

# RLT-Anlagenauslegung für Produktionshallen

## Ist der Luftwechsel eine Auslegungsgröße für RLT-Anlagen in stoffbelasteten Produktionshallen?

Zur Ermittlung der Luftströme, die bei der Planung von RLT-Anlagen erforderlich sind, wird in vielen Verordnungen und Richtlinien der Luftwechsel als Auslegungsgröße vorgegeben. Fraglich ist, ob dieser auch zur Bemessung lufttechnischer Einrichtungen für stoffbelastete Produktionshallen verwendet werden kann. So ist zu fragen, wozu sich Größen wie der Luftwechsel und ähnliche bezogene Luftströme überhaupt eignen und welches Vorgehen das richtige bei der Planung von RLT-Anlagen für Produktionshallen ist.

Im folgenden wird die Auslegung nach Erfahrungswerten kritisch diskutiert. Vorgestellt wird ein Auslegungsverfahren, das sich an den zu erwartenden Wärme- und Stofflasten und nicht an Erfahrungswerten orientiert.

Dr.-Ing. Marten F. Brunk, Bergisch Gladbach,  
Dipl.-Ing. W. Dittes, Stuttgart, und  
Dipl.-Ing. W. Pfeiffer, St. Augustin

Die Aufgaben von RLT-Anlagen in Produktionshallen sind, die Luft im Arbeitsbereich möglichst frei von luftfremden Stoffen zu halten und klimatisch erträgliche Bedingungen zu schaffen. Bei der Planung von RLT-Anlagen sind die hierzu erforderlichen Luftströme zu ermitteln. Für die Luftströme wird in vielen Verordnungen, Normen und Richtlinien der sogenannte Luftwechsel als Auslegungsgröße vorgegeben. Dieser auf das Raumvolumen bezogene Außenluftstrom wurde nur für Räume verwendet, in denen der Strom der Luftverunreinigungen (Stofflasten) in festem Verhältnis zum Raumvolumen angenommen werden kann, z.B. bei Luftverunreinigungen, die von Personen verursacht werden, und bei Raumarten, in denen das Raumvolumen pro Raumnutzer charakteristisch ist (z.B. bei Versammlungs-, Wohn-, Büroräumen oder Toiletten).

Diese Größe Luftwechsel hat sich in der Praxis so festgesetzt, daß sie gedankenlos auch dort verwendet wird, wo obengenannte Zusammenhänge nicht vorliegen. Dies gilt auch bei RLT-Anlagen für Produktionshallen. Vorrangige Aufgabe in Produktionshallen ist die Minderung produktionsbedingter Stoffbelastungen; dazu sind verschiedene Schutzmaßnahmen bekannt [35]. Als lufttechnische Maßnahmen werden zum einen die direkte Erfassung der freigesetzten luftfremden Stoffe an ihrer Entstehungs- oder Austrittsstelle und zum andern die Verdünnung der nicht erfäßbaren luftfremden Stoffe durch RLT-Anlagen angewandt. Zudem ist zu bedenken, daß gleichartige Produktionsvorgänge, z.B. das Schweißen, sowohl in hohen Hallen beim Stahlbau als auch in niedrigen Werkstätten eines Schlossers abgewickelt werden können.

### Definition, Anwendung und Aussagefähigkeit des Luftwechsels

In DIN 1946 Teil 1 [1] wird der Luftwechsel als auf das Raumvolumen bezogener Luftvolumenstrom definiert. Demnach gilt:

$$\text{Luftwechsel } LW = \frac{\text{Luftvolumenstrom } \dot{V}_L}{\text{Raumvolumen } V_{RA}} \quad (1)$$

In Normen und Richtlinien wird diese bezogene Größe sowohl zur Angabe des Außenluft-Volumenstromes  $\dot{V}_{L,AU}$  als auch allgemein zur Angabe des Zuluft-Volumenstromes  $\dot{V}_{L,ZU}$  verwendet. Man muß also zwei Arten für den Luftwechsel unterscheiden:

$$LW_{AU} = \dot{V}_{L,AU}/V_{RA} \quad (2)$$

$$LW_{ZU} = \dot{V}_{L,ZU}/V_{RA} \quad (3)$$

Daneben werden die Außen- und Zuluftströme noch in anderer Form angegeben. In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Auslegungsgrößen für Luftströme aus einigen Normen und Richtlinien zusammengestellt. In DIN 4701 [2] wird der Mindestluftwechsel nach Gleichung (2) zur Abschätzung des Mindestaußenluftstromes bei der Berechnung des Norm-Lüftungswärmebedarfs (meist für Wohnungen, Büros und ähnlich genutzte Raumarten) eingesetzt. DIN-Normen und VDI-Richtlinien zur Wohnungslüftung ([7], [9], [10] und [15]) geben den Mindestaußenluftstrom zum Teil noch als Luftwechsel vor. Parallel dazu verwendet man jedoch häufig den Außenluftstrom direkt; zumindest in neueren Richtlinien-Ausgaben verzichtet man vollkommen auf die Auslegungsgröße Luftwechsel ([7], [10]). Die Außenluftströme für Büro-, Versammlungs- und ähnliche Raumarten sind in DIN 1946 Teil 2 [3; 4] als personen- oder flächenbezogene Außenluftströme vorgeschrieben. In der neuesten Ausgabe [4] werden zusätzlich Rechengleichungen zur Außenluftstromauslegung nach Stofflasten oder Luftverunreinigungen mitgeteilt. Die Außenluftströme für Krankenhäuser sind in DIN 1946 Teil 4, Ausgabe 4/78 [5], zugleich als Luftströme, flächenbezogene Luftströme und als Luftwechsel aufgeführt; in der neuesten Ausgabe 10/89 [6] gibt es nur noch den flächenbezogenen Außenluftstrom.

Für Labors wird der Außenluftstrom nach [8], [11] und [12] als flächenbezogener Wert vorgegeben. Für die Luftströme, die für Digestorien nachzuliefern sind, sind die Werte auf die Öffnungslänge bezogen. Lediglich der Spülluftstrom für Gasflaschenschränke ist als Luftwechsel aufgeführt.

Für Geschäftshäuser werden in VDI 2082 [13; 14] die Außenluftströme als personen- oder flächenbezogene Werte vorgeschrieben. Die in dieser Richtlinie genannten Luftwechsel gelten als Planungshinweise für die zur Wärmeabfuhr notwendigen Zuluftströme; Definition nach Gleichung (3).

Für Arbeitsräume sind zur Atemlufterneuerung in der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 5 [16] personenbezogene Außenluftströme abhängig von der Arbeitsschwere vorgeschrieben. Für den Fall von Luftverunreinigungen (Gefahrstoffe, belästigende Stoffe) muß der Luftstrom nach den Stofflasten bemessen werden. Dieses Vorgehen wird auch in der Sicherheitsregel ZH 1/140 [17] genannt; dazu wird die Berechnungs-Gleichung angegeben. Bei den Bemessungsgrößen für die lufttechnischen Anlagen wird jedoch auf eine

