

– Raumlüftung I –

Luftvolumenströme und Konzentrationen unter instationären Bedingungen

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zielstellung	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Schadstoffbilanzen, Konzentrationsverläufe und erforderlicher Luftvolumenstrom	3
2.2	Zusammensetzung realer Betriebsverläufe	5
2.3	Schadstoffvolumenströme in Versammlungsräumen	6
2.4	Anmerkungen zur Lüftungseffektivität	8
3	Beispiele	9
3.1	Beispiel 1	9
3.2	Beispiel 2	10
3.3	Beispiel 3	10
3.4	Beispiel 4	10
4	Rechenprogramm	11
4.1	Laden und Starten des Rechenprogramms	11
4.2	Bearbeitung des Programmlistings	12
4.3	Abarbeitung	12
4.4	Ein- und Ausgabedaten	14
5	Beispiele mit Programmabarbeitung	15
5.1	Beispiel_1	15
5.2	Beispiel_2	18
5.3	Sonderbeispiel (allgemeiner Schadstofffall)	20

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

Die Festlegung des Luftvolumenstromes bei Lüftungsanlagen erfolgt nach Normenvorgaben (hygienische Forderungen, Außenluftstraten), nach den auftretenden Luftverunreinigungen (Schadstofflasten) und nach den thermischen Lasten im Raum (Heiz- und Kühllasten). Bei Klimaanlageanlagen sind zusätzlich die Feuchtelasten zu beachten.

Da die Normenforderungen in der Regel und die Schadstoffbegrenzungen grundsätzlich auf *zulässigen Raumlufkonzentrationen* basieren, ist die Kenntnis über den Zusammenhang von Luftvolumenstrom durch den Raum und die Schadstoffkonzentration im Raum von *gesundheitlich dominanter* Bedeutung.

Die Kompensation der Heiz-, Kühl- und Feuchtelasten ist hauptsächlich für den *behaglichen* Aufenthalt im Raum relevant. Dies ist nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtungen. Aussagen zu zulässigen Temperatur- und Feuchtebereichen finden sich z. B. unter: [Raummodell](#), [operative Raumtemperatur](#), [Strahlungstemperatur](#), [Strahlungstemperatur-Asymmetrie](#), [Klimaprozess](#).

Bei der Lüftung eines Raumes ist nicht immer ein stationärer Betrieb realisierbar. Einerseits kann sich nach einem vorgegebenen Zeitschema der Luftvolumenstrom und andererseits zeitabhängig der Schadstoffeintrag ändern. Damit liegen im allgemeinen Fall instationäre Betriebsbedingungen vor.

Für die häufigsten Fälle – Versammlungsraum, Büroraum, Unterrichtsraum – wird der Schadstoffeintrag durch die Personen verursacht, wobei der kennzeichnende Marker die CO₂-Konzentration im Raum ist.

Bei Fabrikationsräumen sind dagegen die verschiedensten Schadstoffbelastungen denkbar.

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

Generell stellen sich drei grundsätzliche Fragen:

- 1 *Nach welcher Zeit wird im Raum eine vorgegebene Grenzkonzentration erreicht?*
- 2 *Welche Raumkonzentration stellt sich nach einer bestimmten Betriebszeit ein?*
- 3 *Welcher Luftvolumenstrom ist erforderlich, um nach einer bestimmten Zeit eine vorgegebene Raumkonzentration nicht zu überschreiten?*

Weiterhin sind drei Betriebskonstellationen denkbar:

- A *Die Lüftungsanlage fördert einen bestimmten Luftvolumenstrom und die Schadstoffquelle emittiert einen bekannten Schadstoffstrom. Im Sonderfall liegt ein stationärer Vorgang vor.*
- B *Die Lüftungsanlage ist abgeschaltet und die Schadstoffquelle emittiert, sodass die Konzentration des Schadstoffes im Raum ansteigt.*
- C *Die Lüftungsanlage fördert einen bestimmten Luftvolumenstrom und die Schadstoffquelle ist nicht aktiv, sodass sich die Konzentration in der Raumluf im Zeitverlauf reduziert.*

Im Folgenden werden die theoretischen Ableitungen vorgestellt und schließlich ein Rechenprogramm entwickelt, das auch eine anschauliche Ergebnisausgabe enthält.

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 Schadstoffdaten sind:

$\dot{V}_S$ ausgestoßener Schadstoffvolumenstrom in den Raum (dauerhaft oder zeitbegrenzt)

k_{Zu} Konzentration des Schadstoffes in der zugeführten Außenluft

k Konzentration des Schadstoffes in der Raumluft als Zeitfunktion

k_{zul} zulässige Konzentration des Schadstoffes in der Raumluft.

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

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

Als Laufvariable dient die Zeit τ . Bei zeitbegrenzten Volumenströmen $\dot{V}_S$ und/oder $\dot{V}$ können mehrere aufeinanderfolgende Intervalle definiert werden. Innerhalb dieser Intervalle sind die Volumenströme konstant (siehe Abschnitt 2.2, Bild 1).

2.1 Schadstoffbilanzen, Konzentrationsverläufe und erforderlicher Luftvolumenstrom

Betrachtet wird *ein Intervall* mit konstanten Volumenströmen ($\dot{V}_S, \dot{V}$). Es gilt bei ortsunabhängiger Schadstoffkonzentration k im Raum die allgemeingültige Bilanzgleichung für den infinitesimal kleinen Zeitraum $d\tau$, wobei dk den infinitesimalen Anstieg der Raumluftkonzentration darstellt:

$$\underbrace{\dot{V}k_{Zu}d\tau}_{\text{Schadstoffeintrag durch Zuluft}} + \underbrace{\dot{V}_S d\tau}_{\text{Schadstoffproduktion im Raum}} - \underbrace{\dot{V}k d\tau}_{\text{Schadstoffabfuhr durch Abluft}} = \underbrace{V dk}_{\text{Schadstoffzunahme in der Raumluft}}. \quad (1)$$

Umformung und Trennung der Variablen liefert

$$d\tau = \frac{V}{\dot{V}(k_{Zu} - k) + \dot{V}_S} dk,$$

woraus das bestimmte Integral über das Zeitintervall $\tau_2 - \tau_1$ bei gleichzeitiger Zunahme der Raumluftkonzentration um $k_2 - k_1$ folgt:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau = V \int_{k_1}^{k_2} \frac{1}{\dot{V}(k_{Zu} - k) + \dot{V}_S} dk.$$

Substituiert man

$x = \dot{V}(k_{Zu} - k) + \dot{V}_S$, so gelten weiter:

$$\frac{dx}{dk} = -\dot{V}$$

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau = -\frac{V}{\dot{V}} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x} dx = -\frac{V}{\dot{V}} \int_{\dot{V}(k_{Zu}-k_1)+\dot{V}_S}^{\dot{V}(k_{Zu}-k_2)+\dot{V}_S} \frac{1}{x} dx$$

$$\tau_2 - \tau_1 = -\frac{V}{\dot{V}} [\ln x]_{\dot{V}(k_{Zu}-k_1)+\dot{V}_S}^{\dot{V}(k_{Zu}-k_2)+\dot{V}_S}$$

$$\tau_2 - \tau_1 = -\frac{V}{\dot{V}} \ln \frac{\dot{V}(k_{Zu} - k_2) + \dot{V}_S}{\dot{V}(k_{Zu} - k_1) + \dot{V}_S} \quad \text{bzw.} \quad \tau_2 - \tau_1 = -\frac{V}{\dot{V}} \ln \frac{\dot{V}(k_2 - k_{Zu}) - \dot{V}_S}{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S}. \quad (2)$$

Damit kann die **Frage 1** grundsätzlich beantwortet werden.

