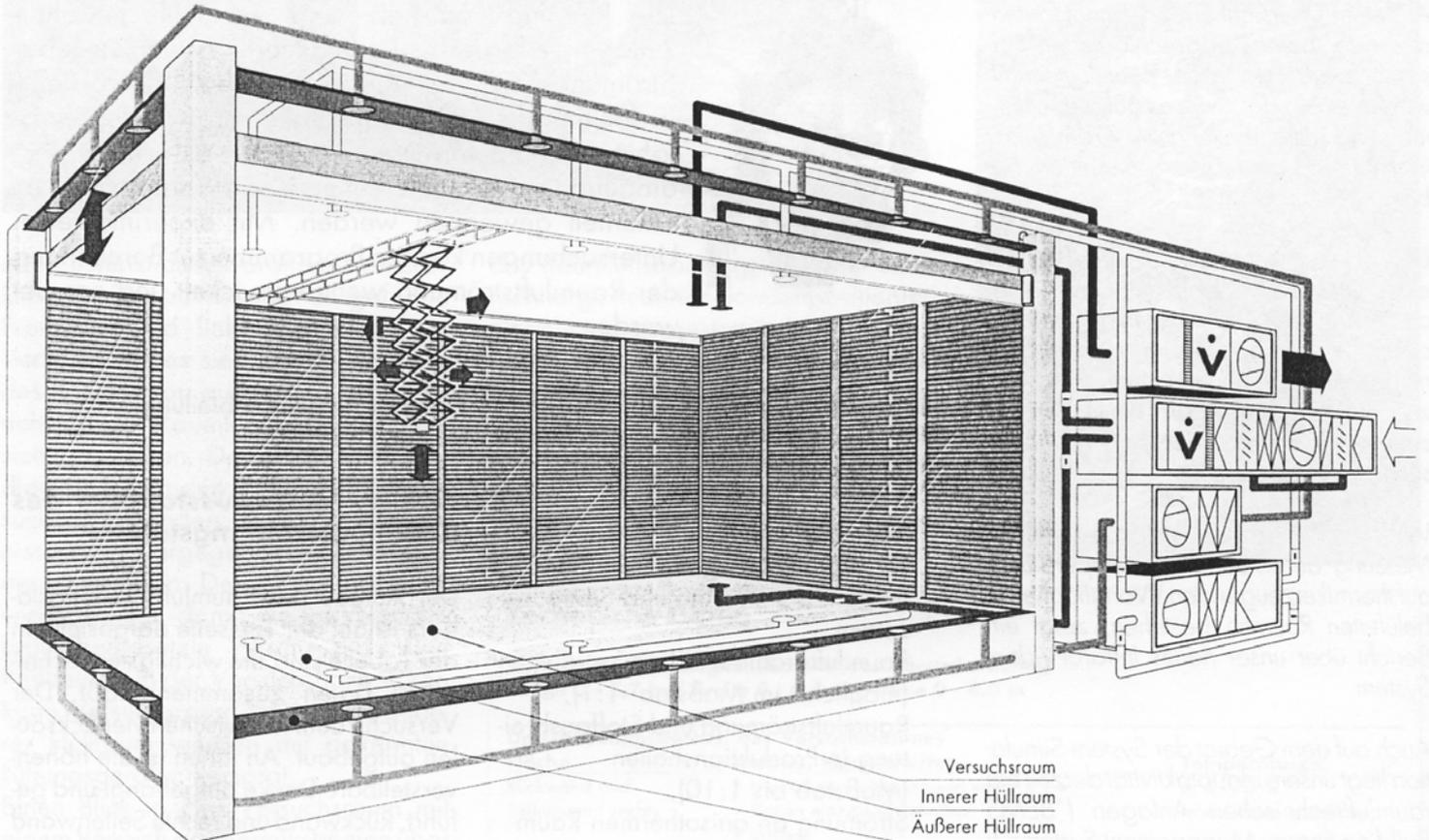


## Das neue RAUMLUFT-STRÖMUNGS-LABOR



*Meine Damen und Herren,*

*zur Einweihung unseres  
Raumluftströmungslabors am 22. Juni  
können wir Ihnen die zweite Ausgabe  
unseres im vergangenen Jahr gestarteten  
HLKBRIEFes überreichen - harte Termine  
sind da sehr hilfreich.*

### INHALT

<b>Das neue Raumluft-Strömungs-Labor HLK - Stuttgart</b>	<b>2</b>
<b>Infrarot-Video-System zur Untersuchung von thermischen und hydraulischen Vorgängen durch Oberflächen-Temperatur-Erfassung</b>	<b>4</b>
<b>Forschung zur Arbeitsplatz-Luftreinhaltung und zum Umweltschutz bei HLK - Stuttgart</b>	<b>5</b>
<b>Berechnungsmethode zur Darstellung des Befeuchtungsverhaltens eines Luftwäschers</b>	<b>10</b>

Im HLKBRIEF wird über die Aktivitäten der Abteilung Heizung Lüftung Klimatechnik des Instituts für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart (IKE HLK), der Forschungsgesellschaft Heizung Lüftung Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK), und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung Lüftung Klimatechnik berichtet.

Bei dieser Gelegenheit möchten wir Sie über unsere in den letzten Jahren stark angewachsenen Aktivitäten in der Raumlufttechnik informieren. Im Vordergrund steht natürlich unser neues RLS-Labor, das wir im Zusammenhang mit dem vom BMFT geförderten Forschungsvorhaben APLÜ und mit Unterstützung einer Reihe von Firmen - in der Hauptsache aber aus eigener Kraft - in acht Monaten entworfen und errichtet haben.

Aus einer Übersicht über die acht laufenden oder bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben in der Raumlufttechnik wird deutlich, daß wir uns auf die Luftführung und Luftreinigung am Arbeitsplatz in Fertigungsbetrieben konzentriert haben.

Ein weiterer Aufsatz gibt am Beispiel eines Luftwäschers Einblick in unsere traditionell starken Aktivitäten in der Untersuchung von Anlagen-Komponenten. Die mitgeteilte Berechnungsmethode wird z.Zt. in umfangreichen Versuchen an einem Wäscher auf unserem Wärmetauscher-Prüfstand validiert.

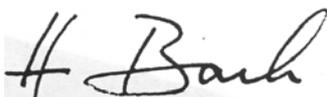
Welche interessanten Möglichkeiten zur Messung der Oberflächentemperaturen auf thermikerzeugenden Warmflächen in belüfteten Räumen bestehen, zeigt ein Bericht über unser neues Infrarot-Video-System.

Auch auf dem Gebiet der System-Simulation liegt unsere Hauptaktivität derzeit bei raumlufttechnischen Anlagen ("BEMS Building Energy Management Systems"); über diesen Komplex, bei dem vor allem unterschiedliche Regelstrategien untersucht und entwickelt werden, wurde bereits in der ersten Ausgabe des HLKBRIEFes berichtet.

Ich freue mich, daß unser HLKBRIEF mit dieser zweiten Ausgabe anfängt, eine feste Einrichtung zu werden, die Kontinuität in unsere Information bringt.

Auch dieses Mal bitte ich Sie um Anregungen und Verbesserungsvorschläge sowie um Mitteilung, wer ebenfalls Interesse an dem BRIEF oder welche Adresse sich geändert hat.

Mit herzlichen Grüßen



Prof. Dr.-Ing. Heinz Bach

## Das neue Raumluft-Strömungs-Labor HLK - Stuttgart

Wolfgang Scholer



Die Planung von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen erfordert z.T. detaillierte Kenntnisse über Strömungsvorgänge in Räumen. Sie können bislang in den meisten Anwendungsfällen auch mit leistungsfähigen Computern wegen der komplexen Randbedingungen noch nicht rechnerisch sondern nur experimentell gewonnen werden. Mit experimentellen Untersuchungen können Programme zur Berechnung der Raumluftströmung weiterentwickelt und erprobt werden.

Deshalb werden nach wie vor Raumluftströmungslabors benötigt, in denen folgendes untersuchbar sein muß:

- Zuluftstrahlen,
- Ausbreitungsvorgänge an Einrichtungen, die Wärme und Stoffe freisetzen,
- Raumluftströmung in Komforträumen (möglichst im Maßstab 1:1),
- Raumluftströmung und Stoffausbreitung in Produktionshallen (Maßstab bis 1:10),
- Strömung an anisothermen Raumumschließungsflächen, an Heiz- oder Kühlflächen,
- dynamische Vorgänge in Räumen aufgrund von Einflüssen durch die Witterung und die Regelung von heiz- und raumlufttechnischen Einrichtungen.

Für dies alles muß das Raumluftströmungslabor ausgestattet sein, daß es mit vertretbarem Aufwand den vorgegebenen Randbedingungen angepaßt werden kann. Zur Untersuchung von Raumluftströmungen und Stoffausbreitungsvorgängen werden zunehmend Tracergase oder Realstoffe eingesetzt; hierbei darf die Zuluftqualität nicht von der mit diesen Stoffen beladenen Fortluft beeinflußt werden.

