

# BELÜFTUNG VON FARBSPRITZKAMMERN

Von

J. GRUBER und M. BLAHÓ

Lehrstuhl für Strömungslehre, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 25. April 1970)

## Belüftung von Farbspritzkammern

Der Farbenauftrag auf Fahrzeuge und andere Gegenstände mit Farbspritzpistolen wird heute schon meist in belüfteten Farbspritzkammern ausgeführt. Das Maß der Belüftung von Farbspritzkammern wird durch den Umstand bestimmt, daß der Werktätige auch ohne Atemschutzgerät keine für die Gesundheit schädliche Menge von den Lösemitteldämpfen einatme. Die Beseitigung der Explosionsgefahr erfordert in der Regel einen wesentlich geringeren Luftwechsel als die Befriedigung dieser Forderung.

### Ermittlung der Luftverunreinigung bei periodischer Bespritzung

Die einfachste Berechnungsmethode ist die, nach der die in der Zeiteinheit mit der Farbe eingespritzte Lösemittelmenge durch die in der Zeiteinheit eingeblasene Frischluftmenge (Lufterfrischung) dividiert wird. Diese Berechnung gibt nur bei ständiger (seit langer Zeit andauernder) Bespritzung einen richtigen Luftverunreinigungswert. In Wirklichkeit ist der Farbenauftrag durch Bespritzung meistens periodisch und in diesem Fall entscheiden die Bespritzungszeit und die Verdampfungsgeschwindigkeit des Lösemittels, inwiefern das Ende der Bespritzungsperiode als stationärer Zustand zu betrachten ist.

Eine weitere Abweichung von der Wirklichkeit besteht darin, daß die Lösemittelkonzentration im Raum bei der Berechnung für gleichmäßig genommen wird, obwohl sie bei weitem nicht gleichmäßig ist. Die Frischluft tritt durch die Decke der Kammer gleichmäßig verteilt ein, also ist die Konzentration in der Nähe der Decke gleich Null. Die Zunahme der Konzentration wird durch die Verdampfung von der mit Farbe schon bespritzten Fläche sowie durch den Bespritzungsprozeß gesteigert, was im allgemeinen etwa in halber Kammerhöhe oder noch niedriger erfolgt. Die verunreinigte Luft wird unten abgesaugt, also ist die Konzentration hinsichtlich der Vertikalverteilung unten am größten. In waagerechter Ebene kann in der Umgebung der Bespritzung auch eine lokal größere Konzentration entstehen.

Eine die Wirklichkeit annähernde Berechnung muß also aus der Sicht des Gesundheitsschutzes der Werktätigen einerseits die Zunahme der Konzentration in der Zeit, andererseits auch deren lokale Verteilung in Betracht ziehen.

### Die zeitliche Änderung der Konzentration

Bei der Berechnung der zeitlichen Änderung der Lösemittelmenge in der Luft muß der zeitliche Ablauf der Verdampfung des Lösemittels berücksichtigt werden.

Gesetzt, es wird am Anfang der Untersuchung in unendlich kurzer Zeit eine Lösemittelmenge von  $\Delta M_0$  gr eingeführt. Den Verdampfungsprozeß durch eine exponentielle Funktion angenähert, sei die schon verdampfte Lösemittelmenge in Abhängigkeit von der Zeit

$$M_{\text{Verd.}} = \Delta M_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right),$$

wo  $t$  die Zeit,  $t_0$  die für die Verdampfung charakteristische Zeitkonstante bedeuten.

Diese Funktion setzt voraus, daß die Verdampfungsgeschwindigkeit (die in der Zeiteinheit verdampfende Menge) der noch nicht verdampften Menge  $\Delta M_0 - M_{\text{Verd.}}$  proportional ist. Die Verdampfung hängt in Wirklichkeit vom gesättigten Dampfdruck des verdampfenden Materials ab, der hingegen eine Funktion der Konzentration ist; die obige einfache Annäherung läßt sich jedoch für die Belüftung in einem beträchtlichen Bereich annehmen. Die Näherungsfunktion wird durch Messungen kontrolliert (s. Abschnitt »Messungen der Lösemittelverdampfung«).

Bei  $t = 0$  ergibt die Funktion  $M_{\text{Verd.}} = 0$ , d. h. die Zeit ist vom Augenblick der Einführung der Lösemittelmenge  $M_0$  zu rechnen. Die Funktion zeigt:  $M_{\text{Verd.}} \rightarrow \Delta M_0$ , wenn  $t \rightarrow \infty$ , also wird die gesamte Lösemittelmenge erst nach einer unendlichen Zeit verdampft.

Werden in Zeitabschnitten  $\Delta t$  immer weitere  $\Delta M_0$ -Mengen in den Raum eingeführt, so ist die verdampfte Lösemittelmenge am Ende der  $i$ -ten Periode  $\Delta t$  gleich:

$$\begin{aligned} M_{\text{Verd.}} &= \Delta M_0 \left[ \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{t_0}} \right) + \left( 1 - e^{-\frac{2\Delta t}{t_0}} \right) + \dots + \left( 1 - e^{-\frac{i\Delta t}{t_0}} \right) \right] = \\ &= \Delta M_0 \left[ i - \left( e^{-\frac{\Delta t}{t_0}} + e^{-\frac{2\Delta t}{t_0}} + \dots + e^{-\frac{i\Delta t}{t_0}} \right) \right] = \\ &= \Delta M_0 \left[ i - e^{-\frac{\Delta t}{t_0}} \cdot \frac{e^{-\frac{i\Delta t}{t_0}} - 1}{e^{-\frac{\Delta t}{t_0}} - 1} \right] = \\ &= \Delta M_0 \left[ i - \frac{e^{-\frac{i\Delta t}{t_0}} - 1}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{t_0}}} \right], \end{aligned}$$

wo die Summenformel der geometrischen Reihe mit  $n$  Gliedern und dem Quotienten  $q = e^{-\Delta t/t_0}$  verwendet wurde.

