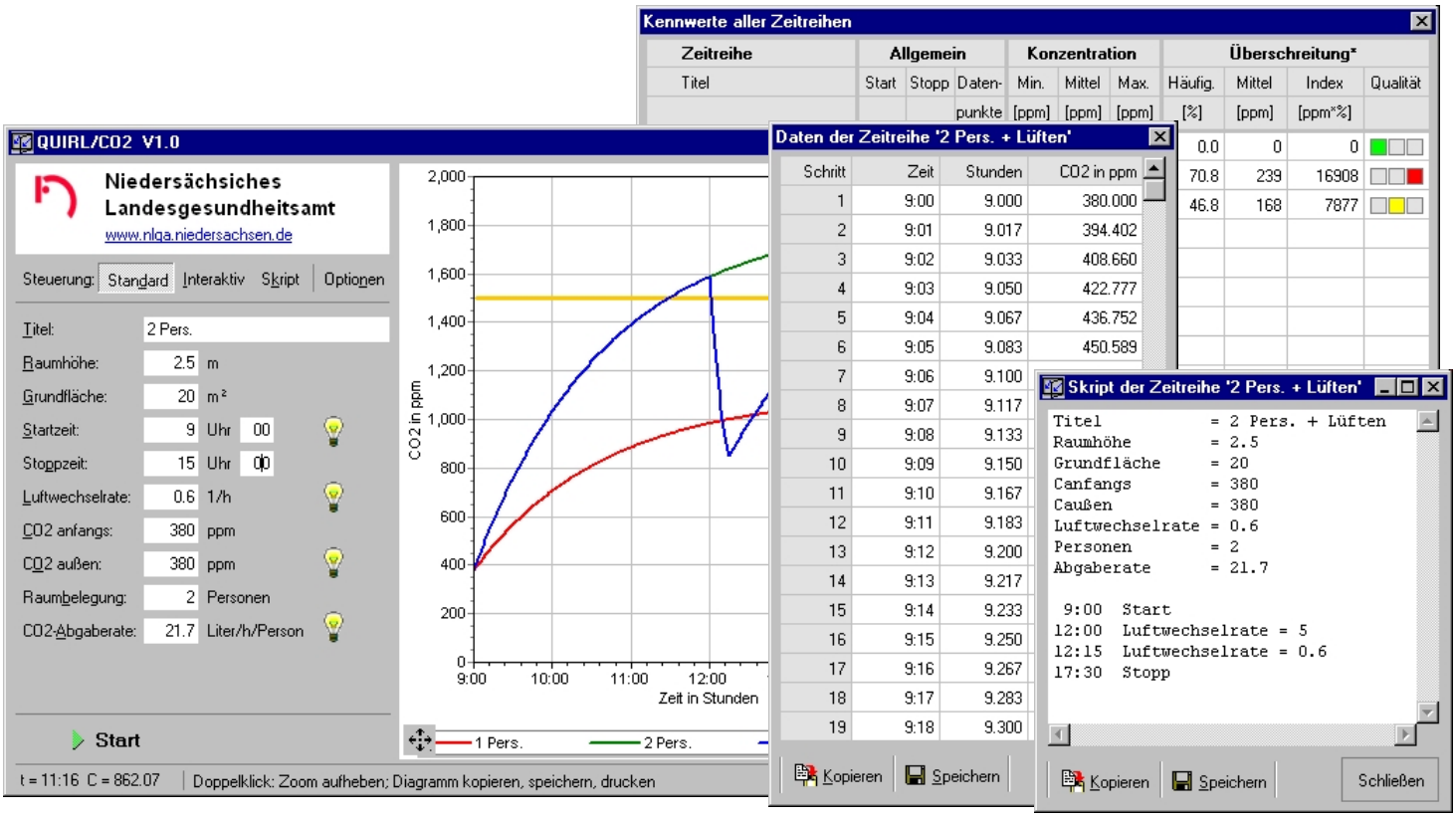
Niedersächsisches
Landesgesundheitsamt



Ein Modell zur Simulation der Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO_2

Handbuch zum Programm QUIRL/CO_2
Version 1.0

Niedersachsen

Ein Modell zur Simulation der Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO_2

Handbuch zum Programm QUIRL/CO_2
Version 1.0

Mai 2003, 1. Auflage

Herausgeber:
Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
Roesebeckstr.4-6
30449 Hannover

Bearbeitung:
Dr. O. Hehl
H. Grams

Nutzungsbedingungen:
Das Programm QUIRL/CO_2 wird im Rahmen der Gesundheitsaufklärung kostenlos abgegeben. Die Weitergabe des Programms mit der dazugehörigen Dokumentation in unveränderter Form ist erlaubt und erwünscht.

Die Urheberrechte liegen beim Niedersächsischen Landesgesundheitsamt. Jede gewerbliche Nutzung ist untersagt. Für Schäden an der Hard- und Software des Nutzers wird keine Haftung übernommen.