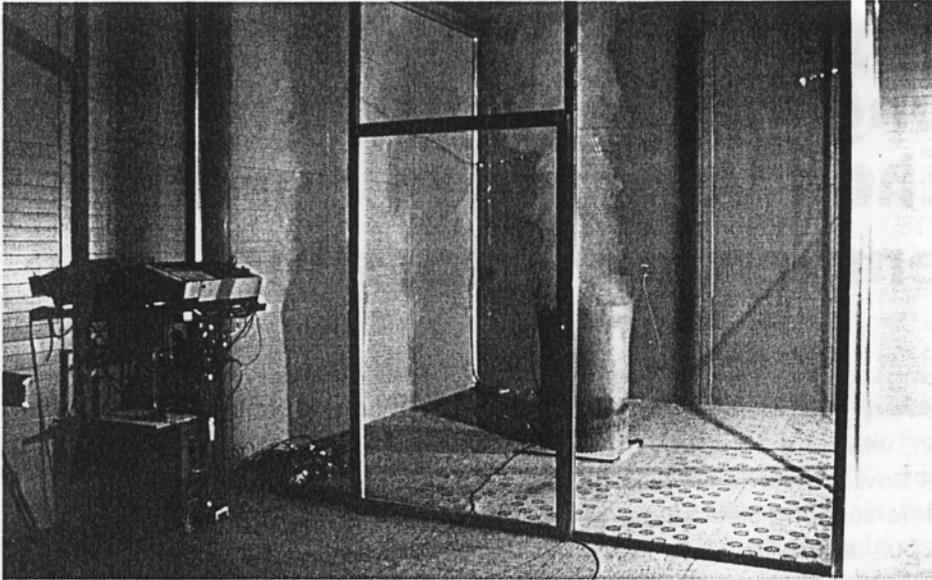
Ein solches Raumluftströmungslabor wurde in der Versuchshalle der FGHLK Stuttgart errichtet und kann dort auch

von der IKE/HLK-Abteilung genutzt werden.

### Aufbau und Ausstattung des Raumluftströmungslabors

Der Aufbau des Raumluftströmungslabors ist auf der Titelseite dargestellt. In der Tabelle sind die wichtigsten technischen Daten zusammengefaßt. Der Versuchsraum ist zwischen vier Ecksäulen aufgebaut. An ihnen ist die höhenverstellbare Decke aufgehängt und geführt. Rückwand und rechte Seitenwand bestehen aus wasserdurchflossenen Heizkörperplatten. Die Front und die linke Seite bilden eine durchsichtige Doppelfassade (Zwischenraum Luftdurchströmung = "äußerer Hüllraum"). Der Fußboden ist aus aufgeständerten Bodenplatten errichtet. Der Versuchsraum wird durch die beiden ortsfesten Plattenwände und durch die zwischen Fußboden und Decke an beliebiger Stelle einbaubaren Acrylglaswände begrenzt. Zwischen den Wänden des Versuchsraumes und der Doppelfassade entsteht der sog. "innere Hüllraum".

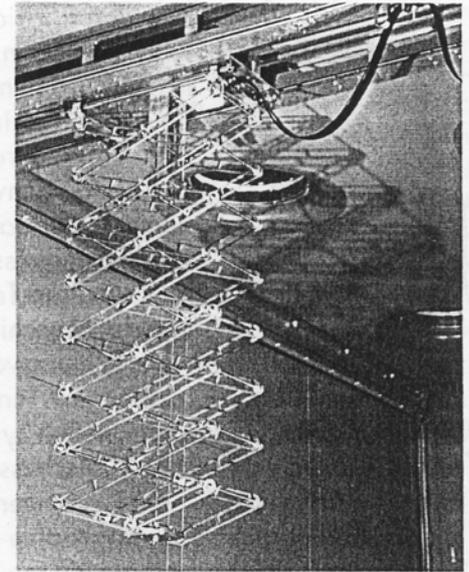
Der Doppelboden oder einzelne Bodenplatten können bei Bedarf mit Hilfe von Sonderkonstruktionen für die Luftzufuhr, zum Heizen oder zum Kühlen eingesetzt werden. Die Temperaturen der beiden Plattenwände können konstantgehalten oder nach vorgegebe-



baut und unter der Decke montiert. Eine Scherenkonstruktion ermöglicht die Vertikalbewegung.

Bild 2: Thermikströmung über einem beheizten Körper.

Bild 3: Meßsondenpositioniereinrichtung



nen Zeitfunktionen verändert werden. Die als Doppelfassade ausgeführte Frontwand und linke Seitenwand des Versuchsraumes sind zur Beleuchtung des Raumes von außen und zur Beobachtung der Raumluftrömung durchsichtig gehalten. Der innere Hüllraum dient dazu, an den transparenten Versuchsraumwänden isotherme Verhältnisse oder vorgegebene Wärmeströme einzustellen. Der äußere Hüllraum wird benötigt, damit die im Versuchsraum freigesetzte Wärme nicht den Prüfbetrieb in der Versuchshalle stören kann. Versuchsraum, innerer und äußerer Hüllraum werden mit getrennten Lüftungsgeräten versorgt.

Einen Blick in den Versuchsraum mit einem Versuch an Thermikströmen über einem beheizten Körper zeigt Bild 2.

Frontwand, linke Seitenwand und die Doppelfassade können vollständig demontiert werden, damit Strömungsvorgänge, z.B. Zuluftstrahlen, ohne den Einfluß von Raumwänden untersucht werden können.

## Meßtechnik

Neben den Meßgrößen zur Bildung von Wärme- und Stoffbilanzen müssen Lufttemperaturen, Oberflächentemperaturen, Luftgeschwindigkeiten und Stoffkonzentrationen an nahezu jedem Ort im Versuchsraum gemessen werden. Die bislang praktizierte manuelle Positionierung der Meßsonden oder der Probengasansaugung stört die Raumluftrömung und erfordert einen hohen Personal- und Zeitaufwand. Deshalb ist

das Raumluftrömungslabor mit einer rechnergesteuerten Sondenpositioniereinrichtung ausgestattet, mit der jeder Raumpunkt automatisch angefahren werden kann. Bild 3 zeigt die Meßsondenpositioniereinrichtung. Sie kann so gesteuert werden, daß sie Hindernisse wie z.B. Einbauten umfährt. Die Elemente für die Längs- und Querbewegung sind wie eine Kranbahn aufge-

## Technische Daten

**Abmessungen, Variationsbereich des Versuchsraumes**  
Länge 0 - 7,7 m / Breite 0 - 4,4 m / Höhe 0 - 4,0 m

### Umschließungsflächen des Versuchsraumes

Fläche	Aufbau, Eigenschaften	Temperaturen
Rückwand und Seitenwand rechts	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heizkörperplatten-Moduln von 1 x 1 m</li> <li>Platten einzeln abnehmbar</li> <li>ortsfest</li> <li>wasserdurchfließen, temperierbar</li> </ul>	5 °C - 70 °C modulweise einstellbar
Frontwand und Seitenwand links	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acrylglas</li> <li>ortsveränderbar</li> <li>temperierbar mit Luft (innerer Hüllraum)</li> </ul>	5 °C - 35 °C
Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doppelboden 0,6 m hoch</li> <li>Bodenplatten 0,6 x 0,6 m</li> <li>Platten einzeln austauschbar (Luftdurchlässe)</li> </ul>	falls erforderlich temperierbar (Sonderaufbau)
Decke	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stahlrahmen m. verschiebbaren Holzträgern</li> <li>Holzspanplatten von unten angeschraubt</li> <li>höhenverstellbar</li> </ul>	falls erforderlich temperierbar (Sonderaufbau)

### Luftversorgung

Zone	Betriebsweise	Temperaturen	Luftführung
Versuchsraum	Außenluft (wegen Tracergaszugabe) 0 - 4000 m <sup>3</sup> /h	0 °C - 60 °C	alle Richtungen wählbar
Innerer Hüllraum	Umluft	5 °C - 35 °C	umstellbar unten/oben oben/unten
Äußerer Hüllraum	Umluft	~ 20 °C	unten/oben

### Meßtechnik

#### Meßproblem

Zu- und Abluftstrom des Versuchsraumes

#### Eingesetzte Meßtechnik

• Einströmdüsen verschiedener Größen,  
eingebaut in sogenannten Beruhigungskammern

#### Raumlufzustand:

Luft- / Oberflächentemperaturen  
Luftgeschwindigkeiten / Turbulenzgrad  
Luftqualität / Stoffausbreitung

• NiCr - Ni Thermoelemente  
• thermische Anemometer  
• für Tracergas (N<sub>2</sub>O) Infrarotgasanalysator  
• für Realgase (z.B. CnHm)  
Flammenionisationsdetektor  
• für Aerosole Partikelspektrometer

# Infrarot-Video-System zur Untersuchung von thermischen und hydraulischen Vorgängen durch Oberflächen-Temperatur-Erfassung

Gunther Claus



Bei der Entwicklung von neuen Luftführungssystemen, vor allem für Fertigungsbereiche, sind konvektive Luftströmungen, wie sie durch die Wärmeabgabe von Maschinen bewirkt werden, von erheblicher Bedeutung. Ihre Untersuchung stellt einen der ersten Forschungsschwerpunkte für das neue Raumluftströmungslabor dar. Die Übertragung der so gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis wird es erforderlich machen, die Temperaturverteilung an der Oberfläche der Maschinen möglichst gut zu erfassen. Für die

schnelle und informative Ermittlung von Oberflächentemperaturen hat sich die Infrarot-Thermographie seit längerem bewährt. Leider waren die bisher erhältlichen kommerziellen Systeme aufgrund der hohen Kosten nur mit erheblichen staatlichen Zuschüssen zu beschaffen. Durch die rasante Entwicklung im Video- und Computerbereich ergaben sich in neuester Zeit jedoch auch für die Thermographie leistungsfähige Systeme zu akzeptablen Preisen. So entstand am IKE ein System aus verschiedenen Hard- und Software-Komponenten, das seit einigen Wochen auch in unserem Labor im Einsatz ist. Die wesentlichen Teile sind eine Videokamera mit IR-selektiver Optik und Röhre, ein höherwertiger PC mit Farbbildschirm und umfangreicher Bildverarbeitungs-Software sowie ein Mehrfarbdrucker.