Um die **Fragestellung 2** zu lösen, ist zunächst eine Umformung der Gl. (2) erforderlich:

$$e^{-\frac{\dot{V}}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1)} = \frac{\dot{V}(k_2 - k_{Zu}) - \dot{V}_S}{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S}. \quad (3)$$

Die weiteren Umstellungen ergeben:

$$k_2 = \left((k_1 - k_{Zu}) - \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} \right) e^{-\frac{\dot{V}}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1)} + \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} + k_{Zu}. \quad (4)$$

Die **Fragestellung 3** kann nicht direkt beantwortet werden, da $\dot{V}$ nicht eliminiert werden kann. Gl. (3) stellt bezüglich $\dot{V}$ eine transzendente Gleichung dar. Deshalb wird die e-Funktion in einer Reihe entwickelt und nach dem zweiten Glied abgebrochen.

Gedankenstütze: $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots$

$$1 - \frac{\dot{V}}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1) = \frac{\dot{V}(k_2 - k_{Zu}) - \dot{V}_S}{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S} \rightarrow 1 - \frac{\dot{V}(k_2 - k_{Zu}) - \dot{V}_S}{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S} = \frac{\dot{V}}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1)$$

$$\frac{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S - \dot{V}(k_2 - k_{Zu}) + \dot{V}_S}{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S} = \frac{\dot{V}}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1)$$

$$\frac{k_1 - k_2}{\dot{V}(k_1 - k_{Zu}) - \dot{V}_S} = \frac{1}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1) \rightarrow \frac{k_1 - k_2}{\frac{1}{\dot{V}}(\tau_2 - \tau_1)} + \dot{V}_S = \dot{V}(k_1 - k_{Zu})$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_S}{k_1 - k_{Zu}} + \frac{V}{\tau_2 - \tau_1} \frac{k_1 - k_2}{k_1 - k_{Zu}}. \quad (5)$$

Damit kann Frage 3 mit dieser Näherungslösung – Reihenentwicklung wurde früh abgebrochen – beantwortet werden. Im Rechenprogramm wird eine iterative Lösung der Gl. (4) benutzt.

Im Weiteren ist zu prüfen, ob die bereitgestellten Gleichungen auch bei den eingangs definierten Betriebskonstellationen immer eine Lösung liefern oder ob in signifikanten Fällen Grenzwertbetrachtungen erforderlich werden:

A Die Lüftungsanlage fördert einen bestimmten Luftvolumenstrom und die Schadstoffquelle emittiert einen bekannten Schadstoffstrom. Im Sonderfall liegt ein stationärer Vorgang vor.

Die Gln. (2) und (4) sind nutzbar. Die Betriebszeit $\tau_2 - \tau_1$ zwischen der die Schadstoffkonzentration in der Raumlüftung von k_1 auf k_2 ansteigt kann bestimmt werden. Genauso eindeutig ist die Schadstoffkonzentration in der Raumlüftung von k_2 am Ende der Betriebszeit $\tau_2 - \tau_1$ berechenbar. Im Sonderfall des unendlich langen Betriebes ($(\tau_2 - \tau_1) \rightarrow \infty$) stellt sich ein Gleichgewichtszustand ($k_2 \rightarrow \text{const}$) ein. Gl. (4) liefert:

$$k_2 = \underbrace{\left((k_1 - k_{\text{Zu}}) - \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} \right) e^{-\frac{\dot{V}}{V}(\tau_2 - \tau_1)}}_{\rightarrow 0} + \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} + k_{\text{Zu}}$$

$k_2 = \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} + k_{\text{Zu}}.$

(6)

Anmerkung: Würde man mit Gl. (5) arbeiten, so folgte:

$$k_2 = k_1 - (\dot{V}(k_1 - k_{\text{Zu}}) - \dot{V}_S) \frac{\tau_2 - \tau_1}{V}.$$

Diese würde wegen der näherungsweisen Reihenentwicklung selbstverständlich eine Abweichung gegenüber Gl. (4) ergeben. Der stationäre Fall aber führt ebenfalls zu Gl. (6). Denn in diesem Fall gelten die Grenzwerte $k_2 = k_1$ und $(\tau_2 - \tau_1) \rightarrow \infty$, sodass schrittweise weiter folgt:

$$k_2 = k_2 - (\dot{V}(k_2 - k_{\text{Zu}}) - \dot{V}_S) \frac{\tau_2 - \tau_1}{V}$$

$$0 = (\dot{V}(k_2 - k_{\text{Zu}}) - \dot{V}_S) \frac{\tau_2 - \tau_1}{V} \quad \rightarrow \quad \underbrace{\frac{0}{\tau_2 - \tau_1}}_{\rightarrow \infty} = \dot{V}(k_2 - k_{\text{Zu}}) - \dot{V}_S \quad \rightarrow \quad k_2 = \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} + k_{\text{Zu}}.$$

B Die Lüftungsanlage ist abgeschaltet und die Schadstoffquelle emittiert, sodass die Konzentration des Schadstoffes im Raum mit zunehmender Zeit ansteigt.

Die Gln. (2) und (4) liefern unbestimmte Ausdrücke, sodass man Grenzwertbetrachtungen durchführen müsste. Diese ist jedoch vermeidbar, denn der triviale Fall ergibt sich direkt aus Gl. (1) für $\dot{V} = 0$ zu $\dot{V}_S d\tau = V dk$, woraus der lineare Zusammenhang folgt:

$k_2 = k_1 + \frac{\dot{V}_S}{V} (\tau_2 - \tau_1).$

(7)

C Die Lüftungsanlage fördert einen bestimmten Luftvolumenstrom und die Schadstoffquelle ist nicht aktiv, sodass sich die Konzentration in der Raumlüftung reduziert.

Die Gl. (4) liefert sofort den zeitlichen Konzentrationsverlauf

$k_2 = (k_1 - k_{\text{Zu}}) e^{-\frac{\dot{V}}{V}(\tau_2 - \tau_1)} + k_{\text{Zu}}.$

(8)

2.2 Zusammensetzung realer Betriebsverläufe

Im praktischen Betrieb werden in der Regel die verschiedensten zeitlichen Abläufe bezüglich Schadstoffeintrag und Größe des Luftvolumenstromes vorkommen. So können beispielsweise auftreten: periodische Vorgänge, über längere Zeiträume nahezu stationäre Betriebszustände,

Fenster-Stoßlüftungen, zeitbegrenzte Schadstoffeinträge bei Labortätigkeiten und/oder bei Herstellungsprozessen in Werkhallen usw.

Diese unterschiedlichen Konstellationen werden aneinandergereiht längs eines Zeitstrahles τ betrachtet. Für die einzelnen Betriebsintervalle i gelten die Darlegungen des Abschnittes 2.1. Damit sind jeweils τ_1 und k_1 am Intervallbeginn sowie τ_2 und k_2 am Intervallende gemäß Bild 1 definiert. Bei der Intervallreihung sind die entsprechenden Verknüpfungen vorzunehmen. Beispielsweise gilt: $k_2(i = 5) \equiv k_1(i = 6)$. Im Rechenprogramm wird dies automatisch organisiert.