Auf ein kontinuierliches Lösemittelspritzen wird übergangen, indem zuerst die Substitutionen  $i\Delta t = t$  und  $\Delta M_0 = \dot{M}\Delta t$  angewendet ( $M$  ist die in der Zeiteinheit eingespritzte Lösemittelmenge), dann die  $\Delta t \rightarrow 0$  und  $i \rightarrow \infty$  Grenzübergänge gebildet werden; die Gleichheit  $i\Delta t = t$  bleibt aufrechterhalten.

$$i\Delta t = t \text{ und } \Delta M_0 = \dot{M}\Delta t$$

eingeschrieben, gilt

$$M_{\text{Verd.}} = \dot{M} \left[ t - \Delta t \frac{e^{-\frac{t}{t_0}} - 1}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{t_0}}} \right].$$

Da

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{t_0}}} = t_0,$$

ist, gilt

$$M_{\text{Verd.}} = \dot{M} \left[ t + t_0 \left( e^{-\frac{t}{t_0}} - 1 \right) \right].$$

Damit erhält man die verdampfte Lösemittelmenge in Abhängigkeit von der Zeit, wenn in den Raum eine Lösemittelmenge  $\dot{M}$  je Sekunde eingespritzt wird.

Nun soll die in der Raumluft entstehende Lösemittelkonzentration untersucht werden, wenn im Laufe des Bespritzens ein ständiger Luftwechsel unterhalten wird.

Bezeichnen wir den Rauminhalt der Farbspritzkammer mit  $Q$  und die dort vorhandene (im Raum als konstant betrachtete) Konzentration mit  $k$ :

$$k = \frac{M_h}{Q} \text{ gr/m}^3,$$

wo  $M_h$  die im gegebenen Augenblick im Raum vorhandene, verdampfte Lösemittelmenge ist.

In den Raum wird ständig  $V$  m<sup>3</sup>/s Frischluft (ohne Lösemittelgehalt) eingeführt und ebensoviel Luft mit einer Konzentration  $k$  entfernt.

Die Differenz der während der Elementarzeit  $dt$  verdampften und der mit der Luft entfernten Lösemittelmengen ist gleich der Zunahme der Lösemittelmenge im Raum

$$d M_{\text{Verd.}} - V k dt = Q dk.$$

Da aus dem vorstehenden Zusammenhang

$$M_{\text{Verd.}} = \dot{M} \left[ t + t_0 \left( e^{-\frac{t}{t_0}} - 1 \right) \right]$$

$$d M_{\text{Verd.}} = \frac{d M_{\text{Verd.}}}{dt} dt = \dot{M} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) dt$$

ist, gilt

$$\dot{M} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) - V k = Q \frac{dk}{dt}.$$

Dividiert durch  $Q$ , multipliziert mit  $t_0$  und die Bezeichnung  $\frac{t}{t_0} = \tau$  eingeführt, erhält man:

$$\frac{\dot{M} t_0}{Q} (1 - e^{-\tau}) - t_0 \frac{V}{Q} k = \frac{dk}{d\tau}.$$

Es seien ferner  $\frac{\dot{M} t_0}{Q} = k_0$  und  $t_0 \frac{V}{Q} = m$  (der auf die Zeit  $t_0$  bezogene Luftfrischungsfaktor), so ergibt sich die inhomogene Differentialgleichung:

$$\frac{dk}{d\tau} + mk = k_0(1 - e^{-\tau}).$$

Die Lösung der homogenen Gleichung lautet:

$$\frac{dk_h}{k_h} = -m d\tau; \ln \frac{k_h}{C} = -m\tau; k_h = C e^{-m\tau}.$$

Durch Variation der Konstante  $C$  sind

$$k = C(\tau) e^{-m\tau}$$

$$\frac{dk}{d\tau} = C' e^{-m\tau} - C m e^{-m\tau}$$

und in die inhomogene Gleichung eingeführt ergibt sich

$$C' e^{-m\tau} - C m e^{-m\tau} + m C e^{-m\tau} = k_0(1 - e^{-\tau})$$

$$C' = k_0(1 - e^{-\tau}) e^{m\tau}$$

$$C = \int_0^{\tau} k_0(1 - e^{-\tau}) e^{m\tau} d\tau + K.$$

Damit ist

$$k = \left[ \int_0^{\tau} k_0(1 - e^{-\tau}) e^{m\tau} d\tau + K \right] e^{-m\tau}.$$

Da im Augenblick  $\tau = 0$   $k = 0$  gilt, ist  $K = 0$ , also gelten

$$\begin{aligned} k &= \left[ k_0 \int_0^{\tau} [e^{m\tau} - e^{(m-1)\tau}] d\tau \right] e^{-m\tau} = \\ &= k_0 \left[ \frac{1}{m} (e^{m\tau} - 1) - \frac{1}{m-1} (e^{(m-1)\tau} - 1) \right] e^{-m\tau} = \\ &= k_0 \left[ \frac{1}{m} (1 - e^{-m\tau}) - \frac{1}{m-1} (e^{-\tau} - e^{-m\tau}) \right]. \end{aligned}$$

Die erhaltene Konzentrationsfunktion hängt außer der dimensionslosen Veränderlichen  $\tau = \frac{t}{t_0}$  von den Parametern  $k_0$  und  $m$  ab. Da  $k$  dem Wert  $k_0$  proportional ist, ist die Berechnung der Funktion  $\frac{k}{k_0}$  zweckmäßig:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{m} (1 - e^{-m\tau}) - \frac{1}{m-1} (e^{-\tau} - e^{-m\tau}).$$

Die Kurven sind in Abb. 1 zu sehen. Jede Kurve nähert sich dem Wert  $\frac{1}{m}$ .