Neben der bereits erwähnten Ermittlung von Oberflächentemperaturen bei schwierig geformten Körpern stellt die Sichtbarmachung von Strömungsvorgängen und Temperaturverteilungen in wasserführenden Bauteilen den wichtigsten Einsatzbereich für das Infrarot-Video-System dar:

- bei Heizkörpern mit horizontaler Wasserführung treten regelmäßig Schwierigkeiten bei der Wasserverteilung auf (Bild 1),

- die gezielte Rücklaufeinspeisung bei Heizkesseln soll für eine gute Durchmischung sorgen bzw. (bei Gußkesseln) alle Heizflächen gleichmäßig mit Wasser versorgen (Bild 2). Genauso können unerwünschte Wärmeverluste infolge von Wärmebrücken erkannt werden, wie sie bei Kesseln und Speichern häufig auftreten. Weitere Möglichkeiten im Bereich der Forschung und Entwicklung sind denkbar:

- Festlegung der Montageorte für HKV am für die Wärmeabgabe eines Heizkörpers repräsentativen Punkt (besonders bei Spezialanschlüssen und unklarer Hydraulik - Bild 3),
- Einfluß von Einrohr-Spezialventilen auf die unerwünschte Wärmeabgabe eines Heizkörpers bei geschlossenem Ventil.

Ein besonderer Vorteil des eingesetzten Infrarot-Video-Systems liegt in der vielseitigen Bildverarbeitung. Durch Kompatibilität mit üblichen Videosystemen können Einzelbilder oder ganze Bildsequenzen abgespeichert, bearbeitet und dann wieder zu Bildfolgen zusammengesetzt werden. So können insbesondere instationäre Vorgänge zunächst beobachtet werden - dabei wird eine Infrarot-Video-Aufzeichnung erstellt - und anschließend werden die interessantesten Einzelbilder bearbeitet und wieder zu einem Bildablauf zusammengestellt. Einzelbilder können auf unterschiedliche Art dokumentiert werden: Farbdruck auf Papier oder Overhead-Folie, als Sofortbild oder als Diapositiv.

Das System ist relativ einfach in der Handhabung und auch gut transportabel, so daß auch ein Einsatz außerhalb des Labors möglich ist.

Bild 1

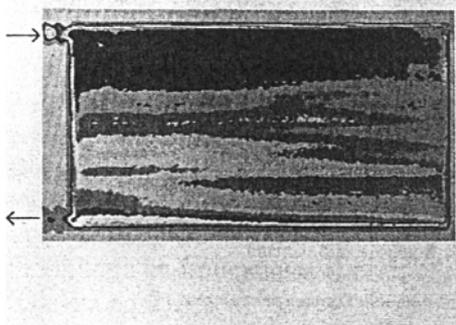


Bild 2

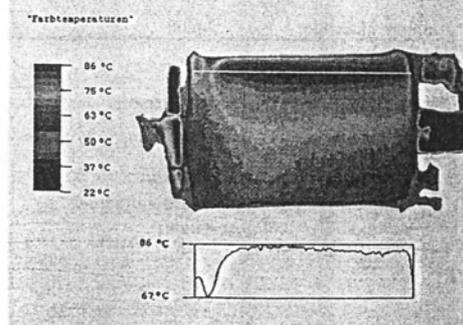
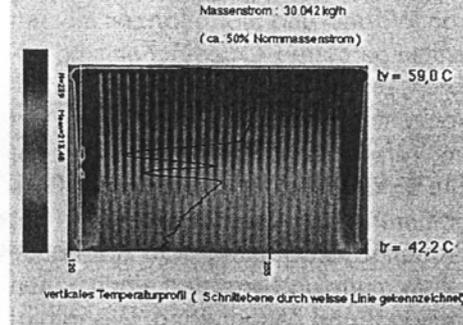


Bild 3



# Forschung zur Arbeitsplatz-Luftreinhal tung und zum Umweltschutz bei HLK-Stuttgart

Walter Dittes



Die Lufttechnik in Produktionshallen ist nicht nur Voraussetzung für den Schutz der Beschäftigten sondern auch für den der Umwelt vor den bei der Produktion entstehenden luftfremden Stoffen. Die Forschung und Entwicklung neuer Lufttechnik für Produktionshallen dient dem Arbeitsschutz und zugleich dem Umweltschutz sowie dem sparsamen Umgang mit Energie und Produktionsstoffen. Bei HLK-Stuttgart befaßt man sich mit diesen Themen in der Grundlagenforschung und bei der Anwendung der Erkenntnisse in der Praxis.

Luftfremde Stoffe, die bei der Produktion freigesetzt werden, gefährden die Beschäftigten und belasten auch die Umwelt, falls diese Stoffe unkontrolliert ins Freie gelangen können. Lassen sich Einsatz, Entstehung und Freisetzung gefährlicher Stoffe nicht durch sog. produktionstechnische Maßnahmen (z.B. Stoffsubstitution, emissionsarme Bearbeitungsverfahren) vermeiden, kann der Schutz der Beschäftigten und der Umwelt nur noch durch Lufttechnik erreicht werden. Die Maßnahmen sind in Bild 1 aufgezeigt:

- Mit Erfassungstechnik wird verhindert, daß die freigesetzten Stoffe zu den Beschäftigten gelangen.
- Die Konzentrationen der nicht erfassbaren luftfremden Stoffe werden in den Arbeitsbereichen durch Raumlufttechnik auf ungefährliche Werte vermindert.
- Die bei der Stofferrfassung oder bei der Raumlüftung fortgeführten Luftströme können durch Abscheidetechnik so gereinigt werden, daß die fortgeführte Luft die Umwelt nicht belastet.

Raumlufttechnik in Produktionshallen ermöglicht zudem, die arbeitsphysiologischen Forderungen (Arbeitsplatzklima) zu erfüllen. Die Bereitschaft zum Einsatz hochwertiger Lufttechnik in Produktionshallen ist jedoch nur bei niedrigen Kosten gegeben. Ein Ziel ist demzufolge, die Lufttechnik zum Arbeitsschutz so zu gestalten, daß man mit möglichst niedrigen Luftströmen und damit niedrigen Kosten für die Abscheidanlagen auskommt.

Ziele der Forschung und Entwicklung von Lufttechnik für Produktionshallen sind, wirkungsvolle Erfassungseinrichtungen und Luftführungen zu konzipieren, strömungstechnischen Grundlagen zu erarbeiten und Konstruktions- und Auslegungsverfahren für die lufttechnischen Einrichtungen zur Verfügung zu stellen. Daneben gilt es, die Erkenntnisse beispielhaft auf Praxisprobleme anzuwenden und die Wirksamkeit nachzuweisen.