**Tabelle 1: Übersicht über die Angaben von Außenluftströmen in Normen und Richtlinien**

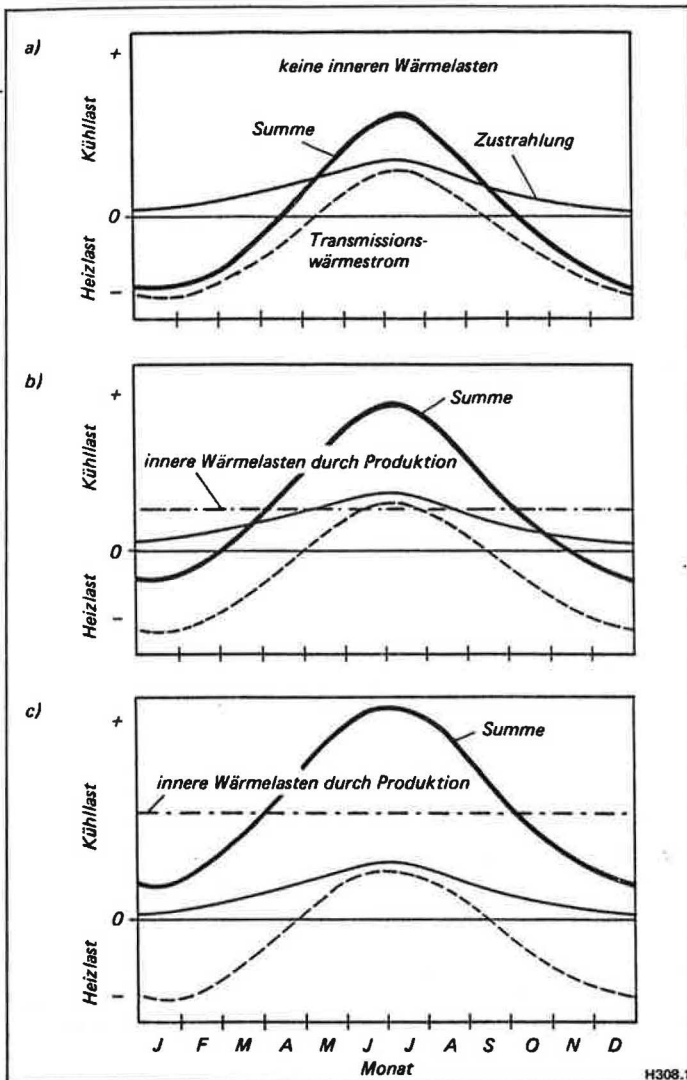
Normen, Richtlinien	Raumart	Angaben für Außen- und Zuluftstrom	Hinweise, Bemerkungen
DIN 1946, Teil 1 [1]	Büroräume, Versammlungsräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Definition des Luftwechsels</li> </ul>	
DIN 4701, Teil 1 [2]	Wohnräume, Versammlungsräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mindest-Außenluftwechsel, falls keine anderen Angaben vorhanden</li> </ul>	Zur Abschätzung des Außenluftstromes bei der Berechnung des Normlüftungs-Wärmebedarfs
DIN 1946, Teil 2 [3] Ausgabe 1/83	Büroräume, Versammlungsräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● personenbezogene Außenluftstraten</li> </ul>	bemessen nach CO <sub>2</sub> -Konzentration, abhängig von der Raumnutzung, Zuschläge für besondere Belastungen, z.B. durch Raucher
DIN 1946, Teil 2 [4] Entwurf 8/91	Büroräume, Versammlungsräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● personen- und flächenbezogene Außenluft-rate als Mindestanforderungen</li> </ul>	Zusätzliche Angaben für Berechnungsverfahren, basierend auf Stofflast/Grenzwert oder Verunreinigungsquelle/Luftqualität
DIN 1946, Teil 4 [5] Ausgabe 4/78	Krankenhäuser	<ul style="list-style-type: none"> <li>● personenbezogene Außenluftstrate</li> <li>● flächenbezogener Außenluftvolumenstrom</li> <li>● Außenluftwechsel</li> </ul>	Auslegung jeweils nach dem höchsten Wert, Zuluftstrom ggf. nach Wärmelasten bemessen
DIN 1946, Teil 4 [6] Ausgabe 12/89	Krankenhäuser	<ul style="list-style-type: none"> <li>● flächenbezogener Außenluftstrom</li> <li>● für OP-Räume nach Auslegungsrechnung</li> </ul>	Zuluftstrom ggf. nach Wärmelasten bemessen
DIN 1946, Teil 6 [7]	Wohnräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Außenluftstrom</li> </ul>	Abhängig von Wohnungsgröße und Raumart
DIN 1946, Teil 7 [8] Entwurf 1/1991	Laboratorien	<ul style="list-style-type: none"> <li>● flächenbezogene Außenluftstrate</li> </ul>	Zusätzliche Hinweise auf andere Verordnungen, Normen und Richtlinien z.B. VDI 2051
DIN 18017, Blatt 3, Ausgabe 8/70 [9]	Bäder und WC ohne Außenfenster	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mindestaußenluftstrom als Außenluft-wechsel</li> <li>● Maximalwerte als Luftvolumenstrom</li> </ul>	
DIN 18017, Blatt 3, Ausgabe 8/90 [10]	Bäder und WC ohne Außenfenster	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mindest-Außenluftvolumenströme</li> </ul>	Maximalwerte für die gesamte Wohnung als Luftwechsel wegen Dichtheit der Gebäude
VDI 2051, Ausgabe 7/78 [11]	Laboratorien	<ul style="list-style-type: none"> <li>● flächenbezogener Außenluftstrom</li> <li>● für Digestorien: längenbezogener Luftstrom</li> </ul>	Luftwechsel als Vergleichswerte
VDI 2051, Ausgabe 6/86 [12]	Laboratorien	<ul style="list-style-type: none"> <li>● flächenbezogener Außenluftstrom</li> <li>● für Digestorien: längenbezogener Luftstrom</li> </ul>	Luftwechsel für den Spülluftstrom in Gasflaschenschränken
VDI 2082, Ausgabe 11/76 [13]	Geschäftshäuser	<ul style="list-style-type: none"> <li>● flächenbezogener Außenluftstrom</li> <li>● Außenluftstraten</li> </ul>	Zuluftwechsel als Planungshinweis zur Wärmeabfuhr
VDI 2082, Ausgabe 11/88 [14]	Geschäftshäuser	<ul style="list-style-type: none"> <li>● flächenbezogener Außenluftstrom</li> <li>● Außenluftstraten</li> </ul>	Zuluftwechsel als Planungshinweis zur Wärmeabfuhr
VDI 2088 [15]	Wohnräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Luftwechsel</li> <li>● für Küchen: Außenluftstrom</li> </ul>	
ASR 5 [16]	Arbeitsräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Außenluftstraten</li> </ul>	Bei Luftverunreinigung Auslegung nach Stofflast
ZH 1/140 [17]	Arbeitsräume	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Berechnungsgleichungen für lastabhängige Auslegung</li> <li>● Außenluftwechsel auch für stoffbelastete Räume</li> </ul>	Keine eindeutige Handlungsanleitung, daß nach Lasten ausgelegt werden muß

Tabelle im Anhang verwiesen. Diese enthält Luftwechselzahlen aus Recknagel/Sprenger/Hönmann [18]. Dort sind diese Erfahrungswerte mit dem Hinweis versehen, daß sie nur als Bemessungsansatz verwendet werden dürfen, sofern die lufttechnischen Anlagen nicht nach den tatsächlich zu erwartenden Wärme- und Stofflasten ausgelegt werden können.

Der Luftwechsel ist jedoch nur bei den Anwendungsfällen als Bemessungsgröße geeignet, wo zwischen dem Raumvolumen

und den den Luftstrom bestimmenden Stofflasten ein fester Zusammenhang besteht, z.B. bei personenabhängigen Stofflasten (CO<sub>2</sub>, Gerüche):

$$\dot{V}_{L, Pers} = \frac{\dot{m}_{S, Pers}}{c_{ARB} - c_{ZU}} \quad (4).$$



**Bild 1: Beispiel für Wärmelasten in unterschiedlich genutzten Produktionshallen**

- a) keine Wärmelasten durch die Produktion (z.B. Endmontage),  
 b) Wärmelasten durch die Produktion (z.B. Werkzeugmaschinen),  
 c) hohe Wärmelasten durch die Produktion (z.B. Gießerei)

Mit fester Belegungsdichte  $A_{\text{Pers}} = A_{\text{RA}}/n_{\text{Pers}}$  gilt für den Außenluftstrom:

$$\dot{V}_{\text{L,AU}} = \frac{\dot{m}_{\text{S,Pers}}}{c_{\text{ARB}} - c_{\text{ZU}}} \cdot \frac{A_{\text{RA}}}{A_{\text{Pers}}} \quad (5)$$

und damit für den Außenluftwechsel:

$$LW_{\text{AU}} = \frac{\dot{m}_{\text{S,Pers}}}{c_{\text{ARB}} - c_{\text{ZU}}} \cdot \frac{1}{A_{\text{Pers}} \cdot h_{\text{RA}}} = \dot{V}_{\text{L,Pers}} \frac{1}{A_{\text{Pers}} \cdot h_{\text{RA}}} \quad (6)$$

Gleichung (6) zeigt, daß bei der Angabe des Luftwechsels die Belegungsdichte statistisch abgesichert sein muß und daß Luftwechselzahlen nur für Räume gleicher Höhe Sinn machen. Diese Verhältnisse gelten allenfalls für Wohnräume, Toiletten und Bäder und zum Teil für Büroräume, obgleich bei letzteren personenbezogene Außenluftstraten einfacher zu handhaben sind. Neuerdings werden von Fanger [19] und [4] jedoch auch für diese Räume nicht nur fest vorgegebene Bemessungsgrößen gefordert, sondern eine Auslegung des Luftstromes nach den tatsächlich zu erwartenden Stofflasten oder Luftverunreinigungen. Selbst in Wohn- und Büroräumen wird die Luftverunreinigung nicht nur vom Menschen, sondern auch von den Raumeinrichtungen und der raumlufttechnischen Anlage verursacht.

Keinen Sinn macht die Angabe des Luftwechsels für Arbeitsräume in Produktionshallen; und zwar wegen der sehr unterschiedlichen Lasten und der sehr unterschiedlichen Raumhöhen bei gleicher Höhe des genutzten Raumbereiches (Arbeitsbereich).