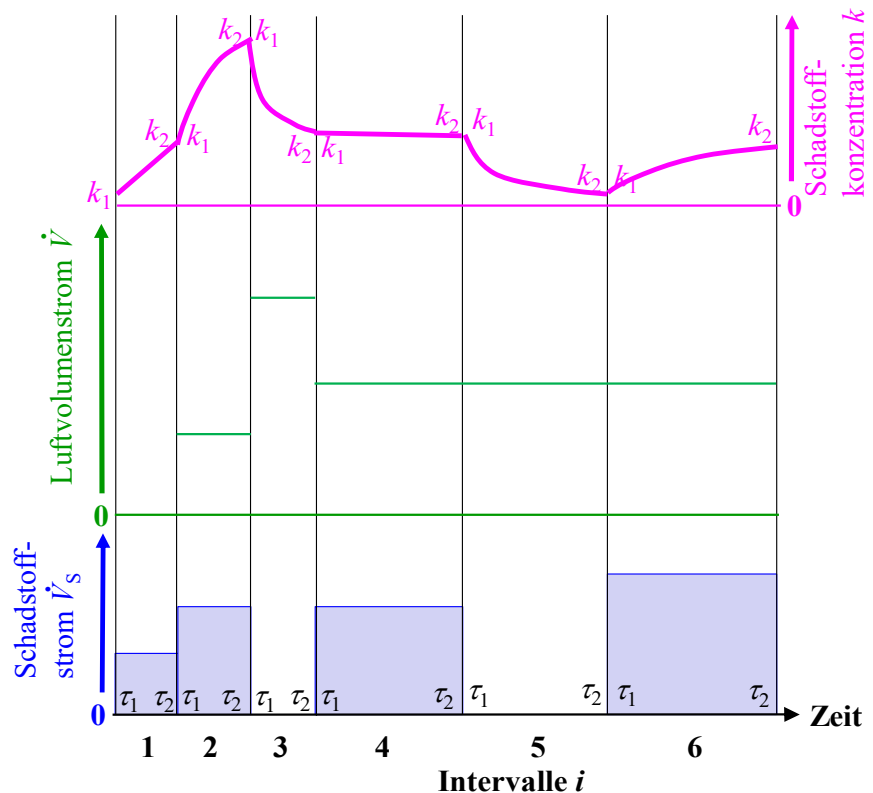


Bild 1 Einteilung von Intervallen mit jeweils konstanten Volumenströmen

2.3 Schadstoffvolumenströme in Versammlungsräumen

Während bei Fabrikationsräumen, Laboren usw. die Schadstoffeinträge speziell zu ermitteln sind, kann bei der Lüftung von Versammlungsräumen auf einen bekannten Datenbestand zurückgegriffen werden.

Unbedingt zu beachten ist hierbei die Norm DIN EN 16798. Der erforderliche Luftvolumenstrom ist dort in Abhängigkeit einer Kategorie (Kategorie II gilt beispielsweise für ein normales Maß an Erwartungen $\equiv$ übliche Praxis), der Personenzahl und/oder der Gebäudeart (z. B. schadstoffarm) angegeben. Diese Normdaten resultieren aus neuen Erkenntnissen aber teilweise auch aus gefundenen Kompromissen und sind – wie die Vergangenheit zeigte – oft starken Änderungen unterworfen. Oftmals wurden auch neue Definitionen und Gliederungen eingeführt. Generell werden unterschiedliche Schadstoffe in die Betrachtung einbezogen.

Diese Normwerte sind für Lernende in der Regel nicht nachvollziehbar, weshalb zum Verständnis auf früher relevante Daten der Literatur zurückgegriffen wird. Sie stehen in einem verständlichen Kontext und basieren lediglich auf der CO₂-Bilanz. Für den erforderlichen Atemluftvolumenstrom und weitere wichtige Werte bezogen auf eine Person werden dort genannt:

- $7,5 \text{ l/min} \rightarrow 7,5 \cdot 60 \text{ l/h} = 450 \text{ l/h} = 0,45 \text{ m}^3/\text{h}$
- $0,5 \text{ l/Atemzug}$

$20000 \text{ Atmungen/Tag} \rightarrow \text{Atemfrequenz } 20000/24/60 \text{ Atmungen/min} = 14 \text{ Atmungen/min}$

$$0,5 \cdot 14 \text{ l/min} = 7 \text{ l/min} \rightarrow 7 \cdot 60 \text{ l/h} = 420 \text{ l/h} = 0,42 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Aufnahme in den Lungenbläschen $0,315 \text{ m}^3/\text{h}$
- Sauerstoffverbrauch $0,3 \text{ l/min} = 18 \text{ l/h} = 0,018 \text{ m}^3/\text{h}$
- normaler Sauerstoffanteil in der Luft 21 %, in der ausgeatmeten Luft 17 %
genutzter Sauerstoff 4 % $\rightarrow$ Atemluftvolumenstrom $0,018/0,04 \text{ m}^3/\text{h} = 0,45 \text{ m}^3/\text{h}$.
- CO_2 -Anteil in der ausgeatmeten Luft ist um 4 % höher als in der Atemluft $\rightarrow$
 $\dot{V}_{\text{CO}_2} = 0,04 \cdot 0,45 \text{ m}^3/\text{h} = 0,018 \text{ m}^3/\text{h}$
- CO_2 -Anteil in der Außenluft 350 ppm (ländlicher Bereich) ... 400 ppm (städtischer Bereich)
- zulässiger CO_2 -Anteil in der Raumluft bei mittlerer Luftqualität 1000 ppm
- Außenluftbedarf pro Person $0,018/[(1000 - 400) \cdot 10^{-6}] \text{ m}^3/\text{h} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$.

Damit gelten die Berechnungsvorgaben:

$$\dot{V}_S = p \cdot 0,018 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{mit } p \text{ Personenzahl im Raum}$$

$$k_{\text{Zu}} = 400 \text{ ppm} = 400 \cdot 10^{-6}.$$

Weiterhin sollten nachfolgende Richtwerte eingehalten werden:

$$\dot{V} \geq p \cdot 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{bei stationärer Lüftung}$$

$$k_{\text{zul}} = 1000 \text{ ppm} = 1000 \cdot 10^{-6}. \quad (\text{Am Intervallende sollte } k_2 \leq k_{\text{zul}} \text{ sein.})$$

Damit ist eine Konzentrationsaufnahme des Luftstromes durch den Raum von 600 ppm zulässig.

Hinweis: Nach DIN EN 16798-1 wird dieser Wert für Kategorie II beispielsweise auf 800 ppm erhöht. Damit ergibt sich nach der vorgenannten Berechnung ein Außenluftbedarf pro Person von $0,018/[800 \cdot 10^{-6}] \text{ m}^3/\text{h} = 22,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Die neue Norm nennt für Kategorie II 7 l/s, sodass $25,2 \text{ m}^3/(\text{h Person})$ folgen.

Bei Versammlungsräumen wird oftmals mit der Größe Luftwechsel β (Luftwechsel/Stunde) gearbeitet. Damit ist ein Zusammenhang zwischen dem Raumvolumen V und dem Luftvolumenstrom $\dot{V}$ (= Zuluftvolumenstrom = Abluftvolumenstrom) gegeben:

$$\dot{V} = \beta V.$$

Daraus resultieren spezielle Darstellungen, so kann dann Gl. (4) geschrieben werden:

$$k_2 = \left((k_1 - k_{\text{Zu}}) - \frac{\dot{V}_S}{\beta V} \right) e^{-\beta(\tau_2 - \tau_1)} + \frac{\dot{V}_S}{\beta V} + k_{\text{Zu}}. \quad (9)$$

2.4 Anmerkungen zur Lüftungseffektivität

Dies ist eine vieldiskutierte Größe. Sie soll angeben, wie effektiv die Schadstoffe im Raum in Abhängigkeit des eingesetzten Lüftungssystems abgeführt werden. Eine damit verbundene Fragestellung lautet bei Räumen mit Personennutzung, welche Schadstoffkonzentration herrscht in Kopfhöhe? Also dort, wo die Atemluft entnommen wird. Bei einer reinen Mischlüftung – wie bei der bisherigen Betrachtung angenommen – wäre sie ortsunabhängig k .

