

– Raumlüftung II –

Luftvolumenströme und Schadstoffe mit dynamischer Eigenentwicklung (z. B. Virenreduktion, Bakterienvermehrung, Isotopenzerfall)

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zielstellung	2
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Exponentielles Wachstum und Bereitstellung der Wachstumsdaten	3
2.2	Partikelbilanzen und Konzentrationsverläufe	6
2.3	Zusammensetzung realer Betriebsverläufe	7
3	Rechenprogramm	7
3.1	Laden und Starten des Rechenprogramms	8
3.2	Bearbeitung des Programmlistings	8
3.3	Abarbeitung	9
3.4	Ein- und Ausgabedaten	11
4	Testbeispiele	12
5	Beispiele mit Programmabarbeitung	15
5.1	Beispiel_11	15
5.2	Beispiel_2	16

Alle in diesem Bericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors. Er übernimmt keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig. Dies gilt für Anwendungen, die über die Eigennutzung hinausgehen.

Alle Interessierten sind eingeladen, an der Weiterentwicklung mitzuwirken.

Viel Erfolg bei der Anwendung!

1 Zielstellung

In Raumlüftung I wurden die Fragestellungen bezüglich der üblich auftretenden Luftverunreinigungen (Schadstofflasten), die im Betrachtungszeitraum stabil sind (z. B. CO₂), ausführlich abgehandelt. Die jetzige Ergänzung gilt für Stoffe die sich eigendynamisch verändern können. So handelt es sich *beispielsweise* um

- Viren, die an in der Raumluft schwebende Aerosolpartikel gebunden sind und im Laufe der Zeit inaktiv werden
- Bakterien, die sich bei bestimmten Raumtemperaturen und -feuchten mit zunehmender Zeit intensiv vermehren können
- radioaktive Isotope, die nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten zeitabhängig zerfallen.

Allgemeingültig werden betrachtet:

k Partikelkonzentration (\equiv Partikel / m³_{Luft})

z. B. Bakterienzahl pro m³ Luft oder virenbeladene Aerosolpartikel pro m³ Luft oder Isotope pro m³ Luft

\dot{P} Partikelstrom (\equiv Partikel / h)

z. B. Aerosolpartikelanzahl pro h, die der Raumluft zugeführt werden.

Die funktionellen Zusammenhänge des Wachstums oder des Zerfalls (\equiv negatives Wachstum) gehen stets von einer Anfangsgröße A (\equiv Bestandsgröße) aus und sind Zeitfunktionen $f(\tau)$.

Theoretisch kann es sich bei den Zeitfunktionen um vielfältige mathematische Approximationen der Realität handeln, beispielsweise um lineare, quadratische oder exponentielle. Im Weiteren werden *Exponentialfunktionen*, die in der Natur das Geschehen am häufigsten realistisch abbilden, betrachtet.

Wie unter Lüftung I wird von einem instationären Betrieb ausgegangen, wobei sich der Luftvolumenstrom und der Partikeleintrag zeitabhängig ändern. Innerhalb eines Zeitintervalls i sind diese aber konstant. Sie können sich aber sprunghaft zum nächsten Zeitintervall $i+1$ ändern, wobei ein veränderter Luftvolumenstrom und/oder veränderter Partikeleintrag erfolgen (z. B. Lüftung wird ausgeschaltet, Partikel emittierende Personen betreten den Raum usw.). Formal gilt wiederum Bild 1 im Abschnitt 2.3.

Im Weiteren wird zunächst ein allgemeingültiges Modell aufgestellt, das dann bezüglich der speziellen Einsatzbedingungen spezifiziert werden kann.

2 Theoretische Grundlagen

Es gilt die Voraussetzung, dass die Luft im Raum mit

V Raumvolumen

zu jedem Zeitpunkt *vollkommen durchmischt* ist.

Die für den Prozess geltenden Partikeldaten sind:

\dot{P} emittierender Partikelstrom in die Raumluft (dauerhaft oder zeitbegrenzt)

k_{Zu} Konzentration der Partikel in der zugeführten Luft (z. B. Außenluft oder Luft aus einem Luftreinigungsgerät)

k Konzentration der Partikel in der Raumluft als Zeitfunktion

\dot{V} Luftvolumenstrom durch den Raum (dauerhaft oder zeitbegrenzt).

Dem Raum wird Zuluft mit k_{Zu} zugeführt und verlässt diesen (Zuluftvolumenstrom = Abluftvolumenstrom) mit der Partikelkonzentration k .

Unter den Angaben werden verstanden: Partikelkonzentration k in Partikel / m_{Luft}^3
Partikelstrom \dot{P} in Partikel / h.

2.1 Exponentielles Wachstum und Bereitstellung der Wachstumsdaten

Dieses wird durch die Funktion

$$k(\tau) = k_0 a^\tau \quad (1)$$

beschrieben, wobei von der Anfangsgröße k_0 ausgegangen wird. Da der Exponent dimensionslos sein muss, erfolgt die Division durch die bei der Berechnung verwendete Zeiteinheit τE (z. B. 1 h). Weiterhin gilt die Umformung

$$k(\tau) = k_0 a^{\frac{\tau}{\tau E}} = k_0 e^{\frac{\tau}{\tau E} \ln a} = k_0 e^{b \tau} \quad \text{mit dem Vermehrungskoeffizienten } b = \frac{\ln a}{\tau E}. \quad (2)$$

Definitionsbereich: $0 < a < \infty$; $a > 1$ Wachstum; $a < 1$ Zerfall
 $-\infty < b < \infty$; $b > 0$ Wachstum; $b < 0$ Zerfall.

Aus Gl. (2) folgen sofort die bekannten Größen Verdopplungs- und Halbwertszeit:

$$\frac{k(\tau)}{k_0} = 2 \rightarrow \text{Verdoppelungszeit } \tau_D = \frac{\ln 2}{b}; \quad \frac{k(\tau)}{k_0} = 0,5 \rightarrow \text{Halbwertszeit } \tau_H = \frac{\ln 0,5}{b}. \quad (2a)$$

Zahlenbeispiele A:

Für $\tau_D = 2 \text{ h}$ folgt $b_D = \frac{\ln 2}{2} \text{ h}^{-1} = 0,34657 \text{ h}^{-1} = 0,005776 \text{ min}^{-1}$.

Für $\tau_H = 3 \text{ h}$ folgt $b_H = \frac{\ln 0,5}{3} \text{ h}^{-1} = -0,2310 \text{ h}^{-1} = -0,003851 \text{ min}^{-1}$.

Die Wachstumsgeschwindigkeit ergibt sich als die 1. Ableitung nach der Zeit zu

$$k' = k_0 b e^{b \tau}. \quad (3)$$

Ist $b > 0$ so kann $k(\tau)$ über alle Grenzen hinaus wachsen ($k \rightarrow \infty$).