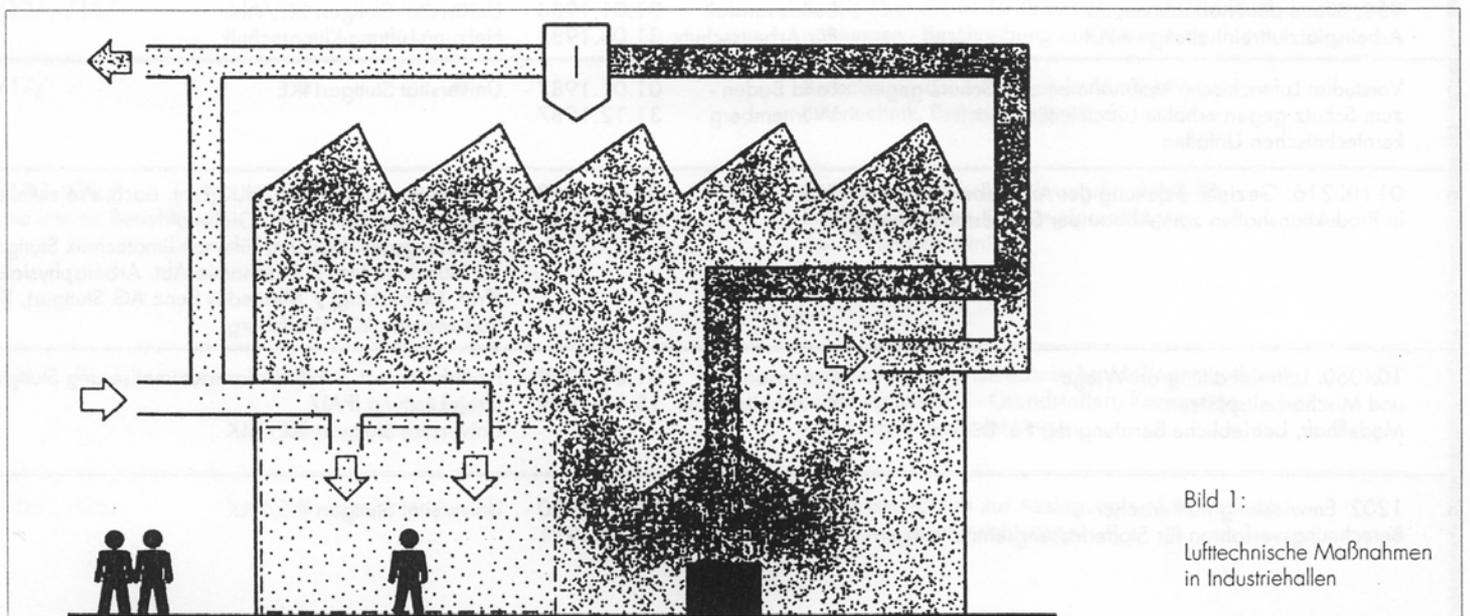


Bild 1:

Lufttechnische Maßnahmen in Industriehallen

## Forschungs- und Entwicklungsprojekte bei HLK Stuttgart

Die unten stehende Tabelle gibt eine Übersicht über Forschungsprojekte, die von der IKE-Abteilung Heizung-Lüftung-Klimatechnik und der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik mit Forschungspartnern durchgeführt wurden. Die Forschungsinhalte sind in Schlagworten angegeben und den Schwerpunkten Arbeitsschutz, Umweltschutz und rationelle Energieverwendung zugeordnet.

Wirksamste und zugleich kostengünstigste Maßnahme zur Arbeitsplatzluftreinhaltung ist das Erfassen der luftfremden Stoffe am Entstehungs- oder Freisetzungsort. In einer Studie (Projekt Nr. 4) sind die in den verschiedenen

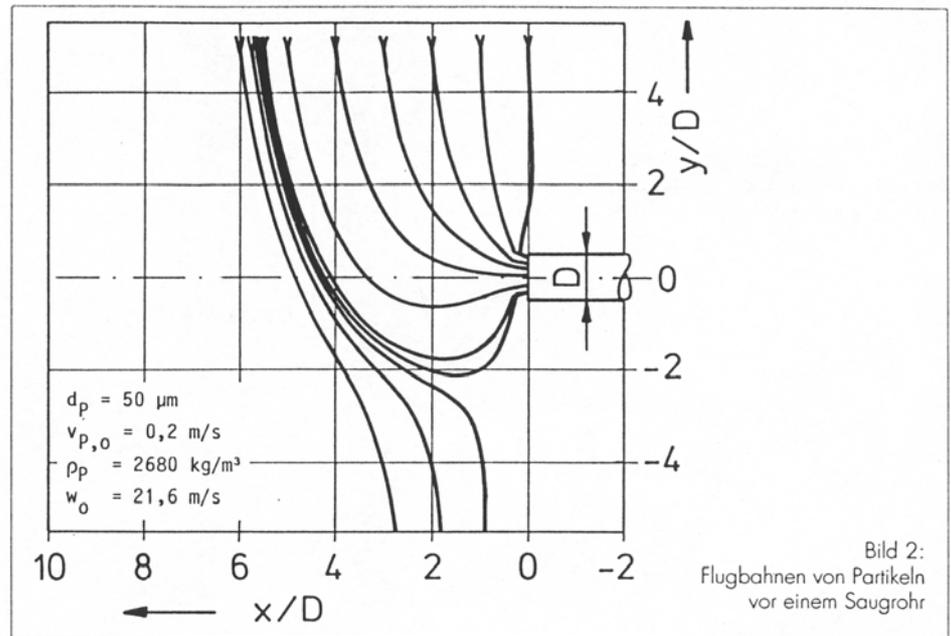
Bereichen der Fertigungstechnik angewandten Bauarten von Erfassungseinrichtungen zusammengetragen. Es werden die Zusammenhänge aufgezeigt zwischen der Stoffentstehung, Stofffreisetzung, Stoffausbreitung einerseits und der Konzeption, Konstruktion und Auslegung wirksamer Erfassungseinrichtungen andererseits. Erfassungseinrichtungen müssen für den jeweils vorliegenden Fall konstruiert und ausgelegt werden; Erfassungseinrichtungen von der Stange sind unzumutbar. Am besten sind Erfassungseinrichtungen, die bereits vom Hersteller in die Produktionseinrichtungen integriert mitgeliefert werden. Das Vorhaben erbrachte zudem, daß bislang noch keine geeigneten Rechenvorschriften zur Auslegung und Bewertung von Er-

fassungseinrichtungen verfügbar sind. Im Vorhaben Nr. 8 werden derzeit solche Grundlagen mit Hilfe numerischer Verfahren erarbeitet. Ziel dieses Vorhabens ist, die Wirkungsweise häufig angewandter Erfassungseinrichtungen aufzuzeigen und anhand von Kennlinien oder einfachen Rechenverfahren Auslegungs- und Bewertungsgrundlagen zur Verfügung zu stellen. Dazu werden das Strömungsfeld und der Stofftransport berechnet. Bild 2 zeigt als Rechenergebnis die Flugbahnen von Partikeln nahe einem sog. Saugrohr. Hierbei wurde für die vollständige Erfassung der Partikel ein Luftstrom berechnet, der nur ca. ein Drittel von dem beträgt, den man mit den immer noch anzuwendenden Näherungsverfahren ermittelt.

## Übersicht über Forschungsvorhaben zur Arbeitsplatzlüftung und zum Umweltschutz

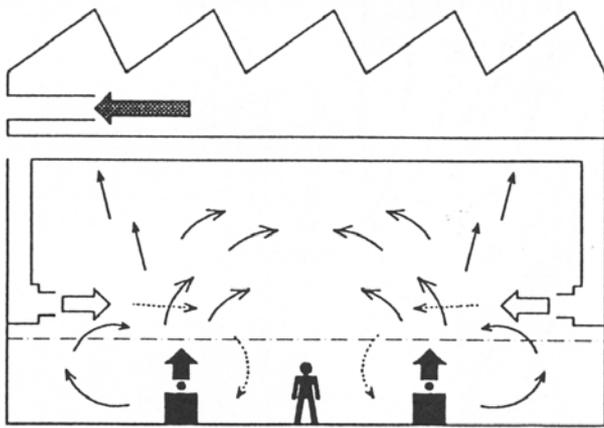
Proj. Nr.	Forschungsthema / Forschungsvorhaben	Auftraggeber / Projektträger	Laufzeit	Bearbeiter
1	ET-5065 A: Reduzierter Energieeinsatz für Raumlufttechnische Anlagen bei Verwendung einer Lüfführung von unten nach oben	BMFT / PLE	01.11.1977 - 31.07.1980	Institutsgemeinschaft Stuttgart e.V. (Prof. Bach, Projektleitung) / Kessler und Luch GmbH, Gießen, / Heinrich Nickel GmbH, Betzdorf, / Schmidt Reuter Ing. Ges. mbH, Köln
2	01 VQ 031: Sorption und Recycling von Schadstoffen aus der Abluft bei der Herstellung von Polyurethan- (PUR-) Weichschaum <u>Unterauftrag:</u> Stofferfassung und Raumlufttechnik	BMFT / DFVLR	01.07.1981 - 30.06.1983	Universität Stuttgart: - Institut für Kunststoffprüfung - Institut für chemische Verfahrenstechnik - IKE/Abt. Heizung-Lüftung-Klimatechnik
3	01 HB 182: Branchenprojekt Tischlereihandwerk. - Entwicklung und modellhafte Realisierung von Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsumgebungseinflüsse - Betriebsprojekt Kuffner <u>Unteraufträge:</u> Entwicklung und Beurteilung der Lufttechnik beim Lackieren	BMFT / DFVLR	01.12.1982 - 31.08.1985	SAPCO GmbH, Düsseldorf u.a. / Universität Stuttgart, IKE/Abt. Heizung-Lüftung-Klimatechnik
4	958: Bilanz der Maßnahmen zur Arbeitsplatzluftreinhaltung - APLR	Bundesanstalt für Arbeitsschutz	01.01.1984 - 31.03.1985	Universität Stuttgart IKE/Abt. Heizung-Lüftung-Klimatechnik
5	Vorstudie: Lufttechnische Maßnahmen zum Schutz gegen erhöhte Luftaktivitäten nach kerntechnischen Unfällen	Land Baden - Württemberg	01.01.1987 - 31.12.1987	Universität Stuttgart IKE
6	01 HK 216: Gezielte Belüftung der Arbeitsbereiche in Produktionshallen zum Abbau der Schadstoffbelastung	BMFT / DLR	01.10.1988 - 31.01.1991	Universität Stuttgart, IKE/HLK (Prof. Bach, Projektleitung) / Kessler und Luch GmbH, Gießen / Forschungsges. Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH / TU München, Inst. f. Ergonomie Abt. Arbeitsphysiologie (Prof. Diebschlag) / Mercedes Benz AG Stuttgart, Sindelfingen / Volkswagen AG, Wolfsburg
7	104060: Luftreinhaltung an Wiege- und Mischarbeitsplätzen - Modellhaft, betriebliche Beratung der Fa. Döllken	Bundesanstalt für Arbeitsschutz	01.01.1989 - 15.11.1989	Fraunhofer Inst. f. Produktionsautomatisierung Stuttgart (Projektleitung IPA) / Universität Stuttgart IKE/HLK
8	1202: Entwicklung numerischer Berechnungsverfahren für Stofferfassungseinrichtungen	Bundesanstalt für Arbeitsschutz	01.01.1990 - 31.12.1991	Universität Stuttgart IKE/HLK