Inhalt

1. Einleitung 4
2. Luftqualität und CO_2-Konzentration 4
3. Physikalische und mathematische Grundlagen 5
3.1. Modellannahmen 5
3.2. Modellgleichung 5
3.3. Luftwechselrate 6
3.4. CO_2-Konzentration in der Außenluft 6
3.5. CO_2-Produktion durch die Raumnutzer 7
4. Systemvoraussetzungen, Installation und Deinstallation 7
5. Schnelleinstieg 7
6. Modellsteuerung 8
6.1. Modellsteuerung „Standard“ 8
6.2. Modellsteuerung „Interaktiv“ 9
6.3. Modellsteuerung „Skript“ 9
7. Diagrammdarstellung 11
7.1. Achsenbereich ändern (Zoomen) 11
7.2. Externe Daten hinzufügen 11
7.3. Diagramm exportieren 12
7.4. Diagramm drucken 12
7.5. Diagramm-Optionen 12
8. Zeitreihen 12
8.1. Skript der Zeitreihen anzeigen / exportieren 12
8.2. Daten der Zeitreihen anzeigen / exportieren 13
8.3. Kennwerte der Zeitreihen anzeigen 13
8.4. Zeitreihen umbenennen 13
8.5. Zeitreihen löschen 13
9. Anhang 13
9.1. Literatur 13
9.2. Anwendungsbeispiel 13

1. Einleitung

Etwa 90 % seiner Zeit verbringt ein Mensch in den industrialisierten Staaten Europas in Innenräumen. Ein gesundheitsverträgliches Innenraumklima ist daher für das Wohlbefinden des Menschen von großer Bedeutung. Neben geeigneten Temperaturen und Luftfeuchten ist hierfür auch die Zusammensetzung der Innenraumluft ein wichtiger Faktor. Auch wenn die Raumluft so weit wie möglich frei von Luftverunreinigungen sein sollte, sind im Innenraum praktisch immer zusätzliche Stoffe in der Luft vorhanden, die von vielen kleinen Quellen – nicht zuletzt dem Menschen selbst – abgegeben werden. Die Konzentration dieser Stoffe in der Luft hängt aber nicht nur von den Quellen, sondern beispielsweise auch von der Raumgröße und der Art und Weise der Lüftung ab. Daher ist eine bewusste und sachgerechte Lüftung der Räume eine gute Grundlage für eine gesundheitsverträgliche Innenraumluft.

Als ein möglicher „Gradmesser" der Luftqualität in Innenräumen, in denen sich Personen aufhalten, gilt seit langem das Kohlendioxid (CO_2). In einem Projekt des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes wurde daher die Luftqualität in Klassenräumen von sieben niedersächsischen Schulen anhand von CO_2 als Indikator untersucht (NLGA, 2003). Im Rahmen dieses Projekts ist auch die vorliegende Modellsoftware QUIRL/CO_2 (Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO_2) entwickelt worden. Da im Modell aber keine schulspezifischen Einschränkungen vorhanden sind, ist das Einsatzgebiet des Modells nicht auf Klassenräume begrenzt. So wurde das Modell auch bereits für Büroräume erfolgreich eingesetzt.

Die Software QUIRL/CO_2 ist sowohl in der Bedienung als auch im zugrundeliegenden Modellansatz bewusst einfach gehalten worden. Die Software erhebt somit keinen Anspruch auf die vollständige Beschreibung aller für das Raumklima und für die Raumluftqualität relevanten Faktoren. Vielmehr wurden die relevanten Prozesse auf das notwendige Mindestmaß beschränkt, um auch dem Nicht-Fachmann das Verständnis zu erleichtern und eine Nutzung zu ermöglichen. Die Prozesse werden daher nur kurz angerissen und auch nur soweit erklärt, als es zum grundlegenden Verständnis der komplexen Zusammenhänge erforderlich ist, die letztlich die Konzentration von Schadstoffen (hier am Beispiel von CO_2) in der Raumluft bestimmen.

2. Luftqualität und CO_2-Konzentration

Für die Beurteilung der Qualität von Innenraumluft wurde von Pettenkofer bereits 1858 in einer Veröffentlichung über den „Luftwechsel in Wohngebäuden" CO_2, dass bei der Atmung freigesetzt wird, als Indikator genannt. Nach Pettenkofer sollte aus Gründen der Geruchsbelastung und des Wohlbefindens in Räumen ein CO_2-Wert von 1.000 ppm („parts per million", 1 ppm = 1 Teil auf 1 Million Teile) nicht überschritten werden. Bei höheren Kohlendioxidgehalten ist zunehmend mit Beschwerden wie Müdigkeit oder Konzentrationsschwäche zu rechnen. Zudem gehen höhere CO_2-Konzentrationen häufig mit Belästigungen durch Körpergerüche einher.