Der Luftwechsel kann somit weder als Auslegungs- noch als Vergleichsgröße für Produktionshallen, Werkstätten und Laboratorien dienen. Die hier benötigten Außenluftströme sind erstens von den erwartbaren Stoff- und Wärmelasten abhängig. Zweitens sind der Umfang der Stofffassung (Absaugung) und der dazu notwendige Erfassungsluftstrom maßgebend. Drittens beeinflusst die Zuluftführung die Höhe des Luftstromes. Die Bemessung der Außen- und Zuluftströme kann demnach nicht nach Erfahrungswerten wie dem Luftwechsel erfolgen, sondern muß aus Wärme- und Stoffbilanzen ermittelt werden.

Die korrekte Auslegung nach den zu erwartenden Lasten nutzt dem Beschäftigten und dem Unternehmer, der zum Schutz seiner Beschäftigten bereits sogenannte Primärmaßnahmen zur Vermeidung der Stofflasten [35] unternommen hat oder hochwirksame Einrichtungen zum direkten Erfassen der luftfremden Stoffe installieren ließ. Die raumlufttechnische Anlage wird dann nach den verbleibenden Restlasten bemessen und nicht nach Luftwechselzahlen. Bei diesem Vorgehen kann auch dargestellt werden, welche Schutzmaßnahmen sowohl hinsichtlich der Belastungsminderung als auch der Kosten Vorteile aufweisen.

## Berechnung der Außen- und Zuluftströme für Produktionshallen

### Wärme- und Stoffströme

Bei Beginn der Anlagenplanung steht meist noch nicht fest, ob die Luftströme (= Auslegungsluftströme für die RLT-Anlage) nach den Wärme- oder den Stofflasten bemessen werden müssen. Deshalb sind zunächst die in einer Produktionshalle entstehenden Wärme- und Stoffströme zu ermitteln. Bei den Wärme- und den Stofflasten muß ggf. von sehr großen Lastschwankungen ausgegangen werden; diese Schwankungen sind sowohl durch die Produktionstechnik als auch durch die Witterung bedingt. Da die Luftströme nach dem Belastungsmaximum auszulegen sind, interessieren nicht nur der Lastmittelwert, sondern der gesamte Zeitverlauf und das Lastmaximum.

Die Wärmelasten ergeben sich aus der Summe der Wärmeströme aus Produktionseinrichtungen  $\dot{Q}_{\text{P}}$ , des Transmissionswärmestromes  $\dot{Q}_{\text{Tr}}$ , der Sonneneinstrahlung  $\dot{Q}_{\text{Str}}$ , der Beleuchtungswärme  $\dot{Q}_{\text{B}}$  und der von den Personen abgegebenen Wärme  $\dot{Q}_{\text{Pers}}$ :

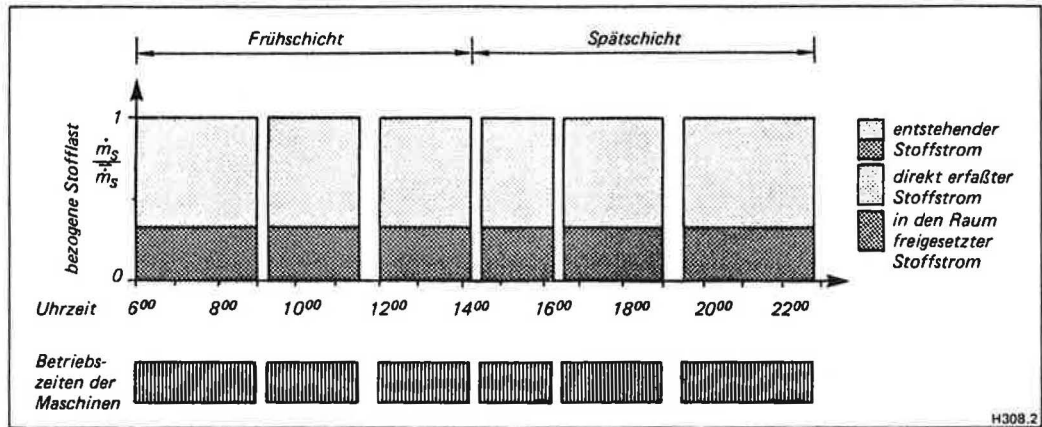
$$\dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_{\text{P}} + \dot{Q}_{\text{Tr}} + \dot{Q}_{\text{Str}} + \dot{Q}_{\text{B}} + \dot{Q}_{\text{Pers}} \quad (7)$$

Die Speichermassen der Maschinen und des Gebäudes können sich verzögernd und dämpfend auf die Gesamtlast auswirken. In Bild 1 aus [20] ist an drei Beispielen gezeigt, daß sich die drei wesentlichen Lastanteile ( $\dot{Q}_{\text{P}} + \dot{Q}_{\text{Tr}} + \dot{Q}_{\text{Str}}$ ) je nach Produktionsart und Gebäudestruktur erheblich unterscheiden können. Die Extremwerte für die Transmissions- und Strahlungswärmeströme können in Anlehnung an [21] und [22] abhängig vom Gebäudeaufbau und den Klimadaten zumeist sicher berechnet werden. In [22] findet man auch Angaben für die von den Personen und der Beleuchtung abgegebenen Wärmeströme. Schwieriger ist die Ermittlung des Wärmestroms von Produktionseinrichtungen  $\dot{Q}_{\text{P}}$ . Er setzt sich zusammen aus der elektrischen Leistungsaufnahme der Antriebe  $P_{\text{el}}$ , der durch Heizmedien oder Brennstoffe zugeführten Wärme  $\dot{Q}_{\text{Th}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{Br}}$  und der durch Kühlmedien abgeführten Wärme  $\dot{Q}_{\text{Kü}}$ . Hinzu kommt der an Erfassungseinrichtungen direkt abgeführte Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{ER}}$  sowie der Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{Mat}}$ , der sich durch den Zu- und Abtransport von Werkstoffen, Werkstücken und Abfallstoffen bei unterschiedlicher Temperatur ergibt.

$$\dot{Q}_{\text{P}} = P_{\text{el}} + \dot{Q}_{\text{TU}} + \dot{Q}_{\text{Br}} + \dot{Q}_{\text{Kü}} + \dot{Q}_{\text{ER}} + \dot{Q}_{\text{Mat}} \quad (8)$$

Diese Wärmeströme lassen sich allenfalls aus Erfahrungswerten, unterstützt durch Messungen an bereits bestehenden Anlagen, ermitteln. In [23; 24] sind einige Anhaltswerte mitgeteilt.





**Bild 2: Beispiel für zeitlich konstante Stofffreisetzung bei ständig wirkender Erfassungseinrichtung (z.B. bei gekapselten Werkzeugmaschinen)**

Ebenso problematisch ist die Ermittlung der entstehenden Stoffströme. Die Stoffströme  $\dot{m}_{s,j}$  müssen für jede Stoffart  $j$  getrennt bekannt sein. Auch hier treten abhängig vom Produktionsverfahren sehr unterschiedliche Zeitverläufe auf. In Bild 2 wird ein Beispiel gezeigt, bei dem der entstehende Stoffstrom konstant ist. Solche Verhältnisse findet man bei Maschinen im Dauerbetrieb (z.B. bei der automatisierten mechanischen Fertigung) vor. Wirken bei solchen Maschinen die Erfassungseinrichtungen gleichbleibend gut, so ist auch der in den Raum freigesetzte Stoffstrom  $\dot{m}_{s,RA,j}$  konstant. Wesentlich komplizierter ist der Lastverlauf, bei nach Art und Ort wechselnden Tätigkeiten, z.B. beim Schweißen an Behältern. Dort ist auch die Wirkung der Erfassungseinrichtung nicht ständig gleich; z.B. von Hand nachzuführende Erfassungseinrichtungen werden nur selten eingesetzt. Man erhält meistens ähnliche Lastverläufe, wie sie in Bild 3 skizziert sind. Die Spitzenwerte für die in den Raum freigesetzten Stoffströme (im Beispiel von Bild 3 um 13 Uhr) entstehen u.a. dann, wenn die Erfassungseinrichtung bei wechselnden Emissionswerten nicht richtig positioniert ist.

Zur Ermittlung der freigesetzten Stoffströme gibt es mehrere Möglichkeiten: Der freigesetzte Stoffstrom kann z.B. abhängig von

den Betriebsparametern der Produktionseinrichtungen z.B. nach [25] gemessen werden. Dieses Verfahren ist jedoch nur praktikabel, wenn die Produktionseinrichtung in einem abgeschlossenen, kontrolliert belüfteten Raum aufgestellt werden kann. Bei manchen Produktionsverfahren, z.B. beim Schweißen, werden Erfahrungswerte in Richtlinien mitgeteilt (siehe z.B. [26]). In vielen Bereichen sind für die durch die Produktion entstehenden Wärme- und Stofflasten bisher noch kaum Erfahrungswerte als Basis für die korrekte Planung der Schutzmaßnahmen veröffentlicht; hier besteht Nachholbedarf.