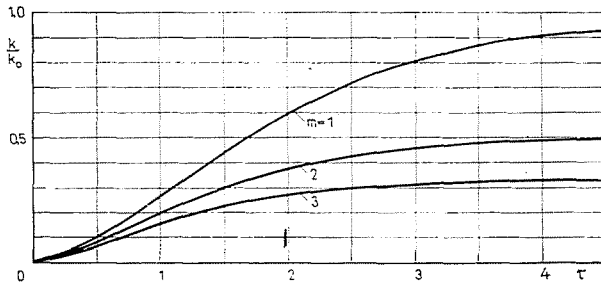


Abb. 1

Für die Beurteilung der Anfangsstrecke sind diejenigen Kurven günstiger, die die Konzentrationsänderung im Verhältnis zum stationären Wert angeben:

$$m \frac{k}{k_0} = 1 - e^{-m\tau} - \frac{m}{m-1} (e^{-\tau} - e^{-m\tau}).$$

Diese Kurvenschar wird in Abb. 2 gezeigt.

Die zum Falle  $m \rightarrow 1$  gehörende Kurve erhalten wir durch den folgenden Grenzübergang:

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow 1} \left[ 1 - e^{-m\tau} - \frac{m}{m-1} (e^{-\tau} - e^{-m\tau}) \right] &= \\ &= 1 - e^{-\tau} - \lim_{m \rightarrow 1} \frac{m(e^{-\tau} - e^{-m\tau})}{m-1} = \\ &= 1 - e^{-\tau} - \lim_{m \rightarrow 1} \frac{e^{-\tau} - e^{-m\tau} + m\tau e^{-\tau}}{1} = 1 - (1 + \tau) e^{-\tau}. \end{aligned}$$

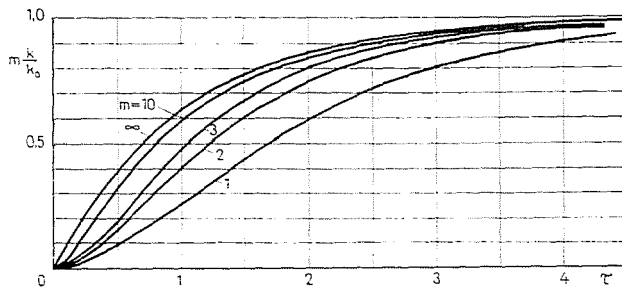


Abb. 2

Im Falle  $m \rightarrow \infty$  gilt

$$m \frac{k}{k_0} = 1 - e^{-\tau}.$$

Jede dieser Kurven nähert sich der Asymptote  $m \frac{k}{k_0} = 1$ . Von der den vorliegenden Umständen entsprechenden Kurve mit dem Parameter  $m$  den zu einer Zeit  $\tau = \frac{t}{t_0}$  gehörenden Wert abgelesen, läßt sich die in diesem Zeitpunkt gültige Konzentration  $k$  berechnen.

Obwohl die Werkötigen nach Beendigung der Farbspritzung den Farbspritzraum im allgemeinen verlassen, kann es uns doch interessieren, wie die Konzentration nach dem Bespritzen in Abhängigkeit von der Zeit abnimmt. Dazu wird folgendes überlegt:

Die gleichmäßige Lösemittelzufuhr ( $\dot{M}$  je sec) vom Zeitpunkt  $t = 0$  bis  $t = t_f$  wird vom Zeitpunkt  $t = 0$  durch  $\Delta M_0$  g Lösemittelzuführung in Intervallen  $\Delta t$  ersetzt. Dies erfolgt  $i$ -mal nacheinander bis zum Beenden der Bespritzung, damit ist

$$t_f = i \Delta t.$$

Die verdampfte Lösemittelmenge wird im Zeitpunkt  $t > t_f$  berechnet. Vom Lösemittel, das am Anfang des letzten Zeitintervalls  $\Delta t$  eingeführt wurde, ist bis dahin die Lösemittelmenge

$$\Delta M_0 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0} - \frac{t_f}{t_0} - \frac{\Delta t}{t_0}\right)} \right]$$

verdampft.