Zur Vereinfachung definierte man in der Regel drei Fälle: Kurzschlussströmung, Verdrängungsströmung und Mischströmung (auch Verdünnungsströmung genannt). Dazu werden üblicherweise einfache Prinzipskizzen angegeben. Auf deren Wiedergabe wird aber bewusst verzichtet, da sie unrealistische Vereinfachungen enthalten. Stattdessen werden nachfolgende Kurzbeschreibungen angeführt.

Kurzschlussströmung: Würde man beispielsweise Luft mit Übertemperatur in Deckennähe mit niedriger Geschwindigkeit einbringen und auf der gegenüberliegenden Raumseite ebenfalls in Deckennähe absaugen, so würde kaum Raumluft induziert, sodass die Abluft nahezu Zuluftqualität hätte. Diese sehr schlechte Lösung ist nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung.

Verdrängungsströmung: In ihrer reinen Form handelt es sich hierbei quasi um eine Kolbenströmung. Sie findet nur in speziellen Fällen Anwendung: z. B. in Farbspritzkabinen, Reinräumen, Operationsräumen bzw. in abgegrenzten Abschnitten davon.

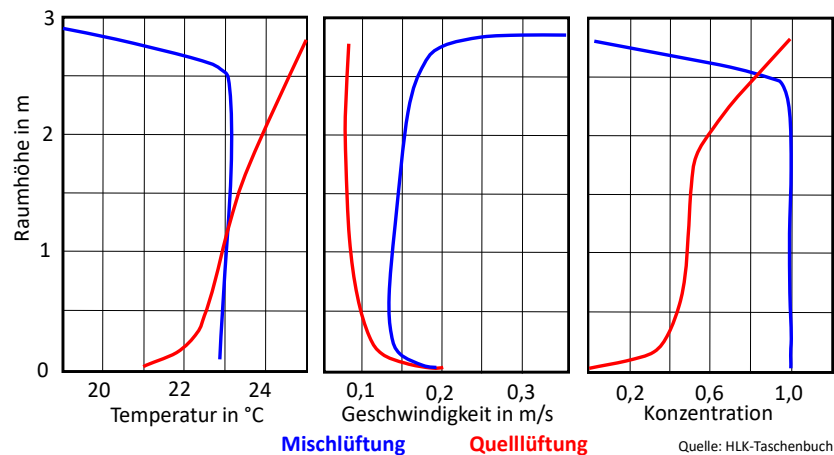
Eine Sonderform dieses Strömungsprinzips stellt die *Quelllüftung* dar. Die Zuluft wird mit Unter-temperatur in Bodennähe in den Raum eingebracht. Es bildet sich ein "Frischlufsee" aus, aus diesem speisen sich alle thermischen Auftriebsströmungen. Sie werden verursacht durch Personen, Geräte (Computer, Drucker, Ladenetzteile), warme Innenwände usw. Innerhalb der Auftriebsströmung entspricht die Konzentration zunächst der der Zuluft. Da die Auftriebsströmungen in der Summe größer als der Abluftvolumenstrom ($\equiv$ Zuluftvolumenstrom) ist, kann sich real keine reine Verdrängungsströmung ausbilden, sondern aus Bilanzgründen treten auch abwärtsgerichtete Luftströmungen auf. Messungen ergaben beispielsweise, dass eine Person, ein PC und ein Drucker in 1,8 m Höhe einen Auftriebsvolumenstrom von jeweils 200 m³/h hervorrufen. Eine am PC arbeitende Person fördert somit 400 m³/h nach oben, sodass bei einem zugeführten Luftvolumenstrom im Bodenbereich von 30 m³/h ($\equiv$ Abluftvolumenstrom in Deckennähe) 370 m³/h wieder nach unten strömen müssen und eine vielfältig geartete "Raumlufthalze" bewirken. Damit einher geht eine intensive Vermischung der Raumluft beispielsweise in der oberen Raumhälfte. Eine genauere Aussage könnte nur eine Strömungssimulation liefern, wobei diese auch nur für einen festvorgegebenen Personenstandort und eine bestimmte Möblierung gilt.

Mischlüftung: Durch verschiedene Formen der Zuluft-einbringung wird die Induktion der Raumluft bewirkt (Induktionsgeräte, Strahlauslässe an der Decke mit Nutzung des Coandaeffekts, Drallausslässe usw.), sodass im Aufenthaltsbereich eine diffuse Raumlufthalze auftritt. Näherungsweise entsteht eine Gleichverteilung der Schadstoffe, d. h., eine vom Standort unabhängige Konzentration, wie sie im Theoriemodell unter 2.1 angenommen wurde.

Bild 2 zeigt einen idealisierten Vergleich zwischen der Misch- und Quelllüftung. Danach ist im Höhenbereich von 1 ... 1,8 m z. B. die CO₂-Konzentration bei Quelllüftung nur halb so groß wie bei der Mischlüftung.

Hinweis: Für Schadstoffe, deren Dichte wesentlich von der Dichte der Luft abweichen gelten derartige Aussagen ohnehin nicht. Sie bedürfen spezieller Absaugungen.

Bild 2 Typische (idealisierte) Temperatur-, Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofile über die Raumhöhe für Lüftungssysteme mit Mischlüftung und Quelläftung nach HLK-Taschenbuch



In der Norm DIN EN 16798-3 berücksichtigt man die systemabhängigen Konzentrationsprofile durch die *Lüftungseffektivität* ε (früher Lüftungswirksamkeit nach DIN 1946-2). Mit der bisher benutzten Notation gilt

$$\varepsilon = \frac{k_{Ab} - k_{Zu}}{k_{AZ} - k_{Zu}} \quad (10)$$

k_{Zu} Konzentration des Schadstoffes in der Zuluft (zugeführte Außenluft)

k_{AZ} Konzentration des Schadstoffes in der Aufenthaltszone (Atemluftentnahme)

k_{Ab} Konzentration des Schadstoffes in der Abluft.

Der systemabhängige Luftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{real}}$ ergibt sich dann zu

$$\dot{V}_{\text{real}} = \frac{\dot{V}}{\varepsilon}, \quad (11)$$

wobei $\dot{V}$ dem berechneten Volumenstrom bei Mischlüftung entspricht.

Aus Bild 2 folgt beispielhaft: Mischlüftung $\varepsilon = 1$, Quelläftung $\varepsilon = 2$. Bei idealer Quelläftung könnte der erforderliche Luftvolumenstrom also halbiert werden.

Inwieweit dies genutzt wird, hat nach ingenieurmäßiger Beurteilung zu erfolgen. Mit der Annahme von $\varepsilon = 1$ befindet man sich auf der "sicheren Seite".

3 Beispiele

Ein Seminarraum ist mit $p = 30$ erwachsenen Personen besetzt. Das Raumvolumen beträgt $V = 300 \text{ m}^3$. Die CO_2 -Konzentration der Zuluft entspricht städtischen Bedingungen $k_{Zu} = 400 \text{ ppm}$.

3.1 Beispiel 1

Zu Beginn des Seminars war der Raum durchlüftet, sodass $k_1 = 400 \text{ ppm}$ galt. In den ersten 30 Minuten erfolgt keine Lüftung. Wie groß ist die CO_2 -Konzentration am Ende dieses Zeitraumes?