Bei der Raumlüftung zur Belastungsminderung ist die Luftführung von großem Einfluß auf die sich in den Arbeitsbereichen einstellenden Stoffkonzentrationen. Im Projekt Nr. 1 wurden neue Luftführungskonzepte für Büroarbeitsplätze untersucht. Dabei zeigte sich, daß mit der Luftzufuhr im Arbeitsbereich (hier über Fußbodenluftdurchlässe) gegenüber der Mischströmung eine Belastungsminderung von mindestens 20 % erreichbar ist. Noch deutlicher ist Einfluß der Luftführung auf die Arbeitsplatzbelastung in Produktionshallen. Derzeit werden im Projekt Nr. 6 neue Luftführungskonzepte zur gezielten Arbeitsplatzbelüftung entwickelt und erprobt. In Bild 3 sind die Prinzipien eines konventionellen Luftführungskonzeptes (a Tangentiallüftung) drei Kon-

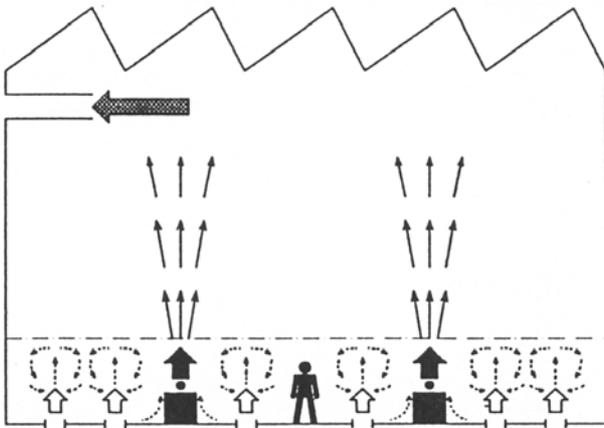


Berichte, Veröffentlichungen des IKE/HLK	Arbeits- schutz	Umwelt schutz	Rationelle Energie- verwendung	Schlagworte
/1/ - /5/	●		●	Luftführung in Büroräumen, Arbeitsplatzlüftung, Luftqualität Energieverbrauch
/6/ , /7/	●	●	●	Stofffassungseinrichtungen zum Arbeitsschutz bei verminderten Luftströmen, Stoffrückgewinnung, Aktivkohlefilter
/8/ - /12/	●	●	●	Stofffassung, Belüftung, Tracergas- und Realgasmessungen
/13/ - /16/	●	●		Studie über die in der Praxis angewandten Stofffassungsein- richtungen - Beschreibung und Bewertung
/17/	●	●		Berechnung der Innenraumkontamination, Filtertechnik, Betriebsstrategien
/18/ - /22/ und interne Berichte	●		●	Entwicklung neuer Luftführungskonzepte für Produktionshallen, Planungsgrundlagen, Ausführungsrichtlinien
/23/ , /24/	●	●	●	produktions- und lufttechnische Maßnahmen beim Umgang mit PVC - Grundstoffen, Konzeption von Erfassungseinrichtungen
/25/ , /26/	●			Rechnerverfahren zur Auslegung und Beurteilung von Erfassungseinrichtungen

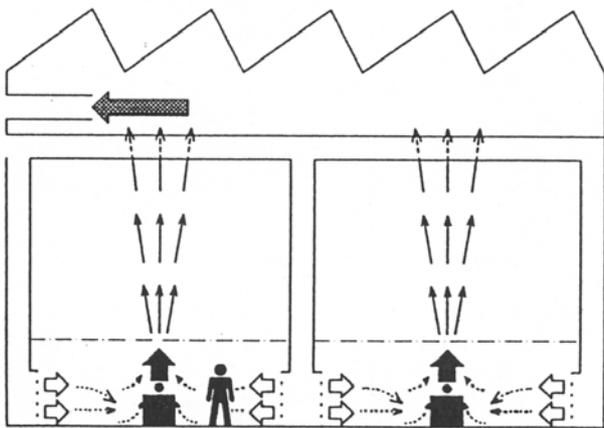
**Bild 3:**  
Lüftführungskonzepte



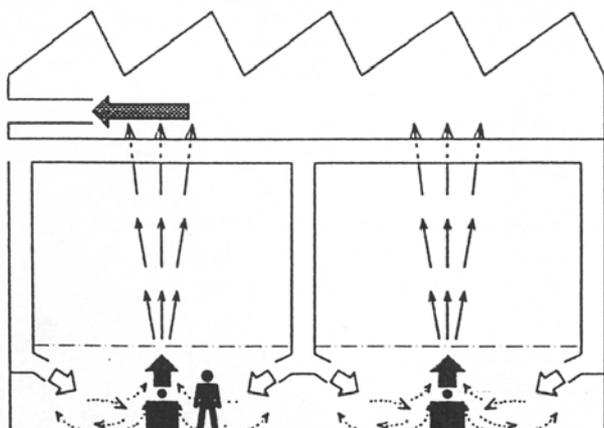
a) Tangentialluftzufuhr



b) Fußbodenluftdurchlässe



c) Impulsarme Luftzufuhr über dem Boden



d) Impulsarme Luftzufuhr in Kopfhöhe

zepten zur gezielten Arbeitsplatzbelüftung (b Fußbodenluftdurchlässe, c impulsarme Luftzufuhr über dem Boden, d impulsarme Luftzufuhr an der Oberkante der Arbeitsbereiche) einander gegenübergestellt. Die bislang erhaltenen Ergebnisse bestätigen die Erwartungen.

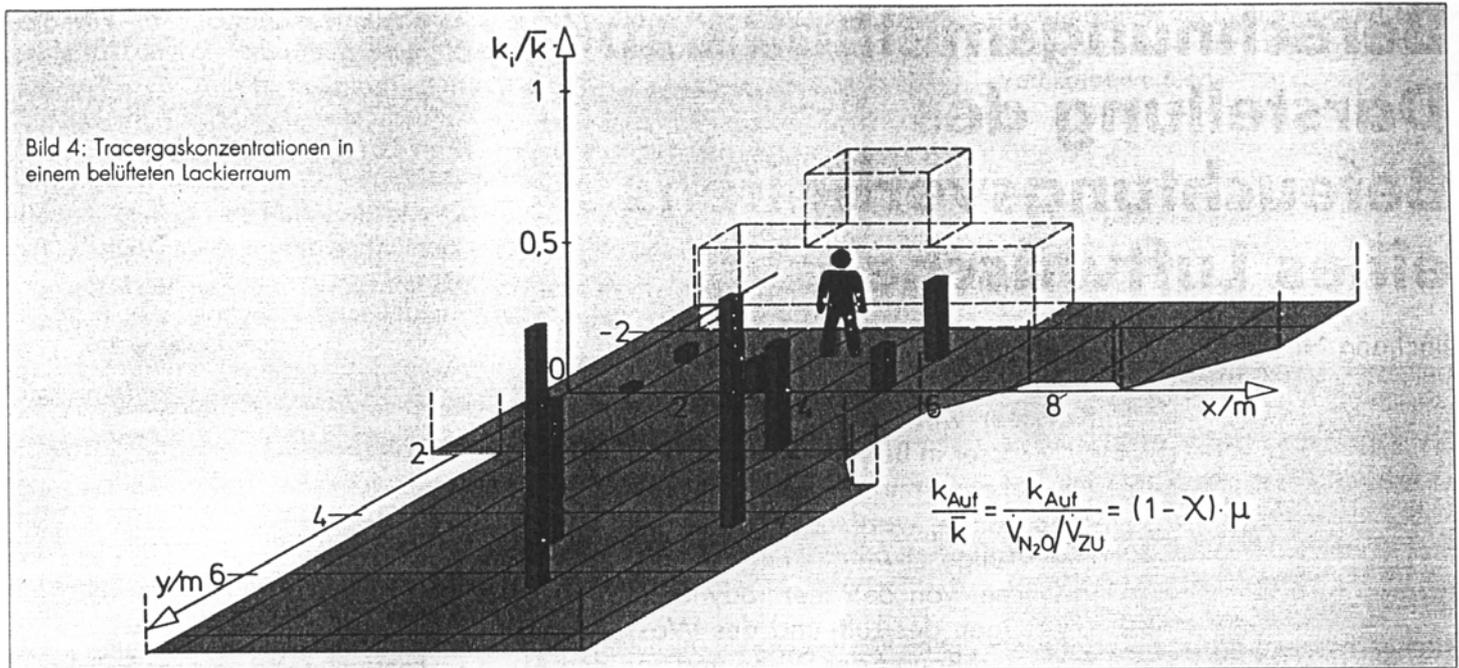
In den Projekten 2, 3 und 7 wurden die Grundlagen auf Praxisprobleme angewandt; u.a. bei der PUR-Weichschaumproduktion, beim Lackieren von Möbeln und bei der PVC-Verarbeitung. Bei Projekt Nr. 2 stand vor allem der Umweltschutz im Vordergrund. Wegen der Kosten und um hohe Abluftkonzentrationen zu erreichen, mußten für den Einsatz einer hochwertigen Abluftreinigungsanlage (Aktivkohlefilter zur FCKW-Rückgewinnung) durch Arbeitsplatzluftreinigungsmaßnahmen erreicht werden, daß der Luftstrom auf ca. 40 % des Istzustandes vermindert werden konnte. Im Lackierraum einer Tischlerei konnten die Stoffkonzentrationen im Arbeitsbereich des Lackierers durch eine arbeitsplatznahe Luftzuführung und durch die Verbesserung der Erfassungseinrichtungen auf ca. 30 % des Wertes gesenkt werden, der sich bei einer konventionellen Mischlüftung einstellt. Bild 4 zeigt Ergebnisse der Tracergasmessungen (örtlich gemessene Konzentrationen bezogen auf die Abluftkonzentrationen). Im Projekt Nr. 7 wurden Erfassungseinrichtungen für den Einsatz bei der PVC-Verarbeitung entwickelt.