### Anforderungen an die Bedingungen im Arbeitsbereich

#### Stoffgrenzwerte am Arbeitsplatz

Bei der Abfuhr von Stofflasten aus der Luft am Arbeitsplatz sind Stoffgrenzwerte zu berücksichtigen. Für gesundheitsgefährliche Stoffe sind die MAK- und TRK-Werte [27; 28] heranzuziehen. Diese Grenzwerte sind als Schichtmittelwerte definiert. Bei Stoffen mit MAK-Werten sind neben diesen Mittelwerten zusätzlich maximale Spitzenkonzentrationswerte (Höhe, Dauer und Häufigkeit) angegeben.

### Formelzeichen

$A_{Pers}$	Arbeitsfläche einer Person in $m^2/P$
$A_{RA}$	Fläche des Raumes ( $m^2$ )
$b$	Außenluftanteil $\dot{m}_{L,AU}/\dot{m}_{L,ZU}$
$c_{ARB}$	Stoffkonzentration in der Luft im Arbeitsbereich (mg/kg)
$c_{AU}$	Stoffkonzentration in der Außenluft (mg/kg)
$c_{ER}$	Stoffkonzentration in der Erfassungsluft (mg/kg)
$c_{FO}$	Stoffkonzentration in der Fortluft (mg/kg)
$c_{RA}$	Stoffkonzentration in der Raumlufte (mg/kg)
$c_{UM}$	Stoffkonzentration in der Umlufte (mg/kg)
$c_{ZU}$	Stoffkonzentration in der Zuluft (mg/kg)
$c_j$	Stoffkonzentration der Stoffkomponente $j$ (mg/kg)
$c_{rein}$	Stoffkonzentration in der Reingluft (mg/kg)
$c_{roh}$	Stoffkonzentration in der Rohluft (mg/kg)
$GW$	Grenzwert für die Stoffkonzentration (MAK-, TRK-Werte) in mg/kg
$GW_j$	Grenzwert für die Stoffkomponente $j$ (mg/kg)
$h_{RA}$	Raumhöhe (Hallenhöhe) in m
$I$	Bewertungsindex für die Stoffkonzentration im Arbeitsbereich
$I_{UM}$	Bewertungsindex für die Stoffkonzentration in der Umlufte
$I_{ZU}$	Bewertungsindex für die Stoffkonzentration in der Zuluft
$LW$	Luftwechsel (1/h)
$LW_{AU}$	Außenluftwechsel (1/h)
$LW_{ZU}$	Zuluftwechsel (1/h)
$\dot{m}_{L,AB}$	Abluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_{L,AU}$	Außenluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_{L,ER}$	Erfassungsluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_{L,FO}$	Fortluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_{L,RA}$	Raumabluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_{L,UM}$	Umluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_{L,ZU}$	Zuluft-Massenstrom (kg/s)
$\dot{m}_S$	freigesetzter Stoffstrom (Momentanwert) in kg/s
$\dot{m}_S$	freigesetzter Stoffstrom (Mittelwert) in kg/s
$\dot{m}_{S,j}$	freigesetzter Stoffstrom der Stoffkomponente $j$ (kg/s)

$\dot{m}_{S,ARB}$	im Arbeitsbereich wirksamer Stoffstrom (kg/s)
$\dot{m}_{S,ER}$	direkt erfaßter Stoffstrom (kg/s)
$\dot{m}_{S,RA}$	in den Raum freigesetzter Stoffstrom (kg/s)
$\dot{m}_{S,Pers}$	pro Person freigesetzter Stoffstrom (kg/s)
$n_{Pers}$	Anzahl der Personen ( $P$ )
$P_{el}$	elektr. Leistung von Maschinen (W)
$Q_B$	Beleuchtungswärmestrom (W)
$Q_{Br}$	mit Brennstoff zugeführter Wärmestrom (W)
$Q_{ges}$	Gesamtwärmestrom Raum (W)
$Q_{Kü}$	mit Kühlmittel abgegebener Wärmestrom (W)
$Q_{Mat}$	mit Werkstoffen zu-/abgeführter Wärmestrom (W)
$Q_P$	Wärmestrom von Produktionseinrichtungen (W)
$Q_{Pers}$	Wärmestrom von Personen (W/P)
$Q_{Th}$	durch Heizmittel zugeführter Wärmestrom (W)
$Q_{Tr}$	Transmissionswärmestrom (W)
$Q_{Str}$	Strahlungswärmestrom (W)
$V_{RA}$	Raumvolumen ( $m^3$ )
$V_{L,AU}$	Außenluft-Volumenstrom ( $m^3/s$ )
$V_{L,ZU}$	Zuluft-Volumenstrom ( $m^3/s$ )
$V_{L,Pers}$	personenbezogene Außenluftfrate ( $m^3/s/P$ )
$\dot{V}_L$	flächenbezogener Luftstrom ( $m^3/s/m^2$ )
$t_{ges}$	Gesamtdauer der Stofffreisetzung (s)
$t_N$	Zeitdauer für wirksame Nutzung der Erfassungseinrichtung (s)
$\beta_{min}$	Mindest-Außenluftwechsel (1/h)
$\eta_A$	Abscheidegrad
$\eta_{A,ER}$	Abscheidegrad bei Erfassungsluftreinigung
$\eta_{A,RA}$	Abscheidegrad bei Raumabluftreinigung
$\eta_E$	Erfassungsgrad
$\eta_W$	Wirksamkeit der Erfassungseinrichtung
$\mu$	Belastungsgrad
$\varphi_{AB}$	Raumabluftanteil
$\varphi_{ER}$	Erfassungsluftanteil
$\vartheta_{ARB}$	Lufttemperatur im Arbeitsbereich ( $^{\circ}C$ )
$\vartheta_{ZU}$	Zulufttemperatur ( $^{\circ}C$ )

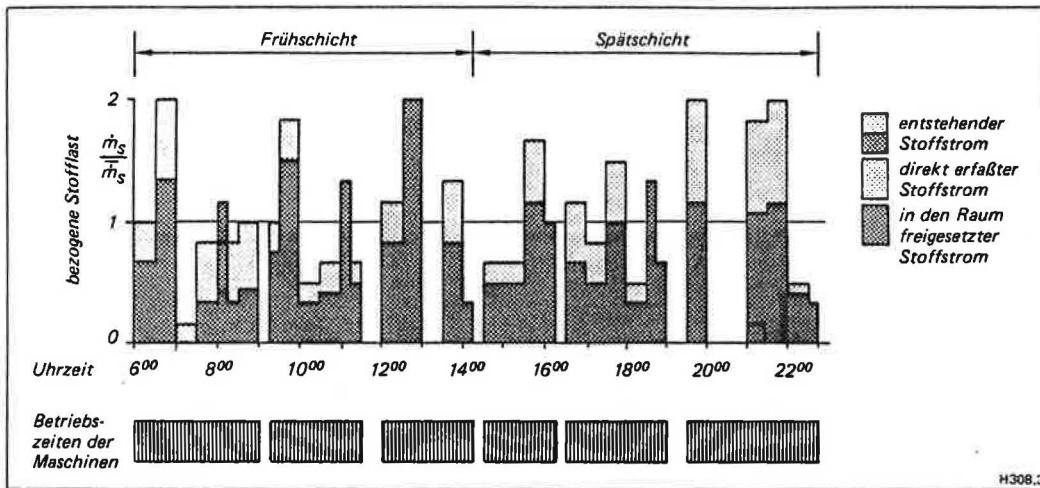


Bild 3: Zeitlich stark schwankende Stofflasten bei nur zeitweise wirkender Erfassungseinrichtung (z.B. Schweißen an Behältern mit von Hand nachzuführenden Erfassungseinrichtungen)

Tabelle 2: Stoffgrenzwerte bei der Reinlufrückführung

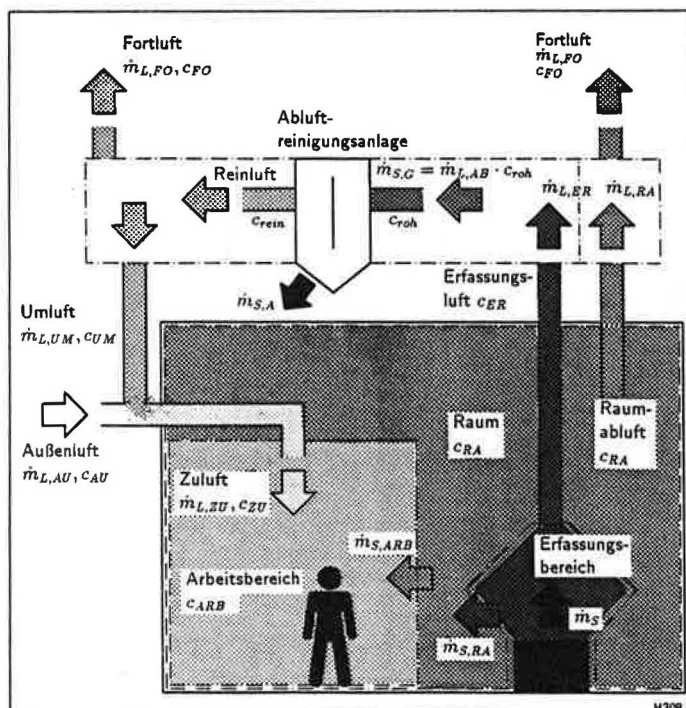
Stoffgruppe	Berechnungsindex		$\frac{\dot{m}_{L,AU}}{\dot{m}_{L,UM}}$
	$I_{UM}$	$I_{ZU}$	
Stoffe mit TRK-Werten	$< 1/10$	$< 1/20$	$\geq 1,0$
Stoffe mit MAK-Werten	$\leq 1/5$	$\leq 1/10^*$	$\geq 0,43$

\*) vorrangige Vorgabe

Bei Unterschreitung der MAK-Werte ist das Gesundheitsrisiko als gering anzunehmen. Dagegen kann bei Stoffen mit TRK-Werten ein Gesundheitsrisiko auch dann nicht ausgeschlossen werden, wenn diese Grenzwerte unterschritten werden. Für diese Stoffe gilt daher das Minimierungsgebot. Das bedeutet, daß die Konzentrationen dieser Stoffe auf das technische machbare Mindestmaß zu begrenzen sind.