Der Schadstoffstrom in die Raumluft beträgt $\dot{V}_S = p \cdot 0,018 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,54 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. Nach Gl. (7) folgt:

$$k_2 = k_1 + \frac{\dot{V}_S}{V} (\tau_2 - \tau_1) = 400 \cdot 10^{-6} + \frac{0,54}{300} (0,5 - 0) = 1300 \text{ ppm.}$$

Der Anstieg auf diesen Wert vollzieht sich linear.

3.2 Beispiel 2

Es schließt sich ein einstündiger Rundgang durch eine Ausstellung an, sodass der leere Raum ($\dot{V}_S = 0$) mit einem Volumenstrom $\dot{V} = 900 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ gelüftet werden kann. Wie groß ist die CO_2 -Konzentration nach einer Stunde?

Gl. (8) liefert:

$$k_2 = (k_1 - k_{\text{Zu}}) e^{-\frac{\dot{V}}{V}(\tau_2 - \tau_1)} + k_{\text{Zu}} = (1300 - 400) e^{-\frac{900}{300} \cdot 1} \text{ ppm} + 400 \text{ ppm} = 445 \text{ ppm.}$$

Der Konzentrationsverlauf folgt einer abklingenden e-Funktion.

3.3 Beispiel 3

Anschließend wird das Seminar im Raum fortgesetzt und der Außen-Luftvolumenstrom $\dot{V} = 900 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ beibehalten. Wie groß ist die CO_2 -Konzentration nach zwei Stunden?

Mit Gl. (4) ergibt sich:

$$k_2 = \left((k_1 - k_{\text{Zu}}) - \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} \right) e^{-\frac{\dot{V}}{V}(\tau_2 - \tau_1)} + \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} + k_{\text{Zu}}$$

$$k_2 = \left((445 - 400) \cdot 10^{-6} - \frac{0,54}{900} \right) e^{-\frac{900}{300} \cdot 2} + \frac{0,54}{900} + 400 \cdot 10^{-6} = 999 \cdot 10^{-6} = 999 \text{ ppm.}$$

Dies entspricht dem zulässigen Wert von 1000 ppm. Dies ist natürlich kein Zufall, denn der Zuluftvolumenstrom $\dot{V} = 900 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht der empfohlenen Zuluftmenge pro Person von $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Dieser wurde ja mit der empfohlenen Raumlüftqualität – der CO_2 -Konzentration von 1000 ppm – hergeleitet (Abschnitt 2.3).

Das berechnete Ergebnis ändert sich auch nicht, wenn die Betriebszeit länger andauert, denn es handelt sich um den stationären Grenzwert gemäß Gl. (6)

$$k_2 = \frac{\dot{V}_S}{\dot{V}} + k_{\text{Zu}} = \frac{0,54}{900} + 400 \cdot 10^{-6} = 1000 \text{ ppm.}$$

Beispiel 4

Im Beispiel 3 wurde die Konzentration am Ende von zwei Betriebsstunden bei einem vorgegebenen Luftvolumenstrom bestimmt.

Würde man die Frage stellen, welcher Luftvolumenstrom ist dem Seminarraum zuzuführen, damit die zulässige CO_2 -Konzentration von $k_2 = 1000 \text{ ppm}$ nach zwei Betriebsstunden erreicht wird, so könnte Gl. (5) einen Näherungswert liefern:

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_S}{k_1 - k_{\text{Zu}}} + \frac{V}{\tau_2 - \tau_1} \frac{k_1 - k_2}{k_1 - k_{\text{Zu}}} = \frac{0,54}{(445 - 400)} 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + \frac{300}{2} \frac{445 - 1000}{445 - 400} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{V} = 10150 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}.$$

Dass der errechnete Wert von dem im Beispiel 3 verwendeten Volumenstrom $\dot{V} = 900 \text{ m}^3/\text{h}$ abweicht, liegt an der Näherung, die Gl. (5) beinhaltet (Reihenentwicklung der e-Funktion mit Abbruch nach dem zweiten Glied). Bei der später wiederholten Berechnung mittels Rechenprogramm wird der genaue Wert $\dot{V} = 900 \text{ m}^3/\text{h}$ ermittelt.

4 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 Ausgabetabellen – bewirkt hätten, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu [MICROSOFT WORD](#) hergestellt.

4.1 Laden und Starten des Rechenprogramms

Die unter <http://berndglueck.de/Lueftung> stehende komprimierte Datei "[Lueftung_I.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_1](#)
- [Beispiel_2](#)
- [Programm I](#)

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 Programmierumgebung Visual Basic 2010 Express).

[Hinweis zur Bildschirmeinstellung](#)

Eine gutlesbare 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.

4.2 Bearbeitung des Programmlistings

Im Ordner "**Programm I**" 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

4.3 Abarbeitung

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

Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

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

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Schadstoffkonzentration zu Beginn der Untersuchung ppm

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

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

Eingabevariante für den Schadstoffstrom:
☐ Schadstoffvolumenstrom VS m³/h oder ☐ Personenzahl p

	Zeitdauer min	Luftvolumen- strom VL m³/h	Luft- wechsel β 1/h	Zuluft- konzentration kZu ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls k1 ppm k2 ppm
i = 1							
i = 2							
i = 3							
i = 4							
i = 5							
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 ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls k1 ppm k2 ppm

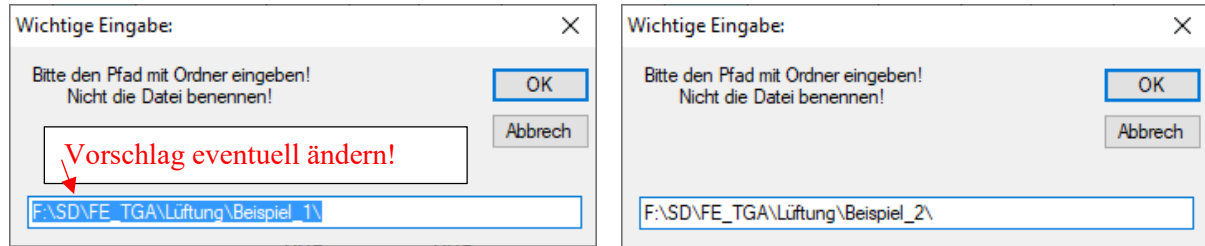
Bitte nur Zahlen und Komma - keine Leerstellen - eingeben!
 Grüne Felder oder alternativ dazu hellblaue Felder ausfüllen.
 Weiße Felder zeigen die Ergebnisse an. Tabellenfelder bis einschließlich imax - mindestens i = 1 - füllen.

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!
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 3 Bedienoberfläche des Rechenprogramms "Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / 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 **INGABE 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 Ausschrift "**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.

4.4 Ein- und Ausgabedaten

Bild 3 zeigt alle Eingabefelder, die zur Programmabarbeitung zu füllen sind. Folgende Größen sind von Bedeutung. Die Bezeichnung entspricht den programminternen Benennungen.