Zu den Forschungsarbeiten kommen Gutachten und Beratungen hinzu, mit Themen wie z.B. "Messung der Stoffausbreitung", "Wirkung von Abscheidern", "Beurteilung und Entwicklung von Erfassungseinrichtungen".

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben zeigen, daß mit weiterentwickelter Lufttechnik für Produktionshallen die Anforderung des Arbeitsschutzes und zugleich auch die des Umweltschutzes erfüllt werden können. Die Weiterentwicklung der Erfassungstechnik und der Raumlufttechnik ist notwendig, um die Kosten für die Schutzmaßnahmen in Grenzen zu halten, damit deren Einsatz nicht aus wirtschaftlichen Überlegungen versagt bleibt. Forschung und

Bild 4: Tracergaskonzentrationen in einem belüfteten Lackiererraum



Entwicklung im Bereich der Lufttechnik für Produktionshallen bedeutet, neue Konzepte für Erfassungseinrichtungen und Luftführungen aufzuzeigen und diese sowohl im Labor als auch an Praxisbeispielen zu erproben. Zur Anwendung dieser neuen Prinzipien müssen vor allem die Grundlagen ergänzt und Instrumentarien zur Auslegung und Beurteilung geschaffen werden. Hierzu werden auch weiterhin experimentelle Untersuchungen vorgenommen; zunehmend werden numerische Verfahren entwickelt, mit denen zumindest angenäherte Vorausberechnungen möglich sind.

## Schrifttum

/1/ Detzer, R.: Beitrag über das Verhalten runder Luftfreistrahlen. Diss. Universität Stuttgart, 1972.

/2/ Bach, H.: Ähnlichkeitskriterien bei Raumströmungen. KI 1973, Nr. 9, S. 37/42.

/3/ Bach, H. u. a.: Reduzierter Energieeinsatz für raumlufttechnische Anlagen bei der Verwendung einer Luftführung von unten nach oben. BMFT-Forschungsbericht 82-023, FIZ 9, Karlsruhe 1982.

/4/ Bach, H., R. Detzer, W. Dittes u. R. Mangelsdorf: Einfluß der Luftführungsart auf den Energieeinsatz bei raumlufttechnischen Anlagen. Forschungsvorhaben des BMFT ET-5065 A. HLH 32 (1981) Nr. 6, S. 253/55.

/5/ Dittes, W. u. R. Mangelsdorf: Der Wärmetransport im Raum bei der Luftführung von unten nach oben - Theoretische Ansätze und experimentelle Überprüfung. HLH 32 (1981), Nr. 7, S. 265/71.

/6/ Dittes, W., W. Gans u. G. Kiene: Messung der Stoffemission an einer PUR-Verschäumungsanlage. Zwischenbericht zum Unterauftrag des BMFT-Forschungsvorhabens O1 VQ 031: Sorption und Recycling von Schadstoffen aus der Abluft bei der Herstellung von Polyurethan-(PUR)-Weichschaum (unv.). 1982.

/7/ Dittes, W.: Maßnahmen zur wirksamen Schadstofffassung bei der Polyurethan-(PUR)-Weichschaumherstellung. Schlußbericht zum Unterauftrag des BMFT-Forschungsvorhabens O1 VQ 031: "Sorption und Recycling von Schadstoffen aus der Abluft bei der Herstellung von Polyurethan-(PUR)-Weichschaum". (unver.). 1984.

/8/ Dittes, W.: Belüftung des Oberflächenbehandlungsbereiches von Tischlereibetrieben - Modelluntersuchungen. IKE 7-6, 1983.

/9/ Dittes, W.: Einsatzmöglichkeiten der Spurengas-Meßmethode bei der Untersuchung von Raumluftrömungen. HLH 34 (1983) 8, S. 329/31.

/10/ Dittes, W. u. H. Wolf: Einstellung der Luftdurchlässe und Erprobung der RL-Anlage im Oberflächenbearbeitungsbereich der Tischlerei Kuffner. (unver.) 1985.

/11/ Dittes, W.: Arbeitsplatzluftreinhaltung beim Lackieren in Tischlereibetrieben. DKV-Tagungsbericht. 13. Jg. (1986), Bad Homburg.

/12/ Dittes, W.: Erfassung von Lacknebel und von Lösungsmitteldämpfen und gezielte Belüftung im Lackierbereich einer Tischlerei. Handbuch VDI-Bildungswerk BW 42-38-01 "Heizung und Lüftung von hitze- und schadstoffbelasteten Hallenbauten". Düsseldorf 1988.

/13/ Dittes, W., D. Goetting u. H. Wolf: Arbeitsplatzluftreinhaltung - Erfassungseinrichtungen in der Fertigungstechnik. Fb 438, Wirtschaftsverlag NWV, Bremerhaven 1985, 2. Aufl. 1987.

/14/ Dittes, W., D. Goetting u. H. Wolf: Arbeitsplatzluftreinhaltung - Einrichtungen zur Schadstofffassung. Die Berufsgenossenschaft Nr. 4 (1986), S. 209/13.

/15/ Dittes, W.: Schadstofffassungseinrichtungen. Anforderungen - Bewertung - Bauarten. DKV-Tagungsbericht. 13. Jg. (1986), Bad Homburg.

/16/ Dittes, W.: Schadstoffminderung am Arbeitsplatz durch Absauganlagen und Einkleidungen. Handbuch VDI-Bildungswerk BW 42-38-01 "Heizung und Lüftung von hitze- und schadstoffbelasteten Hallenbauten". Düsseldorf 1988.

/17/ Scholer, W.: Lufttechnische Maßnahmen zum Schutz gegen erhöhte Luftaktivität nach kerntechnischen Unfällen. Vortrag gehalten bei der Tagung der Kern-

technischen Gesellschaft "Strahlenabschirmung und Strahlenschutz in der Kerntechnik". 20./21.06.1988, Stuttgart.

/18/ Bach, H. u. W. Dittes: Raumluftechnik in Industriehallen - Weiterentwickelte Lufttechnik mit Schadstofffassung und gezielter Belüftung. HLH Bd. 37 (1986), Nr. 8, S. 411/18.

/19/ Dittes, W.: Gezielte Belüftung des Aufenthaltsbereiches - Reduktion des Zulufstroms, Verbesserung der Raumlufqualität. Abgrenzbarkeit von Strömungsbereichen. Vortrag gehalten bei der FTA-Arbeitsitzung "Technischer Ausbau" Heidelberg, Okt. 1982 (unver.).

/20/ Dittes, W.: Raumluftechnische Maßnahmen in Produktionsstätten. VDI-Berichte Nr. 655, 1987, S. 71/84.

/21/ Bach, H. u. W. Dittes: Heizung und Lüftung von Industriehallen. Tagungsbericht Tb 153 "Klima am Arbeitsplatz" 21./22.03.90 Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund. Wirtschaftsverlag Bremerhaven 1990.