Zur Beurteilung der Gefahrstoffkonzentrationen wird der sogenannte Bewertungsindex gebildet:

$$I = \frac{\text{Stoffkonzentration am Arbeitsplatz}}{\text{Grenzwert für diesen Stoff}} = \frac{c_{ARB}}{GW} \quad (9)$$



122 Bild 4: Systemgrenzen, Bezeichnungen für Luft- und Stoffströme

Bei Einhaltung der Grenzwerte ist  $I < 1$ . Treten am Arbeitsplatz mehrere Gefahrstoffe zugleich auf, so ist der Summenbewertungsindex nach [29] zu bilden:

$$I = \sum_j \frac{c_{ARB,j}}{GW_j}; \quad \text{mit } \frac{c_{ARB,j}}{GW_j} > 0,1 \quad (10)$$

und zwar getrennt nach Stoffen mit TRK- und MAK-Werten.

#### Stoffgrenzwerte für die Umluft

Wird zur Wärmenutzung ein Teil der gereinigten Abluft (Absaugluft von Erfassungseinrichtungen) in den Arbeitsraum zurückgeführt (Reinlufrückführung), so ist in dieser Umluft die Stoffkonzentration zu begrenzen (s. Tabelle 2, [30; 31]). Die hierfür zu verwendenden Bewertungsindizes sind für die Umluft:

$$I_{UM} = \frac{c_{UM}}{GW} \quad (11)$$

und für die Zuluft:

$$I_{ZU} = \frac{c_{ZU}}{GW} = \frac{I_{UM}}{\dot{m}_{L,AU}/\dot{m}_{L,UM} + 1} \quad (12)$$

Ist bei Stoffen mit MAK-Werten der Index  $I_{UM} \leq 1/5$  nicht erreichbar, so kann das Verhältnis  $\dot{m}_{L,AU}/\dot{m}_{L,UM}$  mit  $I_{ZU} = 1/10$  aus Gleichung (12) errechnet werden;  $I_{ZU} \leq 1/10$  muß stets eingehalten werden (s. Tabelle 2).

#### Anforderungen an das thermische Umfeld

In Verordnungen, Richtlinien und DIN-Normen [32; 33] sind die Erträglichkeitsgrenzen für die Belastung durch Klima und Arbeit vorgegeben. Diese Grenzen geben an, unter welchen Voraussetzungen das klimatische Umfeld am Arbeitsplatz noch eine Dauerleistung der Beschäftigten ohne Gesundheitsschädigung zuläßt. Demgegenüber fordert der Beschäftigte in zunehmenden Maße verbesserte Bedingungen am Arbeitsplatz. Sogenannte behagliche Bedingungen lassen sich vor allem im Sommer jedoch nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erreichen. Die Anforderungen für den sogenannten Behaglichkeitsbereich sind in [34] aufgeführt. Da die dort zugrunde gelegten Gleichungen im wesentlichen aus Untersuchungen bei den Verhältnissen an Büroarbeitsplätzen gewonnen wurden, ist die Anwendung dieser Vorgaben in Industriehallen zumindest umstritten.

#### Bewertungsgrößen

Bei der Berechnung der Luftströme benötigt man als Qualitätsmaßstäbe für die Stofffassung und die Luftführung folgende Bewertungsgrößen (siehe auch [35]):

Der *Erfassungsgrad* [36] gibt das Verhältnis von direkt erfaßtem zu freigesetztem Stoffstrom an

$$\eta_E = \frac{\dot{m}_{S,ER}}{\dot{m}_S} \quad (13).$$

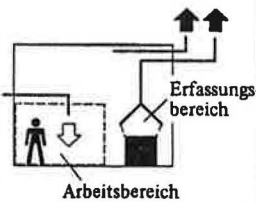
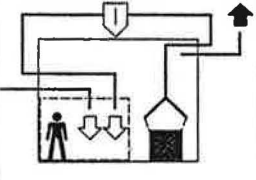
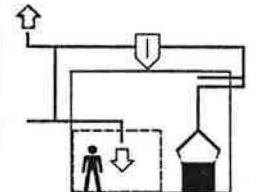
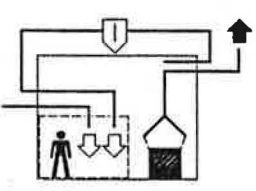
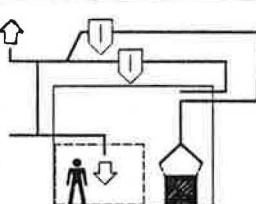
Kann eine Erfassungseinrichtung zum Beispiel bei ortsveränderlichen Stoffquellen nicht während der Gesamtemissionsdauer  $t_{ges}$ , sondern nur während der Nutzzeit  $t_N$  gleich gut wirken, so ist der Erfassungsgrad mit dem Zeitverhältnis  $t_N/t_{ges}$  (*Nutzgrad* [36]) ge-

nannt) zu gewichten. Daraus ergibt sich mit der *Wirksamkeit* der Erfassungseinrichtung [36] die Größe, die in den Bilanzgleichungen einzusetzen ist:

$$\eta_W = t_N/t_{ges} \cdot \eta_E \quad (14).$$

Der *Belastungsgrad* gibt den Anteil des in den Raum freigesetzten Stoffstroms an, der im Arbeitsbereich wirksam wird:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{S,ARB}}{\dot{m}_{S,RA}} = \frac{\dot{m}_{S,ARB}}{(1 - \eta_W) \cdot \dot{m}_S} \quad (15).$$

Schaltbild	Konzentrationen
	$\dot{m}_{L,UM} = 0$ $\dot{m}_{L,AU} = \dot{m}_{L,ZU}$ $\dot{m}_{L,AU} = \dot{m}_{L,ER} + \dot{m}_{L,AB}$ $c_{ARB} = c_{AU} + \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{L,ZU}} \mu (1 - \eta_W)$
	$\dot{m}_{L,AU} = \dot{m}_{L,AB}$ $c_{ARB} = \frac{c_{AU} \cdot b}{B} + \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{L,ZU} \cdot B} [\mu (1 - \eta_W) + \eta_W (1 - \eta_A) + K]$
	$\dot{m}_{L,AU} = \dot{m}_{L,FO}$ $c_{ARB} = \frac{c_{AU} \cdot b}{B} + \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{L,ZU} \cdot B} [\mu (1 - \eta_W) + \eta_W (1 - b)(1 - \eta_A) + K]$
	$\dot{m}_{L,AU} = \dot{m}_{L,ER}$ $c_{ARB} = \frac{c_{AU} \cdot b}{B} + \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{L,ZU} \cdot B} [\mu (1 - \eta_W) + K]$
	$\dot{m}_{L,AU} = \dot{m}_{L,FO}$ $c_{ARB} = \frac{c_{AU} \cdot b}{B^*} + \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{L,ZU} \cdot B^*} [\mu (1 - \eta_W) + \eta_W (1 - b)(1 - \eta_{A,ER}) + K^*]$

Abkürzungen:

$$b = \frac{\dot{m}_{L,AU}}{\dot{m}_{L,ZU}} \quad \varphi_{AB} = \frac{\dot{m}_{L,AB}}{\dot{m}_{L,ZU}} \quad \varphi_{ER} = \frac{\dot{m}_{L,ER}}{\dot{m}_{L,ZU}}$$