Von der vorletzten Farbdose sind

$$\Delta M_0 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0} - \frac{t_f}{t_0} + 2 \frac{\Delta t}{t_0}\right)} \right],$$

usw., von der ersten Farbdose

$$\Delta M_0 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0} - \frac{t_f}{t_0} + i \frac{\Delta t}{t_0}\right)} \right] \text{ verdampft.}$$

Die dimensionslosen Zeitbezeichnungen

$$\frac{t}{t_0} = \tau, \quad \frac{t_f}{t_0} = \tau_f \quad \text{und} \quad \frac{\Delta t}{t_0} = \Delta \tau$$

angewendet, ist das verdampfte Lösemittel im Zeitpunkt  $\frac{t}{t_0} = \tau$

$$\begin{aligned} M_{\text{Verd.}} &= \Delta M_0 \left\{ [1 - e^{-(\tau - \tau_f + \Delta \tau)}] + [1 - e^{-(\tau - \tau_f + 2 \Delta \tau)}] + \right. \\ &\quad \left. + \dots + [1 - e^{-(\tau - \tau_f + i \Delta \tau)}] \right\} = \\ &= \Delta M_0 [i - e^{-(\tau - \tau_f)} (e^{-\Delta \tau} + e^{-2 \Delta \tau} + \dots + e^{-i \Delta \tau})] = \\ &= \Delta M_0 \left[ i - e^{-(\tau - \tau_f + \Delta \tau)} \frac{e^{-i \Delta \tau} - 1}{e^{-\Delta \tau} - 1} \right], \end{aligned}$$

wo bei der letzten Gleichheit wieder die Summenformel der geometrischen Reihe angewendet wurde.

Auf den Fall der kontinuierlichen Bespritzung übergehend, gelten

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \tau \rightarrow 0 \\ i \rightarrow \infty \end{array} \right\} i \Delta \tau \rightarrow \tau_f$$

und

$$\Delta M_0 = \dot{M} \Delta t = \dot{M} t_0 \Delta \tau.$$

Damit ist

$$\begin{aligned} M_{\text{Verd.}} &= \dot{M} t_0 \left[ \tau_f - e^{-(\tau - \tau_f + \Delta \tau)} \frac{\Delta \tau (e^{-\tau_f} - 1)}{e^{-\Delta \tau} - 1} \right] = \\ &= \dot{M} t_0 [\tau_f - e^{-(\tau - \tau_f)} (1 - e^{-\tau_f})] = \\ &= \dot{M} t_0 [\tau_f - e^{-(\tau - \tau_f)} + e^{-\tau}], \end{aligned}$$

da

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta\tau}{e^{-\Delta\tau} - 1} = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{-e^{-\Delta\tau}} = -1.$$

Zur Bestimmung der Konzentrationsänderung, die in der Farbspritzkammer nach dem Bespritzen entsteht, ist die Bestimmung von

$$dM_{\text{Verd}} = \frac{dM_{\text{Verd}}}{d\tau} \cdot d\tau$$

nötig.

Die vorige Formel nach  $\tau$  differenziert, erhält man

$$\frac{dM_{\text{Verd}}}{d\tau} = \dot{M}t_0 [e^{-(\tau-t_0)} - e^{-\tau}] = \dot{M}t_0 (e^{\tau} - 1) e^{-\tau}.$$

Die Veränderung der Lösemittelmenge im belüfteten Raum ist

$$Qdk = \dot{M}t_0 (e^{\tau} - 1) e^{-\tau} d\tau - kVt_0 d\tau.$$

Daraus ergibt sich mit den vorigen Bezeichnungen  $\frac{\dot{M}t_0}{Q} = k_0$  und  $t_0 \frac{V}{Q} = m$ :

$$\frac{dk}{d\tau} + mk = k_0 (e^{\tau} - 1) e^{-\tau}.$$

Die Lösung der homogenen Differentialgleichung lautet wieder

$$k_h = Ce^{-m\tau}$$

und bei Variieren der Konstante  $C$

$$\begin{aligned} C &= k_0 (e^{\tau} - 1) \int_0^{\tau} e^{(m-1)\tau} d\tau + K = \\ &= k_0 (e^{\tau} - 1) \left[ \frac{e^{(m-1)\tau}}{m-1} \right]_0^{\tau} + K = \\ &= \frac{k_0 (e^{\tau} - 1)}{m-1} [e^{(m-1)\tau} - 1] + K. \end{aligned}$$

Damit ist die Lösung der inhomogenen Gleichung

$$k = \left\{ \frac{k_0}{m-1} (e^{\tau} - 1) [e^{(m-1)\tau} - 1] + K \right\} e^{-m\tau}.$$



Da diese Differentialgleichung für die Periode nach Beendigung des Bespritzens gültig ist, muß der in der Zeit  $\tau = \tau_f$  erreichte Wert der Konzentrationszunahme während des Bespritzens als Anfangsbedingung eingesetzt werden, d. h. im Zeitpunkt  $\tau = \tau_f$  gilt

$$\left\{ \frac{k_0}{m+1} (e^{\tau_f} - 1) [e^{(m-1)\tau_f} - 1] + K \right\} e^{-m\tau_f} = \\ = \frac{k_0}{m} (1 - e^{-m\tau_f}) - \frac{k_0}{m-1} (e^{-\tau_f} - e^{-m\tau_f}).$$

Daraus ist

$$K = \frac{k_0}{m} (e^{m\tau_f} - 1) - \frac{k_0}{m-1} [e^{(m-1)\tau_f} - 1] - \\ - \frac{k_0}{m-1} (e^{\tau_f} - 1) [e^{(m-1)\tau_f} - 1] = \frac{k_0}{m} (e^{m\tau_f} - 1) - \\ - \frac{k_0}{m-1} [e^{(m-1)\tau_f} - 1] e^{\tau_f}.$$

Nach Substitution des Wertes  $K$  ist die zeitliche Änderung der Konzentration nach dem Bespritzen

$$\frac{k}{k_0} = \left\{ \frac{e^{\tau_f} - 1}{m-1} [e^{(m-1)\tau} - 1] + \frac{1}{m} (e^{m\tau_f} - 1) - \frac{e^{\tau_f}}{m-1} [e^{(m-1)\tau_f} - 1] \right\} e^{-m\tau}.$$

Es ist zu ersehen, daß sich der Wert von  $\frac{k}{k_0}$  bei  $\tau \rightarrow \infty$  Null nähert.