Bei verschiedenen Vorgängen kann jedoch ein Wendpunkt in der Wachstumskurve auftreten, so z. B. wenn Platz- oder Nahrungsbegrenzungen existieren. Die Wachstumskurve wird sich dann einer Sättigung asymptotisch nähern. Andererseits kann das Wachstum mit einer Vergiftungsstrategie von einem Zerfallsprozess überlagert werden.

Ist $b < 0$ so wird $k(\tau)$ gegen Null gehen ($k \rightarrow 0$).

Bei biologischen Prozessen bedeutet das Unterschreiten von 1 das Aussterben, da nur ganzzahlige Werte sinnvoll sind.

Bei der Raumlüftung werden die Gl. (1) bis (3) als uneingeschränkt gültig betrachtet, denn die Begrenzung der Partikelanzahl soll durch eine Abfuhr erreicht werden (Abluft und/oder Luftreinigungsgeräte). Letztere entnehmen belastete Luft und geben weniger belastete zurück.

Die spätere Berechnung soll mit der Differenzenmethode erfolgen, d. h. es ist eine rekursive Darstellung anzugeben. Dazu gibt es nachfolgende Möglichkeiten:

A Entwicklung aus der Differentialgleichung

Formal ist die Ableitung k' durch den Differenzenquotienten zu ersetzen

$$\frac{dk}{d\tau} \rightarrow \frac{k_n - k_{n-1}}{\Delta\tau}.$$

Aus Gl. (3) folgt dann

$$\frac{dk}{d\tau} = k_0 b e^{b\tau} \rightarrow \frac{k_n - k_{n-1}}{\Delta\tau} = k_0 b e^{b\tau} \rightarrow k_n = k_{n-1} + k_0 b e^{b\tau} \Delta\tau.$$

k_0 gilt zur Zeit $\tau = 0$. τ stellt die gesamte Betrachtungszeit $\tau = \Delta\tau + \Delta\tau + \Delta\tau + \dots$ dar. Das Wachstum nimmt dann folgenden Verlauf:

$$k_1 = k_0 + k_0 b \Delta\tau e^{b\Delta\tau}$$

$$k_2 = k_1 + k_0 b \Delta\tau e^{b(\Delta\tau + \Delta\tau)} = k_1 + k_0 b \Delta\tau \underbrace{e^{b\Delta\tau} e^{b\Delta\tau}}_F = k_1 + k_0 b \Delta\tau F^2$$

\vdots

$$k_n = k_{n-1} + k_0 b \Delta\tau F^n. \quad (4)$$

Zahlenbeispiel B: $k_0 = 1$ und $b = 2 \text{ h}^{-1}$

Der analytisch berechnete Wert nach Gl. (2) liefert für die Dauer einer Stunde:

$$k_{1h} = k_0 e^{b\tau} = 1 e^{2 \cdot 1} = 7,389.$$

Die numerische Berechnungen mit der Schrittweite $\Delta\tau = 0,2 \text{ h}$ und dem Gleichungssystem (4) ergeben:

$$F = e^{2 \cdot 0,2} = 1,492:$$

$$k_1 = 1 + 1 \cdot 2 \cdot 0,2 F = 1,597$$

$$k_2 = 1,597 + 1 \cdot 2 \cdot 0,2 F^2 = 2,487$$

\vdots

$$k_5 = 5,796 + 1 \cdot 2 \cdot 0,2 F^5 = 8,752. \text{ Fehler gegenüber analytisch berechnetem Wert: } 18,4 \%$$

Für kleinere Zeitschrittweiten nähert sich das Ergebnis besser an den analytischen Wert an und der Fehler reduziert sich deutlich:

$\Delta\tau = 1 \text{ min} = 1/60 \text{ h}$	$k_n = 60 = 7,50$
$\Delta\tau = 0,5 \text{ min} = 1/120 \text{ h}$	$k_n = 120 = 7,44$
$\Delta\tau = 1 \text{ s} = 1/3600 \text{ h}$	$k_n = 3600 = 7,39$

B Entwicklung aus der bekannten Definition für eine exponentielle Folge

Bei einer exponentiellen Folge wächst (bzw. fällt) das Folglied um einen relativen Anteil. Die Änderung zwischen $k_n - k_{n-1}$ ist proportional zum Bestand k_{n-1} . Es gilt das Entwicklungsgesetz:

$$k_n - k_{n-1} = k_{n-1} G \quad G \text{ Wachstumsfaktor } G < 0 \text{ Zerfall; } G > 0 \text{ Wachstum} \quad (5)$$

$$k_n = k_{n-1} \underbrace{(1 + G)}_{H=1+G} = k_{n-1} H \quad H \text{ Vervielfältigungsfaktor } H < 1 \text{ Zerfall; } H > 1 \text{ Wachstum} \quad (6)$$

Zahlenbeispiel C: $k_0 = 1$, $b = 2 \text{ h}^{-1}$, $k_{1h} = k_{n=60} = 7,389 \dots$, Zeitschritt $\Delta\tau = 1 \text{ min}$

$$k_{60} = k_0 H^{60} \rightarrow 7,389 \dots = H^{60} \rightarrow H = 1,0339 \dots$$

Die Richtigkeit der rekursiven Berechnung nach Gl. (6) wird bestätigt. Der mathematische Zusammenhang ist durch Gl. (10) gegeben.

τ	Gl. (2)	Gl. (6)
0,5 h	2,7183	2,7183
1,0 h	7,3891	7,3891
2,0 h	54,5982	54,5982

Im Weiteren werden Gl. (6) und der Zeitschritt $\Delta\tau = 1 \text{ min}$ verwendet, da er den praktischen Gegebenheiten realistisch entspricht.

Bereitstellung der Wachstumsdaten

Realistisch ist die praktische Messung des Wachstums bei abgestellter Lüftung $\dot{V} = 0$ und Partikelstrom $\dot{P} = 0$. Besser ist natürlich die Bestimmung unter Laborbedingungen.

Ist die Zeitschrittweite $\Delta\tau = 1 \text{ min} = 1/60 \text{ h}$, so gelten für eine beliebige Vervielfältigungszeit

$$\tau_V = n_V \Delta\tau \quad \rightarrow \quad \text{Zahl der Zeitschritte } (\equiv \text{Minuten}): \quad n_V = \frac{\tau_V}{\Delta\tau}. \quad (7)$$

Ist die Gesamtvervielfältigung H_{gesamt} , so beträgt der gesuchte Vervielfältigungsfaktor

$$H = H_{\text{gesamt}}^{n_V} = H_{\text{gesamt}}^{\frac{\tau_V}{\Delta\tau}}. \quad (8)$$

Zahlenbeispiel D: $\tau_V = 2 \text{ h}$; $H_{\text{gesamt}} = 2,5$ (fache Anzahl der Partikel gegenüber Beginn)

$$H = H_{\text{gesamt}}^{\frac{\tau_V}{\Delta\tau}} = 2,5^{\frac{1}{2 \cdot 60}} = 1,00766.$$