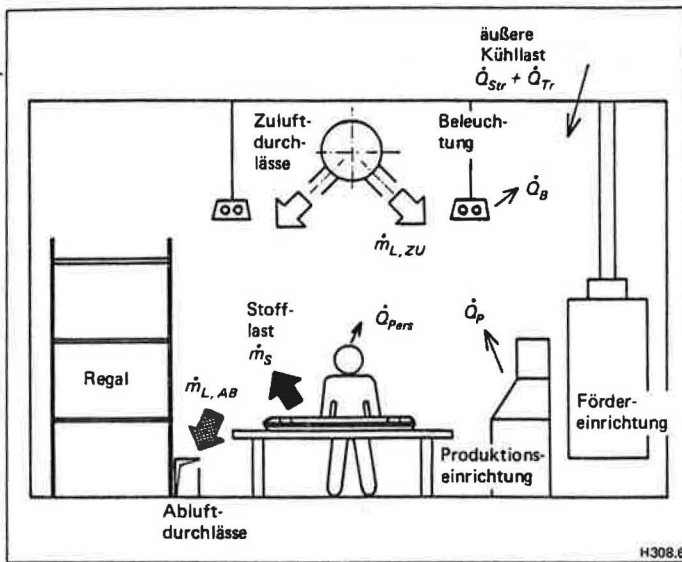
$$B = 1 - (1 - b)(1 - \eta_A) \quad K = (1 - b)(1 - \eta_A)(1 - \eta_W)(1 - \mu)$$

$$B^* = 1 - (1 - b)[\varphi_{AB}(1 - \eta_{A,AB}) + \varphi_{ER}(1 - \eta_{A,ER})]$$

$$K^* = (1 - b)(1 - \eta_W)(1 - \mu)[\varphi_{AB}(1 - \eta_{A,AB}) + \varphi_{ER}(1 - \eta_{A,ER})]$$

**Bild 5: Berechnungsgleichungen für die Stoffkonzentration im Arbeitsbereich bei verschiedenen Systemen zur Reiluftückführung**





**Bild 6: Aufbau und Einrichtungen beim Arbeitsraum zum Reinigen der Kunststoffteile**

Diese Bewertungsgrößen können analog auch für Wärmelasten gebildet werden.

### Berechnungsgleichungen für die Luftströme

#### Wärme- und Stoffbilanzen

Der Zuluftstrom für einen Raum setzt sich aus dem Außenluftstrom und gegebenenfalls aus dem Umluftstrom (rückgeführte Reuluft) zusammen. Maßgebende Auslegungsgrößen für den Zuluftstrom sind die aus dem Raum abzuführenden Wärme- und Stofflasten und die erreichbaren Unterschiede bei den sogenannten Lastkonzentrationen (spezifische Enthalpie, Stoffkonzentrationen) zwischen den im Arbeitsbereich einzuhaltenen Werten und denen in der Zuluft. In Bild 4 sind die Bilanzgrenzen angegeben sowie Luftströme und Stoffströme bezeichnet. Maßgebend für die Auslegung ist der Anteil des an Produktionseinrichtungen freigesetzten Wärme- bzw. Stoffstroms, der in den Arbeitsbereich gelangt. Für den Arbeitsbereich und den Arbeitsraum lassen sich folgende Wärme-, Stoff- und Luftstrombilanzen aufstellen. Für die Luftstrombilanz des Gesamtraumes gilt:

$$\dot{m}_{L,ZU} = \dot{m}_{L,AU} + \dot{m}_{L,UM} = \dot{m}_{L,RA} + \dot{m}_{L,ER} \quad (16)$$

Die Stoffstrombilanz wird für den Arbeitsbereich erstellt:

$$\dot{m}_{L,ZU} \cdot c_{ZU} + \mu (1 - \eta_W) \dot{m}_S = \dot{m}_{L,ZU} \cdot c_{ARB} \quad (17)$$

wobei sich der Stoffstrom in der Zuluft als Summe aus dem mit der Umluft rückgeführten Stoffstrom und dem von außen einströmenden Stoffstrom ergibt:

$$\dot{m}_{L,ZU} \cdot c_{ZU} = \dot{m}_{L,UM} \cdot c_{UM} + \dot{m}_{L,AU} \cdot c_{AU} \quad (18)$$

Letztgenannter Betrag ist meistens Null.

Die Wärmestrombilanzen werden allerdings zweckmäßigerweise für den Arbeitsbereich aufgestellt:

$$\dot{m}_{L,ZU} \cdot h_{ZU} + \mu (1 - \eta_W) \dot{Q}_{ges} = \dot{m}_{L,ZU} \cdot h_{ARB} \quad (19)$$

Maßgebend ist meist der Luftstrom zum Kühlen im Sommer. Für die Zuluftenthalpie kann näherungsweise die Außenluftenthalpie

angesetzt werden ( $\dot{m}_{L,UM} = 0$ ), wenn das Zuluftnetz nicht durch zu warme Raumbereiche geführt wird und die Zuluftkanäle möglichst wärmegeämmt sind. Die Werte für Erfassungs- und Belastungsgrad für Wärmelasten unterscheiden sich meist von denen für Stofflasten.

#### Zu- und Außenluftströme

Die Zu- und Außenluftströme errechnen sich aus den Wärme- und Stoffstrombilanzen. Mit den erwartbaren Stofflasten und der Stoffgrenzwerten gilt ( $c_{AU} = 0$ ):

$$\dot{m}_{L,ZU} = \frac{\mu (1 - \eta_W) \dot{m}_S + \dot{m}_{L,UM} \cdot c_{UM}}{c_{ARB}} \quad (20)$$

und mit dem Bewertungsindex umgeformt:

$$\dot{m}_{L,ZU} = \frac{1}{I} \left[ \frac{\dot{m}_S}{GW} (1 - \eta_W) \mu + \dot{m}_{L,UM} \cdot I_{UM} \right] \quad (21)$$

In Gleichung (21) ist für die Stofflast bei einem Lastverlauf nach Bild 2 der zeitliche Mittelwert einzusetzen und für den Bewertungsindex bei den Stoffkonzentrationen der Wert kleiner 1,0. Damit der Grenzwert dauerhaft sicher unterschritten werden kann, muß bei den freigesetzten Stoffströmen der maximal erwartbare Schichtmittelwert bestimmt werden; bei Belastungsgrad und Erfassungsgrad sind die Minimalwerte einzusetzen, die sich auch unter ungünstigen Voraussetzungen stets noch erreichen lassen. Bei einem Lastverlauf nach Bild 3 ist zu prüfen, ob die in der MAK Werte-Liste geforderten Vorgaben für Spitzenexpositionen eingehalten werden. Maßgebend sind Anzahl der Expositionsspitzen pro Schicht sowie Dauer und Höhe der Lastspitzen. Überschreiten diese Spitzenexpositionen nicht die in [28] stoffartabhängig vorgegebenen Grenzen, so werden für den Stoffstrom der zeitliche Mittelwert und für den Bewertungsindex  $I$  wiederum der Wert kleiner 1,0 eingesetzt. Andernfalls sind die im Maximum freigesetzten Stoffströme anzusetzen; für den Bewertungsindex  $I$  gilt auch hier wiederum der Wert kleiner 1,0. Bei Stoffen mit TRK-Werten ist stets ein Bewertungsindex wesentlich kleiner als eins anzustreben ( $I < 1$ ). Für den Bewertungsindex von Umluft und Zuluft sind die in Tabelle 2 vorgegebenen Werte einzusetzen.

Im allgemeinen sind die Abscheider jedoch in der Lage, den geforderten Wert für  $I_{UM}$  weit zu unterschreiten; dann stellt sich im Arbeitsbereich eine wesentlich niedrigere Stoffkonzentration ein (Bewertungsindex  $I < 1$ ). Um diese Größe abhängig von den ermittelten Luftströmen und der tatsächlichen Wirkung des Abscheiders ermitteln zu können, sind in Bild 5 Gleichungen für verschiedene Anlagenarten angegeben.