### Lokale Änderungen der Konzentration

Die in den obigen Gleichungen vorkommende Konzentration  $k$  bedeutet die Konzentration in der aus der Kammer abgesaugten Luft, da damit die Lösemittelmenge ausgedrückt wurde, die die Kammer verläßt. Beim Aufschreiben des Produktes  $Q dk$  auf der rechten Seite wurde hingegen angenommen, daß die Konzentrationsänderung im ganzen Volumen  $Q$  der Kammer gleich groß ist, was man sich am einfachsten so vorstellen kann, daß auch der Konzentrationswert in der Kammer überall gleich ist.

In Wirklichkeit ist die Konzentrationsverteilung in der Kammer nicht gleichmäßig. Bei der Belüftung der Kammern wird im allgemeinen die Frischluft an der ganzen Decke der Kammer gleichmäßig eingeblasen. Daher ist die Lösemittelkonzentration an der Decke gleich Null und nimmt in der Umgebung

des Farbspritzens sowie der trocknenden Oberflächen bis zu einem überdurchschnittlichen Wert zu, im großen und ganzen wie es in Abb. 3 zu sehen ist.

Im allgemeinen ist es nicht bekannt, wie sich die Konzentration in der Horizontalebene verteilt bzw. um wievielfach die Konzentration in der Spritzzone höher ist als der Durchschnittswert in der Horizontalebene, da ihr Wert von der Grundfläche der Kammer, den darin befindlichen Gegenständen sowie

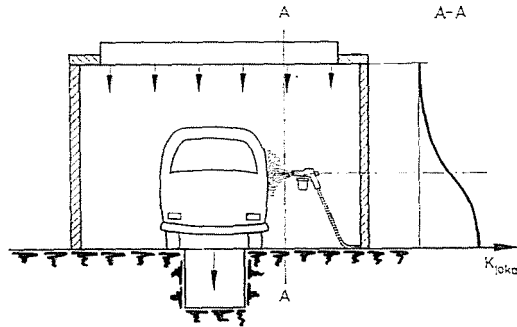


Abb. 3

von der Zahl der Spritzpistolen abhängig ist. Im allgemeinen läßt sich jedoch feststellen, daß in halber Kammerhöhe oder darunter gespritzt wird und auch die bespritzten Flächen sich vorwiegend in der halben Höhe der Kammer oder darunter befinden; somit nimmt die Konzentration mit guter Annäherung immer in halber Höhe zu, und erreicht im Flächendurchschnitt schließlich den beim Absaugen berechneten Wert.

Da die Zunahmekurve für die mittlere Höhe als spiegelig betrachtet werden kann, beträgt die Durchschnittskonzentration die Höhe entlang ungefähr die Hälfte der Konzentration beim Absaugen.

Da beim Einblasen die Konzentration immer gleich Null ist, kann auch der Durchschnittswert der Konzentrationsänderungen gleich der Hälfte der beim Absaugen gültigen Änderung genommen werden. Das kann auch so aufgefaßt werden, als zeigte sich beim Absaugen das Zweifache der Durchschnittskonzentration in halber Höhe. Wird die Durchschnittskonzentration auch weiterhin mit  $k$  bezeichnet, ist  $2 V k dt$  die in der Zeit  $dt$  abgeführte Lösemittelmenge bei einem Luftwechsel  $V$  m<sup>3</sup>/sec. In beiden Differentialgleichungen statt  $V$  den Wert  $2 V$  eingesetzt, gibt die Lösung der Funktion den Konzentrationswert, der in halber Höhe als Durchschnitt betrachtet werden kann. Eine Verdoppelung des  $V$ -Wertes bedeutet die Verdoppelung des  $m$ -Wertes.

Die Konzentration in Kopfhöhe des Werk tätigen geht aus dieser Berechnung noch nicht hervor. Die Konzentration kann nämlich in der Bespritzungszone das Vielfache des berechneten Durchschnittswertes erreichen. Dagegen

nimmt die Konzentration, wenn man sich von der Spritzstelle waagrecht entfernt, wegen der Abwärtsströmung rasch ab. Der Kopf des Werkstätigen befindet sich im allgemeinen höher als die bespritzte Fläche, daher sind die Verhältnisse relativ günstiger. Damit hängt die Konzentration in Kopfhöhe des Werkstätigen in hohem Maße von der Geschwindigkeit der Abwärtsströmung ab. Eine genauere Beziehung könnte aber nur anhand von weiteren Versuchsdaten gegeben werden.

### Lösemittelverdampfungsmessungen

Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Lösemittelverdampfung und der Zeitkonstante  $t_0$  wurden folgende Messungen mit einigen Farben (den Erzeugnissen des Betriebs Budalakk) durchgeführt.