Ist die **Verdopplungszeit** (in der Biologie ist es die Generationenzeit) $\tau_{V,\text{Verdopplung}}$ in h, so gilt mit $H_{\text{gesamt}} = 2$ für den Zeitschritt (1/60 h):

$$H = 2^{\frac{1}{60 \tau_{V,\text{Verdopplung}}}}. \quad (9)$$

Zahlenbeispiel E: $\tau_{V,\text{Verdopplung}} = 2 \text{ h}$; $n_{V,\text{Verdopplung}} = 60 \cdot 2 = 120$

$$H = 2^{\frac{1}{60 \tau_{V,\text{Verdopplung}}}} = 2^{\frac{1}{120}} = 1,005793$$

Analog wird bei Zerfallsprozessen die **Halbwertszeit** $\tau_{V,\text{Halbwert}}$ in h benannt, so gilt mit $H_{\text{gesamt}} = 0,5$ analog:

$$H = 0,5^{\frac{1}{60 \tau_{V,\text{Halbwert}}}}. \quad (9a)$$

Zahlenbeispiel F: $\tau_{V,\text{Halbwert}} = 3 \text{ h}$; $n_{V,\text{Halbwert}} = 60 \cdot 3 = 180$

$$H = 0,5^{\frac{1}{60 \tau_{V,\text{Halbwert}}}} = 0,5^{\frac{1}{180}} = 0,996157$$

Selbstverständlich kann auch aus dem bekannten **Vermehrungskoeffizient** b der Vervielfältigungsfaktor H bestimmt werden. In Gl. (2) galt $k(\tau) = k_0 e^{b \tau}$. Es gilt für die allgemeine Vervielfältigungszeit τ_V in Verbindung mit der umgeformten Gl. (8):

$$e^{b \tau_V} = H_{\text{gesamt}} = H_{\text{gesamt}}^{\frac{\tau_V}{\Delta\tau}}$$

$$H = e^{b \Delta\tau} \quad \rightarrow \quad \text{für kleine Exponenten } H \approx 1 + b \Delta\tau. \quad (10)$$

Zahlenbeispiel G: Es gelten die Werte aus dem Zahlenbeispiel A

$$b_D = 0,005776 \text{ min}^{-1} \quad \rightarrow \quad H = e^{b_D \Delta\tau} = 1,00579 \quad \rightarrow \quad H^{120} = 2$$

$$b_H = -0,003851 \text{ min}^{-1} \quad \rightarrow \quad H = e^{b_H \Delta\tau} = 0,99616 \quad \rightarrow \quad H^{180} = 0,5.$$

Wie man erkennt, ist die Bereitstellung der Ausgangswerte zur Berechnung für das exponentielle

Wachstum (Zerfall) für die rekursiv arbeitende Differenzengleichung sehr einfach.

2.2 Partikelbilanzen und Konzentrationsverläufe

Betrachtet wird *ein Intervall* i zwischen den Zeiten $\tau_1(i)$ und $\tau_2(i)$ mit konstant emittierendem Partikelstrom \dot{P} und konstantem Luftvolumenstrom \dot{V} , wobei die Partikelanzahl einem exponentiellen Wachstums- oder Zerfallsprozess unterliegt. Der Zeitraum $\tau_2(i) - \tau_1(i)$ wird jeweils in $n \Delta\tau$ zerlegt und eine rekursiv arbeitende *Differenzengleichung* betrachtet, sodass sich die Werte für n aus denen für $n-1$ ergeben.

Ausgehend von der Partikelanzahl im Raum $V k_{n-1}$, die zur Zeit τ_{n-1} im Raum herrscht, ändert sich im Zeitraum $\Delta\tau$ die Partikelanzahl, sodass zur Zeit $\tau_n = \tau_{n-1} + \Delta\tau$ die Konzentration k_n vorhanden ist:

$$\underbrace{V k_n}_{\text{neue Partikel-anzahl}} = \underbrace{V k_{n-1}}_{\text{alte Partikel-anzahl}} + \underbrace{\dot{V} k_{\text{Zu}} \Delta\tau}_{\text{Partikeleintrag durch Zuluft}} + \underbrace{\dot{P} \Delta\tau}_{\text{emittierte Partikel in den Raum}} + \underbrace{V k_{n-1} G}_{\text{Partikel- vermehrung}} - \underbrace{\dot{V} k_{n-1} \Delta\tau}_{\text{Partikelabfuhr durch Abluft}}. \quad (11)$$

Da außer der Partikelvermehrung noch weitere Partikeländerung durch die Lüftung und den Partikeleintrag auftreten ist beim Vermehrungsterm zunächst der Wachstumsfaktor G nach Gl. (5) zu verwenden.

Nur zur Gegenüberstellung zur Raumlüftung I sei die veränderte Differenzialgleichung mit der Wachstumsgeschwindigkeit nach Gl. (3) angeführt:

$$\underbrace{\dot{V} k_{\text{Zu}} d\tau}_{\text{Partikeleintrag durch Zuluft}} + \underbrace{\dot{P} d\tau}_{\text{emittierte Partikel in den Raum (Quelle)}} + \underbrace{V k b e^{b \tau} d\tau}_{\text{Partikel- vermehrung}} - \underbrace{\dot{V} k d\tau}_{\text{Partikelabfuhr durch Abluft}} = \underbrace{V dk}_{\text{Partikelzunahme in der Raumlüftung}}.$$

Falls diese Differenzialgleichung überhaupt lösbar ist, würde diese einen aufwändigen Algorithmus nach sich ziehen, bei dem auch die einzelnen Betriebsfälle zu unterscheiden wären. Der Algorithmus der Differenzengleichung besteht dagegen nur aus einer einzigen Zeile, die übersichtlich und leicht verständlich ist.

Die **zugeschnittene Berechnungsgleichung** für den Zeitschritt $\Delta\tau = 1 \text{ min}$ mit \dot{V} in m^3/h , \dot{P} in Partikel/h und mit dem Vervielfältigungsfaktor H nach Gl. (6) bezogen auf $\Delta\tau = 1 \text{ min}$ lautet:

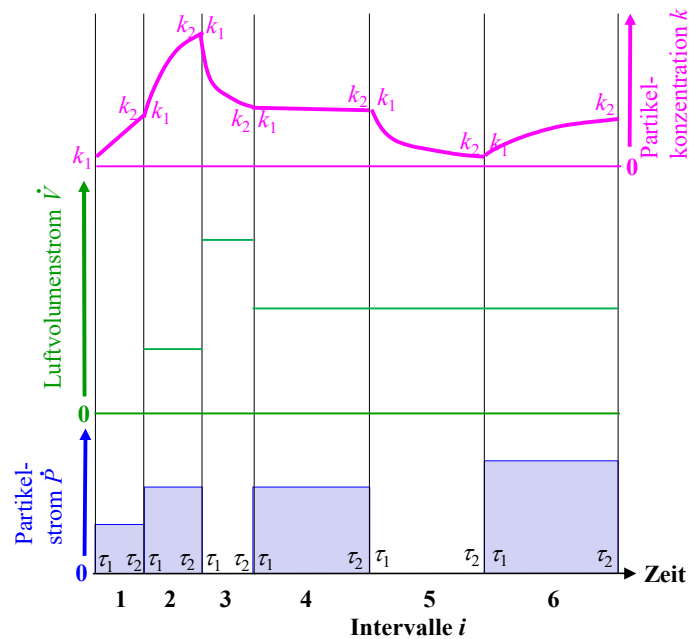
$$k_n = k_{n-1} H + \frac{\dot{V}}{V} (k_{\text{Zu}} - k_{n-1}) \frac{1}{60} + \frac{\dot{P}}{V} \frac{1}{60}. \quad (12)$$

Durch Substitution der Luftwechselzahl β in h^{-1} kann auch $\dot{V} = \beta V$ geschrieben werden.