/22/ Scholer, W.: Das neue Raumlufströmungslabor in Stuttgart". HLH Bd 41 (1990) Heft 7.

/23/ Dittes, W., O. Krockenberger, W. Scholer u. R. Schwarz: Luftreinhaltung an Wiege- und Mischarbeitsplätzen. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Erscheint 1990.

/24/ Biegert, B.: Berechnung und Konzeption von Stofffassungseinrichtungen an Wiege- und Mischarbeitsplätzen. Studienarbeit Universität Stuttgart, 1989 (unver.).

/25/ Baumann, W.: Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes der Luftströmung an Abluftöffnungen mit dem Programmpaket PHOENICS. Studienarbeit Universität Stuttgart, 1986 (unver.).

/26/ Scholer, W.: Erstellen eines Programms zur Flugbahnberechnung von Partikeln. Diplomarbeit Universität Stuttgart, 1986 (unver.).

# Berechnungsmethode zur Darstellung des Befeuchtungsverhaltens eines Luftwäschers

Jinchang Ni



Im Luftwäscher wird Luft unmittelbar mit fein zerstäubtem Wasser in Berührung gebracht. Es überlagern sich bekanntermaßen Stoff- und Wärmeübertragungsvorgänge, wobei der Luftbehandlungsprozeß von der Luftgeschwindigkeit, vom Wasserdruck vor den Düsen, von den thermodynamischen Eintrittsbedingungen des Luft- und des Wasserstroms, von Anzahl und Bauart der Düsen und von den Abmessungen des Luftwäschers abhängt.

Es wird eine vereinfachte Berechnungsmethode zur Darstellung des Befeuchtungsverhaltens abgeleitet. Besonderer Wert wird dabei auf eine einfache Beschreibung der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge an charakteristischen Wassertropfen gelegt.

## Befeuchtungsgrad

Als Bewertungskriterium für das Betriebsverhalten eines Befeuchters wird üblicherweise der Befeuchtungsgrad verwendet. Er stellt das Verhältnis von erreichter zu maximal möglicher Luftzustandsänderung dar. Für den adiabaten Luftbefeuchter wird der Befeuchtungsgrad nach Gleichung (1) definiert:

## Beschreibung des Befeuchtungsvorganges

Zur Beschreibung des Befeuchtungsvorganges werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- gleichmäßige Verteilung der Wassertropfen über dem Kammerquerschnitt,
- homogene Luftgeschwindigkeitsverteilung und dadurch Luftzustandsänderungen nur in Längsrichtung der Kammer.

Zur Beschreibung der Vorgänge wird ein Raumelement  $dl$  betrachtet, (Bild 1). Die Abnahme des Massenstroms aller Wassertropfen und die Zunahme des Wasserdampfes im Luftstrom liefert die Stoffbilanz im Raumelement  $dl$  (Gleichung 2).

Wird ein Stoffaustauschkoeffizient eingeführt, so errechnet sich der Stoffaustauschmassenstrom, entsprechend Gleichung (3)

Gleichung (2) und (3) ergeben, integriert über die gesamte Länge des Wäschers, den Gesamtbefeuchtungsgrad wie in Gleichung (4) definiert.

Der Stoffaustauschkoeffizient ist aus  $Re$  und  $Sc$  berechenbar, wenn vorausgesetzt werden kann, daß die Lewis'sche Beziehung ( $Le = 1$ ) gilt und das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Gesamtdruck gering ist; hierfür geben Ranz und Marshall /1/ die

Gleichung (5) an, wobei die Reynolds-Zahl  $Re$  (6) aus der mittleren Relativgeschwindigkeit des Wassertropfens berechnet wird und  $Sc$  (7) die Schmidt-Zahl bezeichnet.

$D$  und  $d_T$  stellen den Diffusionskoeffizienten und den mittleren Tropfendurchmesser dar. Größere Probleme bereitet es, die Austauschoberfläche  $A_T$  zu bestimmen. Eine genaue Berechnung ist unmöglich; es müssen daher folgende vereinfachende Annahmen getroffen werden:

- Bewegung der Luft und der Wassertropfen nur in Längsrichtung der Befeuchtungskammer,
- kugelförmige Gestalt der Wassertropfen und
- konstanter und unveränderlicher Durchmesser der Wassertropfen.

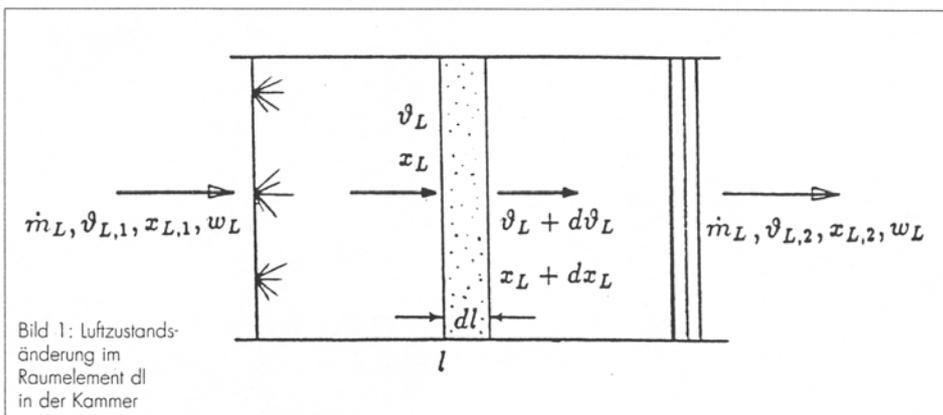
Man kann auch umgekehrt formulieren, daß eine fiktive Oberfläche  $A_T$  unter obigen Bedingungen mit  $m_w$  und einem fiktiven  $d_T$  zusammenhängt. Dadurch läßt sich die Austauschoberfläche nach Gleichung (8) ermitteln.

Die mittlere Verweilzeit  $t$  der Wassertropfen in der Befeuchtungskammer ergibt sich aus Gleichung (9) für die Bewegung eines Einzeltropfens.

Die Widerstandskraft  $F_w$  für den Tropfen ergibt sich im allgemeinen unter Benutzung des Widerstandsbeiwertes  $c_w$  nach Gleichung (10).

Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  ist nach der empirischen Angabe von Reinhart /2/ eine Funktion von  $Re$  (Gleichung 11)

Der Befeuchtungsgrad des adiabaten Luftbefeuchters ergibt sich unter Ver-



wendung von Gleichung (5) und (6) wie in Gleichung (12) dargestellt, wobei  $l_k$  die Kammerlänge und  $w_L$  die Luftgeschwindigkeit sind. Der Betrag des Klammerausdrucks ist für einen bestimmten Wäscher von Wasserdruck, Düsentyp und Luftgeschwindigkeit abhängig.  $k_v$  stellt das Verhältnis der Volumina des zerstäubten Wassers in der Kammer  $V_w$  (Gesamtheit der in der Luft schwebenden Tropfen) und der Befeuchtungskammer  $V_k$  dar (Nicht zu verwechseln mit der Wasser-Luft-Zahl).

### Rechenergebnisse

Mit den oben eingeführten Rechenansätzen lassen sich nun die Änderung der Relativgeschwindigkeit, die Verweilzeit der Tropfen in der Kammer,

die Wassertropfengeschwindigkeit, die Austauschoberfläche an den Wassertropfen, die Austauschkenngroße und schließlich der Befeuchtungsgrad errechnen.

Die im folgenden gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf den Düsentyp EZ 14/7.5 (Firma Lechler) und auf einen Sprühdüsenbefeuchter mit den Abmessungen (0,6 x 0,6 x 1,1) m<sup>3</sup>.

Den zeitlichen Verlauf der Relativgeschwindigkeit bei unterschiedlichem Wasserdruck zeigt Bild 2. Diese Ergebnisse werden zur Berechnung der mittleren Reynolds-Zahl herangezogen.

Bild 3 beschreibt die Abhängigkeit der mittleren Austauschkenngroße von der

Luftgeschwindigkeit und dem Wasserdruck vor den Düsen.

Bild 4 enthält die Abhängigkeit des Befeuchtungsgrades vom Verhältnis der Volumina des zerstäubten Wassers in der Kammer und der Befeuchtungskammer. Dabei wird zusätzlich der Wasserdruck vor den Düsen variiert.

### Zusammenfassung

Ausgehend von vereinfachenden Annahmen über Geometrie und Strömungsverhältnisse in einem Sprühdüsenbefeuchter wird ein vereinfachtes Rechenverfahren abgeleitet.