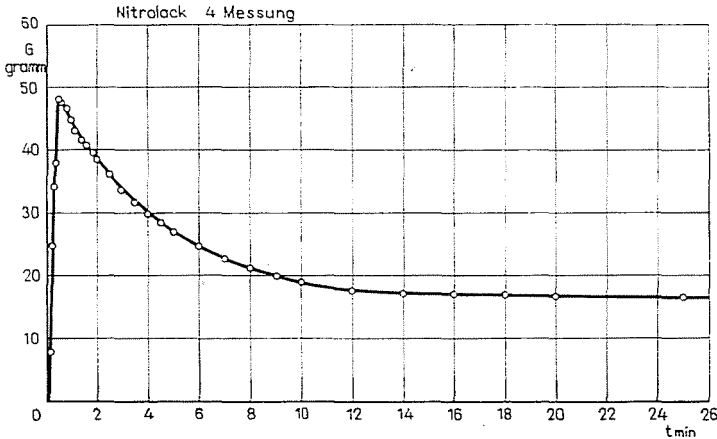


Abb. 4

An die Lastseite einer Schnellwaage mit Grammskala wurde in der Vertikalebene eine Aluminiumplatte von etwa 1 m<sup>2</sup> Fläche gehängt. Diese wurde in verhältnismäßig kurzer Zeit wie beim Farbauftragen mit Farbe bespritzt und die Gewichtszunahme sowie Gewichtsabnahme der Platte wurden in Abhängigkeit von der Zeit abgelesen. In Abb. 4 wird als Beispiel eine so aufgenommene Kurve gezeigt.

Außerdem wurde die durch die Spritzpistole verbrauchte Farbenmenge gewogen.

Die Raumtemperatur betrug ungefähr 24 °C, es war keine mechanische Belüftung vorhanden.

Die Angaben der Messungen sind in der Tab. 1 zusammengestellt.

Tabelle 1

Farbensorte	Spritzzeit	Verspritzte Farbe	Auf die Fläche aufgespritzte Farbe	Davon Lösemittel	Oberfläche	In der Zeiteinheit verspritzte Farbe		Verhältnis der Verspritzten und auf die Fläche aufgetragenen Farbe	Verhältnis des Lösemittels zur Farbe	Auf die Flächeninhalt gespritzte Farbe	Zeitkonstante $t_0$
	Minute	gr	gr	gr		m <sup>2</sup>	gr/Min				
1. Nitro	—	—	181	151	1,07	—	—	—	0,835	169	12,1
2. Nitro	0,4	187	60	50	1,07	467	28,0	3,12	0,835	56	5,9
3. Nitro	—	—	80	52	1,07	—	—	—	0,650	75	2,9
4 Nitro	0,4	128	48	33	0,8	320	19,2	2,67	0,688	60	4,6
5. Nitro	0,2	247	130	100	1,07	(1235)	—	1,90	0,770	122	7,5
						394	23,6	2,56	0,755	94	6,6
6. Neolux	0,8	204	85	45	1,07	255	15,3	2,40	0,530	80	22,6
7. Neolux	1,0	76	34	18,6	0,8	76	4,6	2,23	0,546	42	13,3
						167	10,0	2,31	0,538	61	18,0
8. Cellodal	3,5	283	96	38	0,8	81	4,9	2,95	0,396	48	7,0
9. Cellodal	0,6	150	77	44	1,07	250	15,0	1,95	0,572	72	7,0
						166	10,0	2,45	0,484	60	7,0
10. Fortamin	1,0	130	84	46	1,07	130	7,8	1,55	0,547	79	21,0
11. Resistan	1,6	123	63	30	0,8	77	4,6	1,96	0,477	79	14,3

In Verbindung mit den Angaben soll erwähnt werden, daß zur genauen Messung der Trockenkonstante das Bespritzen möglichst schnell vorgenommen werden mußte. So ist die Bestimmung der in der Zeiteinheit verspritzten Farbenmenge nicht genau, weist eine starke Streuung auf und ist im allgemeinen wesentlich größer als unter betriebsmäßigen Bedingungen, wo der Werk-tätige bei Ortswechsel, bei der Überprüfung der bespritzten Fläche, usw., die Pistole oft schließt.

Die verspritzte Farbenmenge war bei den Messungen durchschnittlich mehr als das Zweifache der auf die Oberfläche aufgetragenen Farbenmenge (unter Vernachlässigung der Verdampfung während der Bespritzungszeit). Das ist auch eine größere Menge als die gewöhnlich danebengespritzt wird, was durch die verhältnismäßig kleine Platte begründet ist. Am Plattenumfang sollte nämlich die Farbschicht nicht dünner sein und so ergab sich dort ein großer Farbenverlust.

Wird die Luftverunreinigung aufgrund der aus der Spritzpistole gespritzten Lösemittelmenge berechnet, dann beeinflusst das Danebenspritzen das Ergebnis nur insofern, daß die danebengespritzte Farbe bis zum Erreichen

der weiter entfernten Flächen im allgemeinen schneller trocknet. Da jedoch die danebengespritzte Farbenmenge durch die Gewichtswirkung und durch die abwärts gerichtete Luftströmung in der Regel schneller zu der unteren Absaugöffnung gelangt als der von der bespritzten Fläche verdampfte Verdünner, können bei der weiteren Ermittlung der Konzentration die Verdampfung der danebengespritzten Farbe und die der bespritzten Fläche für gleich genommen werden.