2.3 Zusammensetzung realer Betriebsverläufe

Im praktischen Betrieb werden in der Regel die verschiedensten zeitlichen Abläufe bezüglich Partikeleintrag und Größe des Luftvolumenstromes vorkommen. So können beispielsweise auftreten: periodische Vorgänge, über längere Zeiträume nahezu stationäre Betriebszustände, Fenster-Stoßlüftungen, zeitbegrenzte Aerosoleinträge durch Personen usw. Diese unterschiedlichen Konstellationen werden gemäß Bild 1 für die einzelnen Betriebsintervalle i aneinandergereiht längs eines Zeitstrahles τ betrachtet. Damit sind jeweils τ_1 und k_1 am Intervallbeginn sowie τ_2 und k_2 am Intervallende definiert. Bei der Intervallreihung gelten die entsprechenden Verknüpfungen, beispielsweise $k_2(i=5) \equiv k_1(i=6)$. Im Rechenprogramm wird dies automatisch organisiert.

Bild 1 Einteilung von Intervallen mit jeweils konstanten Volumenströmen und/oder Partikelströmen



Innerhalb dieser Intervalle i erfolgt die zeitdiskretisierte Abarbeitung der Gleichung (12) in Minuten-Schritten $\Delta\tau$.

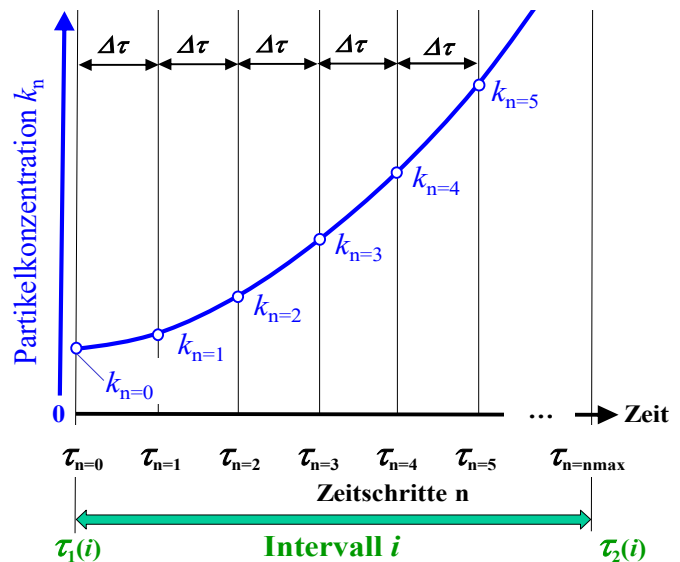


Bild 2 Veränderungen der Partikelkonzentrationen k_n in Abhängigkeit von τ_n innerhalb eines beliebigen Intervalls i

Die Berechnung erfolgt für alle vorgegebenen Intervalle $i = 1 \dots i_{max}$, sodass insgesamt $\sum_{i=1}^{i_{max}} i \cdot n_{max}(i)$ Rechnungen durchgeführt werden.

3 Rechenprogramm

Die meisten auf der Website <http://berndglueck.de> vorgestellten Rechenprogramme wurden in der Programmierumgebung **VISUALBASIC.NET STANDARD** erstellt. Da dieses nicht mehr aktualisiert wurde, kommt für die seit 2014 erarbeiteten Rechenprogramme die neue Programmierumgebung **MICROSOFT Visual Basic 2010 Express**, die aus dem Internet kostenlos downloadbar ist, zum Einsatz. Dies ist jedoch nur für Nutzer, die Weiterentwicklungen und/oder Ergänzungen des Programms vornehmen wollen, von Interesse.

Selbstverständlich kann mit dem Rechenprogramm **Berechnung.exe** direkt gearbeitet werden.

Erfolgt die Programmabarbeitung aber in der Programmierumgebung, sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetafeln – bewirkt hätten, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu [MICROSOFT WORD](#) hergestellt.

3.1 Laden und Starten des Rechenprogramms

Die unter <http://berndglueck.de/Lueftung> stehende komprimierte Datei "[Lueftung_II.zip](#)" ist nach dem Download zu extrahieren und in ein eigenes Verzeichnis (Ordner) – beispielsweise "[Lüftung](#)" – auf die Festplatte zu kopieren. Im genannten Ordner befinden sich dann:

- [Beispiel_11](#)
- [Beispiel_12](#)
- [Programm II](#)

Im Unterordner "Programm" ist das Rechenprogramm mit allen Entwicklungsdateien enthalten.

- [Berechnung.exe](#) (Rechenprogramm als Datei zur sofortigen Nutzung)
- [Programm.sin](#) (Rechenprogramm als Datei zur Verwendung in der Programmierungsumgebung Visual Basic 2010 Express).

[Hinweis zur Bildschirmeinstellung](#)

Eine gut lesbare Darstellung erreicht man mit der Auflösung 1920×1080 Pixel und der Skalierungsstufe 100 % oder 125 %.

Die Programmabarbeitung erfolgt in der Regel ohne Entwicklungsumgebung:

[Berechnung.exe](#) mit Doppelklick starten.

Zu Beginn wird in einem Fenster ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben! Ist das Beispiel noch nicht vorhanden, so muss der Ordner – beispielsweise [Beispiel_xy](#) – dafür *vorher* angelegt werden. In diesem wird dann automatisch die Datei [Eingabe.dat](#) angelegt. In dieser sind auch die Ergebnisse eines bereits berechneten Beispiels verzeichnet.

3.2 Bearbeitung des Programmlistings

Im Ordner "[Programm II](#)" ist – wie oben bereits mitgeteilt – auch der Quellcode "[Programm.sin](#)" enthalten. Um diesen anzuzeigen, ist die Entwicklungsumgebung Visual Basic 2010 Express zu laden und beispielsweise "[Programm.sin](#)" mit Doppelklick zu starten.

Über "Ansicht" und "Projektmappen-Explorer" findet man die [Form1](#) und die [Form2](#). In [Form1](#) sind die Algorithmen für die Eingabe, die Berechnung und den Ausgabedruck enthalten. In [Form2](#) befindet sich der Algorithmus zur Diagrammerstellung. Aus den Programmlistings sind alle inhaltlichen Details – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich.