<i>Basiseingaben</i>		
V	m ³	Raumvolumen
i _{max}	-	Anzahl der Untersuchungsintervalle
kStart	ppm	Schadstoffkonzentration im Raum zu Beginn der Untersuchung ($\equiv k_1$ bei $i = 1$)
<i>Festlegung der Eingabevarianten</i>		
RadioButton 1 oder 2		Eingaben des Luftvolumenstromes VL oder der Luftwechselzahl β
RadioButton 3 oder 4		Eingaben des Schadstoffstromes VS oder der Personenzahl p (nur bei CO ₂ -Belastung)
RadioButton 5 oder 6		Eingaben der Schadstoffkonzentration der Zuluft (zeitlich konstant oder in jedem Intervall i unterschiedlich)
kZu_const	ppm	zeitlich konstante Zuluftkonzentration ($i = 1 \dots i_{\max}$) (nur bei RadioButton = 5)
<i>Intervallbezogene Eingaben für i = 1 bis i_{max} 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)	ppm	Zuluftkonzentration im Intervall i (nur bei RadioButton = 6)
VS(i)	m ³ /h	Schadstoffvolumenstrom in den Raum im Intervall i (nur bei RadioButton = 3)
p(i)	-	Personenzahl im Raum im Intervall i (nur bei RadioButton = 4) programminterne Annahme: 0,018 m ³ CO ₂ /(h Person)
Weiße Felder nicht ausfüllen! Dort erfolgt die Ergebnisanzeige (Konzentrationen 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	ppm	Zuluftkonzentration
VS_Ber	m ³ /h	Schadstoffvolumenstrom in den Raum (nur bei RadioButton = 3)
p_Ber	-	Personenzahl im Raum (nur bei RadioButton = 4) programminterne Annahme: 0,018 m ³ CO ₂ /(h Person)
k1	ppm	Schadstoffkonzentration im Raum zu Beginn des Berechnungszeitraumes
k2	ppm	Schadstoffkonzentration im Raum am Ende des Berechnungszeitraumes
Weiße Felder nicht ausfüllen! Dort erfolgt die Ergebnisanzeige (erforderlicher Luftvolumenstrom V_Ber und erforderliche Luftwechselzahl β_{Ber} .		

Wird entsprechend Seite 13 **ZEICHNEN** aktiviert, öffnet sich das Diagrammfenster. Nach Drücken des dortigen Buttons **ZEICHNEN** erscheint das Diagramm mit den Konzentrationsverläufen.

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	ppm	minimaler Konzentrationswert der Ordinate
k_max	ppm	maximaler Konzentrationswert der Ordinate
Teilung	-	Teilung der Ordinatenachse

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

5 Beispiele mit Programmabarbeitung

Die mitgelieferten Beispiele (Beispiel_1 und Beispiel_2) sollten zur Überprüfung der richtigen Installation stets abgearbeitet werden!

5.1 Beispiel_1

Es werden die Einzelbeispiele – Beispiel 1 bis Beispiel 3 – des Abschnittes 3 aneinandergereiht ($i = 1 \dots 3$) betrachtet. Sie sind ergänzt um einen 2-stündigen weiterführenden konstanten Betriebsfall ($i = 4$) und um einen weiteren 3-stündigen Betriebsfall ($i = 5$) bei verschlechterten Zuluftbedingungen ($k_{zu}(5) = 450$ ppm).

Nachfolgend werden die Eingaben und Ergebnisse dargestellt. Sie sind selbsterklärend.

Der Vergleich mit den manuell ermittelten Ergebnissen zeigt die richtige Arbeitsweise des Rechenprogramms.

Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / Luftvolumenstrom

F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_1\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

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

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Schadstoffkonzentration zu Beginn der Untersuchung ppm

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

Eingabevariante für den Schadstoffstrom:
☐ Schadvolumenstrom VS m³/h oder ☒ Personenzahl p

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

i	Zeitdauer min	Luftvolumen- strom VL m³/h	Luft- wechsel β 1/h	Zuluft- konzentration kZu ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls	
							k1 ppm	k2 ppm
i = 1	30		0,0	400		30		
i = 2	60		3,0	400		0		
i = 3	120		3,0	400		30		
i = 4	120		3,0	400		30		
i = 5	180		3,0	450		30		
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 ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls	
						k1 ppm	k2 ppm

START LADEN LÖSCHEN **EINGABE prüfen + speichern** RECHNEN ZEICHNEN DRUCKEN ENDE

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! Es erfolgt automatische Datenspeicherung.
 4. RECHNEN aktivieren! Warten auf Ergebniseintrag! Es erfolgt automatische Datenspeicherung.
 5. ZEICHNEN aktivieren!
 6. Bei Bedarf DRUCKEN aktivieren!

Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_1\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

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

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Schadstoffkonzentration zu Beginn der Untersuchung ppm

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

Eingabevariante für den Schadstoffstrom:
☐ Schadvolumenstrom VS m³/h oder ☒ Personenzahl p

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

i	Zeitdauer min	Luftvolumen- strom VL m³/h	Luft- wechsel β 1/h	Zuluft- konzentration kZu ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls	
							k1 ppm	k2 ppm
i = 1	30	0	0,0	400	0,54	30	400	1300
i = 2	60	900	3,0	400	0,00	0	1300	445
i = 3	120	900	3,0	400	0,54	30	445	999
i = 4	120	900	3,0	400	0,54	30	999	1000
i = 5	180	900	3,0	450	0,54	30	1000	1050
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 ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls	
						k1 ppm	k2 ppm

START LADEN LÖSCHEN **EINGABE prüfen + speichern** **RECHNEN** ZEICHNEN DRUCKEN ENDE

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! Es erfolgt automatische Datenspeicherung.
 4. RECHNEN aktivieren! Warten auf Ergebniseintrag! Es erfolgt automatische Datenspeicherung.
 5. ZEICHNEN aktivieren!
 6. Bei Bedarf DRUCKEN aktivieren!

Bild 5 Beispiel_1 oben: Eingaben für das Berechnungsbeispiel, unten: Eingaben und Ergebnisse