Tabelle 2

$A = 0,8 \text{ m}^2$

Vorher 440 Gramm  
 Nachher 312 Gramm  
 128 Gramm

Farbensorte: Nitroemail

$t'$	$G$	$t$	$M_0 - M$	$\frac{M_0}{M_0 - M}$
	8			
	25			
	34			
Ende des Spritzens	38			
	48	0	33	1
	47,8	0,1	32,8	1,01
		0,2		
	46,4	0,3	31,4	1,05
		0,4		
	44,9	0,5	29,9	1,10
	43,5	0,7	28,5	1,16
	41,9	0,9	26,9	1,23
	40,8	1,1	25,8	1,28
	39,8	1,3	24,8	1,33
	38,7	1,5	23,7	1,39
	36,2	2	21,2	1,56
	33,9	2,5	18,9	1,75
	31,8	3	16,8	1,86
	30,1	3,5	15,1	2,18
	28,5	4	13,5	2,44
	27,1	4,5	12,1	2,73
	24,6	5,5	9,6	3,44
	22,7	6,5	7,7	4,30
	21,2	7,5	6,2	5,34
	20,1	8,5	5,1	6,48
	19,2	9,5	4,2	7,86
	17,8	11,5	2,8	11,8
	17,3	13,5	2,3	14,3
	17,0	15,5	2,0	16,5
	16,8	17,5	1,8	18,4
	16,6	19,5	1,6	20,6
	16,2	24,5	1,2	27,5
	15,9	59,5	0,9	36,6
	15		0	

$$M_0 = 48 - 15 = 33$$

$$t = t' - 0,5$$

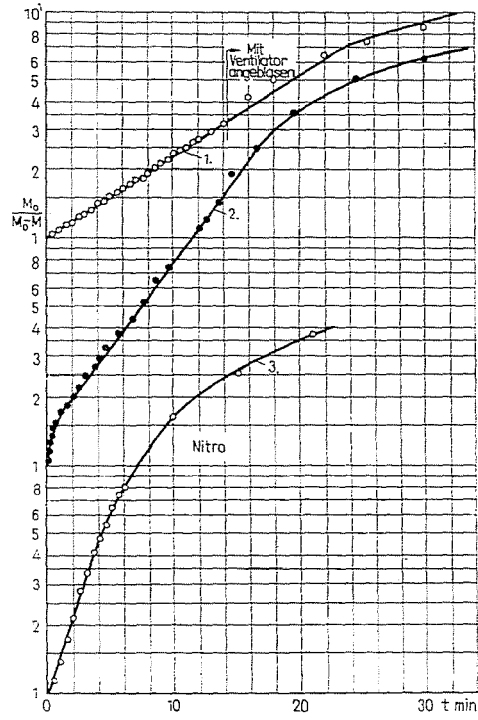


Abb. 5

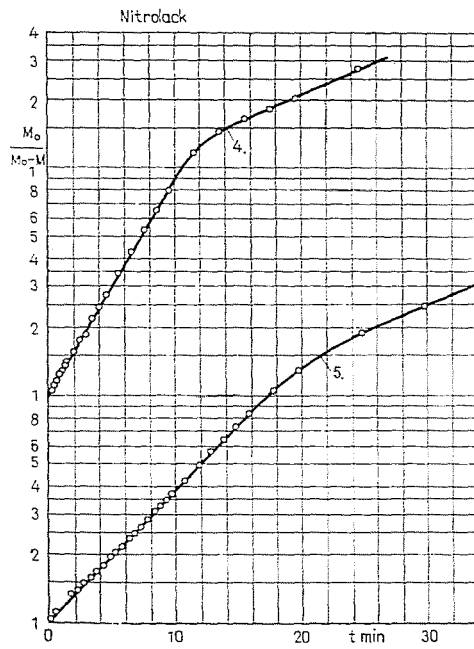


Abb. 6

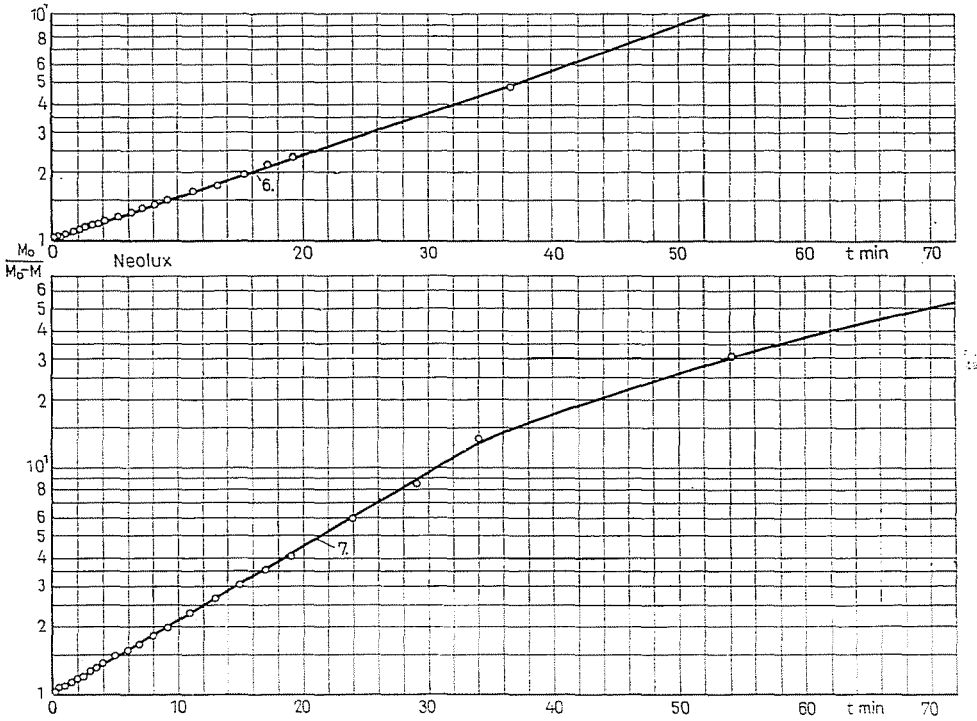


Abb. 7

Aus dem zeitlichen Verlauf der Gewichtsabnahme wurden die Werte  $\frac{M_0}{M_0 - M}$  berechnet, wo  $M_0$  die Gesamtmenge des auf die Oberfläche gelangten Lösemittels bedeutet (den Unterschied zwischen dem maximalen und dem nach praktisch unendlicher Zeit gewogenen Gewicht),  $M$  hingegen die Lösemittelmenge, die sich momentan auf der Fläche befindet.  $M_0 - M$  ist also die schon verdampfte Lösemittelmenge. Die Verarbeitung der in Abb. 4 gezeigten Wägung wird in Tabelle 2 mitgeteilt.