- Der Algorithmus kann nach den entsprechenden Programmierregeln geändert werden.
- Die Programmabarbeitung in der Entwicklungsumgebung ist mit und ohne spezieller Verfolgungsstrategie möglich:

⇒ Menüleiste " Debuggen " Einfachklick ⇒ " Debugging starten " Einfachklick

3.3 Abarbeitung

Bild 3 zeigt die Bildschirmoberfläche (Maske) nach dem Aufruf beispielsweise von **Berechnung.exe**.

Bild 3 Bedienoberfläche des Rechenprogramms "Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom"

1. **START** drücken und Beispiel mit Pfad und Ordner eingeben bzw. überschreiben.

2. Eventuell vorhandenes Beispiel **LADEN** oder **LÖSCHEN** vornehmen.
3. Neue Zahleneingaben sind gemäß Beschreibung in die Maske einzutragen. Vorsicht: **Keine Leerzeichen im gesamten Eingabefeld!** Mit **EINGABE prüfen + speichern** abschließen.

Eine Grobüberprüfung wird vorgenommen. Bei Fehleranzeige und akustischem Signal (BEEP) bitte Korrekturen in der Eingabemaske vornehmen. Bei Fehlerfreiheit werden die Eingabewerte in die Datei **Eingab.dat** geschrieben.

RECHNEN drücken bewirkt die Abarbeitung des Algorithmus. Nach Abschluss der Berechnung wird dies im oberen Textfeld mit der Aufschrift "**Rechnung beendet!**" und akustischem Signal (BEEP) angezeigt.

4. Aktivieren von **ZEICHNEN** bewirkt das Öffnen eines zweiten Fensters.



Bild 4 Diagrammoberfläche des Rechenprogramms zum "Zeitlichen Konzentrationsverlauf"

Das dortige Drücken von **ZEICHNEN** trägt den Konzentrationsverlauf in das vorbereitete Diagramm ein. Der Darstellungsbereich i_{\min} , i_{\max} , der Konzentrationsbereich k_{\min} , k_{\max} und die Teilung der Ordinate können überschrieben werden. Die Aktualisierung der Anzeige erfolgt durch wiederholtes Drücken von **ZEICHNEN**.

Der Sonderberechnungsfall kann nicht gezeichnet werden, da er ja nur die Ermittlung des Luftvolumenstromes beinhaltet. Wenn dennoch Interesse am Konzentrationsverlauf besteht, sind die Daten – einschließlich des ermittelten Luftvolumenstromes – als normaler Berechnungsfall ($i_{\max} = 1$ und Intervall $i = 1$) abzuarbeiten.

5. Das Aktivieren von **DRUCK** liefert einen kompletten Ausdruck der Eingabewerte und der berechneten Größen als WORD-Datei. Diese kann in bekannter Weise gespeichert, gedruckt und bearbeitet werden. Je nach WORD-Einstellung sind eventuell die Zeilenabstände anzupassen.
6. **ENDE** drücken schließt das Diagrammfenster und das Rechenprogramm.

3.4 Ein- und Ausgabedaten

Bild 3 zeigt alle Eingabefelder, die zur Programmabarbeitung zu füllen sind. Nachfolgende Größen sind von Bedeutung. Die Bezeichnungen entsprechen den programminternen Benennungen.

Es kann mit beliebigen Maßzahlen gearbeitet werden, um gut ablesbare Werte zu erhalten z. B. mit $1000 \text{ Partikeln} / \text{m}_{\text{Luft}}^3$ ($k_{\text{Partikel}} / \text{m}_{\text{Luft}}^3$) oder $0,001 \text{ Partikeln} / \text{m}_{\text{Luft}}^3$ ($m_{\text{Partikel}} / \text{m}_{\text{Luft}}^3$). Der emittierende Partikelstrom in den Raum \dot{P} ist jedoch in der gleichen Maßeinheit z. B. $k_{\text{Partikel}} / \text{h}$ oder $m_{\text{Partikel}} / \text{h}$ anzugeben. Allgemein gelten: $x_{\text{Partikel}} / \text{m}_{\text{Luft}}^3$ bzw. $x_{\text{Partikel}} / \text{h}$.

<i>Basiseingaben</i>		
V	m ³	Raumvolumen
imax	-	Anzahl der Untersuchungsintervalle
kStart	xP/m ³	Partikelkonzentration im Raum zu Beginn der Untersuchung ($\equiv k_1$ bei $i = 1$)
H	-	Vervielfältigungsfaktor nach (Gl. (6)) bezogen auf den Zeitschritt $\Delta\tau = 1$ min (Wachstum: $H > 1$; Zerfall: $H < 1$; Neutral: $H = 1$)
<i>Festlegung der Eingabevarianten und des Partikelwachstums</i>		
RadioButton 1 oder 2	Eingaben des Luftvolumenstromes VL oder der Luftwechselzahl β	
RadioButton 5 oder 6	Eingaben der Partikelkonzentration der Zuluft (zeitlich konstant oder in jedem Intervall i unterschiedlich)	
RadioButton 7 bis 11	Maßzahlen zur Partikelkonzentration x (z. B. xP/m ³ oder xP/h) (die reale Partikelzahl ist z. B. 1000× größer oder 1/1000000 kleiner als angegeben; im letztgenannten Fall entspricht dies ppm)	
kZu_const	xP/m ³	zeitlich konstante Partikelkonzentration in der Zuluft ($i = 1 \dots imax$) (nur bei RadioButton = 5)
<i>Intervallbezogene Eingaben für $i = 1$ bis $imax$ ohne Leerzeilen dazwischen</i>		
Dtau(i)	min	Zeitdauer des betrachteten Intervalls i
VL(i)	m ³ /h	Luftvolumenstrom durch den Raum im Intervall i (nur bei RadioButton = 1)
$\beta(i)$	1/h	Luftwechselzahl im Intervall i (nur bei RadioButton = 2)
kzu(i)	xP/m ³	Partikelkonzentration in der Zuluft im Intervall i (nur bei RadioButton = 6)
P(i)	xP/h	Partikelstrom von einer Quelle im Raum im Intervall i
Weiße Felder nicht ausfüllen! Dort erfolgt die Ergebnisanzeige (Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls i : $k_1(i)$, $k_2(i)$)		

Beim **Sonderberechnungsfall** – Ermittlung des erforderlichen Luftvolumenstromes VL_Ber bzw. des Luftwechsels β _Ber – ist in der CheckBox ein Häkchen zu setzen. Die vorstehend genannten intervallbezogenen Eingaben entfallen, stattdessen sind nachfolgende Eingaben vorzunehmen. Sie gelten nur für den Berechnungszeitraum.

Dtau_Ber	min	Zeitdauer
kzu_Ber	xP/m ³	Partikelkonzentration in der Zuluft
P_Ber	xP/h	Partikelstrom von einer Quelle im Raum
k1	xP/m ³	Partikelkonzentration im Raum zu Beginn des Berechnungszeitraumes
k2	xP/m ³	Partikelkonzentration im Raum am Ende des Berechnungszeitraumes
Weiße Felder nicht ausfüllen! Dort erfolgt die Ergebnisanzeige (erforderlicher Luftvolumenstrom V_Ber und erforderliche Luftwechselzahl β _Ber.		