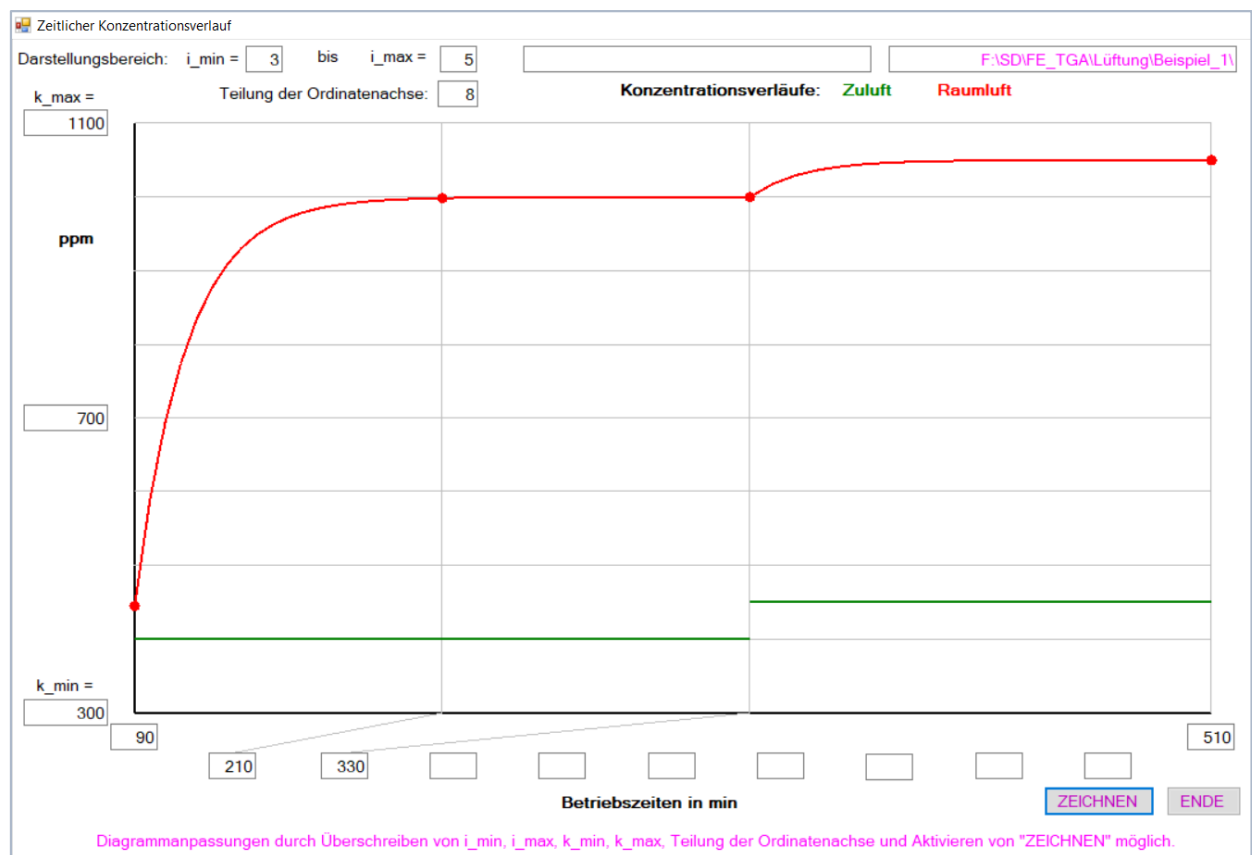
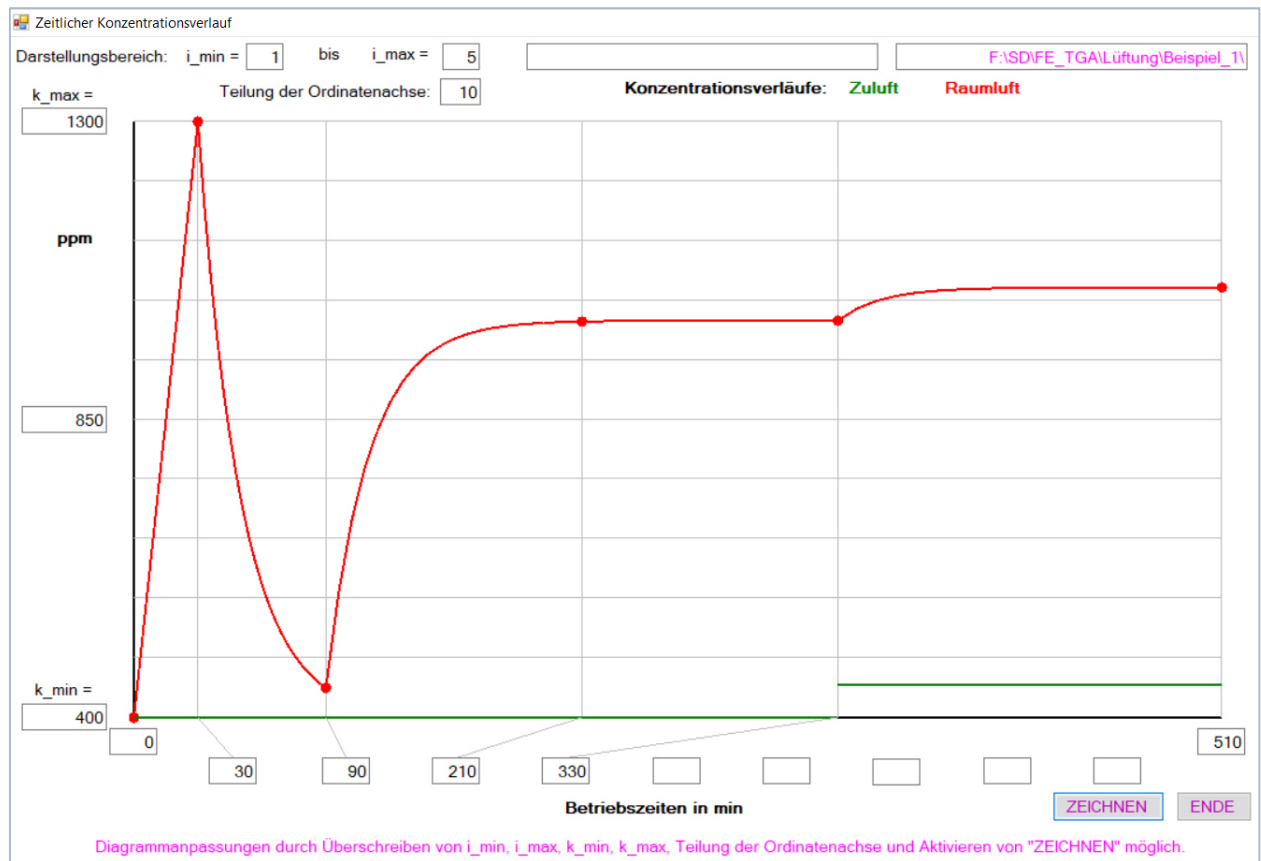


Bild 6 Beispiel_1 oben: automatisch erzeugter Konzentrationsverlauf, unten: nach manueller Diagrammanpassung

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_1\

Berechnung des Schadstoff-Konzentrationsverlaufs**Eingabe- und Ergebnisdaten:**

Basiseingaben:

Raumvolumen 300 m³ Anzahl der Untersuchungsintervalle 5

Schadstoffkonzentration im Raum zu Beginn der Untersuchung 400 ppm

Festlegung der Eingabevarianten:

Eingabe der Luftwechselzahl

Eingabe der Personenzahl

Eingabe intervallbezogener Schadstoffkonzentrationen in der Zuluft

Intervalldaten:

Eingabewerte										Ergebnisse	
i	Dtau	VL	β	kZu	VS	p	k1	k2			
-	min	m ³ /h	1/h	ppm	m ³ /h	-	ppm	ppm			
1	30	0	0,0	400	0,54	30	400	1300			
2	60	900	3,0	400	0,00	0	1300	445			
3	120	900	3,0	400	0,54	30	445	999			
4	120	900	3,0	400	0,54	30	999	1000			
5	180	900	3,0	450	0,54	30	1000	1050			

Dtau Zeitdauer, VL Luftvolumenstrom, β Luftwechselzahl, kZu Zuluftkonzentration

VS Schadstoffvolumenstrom, p Personenzahl

k1/k2 Schadstoffkonzentration zu Beginn/am Ende des Intervalls

Bild 7 Ausdruck der Eingabewerte und der Ergebnisse für Beispiel_1**5.2 Beispiel_2**

Es wird das manuell berechnete Beispiel 4 zugrunde gelegt, das nur näherungsweise gelöst werden konnte.

Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_2\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

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

Raumvolumen 300 m³

Untersuchungsintervalle imax 5

Raum-Schadstoffkonzentration zu Beginn der Untersuchung 400 ppm

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

Eingabevariante für den Schadstoffstrom:
☒ Schadvolumenstrom VS m³/h oder ☐ Personenzahl p

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

Zeitdauer min Luftvolumenstrom VL m³/h Luftwechsel β 1/h Zuluftkonzentration kZu ppm Schadstoffvolumenstrom VS m³/h Personenzahl p Schadstoffkonzentration zu Beginn und am Ende des Intervalls k1 ppm k2 ppm

i = 1

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

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

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

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 8 Beispiel_2 oben: Eingaben für das Berechnungsbeispiel, unten: Eingaben und Ergebnisse

Zahlenmäßig handelt es sich um das frühere Beispiel 3 (Seite 10), jedoch mit inverser Aufgabenstellung. Dort wurde ein Luftvolumenstrom von 900 m³/h vorgegeben und die Endkonzentration $k_2 = 999 \text{ ppm} \approx 1000 \text{ ppm}$ bei $k_1 = 445 \text{ ppm}$ bestimmt. Bei der jetzt umgekehrten Berechnung folgt: $VL_{\text{Ber}} = 899 \text{ m}^3/\text{h} \approx 900 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Ergebnis ist richtig und damit viel genauer als die Näherungsrechnung (Beispiel 4).