Insbesondere kann damit die Änderung der Relativgeschwindigkeit, die Verweilzeit der Tropfen in der Kam-

$$(1) \quad \Psi_x = \frac{x_{L,2} - x_{L,1}}{x_{L,f,1} - x_{L,1}}$$

$x_{L,1}$  Luftfeuchtegehalt beim Eintritt in den Wäscher

$x_{L,2}$  Luftfeuchtegehalt beim Austritt aus dem Wäscher

$x_{L,f,1}$  Sättigungsfeuchtegehalt der Luft bei der Kühlgrenztemperatur  $\vartheta_{L,f,1}$

$$(2) \quad -d\dot{m}_{W,dl} = \dot{m}_L \cdot dx_L$$

$$(3) \quad -d\dot{m}_{W,dl} = \sigma \cdot dA_{T,dl} \cdot (x_{LT} - x_L)$$

$$(4) \quad \Psi_x = 1 - e^{-\frac{\sigma \cdot A_T}{\dot{m}_L}}$$

$A_T$  Gesamtfläche aller Tropfen

$\dot{m}_L$  Luftmassenstrom

$$(5) \quad \sigma = \frac{D \cdot \rho_L}{d_T} \cdot (2.0 + 0.6 \cdot Re_T^{\frac{1}{2}} \cdot Sc_T^{\frac{1}{3}})$$

$$(6) \quad Re = \frac{w_{T,rel} \cdot d_T}{\nu}$$

$$(7) \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

$$(8) \quad A_T = \frac{6 \cdot \dot{m}_W \cdot t}{\rho_W \cdot d_T}$$

$$(9) \quad F_w = -m_T \cdot \frac{dw_T}{dt}$$

$F_w$  Widerstandskraft

$m_T$  die Masse eines Einzeltropfens

$w_T$  absolute Geschwindigkeit des Tropfens

$$(10) \quad F_w = c_w \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w_{T,rel}^2 \cdot A_{T,S}$$

$A_{T,S}$  Stirnfläche des Tropfens.

$$(11) \quad c_w = f(Re)$$

$$(12) \quad \Psi_x = 1 - e^{-\frac{6 D l_k k_v}{d_T^2 w_L} \cdot (2.0 + 0.6 Re_T^{\frac{1}{2}} Sc_T^{\frac{1}{3}})}$$

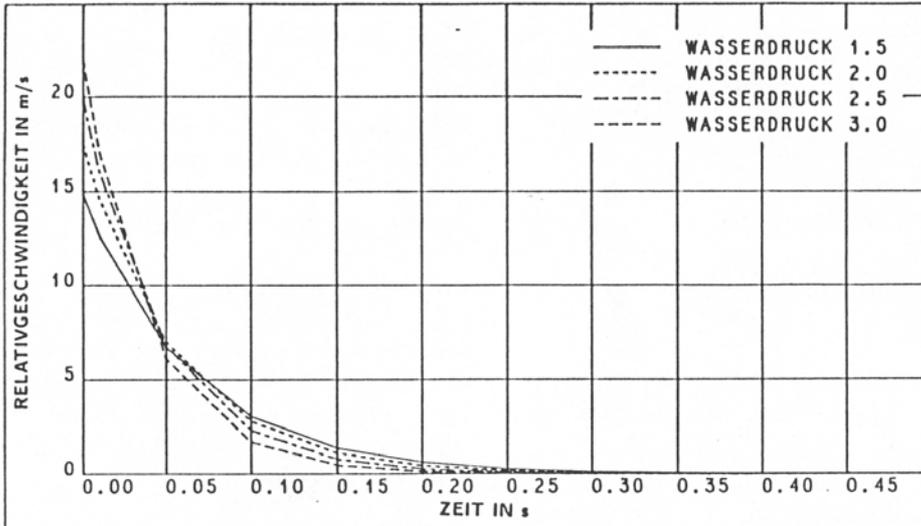


Bild 2: Veränderung der Relativgeschwindigkeit mit der Flugzeit bei unterschiedlichem Wasserdruck vor den Düsen (Gleichstromwäscher).

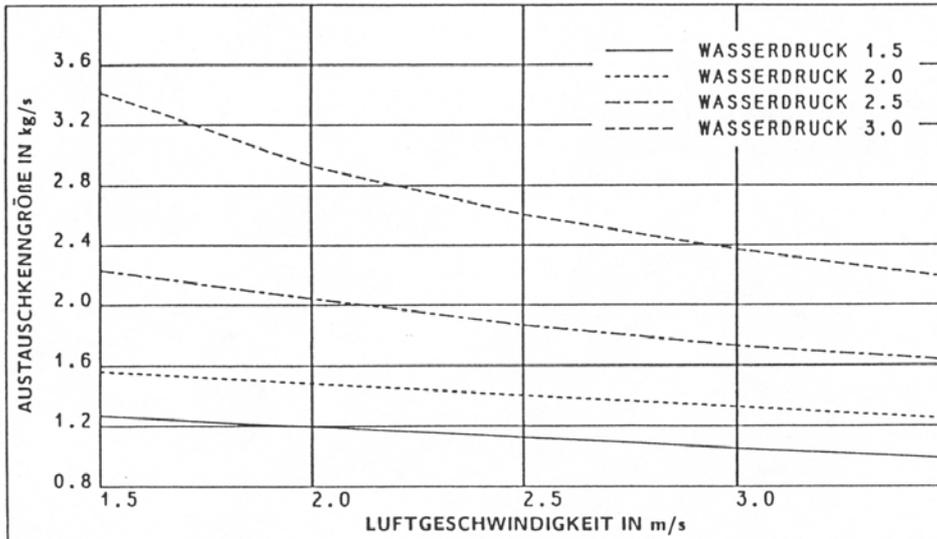


Bild 3: Die Abhängigkeit der mittleren AustauschkenngroÖe von der Luftgeschwindigkeit und dem Wasserdruck vor den Düsen.

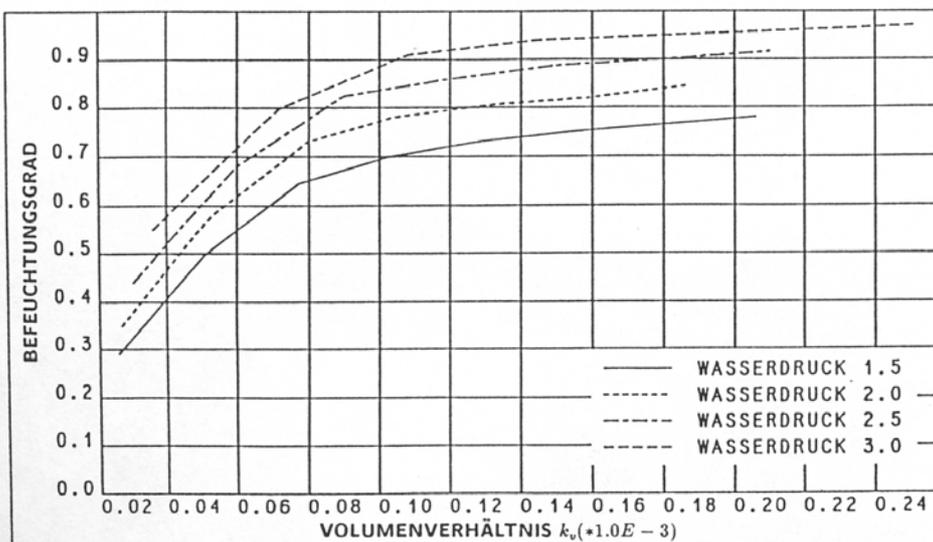


Bild 4: Befeuhtungsgrad in Abhängigkeit von Volumenverhältnis und Wasserdruck.

mer, die Wassertropfengeschwindigkeit, die Austauschoberfläche an den Wassertropfen, die AustauschkenngroÖe und schließlich der Befeuhtungsgrad errechnet werden. Voraussetzung hierzu ist, daß die Abmessungen der Kammer, die Kenndaten der Düse (Wassertropfenspektrum) und die Betriebsbedingungen wie Luftgeschwindigkeit und Wasserdruck vor den Düsen bekannt sind.

Als kennzeichnende GröÖe wird ein neuer Parameter, das Volumenverhältnis  $k_v$ , eingeführt.

Das aufgestellte Rechenmodell soll durch eigene Messungen bestätigt werden.

### Schrifttum

/1/Ranz, W.E. und Marshall, W.R.:  
Evaporation from drops. Chem. Engng. Progr. 48  
(1952) Nr. 3, S.141-146, Nr. 4, S.173-180.

/2/Demirdzic, I., Kaludjeric, P. u. Peric, M:  
Analyse und Berechnung des Wärme- und  
Stoffaustausches im Luftwäscher. HLH 35 (1984)  
Nr. 12, S. 575-584.

### Autoren:

Dipl. Ing. Wolfgang Scholer  
Dipl. Ing. Walter Dittes  
Dipl. Ing. Jinchang Ni  
IKE/HLK  
Dipl. Ing. Gunther Claus  
FGHLK

### Herausgeber:

Verein der Förderer der  
Forschung im Bereich  
Heizung-Lüftung-Klima-  
technik Stuttgart e.V.  
Pfaffenwaldring 6a  
7000 Stuttgart 80  
Tel. 0711 / 685 - 2085/90  
Fax 0711 / 687 - 6056

Redaktion: G. Claus

Grafik u. Layout: S. Crane u.  
R. Wernecke

Die Verantwortung für den Inhalt  
der Beiträge liegt bei den Autoren.

Veröffentlichung, auch auszugs-  
weise, nur mit Genehmigung des  
Herausgebers.