Die Ermittlung des Luftvolumenstromes beim Sonderberechnungsfall ist aufwendig und erfolgt in zwei Genauigkeitsstufen $\pm 0,5\%$ und $\pm 1\%$ bezüglich der Partikelkonzentration k_2 , die programmintern nacheinander aufgerufen werden. Der Fehler des Luftvolumenstromes kann größer sein.

Wird entsprechend Seite 9 **ZEICHNEN** aktiviert, öffnet sich das Diagrammfenster. Nach Drücken

des dortigen Buttons **ZEICHNEN** erscheint das Diagramm mit den Partikelkonzentrationsverläufen.

Dies gilt jedoch nicht für den Sonderberechnungsfall!

Die Diagrammgrenzen werden automatisch so gewählt, dass die volle Diagrammgröße zur Anzeige genutzt wird. Diese können durch Überschreiben verändert werden.

i_min	-	niedrigstes Anzeigeintervall
i_max	-	höchstes Anzeigeintervall
k_min	xP/m ³	minimaler Partikelkonzentrationswert der Ordinate
k_max	xP/m ³	maximaler Partikelkonzentrationswert der Ordinate
Teilung	-	Teilung der Ordinatenachse

Wiederholtes Aktivieren des Buttons **ZEICHNEN** aktualisiert die Diagrammdarstellung.

4 Testbeispiele

Da für den komplexen exponentiellen Verlauf keine Handrechnung vorliegt, wird der Algorithmus anhand bisheriger Beispiele abschnittsweise überprüft. Die Eingabedaten sind den nachfolgenden Bildschirmkopien zu entnehmen.

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_C\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung kStart xP/m³

Zeitdauer min Luftvolumenstrom VL m³/h Luftwechsel β 1/h

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Partikelstrom P xP/h

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu

Im Beispiel C (Seite 4) wurde ebenfalls der Wert $k_{60} = 7,3891$ errechnet. Das gleiche Ergebnis folgt natürlich auch bei einer Berechnung mit der Einheit ppm (Maßzahl $x = 1/1000000$).

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_C\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung kStart xP/m³

Zeitdauer min Luftvolumenstrom VL m³/h Luftwechsel β 1/h

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☐ 1 ☐ 1/1000 ☒ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Partikelstrom P xP/h

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu

Schließlich wird noch das Zahlenbeispiel E mit dem Rechenprogramm nachvollzogen.

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_E\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung kStart xP/m³

Zeitdauer min Luftvolumenstrom VL m³/h Luftwechsel β 1/h

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Partikelstrom P xP/h

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu

Wird zusätzlich ein Partikelstrom $\dot{P} = 100$ Partikel/h im Raum emittiert, so folgt:

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_E\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³
 Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung
 kStart xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an.
 Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu

i	Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m³/h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	k1 xP/m³	k2 xP/m³
i = 1	120	0	0,0	0,00	100,00	1,00	4,88

Man erkennt, dass der zusätzliche Partikelstrom in die Vermehrung einbezogen wird. Ansonsten müsste $k_2 = 4$ Partikel/m³ betragen. Erfolgt keine Vermehrung ergibt sich $k_2 = 3$ Partikel/m³:

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_E\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³
 Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung
 kStart xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an.
 Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu

i	Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m³/h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	k1 xP/m³	k2 xP/m³
i = 1	120	0	0,0	0,00	100,00	1,00	3,00

In ähnlicher Weise kann die Wirkung der Lüftung getestet werden.

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_G\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³
 Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung
 kStart xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☐ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☒ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an.
 Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu

i	Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m³/h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	k1 xP/m³	k2 xP/m³
i = 1	120	50	0,5	1,00	0,00	1,00	1,60

Als weiterer Test wird das Beispiel_1 aus Raumlüftung I mit dem neuen Programm berechnet und die Partikelkonzentration als Zeitverlauf gezeichnet, wobei natürlich das Partikelwachstum durch die Wahl $H = 1$ unterdrückt werden muss. Es gilt:

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Test_L\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³
 Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung
 kStart xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☐ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☒ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☐ Konzentration zeitlich konstant kZu oder ☒ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

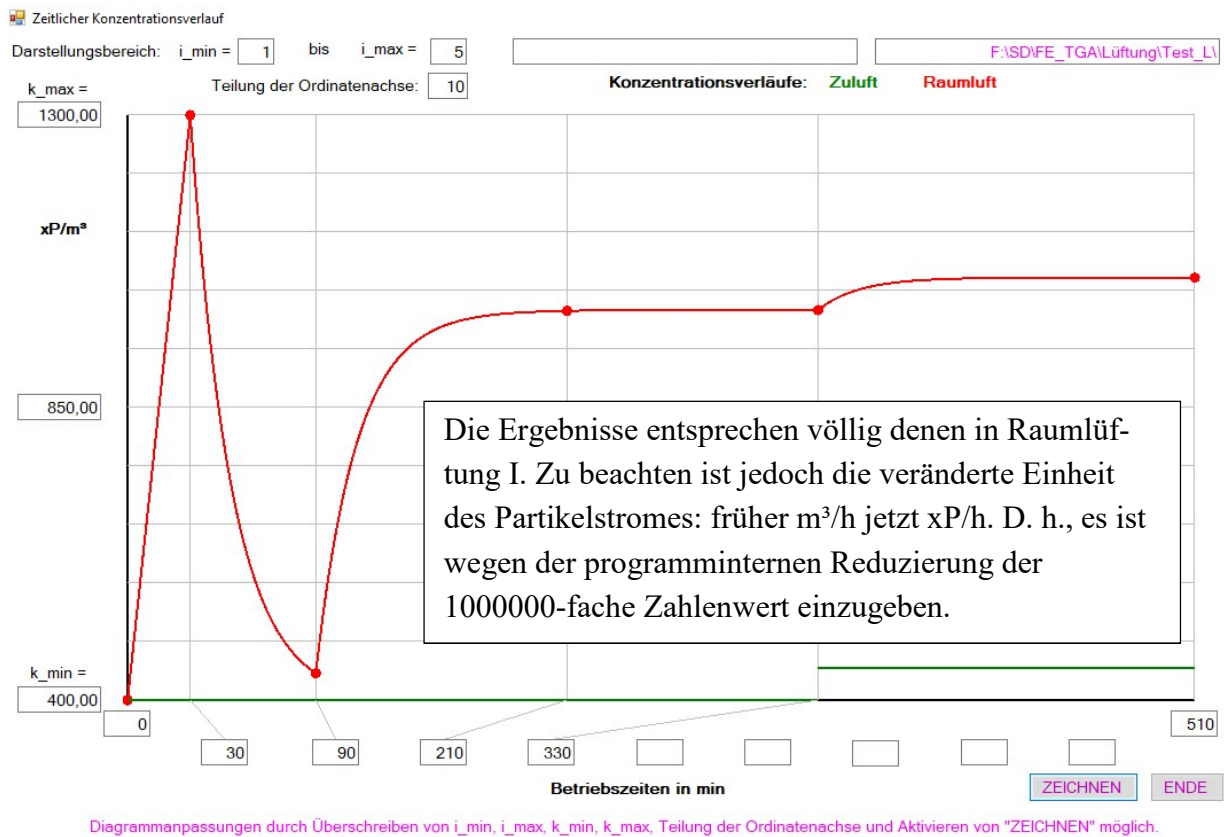
Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☐ 1 ☐ 1/1000 ☒ 1/1000 000

Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des
 k1 xP/m³ k2 xP/m³

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an.
 Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben! Ordner für Beispiel vorher anlegen!
 2. LADEN oder LÖSCHEN aller Daten (Daten aus Datei laden oder Neueingabe)!
 3. EINGABE prüfen / speichern drücken!

i	Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m³/h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	k1 xP/m³	k2 xP/m³
i = 1	30	0	0,0	400,00	540000,00	400,00	1300,00
i = 2	60	900	3,0	400,00	0,00	1300,00	441,46
i = 3	120	900	3,0	400,00	540000,00	441,46	998,81
i = 4	120	900	3,0	400,00	540000,00	998,81	1000,00
i = 5	180	900	3,0	450,00	540000,00	1000,00	1050,00



5 Beispiele mit Programmabarbeitung

Die mitgelieferten Beispiele (Beispiel_11 und Beispiel_12) sollten zur Überprüfung der richtigen Installation stets abgearbeitet werden!

5.1 Beispiel_11

Nachfolgend wird ein konstruiertes Beispiel, das über 5 Zeitintervalle mit intervallweise konstanten Luftvolumenströmen reicht, betrachtet. Die Partikelquelle ist während der Intervalle unterschiedlich stark aktiv. Die Zuluft weist eine geringe Partikelkonzentration auf. Die Partikel werden mit der Zeit inaktiv bzw. zerfallen. Ihre Halbwertszeit beträgt 2 h. Die Eingabewerte sind tabellarisch erkennbar. Der Vervielfältigungsfaktor ist bei einem Zerfallsprozess kleiner 1. Er ergibt sich gemäß Gl. (9a) zu:

$$H = 0,5^{\frac{1}{60 \cdot \tau_{\text{Halbwert}}}} = 0,5^{\frac{1}{120}} = 0,994240.$$

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

F:\SD\IFE_TGA\Lüftung\Beispiel_11

Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen: 300 m³

Untersuchungsintervalle: imax = 5

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung: kStart = 1000 xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☐ Konzentration zeitlich konstant kZu oder ☒ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Vervielfältigungsfaktor für ein exponentielles Wachstum der Partikelanzahl (Berechnungsschritt 1 min): H = 0,994240

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an.
 Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

	Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m³/h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	Partikelkonzentration zu Beginn k1 xP/m³	Partikelkonzentration am Ende k2 xP/m³
i = 1	30	0		100	2000		
i = 2	60	900		500	0		
i = 3	120	550		500	400000		
i = 4	120	900		1000	20000		
i = 5	180	900		1000	20000		

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben! Ordner für Beispiel vorher anlegen!

2. LADEN oder LÖSCHEN aller Daten (Daten aus Datei laden oder Neueingabe)

3. EINGABE prüfen / speichern drücken!

Bild 5a Beispiel_11: Eingaben für das Berechnungsbeispiel

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_11\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen m³
 Untersuchungsintervalle imax
 Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung kStart xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h
 Vervielfältigungsfaktor für ein exponentielles Wachstum der Partikelanzahl (Berechnungszeitschritt 1 min): H

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☐ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☒ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an.
 Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

	Zeitdauer min	Luftvolumen- strom VL m³/h	Luft- wechsel β 1/h	Zuluft- konzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls k1 xP/m³	k2 xP/m³
i = 1	30	0	0,0	100,00	2000,00	1000,00	843,96
i = 2	60	900	3,0	500,00	0,00	843,96	461,00
i = 3	120	550	1,8	500,00	400000,00	461,00	1025,87
i = 4	120	900	3,0	1000,00	20000,00	1025,87	916,74
i = 5	180	900	3,0	1000,00	20000,00	916,74	916,63
i = 6							
i = 7							
i = 8							
i = 9							
i = 10							

☐ Sonderberechnungsfall: Erforderlicher Luftvolumenstrom VL gesucht, um Grenzkonzentration k2 einzuhalten

Zeitdauer min	Luftvolumen- strom VL m³/h	Luft- wechsel β 1/h	Zuluft- konzentration kZu xP/m³	Partikelstrom P xP/h	Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls k1 xP/m³	k2 xP/m³

1. START drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben! Ordner für Beispiel vorher anlegen!
 2. LADEN oder LÖSCHEN aller Daten (Daten aus Datei laden oder Neueingabe)!
 3. EINGABE prüfen / speichern drücken! Es erfolgt automatische Datenspeicherung.
 4. RECHNEN aktivieren! Warten auf Ergebniseintrag! Es erfolgt automatische Datenspeicherung.
 5. ZEICHNEN aktivieren!
 6. Bei Bedarf DRUCKEN aktivieren!