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_2\

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

Basiseingaben:

Raumvolumen 300 m³

Festlegung der Eingabevarianten:

Eingabe der Personenzahl

Daten des betrachteten Intervalls:

Eingabewerte						Ergebnisse	
Dtau	k1	k2	kZu	VS	p	VL	β
min	ppm	ppm	ppm	m ³ /h	-	m ³ /h	1/h
120	445	1000	400	0,54	30	899	3,0

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

kZu Zuluftkonzentration, VS Schadstoffvolumenstrom, p Personenzahl

VL Luftvolumenstrom, β Luftwechselzahl

Bild 9 Ausdruck der Eingabewerte und der Ergebnisse für Beispiel_2

Um den Konzentrationsverlauf zeichnen zu können, muss eine normale Berechnung (kein Sonderberechnungsfall) vorausgehen. Dies gibt Beispiel_2a wieder.

Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SD\FE_TGA\Lüftung\Beispiel_2a\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

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

Raumvolumen 300 m³

Untersuchungsintervalle imax 1

Raum-Schadstoffkonzentration zu Beginn der Untersuchung 445 ppm

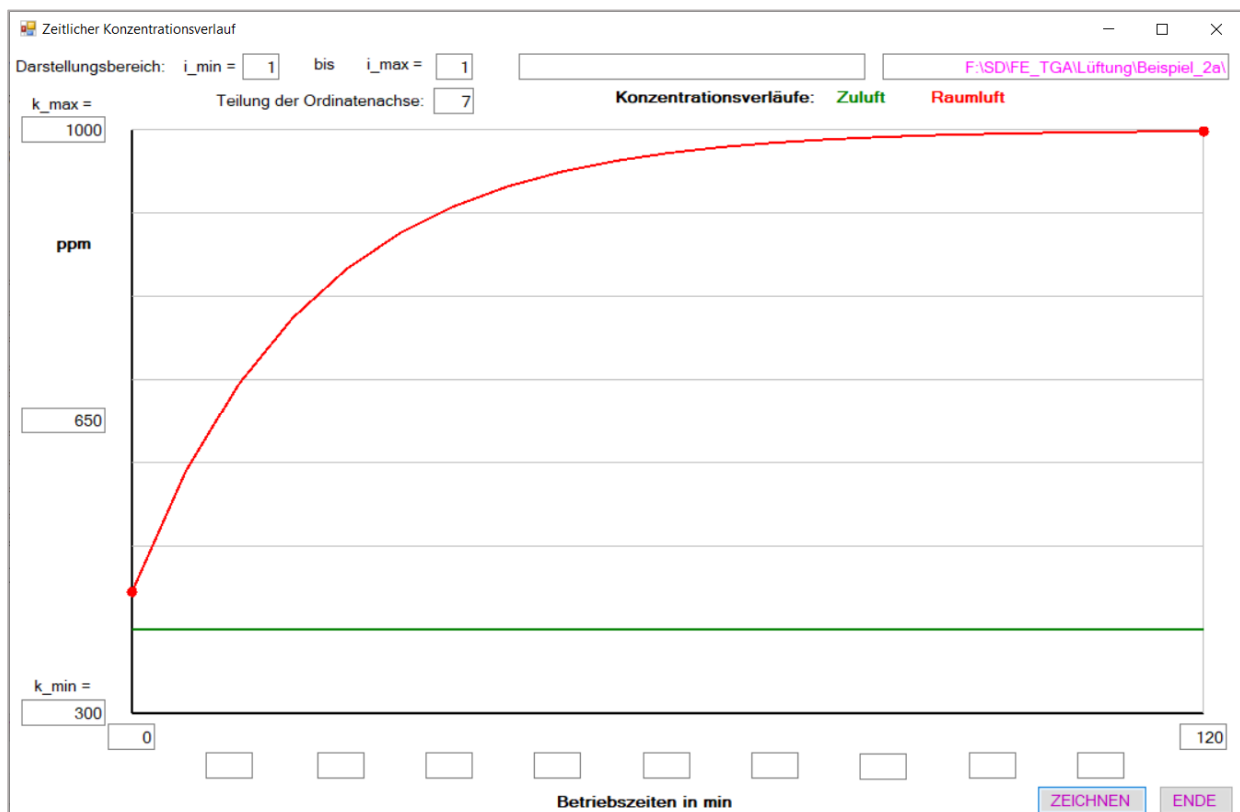
Eingabevariante für den Luftstrom:
☒ Luftvolumenstrom VL m³/h oder ☐ Luftwechselzahl β 1/h

Eingabevariante für den Schadstoffstrom:
☐ Schadvolumenstrom VS m³/h oder ☒ Personenzahl p

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

	Zeitdauer min	Luftvolumenstrom VL m ³ /h	Luftwechsel β 1/h	Zuluftkonzentration kZu ppm	Schadstoffvolumenstrom VS m ³ /h	Personenzahl p	Schadstoffkonzentration zu Beginn und am Ende des Intervalls k1 ppm	Schadstoffkonzentration zu Beginn und am Ende des Intervalls k2 ppm
i = 1	120	900	3,0	400	0,54	30	445	999
i = 2								

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

Bild 10 Beispiel_2a: Mit dem Ergebnis von Beispiel_2 wird eine normale Berechnung und Diagrammerstellung vorgenommen**Bild 11** Konzentrationsverlauf von Beispiel_2a nach manueller Diagrammanpassung

5.3 Sonderbeispiel (allgemeiner Schadstofffall)

In einer Reparaturhalle ($V = 4000 \text{ m}^3$, $t = 20 \text{ °C}$) werden im Störfall $0,5 \text{ kg}$ Ammoniak pro Stunde freigesetzt. Wie groß muss der Luftwechsel sein, um 20 ppm nicht zu überschreiten? Vereinfacht werden angenommen, dass es keine Ammoniakbelastung in der Außenluft gibt und auch vorher die Hallenluft nicht belastet war.

Um den Schadstoffstrom zu ermitteln ist von der allgemeinen Gasgleichung

$$p V = m R T$$

auszugehen. Mit $R = 488,22 \text{ J/(kg K)}$ ergibt sich der Schadstoffvolumenstrom zu:

$$\dot{V}_S = \frac{\dot{m}_S R T}{p} = \frac{0,5 \cdot 488,22 \cdot 293 \text{ m}^3}{100000 \text{ h}} = 0,72 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Berechnung der Schadstoffkonzentrationen / Luftvolumenstrom

Rechnung beendet! F:\SDIFE_TGAI\Luftung\Beispiel_3\ Autor: Prof. Bernd Glück, 2021, Version 1

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

Raumvolumen m³

Untersuchungsintervalle imax

Raum-Schadstoffkonzentration zu Beginn der Untersuchung ppm

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

Eingabevariante für den Schadstoffstrom:
☒ Schadstoffvolumenstrom VS m³/h oder ☐ Personenzahl p

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

	Zeitdauer min	Luftvolumen- strom VL m³/h	Luft- wechsel β 1/h	Zuluft- konzentration kZu ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls	
							k1 ppm	k2 ppm
i = 1								
i = 2								
i = 3								
i = 4								
i = 5								
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 ppm	Schadstoffvolumen- strom VS m³/h	Personen- zahl p	Schadstoffkonzentrationen zu Beginn und am Ende des Intervalls	
							k1 ppm	k2 ppm
	60	36022	9,0	0	0,72		0	20

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