Die erhaltenen Werte wurden in Abhängigkeit der Zeit — die vom Erreichen des Höchstgewichtes gemessen wurde — in einem Diagramm mit halblogarithmischer Teilung dargestellt (Abb. 5—10). Bei der mitgeteilten Berechnung wurde der exponentielle Verlauf der Verdampfung angenommen. Dementsprechend müßte man im halblogarithmischen Diagramm eine Gerade erhalten. Wie es in den Abbildungen zu sehen ist, ist der Anfang der Kurven in mehreren Fällen wirklich gerade, bei anderen läßt er sich durch eine Gerade gut annähern. Nur die Cellodal-Farbe bildet eine Ausnahme, deren Kurve von der Geraden bald abweicht; bei dieser ist die Annäherung des Anfangsabschnitts durch eine Gerade unsicher.

In einer späteren Periode der Verdampfung weichen die Kurven von der Geraden ab, stellenweise kann ein gerader Abschnitt mit geringer Steigung festgestellt werden. Das bedeutet, daß sich der Verdampfungsprozeß später im Vergleich zur exponentiellen Funktion zeitlich verlängert. Diese Verlängerung beginnt aber erst, als schon mehr als 90% des Verdünnners verdampft sind, die Berechnung der Konzentration wird also praktisch dadurch nicht beeinflusst.

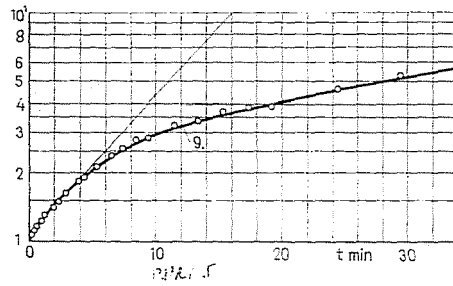
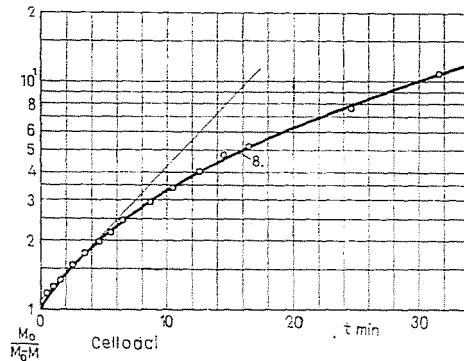


Abb. 8

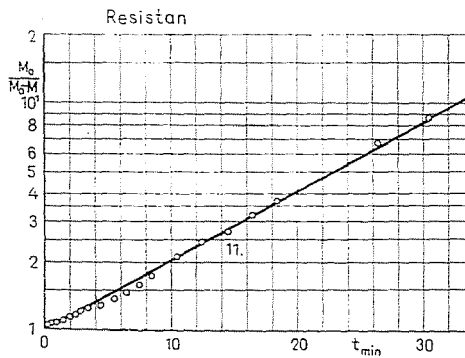


Abb. 9



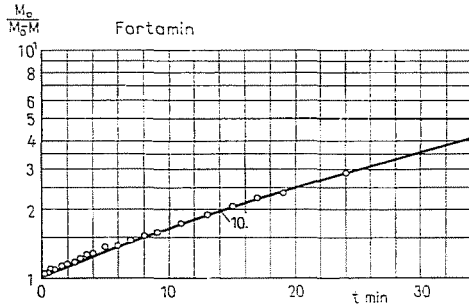


Abb. 10

Bei den Cellodal- und Fortamin-Farben beginnt zwar die zeitliche Verzögerung schon früher, nach Verdampfung von etwa 55%, aber die langsamere Verdampfung bedeutet aus der Sicht der Luftverunreinigung nur günstigere Verhältnisse als berechnet.

Durch die Messungen wurde also im wesentlichen der Ausgangszusammenhang der Berechnung nachgewiesen.

Aus dem Richtungsfaktor der einzelnen Strecken konnte die zur Berechnung erforderliche Zeitkonstante  $t_0$  festgestellt werden. Diese Werte sind in der letzten Spalte der Tabelle I gezeigt.

### Zusammenfassung

Durch Messungen kann bewiesen werden, daß die Verdampfung des Lösemittels mit dem eingangs zugrunde gelegten exponentiellen Zusammenhang praktisch befriedigend angenähert werden kann. Auf dieser Grundlage wurde die Bestimmung der zeitlichen Änderung der Lösemittelkonzentration während der Bespritzung sowie in der Periode nach Beendigung der Bespritzung ermöglicht.

### Literatur

- KISS, R.—NYERGES, T.: Felület bevonatolás és légtechnikája. Budapest, 1966.  
 KAISER, H.: Lackieranlagen für die Einzel- und Mengenfertigung, Fette, Seifen, Anstrichmittel 4, 62 (1964).

Prof. Dr. József GRUBER }  
 Dr. Miklós BLAHÓ } Budapest XI., Bertalan Lajos u. 1, Ungarn