Als Wärmelasten sind im allgemeinen die im Sommer maximal erwartbaren Wärmeströme maßgebend. Abhängig vom Luftführungssystem ist zu prüfen, welche Enthalpiedifferenz (entspricht ungefähr der Temperaturdifferenz) zwischen Raum- und Zuluft (= Außenluft) erreicht werden kann. Wird auf eine Zuluftkühlung verzichtet, wird die Zuluftenthalpie etwas höher als die maximale Außenluftenthalpie angenommen. Es gilt für den Zuluftstrom:

$$\dot{m}_{L,ZU} = \frac{\mu (1 - \eta_W) \cdot \dot{Q}_{ges}}{h_{ARB} - h_{ZU}} \quad (22)$$

Raumdaten		Raumlasten	
		Wärmelasten	Stofflasten
Grundfläche	8 · 12 = 96 m <sup>2</sup>	Beleuchtung	$\dot{Q}_B = 1\,920 \text{ W}$
Raumhöhe	5 m	Personen à 120 W	$\dot{Q}_{Pers} = 1\,200 \text{ W}$
Belegung	10 Personen	Maschinen	$\dot{Q}_P = 960 \text{ W}$
$\eta_{Pers}$	0,104 P/m <sup>2</sup>	Äußere Kühllast	$\dot{Q}_{Tr+Str} = 1\,920 \text{ W}$
Raumvolumen	480 m <sup>3</sup>	Gesamt	$\dot{Q}_{ges} = 6\,000 \text{ W}$
			$q_{ges} = 62,5 \text{ W/m}^2$
			200 Stoßstangen/h
			40 g Isopropanol pro Stoßstange
			$\dot{m}_S = 8\,000 \text{ g/h}$
			$GW_{ISOPROPANOL} = 400 \text{ ppm}$
			$= 980 \text{ mg/m}^3$

**Tabelle 3: Raumdaten und Raumlasten zum Rechenbeispiel**

**Tabelle 4: Vorgaben und Ergebnisse der Auslegungsrechnung für den Außenluftstrom**

Auslegung nach	Wärmelast	Stofflast ohne Erfassungseinrichtungen	Stofflast mit Erfassungseinrichtungen	Außenluft Luftrate ASR 5 [16]	Luftwechsel Werte aus [17; 18] *)
Auslegungsgröße	$\dot{Q}_K = 6\ 000\ \text{W}$ $(\dot{q}_{\text{ARB}} - \dot{q}_{\text{ZU}})_{\text{max}} = 6\text{K}$	$m_s = 8\ \text{kg/h}$ $\text{GW} = 400\ \text{ppm}$ $= 980\ \text{mg/m}^3$	$m_s = 8\ \text{kg/h}$ $\text{GW} = 400\ \text{ppm}$ $= 980\ \text{mg/m}^3$	$\dot{V}_{\text{L,Pers}} = 40\ \text{bis}\ 60\ \text{m}^3/\text{hP}$	Werkstätte: $LW_{\text{AU}} = 3\ \text{bis}\ 6\ 1/\text{h}$ Lackiererei: $LW_{\text{AU}} = 10\ \text{bis}\ 30\ 1/\text{h}$ Beizraum: $LW_{\text{AU}} = 5\ \text{bis}\ 15\ 1/\text{h}$
Randbedingungen	$\mu = 1,0$ $\eta_{\text{W}} = 0$	$\mu = 1,0$ $\eta_{\text{W}} = 0$ $c_{\text{AU}} = 0$	$\mu = 1,0$ $\eta_{\text{W}} = 0$ $c_{\text{AU}} = 0$	$n_{\text{Pers}} = 10$	$\dot{V}_{\text{RA}} = 480\ \text{m}^3$
Außenluftvolumenstrom $\text{m}^3/\text{h}$	3 000	8 163	4 082	400 bis 600	1 440 bis 14 400
Flächenbezogener Außenluftstrom $\text{m}^3/\text{hm}^2$	31	85	42,5	4,2 bis 6,3	15 bis 150

\*) Anwendungsfall nicht spezifiziert

Für die Auslegung der raumluftechnischen Einrichtungen ist der Luftstrom maßgebend, der nach den vorgenannten Gleichungen (21) oder (22) am größten ist. Es ist jedoch zu prüfen, ob mit dem dabei ermittelten Außenluftstrom auch die Erfassungsluft oder die Reaktionsluft für chemische Prozesse nachgeliefert werden kann, und ob die Atemlufterneuerung nach [16] möglich ist.

### Beispiel für die Ermittlung der Auslegungsluftströme

In einem Arbeitsraum werden Kunststoffstoßstangen von Automobilen für die nachfolgende Lackierung gereinigt und entfettet. Dabei werden die Kunststoffteile von Hand mit einem Tuch abgewischt, das mit Isopropanol getränkt ist. Der Raumschnitt mit den Einrichtungen ist in *Bild 6* skizziert. In *Tabelle 3* sind die Raumdaten, die Raumbelastung und die Raumlasten für Wärme und Stoffe angegeben. Dazu wurden die Wärmelasten aus der Kühllastrechnung nach VDI 2078 [22] bestimmt. Die freigesetzten Stoffströme lassen sich bei diesem Anwendungsfall einfach bestimmen, da der Verbrauch an Reinigungsmitteln registriert wird und man davon ausgehen kann, daß das gesamte verbrauchte Isopropanol während der Bearbeitung oder beim anschließenden Zwischenlagern der Kunststoffteile im Raum verdampft.

Die Auslegungsluftströme werden im folgenden nach vier Verfahren ermittelt. Zum einen nach der Wärmelast nach Gleichung (22). Zum zweiten nach der Stofflast, Gleichung (21). Des weiteren wird der Mindest-Außenluftstrom nach den in der Arbeitsstättenrichtlinie [16] vorgegebenen Außenluftraten bestimmt. Die berechneten Außenluftströme (s. *Tabelle 4*) werden mit dem Außenluftstrom verglichen, der sich nach in [18] vorgegebenen Luftwechselzahlen ergibt. Allerdings ist dieser Anwendungsfall dort nicht genau spezifiziert. Bei den Berechnungen nach Raumlasten wurde ein Luftführungssystem zugrunde gelegt, das im gesamten Raum eine Mischströmung hervorruft; der Belastungsgrad ist somit mit eins anzunehmen. Für die Stoffabfuhr werden zwei Fälle betrachtet:

Im Fall a) werden die Arbeiten ohne den Einsatz einer Erfassungseinrichtung ausgeführt (wie in *Bild 6* dargestellt). Trotz der am Boden angeordneten Abluftdurchlässe – Isopropanol hat eine doppelt so hohe Dichte wie Luft – muß man hierbei von einer vollständigen Durchmischung der freigesetzten Stoffe mit der Raum- und der Zuluft rechnen.

Im Fall b) haben die Beschäftigten Arbeitstische mit Erfassungseinrichtungen zur Verfügung; d.h., daß die beim Bearbeitungsvorgang freigesetzten Isopropanol-Dämpfe direkt erfaßt werden können. Die Wirksamkeit der Erfassungseinrichtung wird mit  $\eta_{\text{W}} = 0,5$  abgeschätzt.

Die Ergebnisse aus *Tabelle 4* zeigen, daß der Außenluftstrom in diesem Anwendungsfall nach den Stofflasten ausgelegt werden

muß. Auch im Fall b) ist der zur Verdünnung der nicht direkt erfaßten luftfremden Stoffe notwendige Zuluftstrom größer als der zur Abfuhr der Wärmelast. Der nach dem Luftwechsel ermittelte Außenluftstrom liefert Werte, die nicht zuordenbar sind. Der große Nachteil der Auslegung nach der Größe Luftwechsel zeigt sich

**Tabelle 5: Erfahrungswerte für flächenbezogene Luftströme in der Automobilindustrie [38]**

	Außenluftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ ]	Zuluftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ ]
Lager	5	10
Montagehalle, Werkstatt	10	20
Mechanische Fertigung	12 bis 35	25 bis 35
Kunststoffteilefertigung	40 bis 60	40 bis 60
Gießerei	> 100	> 100

auch nach folgender Überlegung: Würde dieser Produktionsvorgang in einer mehr als doppelt so hohen Halle vorgenommen, hätten sich aus den Luftwechselzahlen doppelt so hohe Außenluftströme ermitteln lassen. Bessere Vergleichswerte als die Luftwechselzahlen sind flächenbezogene Zu- und Außenluftströme. Diese Werte sind ebenfalls in *Tabelle 4* angegeben. Zum Vergleich sind in *Tabelle 5* Erfahrungswerte aus der Automobilindustrie genannt. Auch dieser Vergleich zeigt, daß die Erfahrungswerte zwar in der richtigen Größenordnung liegen, daß aber auch damit der belastungsmindernde Einfluß von Erfassungseinrichtungen nicht erkannt wird. [H 308]

### Literaturangaben

- [1] DIN 1946, Teil 1: Raumluftechnik, Terminologie und graphische Symbole. Oktober 1988.
- [2] DIN 4701, Teil 1: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. März 1983.
- [3] DIN 1946, Teil 2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen. Januar 1983.
- [4] DIN 1946, Teil 2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen. Entwurf August 1991.
- [5] DIN 1946, Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Krankenhäusern. April 1978.
- [6] DIN 1946, Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Krankenhäusern. Dezember 1989.
- [7] DIN 1946, Teil 6: Raumluftechnik; Lüftung von Wohnungen, Anforderungen. Ausführung, Prüfung. Entwurf November 1989.
- [8] DIN 1946, Teil 7: Raumluftechnik, Raumluftechnische Anlagen für Laboratorien. Entwurf Januar 1991.
- [9] DIN 18017, Blatt 3: Lüftung von Bädern und Spülaborten ohne Außenfenster mit Ventilatoren. August 1970.
- [10] DIN 18017, Blatt 3: Lüftung von Bädern und Spülaborten ohne Außenfenster mit Ventilatoren. August 1990.