START LADEN LÖSCHEN EINGABE prüfen + speichern RECHNEN ZEICHNEN DRUCKEN ENDE

Bild 5b Beispiel_11: Eingaben und Ergebnisse

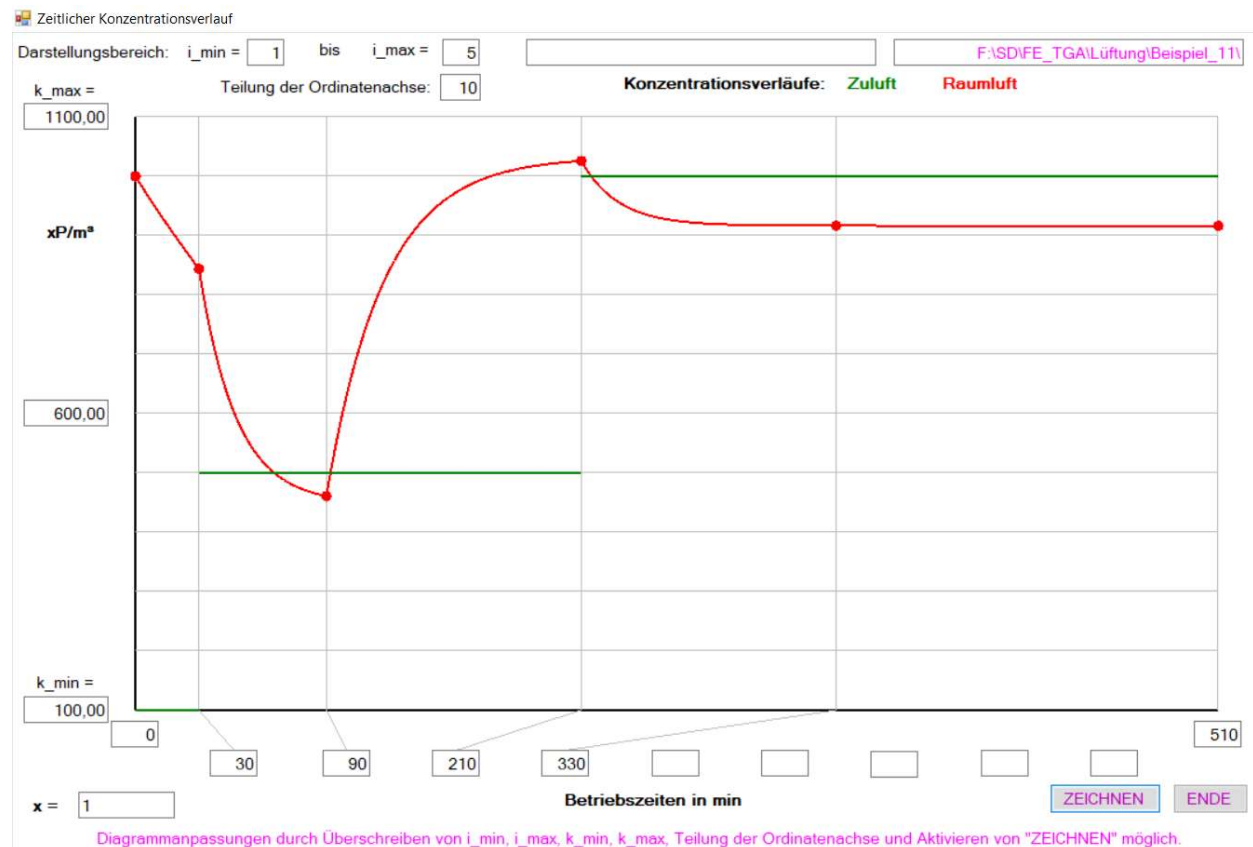


Bild 6 Beispiel_11: automatisch erzeugter Konzentrationsverlauf nach manueller Diagrammanpassung

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_11\

Berechnung des Partikelkonzentrationsverlaufs**Eingabe- und Ergebnisdaten:**

Basiseingaben:

Raumvolumen 300 m³ Anzahl der Untersuchungsintervalle 5

Vervielfältigungsfaktor für exponentielles Wachstum 0,994240

Partikelkonzentration im Raum zu Beginn der Untersuchung 1000 xP/m³

Festlegung der Eingabevarianten:

Eingabe des Luftvolumenstroms

Eingabe intervallbezogener Partikelkonzentrationen in der Zuluft

Intervalldaten (Koeffizient für die Partikelzahlen $x = 1$):

i	Eingabewerte						Ergebnisse	
	Dtau	VL	β	kZu	P		k1	k2
-	min	m ³ /h	1/h	xP/m ³	xP/h		xP/m ³	xP/m ³
1	30	0	0,0	100,00	2000,00		1000,00	843,96
2	60	900	3,0	500,00	0,00		843,96	461,00
3	120	550	1,8	500,00	400000,00		461,00	1025,87
4	120	900	3,0	1000,00	20000,00		1025,87	916,74
5	180	900	3,0	1000,00	20000,00		916,74	916,63

Dtau Zeitdauer, VL Luftvolumenstrom, β Luftwechselzahl

kZu Partikelkonzentration in der Zuluft, P Partikelstrom

k1/k2 zu Beginn/am Ende des Intervalls

Bild 7 Beispiel_11: Ausdruck der Eingabewerte und der Ergebnisse**5.2 Beispiel_12**

Es wird das 3. Zeitintervall des Beispiel_11 zugrunde gelegt und "rückwärts" berechnet.

Berechnung der Partikelkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Aufgabe nicht lösbar! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_12\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

Eingaben (grüne und evtl. blaue Felder) und Ergebnisse (weiße Felder):

Raumvolumen 300 m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Partikelkonzentration zu Beginn der Untersuchung kStart xP/m³

Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Vervielfältigungsfaktor für ein exponentielles Wachstum der Partikelanzahl (Berechnungszeitschritt 1 min): H 0.994240

Eingabevariante für die Partikelkonzentration in der Zuluft:
☒ Konzentration zeitlich konstant kZu xP/m³ oder ☐ Konzentration veränderlich >>> Einzelwerte in Tabelle eintragen!

Koeffizienten für die Partikelzahlen x:
☐ 1000 000 ☐ 1000 ☒ 1 ☐ 1/1000 ☐ 1/1000 000

Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben! Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder

☒ Sonderberechnungsfall: Erforderlicher Luftvolumenstrom VL gesucht, um Grenzkonzentration k2 einzuhalten 6. Bei Bedarf DRUCKEN aktivieren!

Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m ³ /h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m ³	Partikelstrom P xP/h	Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls
					k1 xP/m ³ k2 xP/m ³
120			500	400000	461 1025,87

START LADEN LÖSCHEN EINGABE prüfen + speichern RECHNEN ZEICHNEN DRUCKEN ENDE

☒ Sonderberechnungsfall: Erforderlicher Luftvolumenstrom VL gesucht, um Grenzkonzentration k2 einzuhalten 6. Bei Bedarf DRUCKEN aktivieren!

Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m ³ /h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu xP/m ³	Partikelstrom P xP/h	Partikelkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls
					k1 xP/m ³ k2 xP/m ³
120	549	1,8	500,00	400000,00	461,00 1025,87

START LADEN LÖSCHEN EINGABE prüfen + speichern RECHNEN ZEICHNEN DRUCKEN ENDE

Bild 8 Beispiel_12 oben: Eingaben für das Berechnungsbeispiel, unten: Eingaben und ErgebnisseBei der jetzt umgekehrten Berechnung wird die frühere Rechnung bestätigt: VL_Ber = 549 m³/h \approx 550 m³/h.

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_12\

Sonderberechnungsfall: Berechnung des erforderlichen Luftvolumenstroms**Eingabe- und Ergebnisdaten:**

Basiseingaben:

Raumvolumen 300 m³

Vervielfältigungsfaktor für exponentielles Wachstum 0,994240

Festlegung der Eingabevarianten:

Daten des betrachteten Intervalls

(Koeffizient für die Partikelzahlen $x = 1$):

Eingabewerte					Ergebnisse	
Dtau	k1	k2	kZu	P	VL	β
min	xP/m ³	xP/m ³	xP/m ³	xP/h	m ³ /h	1/h
120	461,00	1025,87	500,00	400000,00	549	1,8

Dtau Zeitdauer, k1/k2 Partikelkonzentration zu Beginn/am Ende des Intervalls

kZu Partikelkonzentration in der Zuluft, Partikelstrom

VL Luftvolumenstrom, β Luftwechselzahl

Bild 9 Beispiel_12: Ausdruck der Eingabewerte und der Ergebnisse