[11] VDI 2052: Raumlufttechnik in Laboratorien. Juli 1978.  
 [12] VDI 2052: Raumlufttechnik in Laboratorien. Juni 1986.  
 [13] VDI 2082: Lüftung von Geschäftshäusern und Verkaufsstätten. November 1976.  
 [14] VDI 2082: Raumlufttechnik für Geschäftshäuser und Verkaufsstätten. Dezember 1988.  
 [15] VDI 2088: Lüftungsanlagen für Wohnungen. Dezember 1976.  
 [16] Arbeitsstättenrichtlinie ASR 5: Lüftung. Bekanntmachung des BMA vom 22. 8. 79.  
 [17] ZH1/140: Sicherheitsregeln für Anlagen zur Luftreinhaltung am Arbeitsplatz. Carl Heymanns Verlag, Köln.  
 [18] Recknagel, Sprenger, Hönnmann: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 90/91. München, Verlag Oldenbourg.  
 [19] Fanger, O. P.: Ein neues Komfortmodell für Raumluftqualität. KI 1990 Nr. 7/8, S. 315/317.  
 [20] Bach, H., und W. Dittes: Heizung und Lüftung von Industriehallen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Tagungsbericht Tb 53 „Klima am Arbeitsplatz“, Wirtschaftsverlag NW 1990, S. 113/28.  
 [21] DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Teil 1: Grundlagen der Berechnung, Teil 2: Tabellen, Bilder, Algorithmen.  
 [22] VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume.  
 [23] Korneli, E.: Berechnung der inneren Wärmelast aus nutzungsbedingter Maschinenbelastung. Luft- und Kältetechnik 22 (1986) 3, S. 139/41.  
 [24] Korneli, E.: Die innere nutzungsbedingte Wärmelast. Luft- und Kältetechnik 25 (1989) 2, S. 68/71.  
 [25] DIN 33891: Bestimmung der Staubemissionsrate, Basisverfahren.  
 [26] VDI 2084: Lüftung von Schweißwerkstätten. Entwurf 2/91.  
 [27] TRGS 102: Technische Richtkonzentrationen (TRK) für gefährliche Stoffe. Carl Heymanns Verlag, Köln.  
 [28] TRGS 900: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und biologische Arbeitsstoffgrenzwerte der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsgefährlicher Arbeitsstoffe der DFG, MAK-Werte-Liste. Carl Heymanns Verlag, Köln.  
 [29] TRGS 403: Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz. Carl Heymanns Verlag, Köln.  
 [30] Pfeiffer, W.: Auswirkungen der Reinfluftrückführung auf die Raumkonzentrationen. Staub-Reinhaltung der Luft 50 (1990), S. 167/69.  
 [31] TRGS 560: Luftrückführung bei Umgang mit krebserzeugenden Gefahrstoffen. Carl Heymanns Verlag, Köln.  
 [32] DIN 33403; Teil 3: Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung.  
 [33] Verordnung über Arbeitsstätten, Arbeitsstättenverordnung (Arbeitsstätt.V) vom 20. 3. 1975, BGBl. I 1975, Seite 729.  
 [34] ISO/DIN 7730: Gemäßigtes Umgebungsklima, Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.  
 [35] VDI 2262: Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz – Minderung der Exposition durch luftfremde Stoffe, Blatt 1: Allgemeine Anforderungen, Entwurf April 1990, Blatt 3: Lufttechnische Maßnahmen. Gründruck erscheint demnächst.  
 [36] Pfeiffer, W.: Lüftung in Schweißhallen, Staub-Reinhaltung der Luft 48 (1988), S. 113/117.  
 [37] Dittes, W.: Raumlufttechnik in Industriehallen, Grundlagen, Auslegung, Luftführung, Staub-Reinhaltung der Luft 51 (1991), S. 77/81.  
 [38] Brunk, M. F.: Lufttechnik in Industriehallen. VDI-Bericht 799, Luftfremde Stoffe am Arbeitsplatz – Einflüsse auf die Umgebung. VDI-Verlag 1991.

**Temperaturen und Gradtage von 50 Orten Deutschlands für Oktober, November und Dezember 1991**

Auf der Basis einer mittleren Raumtemperatur von 20 °C und einem Tagesmittel der Lufttemperatur von 15 °C entsprechend der Neuausgabe der VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 „Wirtschaftlichkeitsberechnung von Wärmeverbrauchsanlagen; betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen“. Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes, Zentralamt, Offenbach a. M.

Stationen	Höhe über NN	Oktober 1991			November 1991			Dezember 1991		
		z	tz	Gt	z	tz	Gt	z	tz	Gt
Aachen	202	31	10,3	302	30	5,9	424	31	3,6	509
Augsburg-Mühlhausen	461	31	7,3	395	30	3,1	508	31	-1,8	675
Bamberg	239	31	7,6	384	30	3,8	487	31	-0,7	641
Berlin-Dahlem	51	31	9,0	342	30	4,7	460	31	1,7	567
Blankenrath	400	31	7,9	376	30	3,7	490	31	0,7	600
Braunlage	607	31	6,1	432	30	2,4	529	31	-0,6	637
Bremen Flughafen	4	31	9,1	337	30	4,8	456	31	2,9	530
Bremerhaven	7	31	9,9	314	30	5,1	446	31	3,3	517
Buchen, Kr. Neckar-Odw.	350	31	7,3	393	30	3,1	508	31	-0,3	630
Coburg	337	31	7,8	378	30	3,6	493	31	-0,9	647
Eriskirch-Mariabrunn	408	31	8,1	367	30	4,0	481	31	-0,3	629
Essen-Bredenei	152	31	10,1	308	30	5,5	436	31	3,1	523
Frankfurt/M. Flughafen	112	31	9,1	338	30	4,8	455	31	1,1	585
Frankfurt/M. Palmengarten	107	31	9,3	332	30	5,4	440	31	1,7	567
Freiburg i. Br.	269	31	10,1	307	30	6,0	420	31	1,5	573
Garmisch-Partenkirchen	719	31	6,5	419	30	1,1	568	31	-3,7	736
Hamburg-Fuhlsbüttel	13	31	9,3	332	30	4,9	453	31	2,6	540
Hamburg-Wandsbek	19	31	9,0	340	30	5,0	451	31	2,8	535
Hannover-Langenhagen	53	31	8,8	346	30	4,7	459	31	2,3	548
Hersfeld, Bad	212	31	8,3	362	30	4,4	467	31	0,7	600
Hilgenroth	290	31	8,6	352	30	3,9	484	31	0,9	592
Hof-Hohensaas	567	31	6,5	419	30	2,0	539	31	-1,5	668
Karlsruhe	112	31	9,8	315	30	5,1	448	31	1,1	586
Kassel	231	31	8,7	351	30	4,0	479	31	1,0	588
Kiel-Holtenau	27	31	9,0	342	30	4,9	452	31	2,8	533
Kissingen, Bad	262	31	7,7	381	30	3,9	483	31	-0,4	631
Köln-Wahn Flughafen	92	31	9,8	317	30	5,3	440	31	2,7	538
Kreuznach, Bad	159	31	8,7	351	30	4,3	471	31	1,0	588
Lingen	21	31	9,5	324	30	5,2	443	31	3,3	517
Lüdenscheid	444	31	8,3	361	30	4,1	478	31	1,5	572
Mainburg	413	31	6,5	417	30	2,8	517	31	-1,7	672
München-Riem	527	31	7,3	394	30	2,8	517	31	-1,8	677
Münster	62		0,0			0,0			0,0	
Neustadt/Weinstraße	125	31	9,3	333	30	4,9	454	31	1,4	578
Nördlingen	425	31	7,0	403	30	3,2	503	31	-1,3	661
Nürnberg	627	31	6,7	411	30	2,7	520	31	0,1	616
Nürnberg-Fischbach	348	31	7,5	388	30	3,6	491	31	-0,6	639
Ohringen	276	31	8,3	363	30	4,5	465	31	0,3	611
Passau-Oberhaus	409	31	8,0	372	30	2,8	515	31	-2,1	686
Regensburg	366	31	7,4	391	30	3,0	512	31	-1,3	660
Saarbrücken-St. Johann	193	31	9,6	323	30	5,2	444	31	2,0	559
Salzfluren, Bad	98	31	9,4	328	30	5,2	444	31	2,6	539
Schwesing	26	31	8,4	359	30	4,7	459	31	2,6	540
Stuttgart Schnarrenberg	314	31	9,0	342	30	4,8	456	31	1,0	589
Trier	144	31	9,5	325	30	5,0	449	31	1,8	564
Ulm	522	31	6,9	408	30	2,8	518	31	-1,7	671
Villingen-Schwenningen	720	31	6,6	416	30	2,1	536	31	-2,1	686
Weiden	438	31	7,4	390	30	2,8	515	31	-1,7	673
Weilburg	183	31	8,5	355		0,0			0,0	
Würzburg	268	31	8,1	370	30	3,8	486	31	0,1	618

126 z = Heiztage tz = Mittlere Temperatur der Heiztage Gt = Gradtage