Der von Pettenkofer nicht toxikologisch begründete CO_2-Wert galt lange Zeit als Standard für die Beschreibung der Qualität von Innenraumluft, gilt aber aufgrund geänderter Wohnraumhygiene und Belegungsdichten als nicht mehr zeitgemäß. Anstelle der „Pettenkofer-Zahl" wird heute üblicherweise der in der DIN 1946-2 genannte Wert von 1.500 ppm als einzuhaltender Wert (für klimatisierte Räume) verwendet und im Folgenden als Referenzwert bezeichnet. Dieser Wert steht allerdings nicht für Geruchsfreiheit in Räumen: bei einer CO_2-Konzentration von 1.500 ppm geben bereits 35% der Raumnutzer eine Geruchsbelästigung an (VDI 4300, Blatt 7).

Lüftung hat die Funktion Gerüche und andere möglicherweise in der Raumluft vorhandene unerwünschte Stoffe zu reduzieren und damit unter anderem zur Verbesserung des Wohlbefindens der Raumnutzer beizutragen. Unterlassene oder reduzierte Lüftung führt damit zu einer unnötigen Verschlechterung der Innenraumluft.

Bei der Belüftung von Räumen durch Fenster wird eine Überschreitung des Referenzwerts von 1500 ppm in der Praxis mehr oder weniger häufig vorkommen. Für eine Bewertung solcher Situationen kommt es zum einen auf die Höhe und zum anderen auf die Dauer der Überschreitung an. So sind kurzzeitige Spitzenwerte oder häufige, aber geringfügige Überschreitungen eher zu akzeptieren als dauerhaft hohe CO_2-Konzentrationen. Um die CO_2-Werte als Indikator für die Güte der Luftqualität einordnen zu können, sind daher die folgenden drei Größen hilfreich:

1. Die Überschreitungshäufigkeit ist der Zeitanteil am Gesamtzeitraum in Prozent, in dem die CO_2-Konzentration über dem Referenzwert liegt.
2. Der Überschreitungsmittelwert gibt die mittlere CO_2-Konzentration in ppm (abzüglich des Referenzwerts) im Überschreitungszeitraum an.
3. Der Überschreitungsindex ist das Produkt aus Überschreitungsmittelwert und -häufigkeit in ppm*% und berücksichtigt damit sowohl die Höhe als auch die Dauer der Überschreitung.

Beispiel: Eine Messung liefert die folgenden 5 CO_2-Konzentrationen: 1800 ppm, 1700 ppm, 1600 ppm, 1500 ppm und 1400 ppm. Für 3 der 5 Messwerte liegt eine Überschreitung des Referenzwerts vor. Damit ergeben sich die Überschreitungshäufigkeit zu 60% (3/5), der Überschreitungsmittelwert zu 200 ppm (5100 ppm/3 – 1500 ppm) und der Überschreitungsindex zu 12000 ppm*%.

Mit dem Überschreitungsindex ist eine qualitative Bewertung der Raumluftqualität auf der Basis von CO_2 als Indikator möglich. Von Grams et al. (2003) wird ein dreistufiges Bewertungsschema der Luftqualität vorgestellt, das auf dem Überschreitungsindex aufbaut. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einer Überschreitung von bis zu 500 ppm bei 30% der Zeit (entsprechend einem Überschreitungsindex von 15000 ppm*%) die Luftqualität gerade noch als „befriedigend“ eingestuft werden kann. Ein höherer Index wird nach diesem Schema als „ungenügend“ bezeichnet. Ein Index von 0 ppm*% (d. h. keine Überschreitung des Referenzwerts im gesamten Zeitraum) entspricht einer „guten“ Luftqualität. Im vorangegangenen Beispiel wäre die Luftqualität somit als „befriedigend“ einzustufen (s.a. Kap. 8.3).

3. Physikalische und mathematische Grundlagen

Die Verteilung von (Schad-)Stoffen in der Innenraumluft mit ihren zeitlichen und räumlichen Schwankungen ist in ein recht komplexes Gesamtsystem eingebettet, an dem viele unterschiedliche Prozesse beteiligt sind. Bei der Formulierung eines theoretischen Modells wird versucht, die komplexen beteiligten Prozesse und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten mathematisch abzubilden. Eine solche Abbildung ist in der Regel nur möglich, wenn man sich auf die für die Fragestellung wesentlichen Prozesse beschränkt. Es müssen also vereinfachende Annahmen getroffen werden, die einerseits die Wirklichkeit möglichst gut abbilden und andererseits eine hinreichend einfache mathematische Formulierung ermöglichen.

3.1. Modellannahmen

Für das hier beschriebene Modell QUIRL/CO_2 zur Berechnung der zeitlichen Verlaufs der CO_2-Konzentration in der Raumluft werden die folgenden drei Annahmen getroffen:

- Das in der Raumluft befindliche CO_2 wird als chemisch stabiler Stoff betrachtet, d.h. es gibt keine chemischen Reaktionen, die CO_2 produzieren oder umwandeln.
- Es gibt keine Adsorption (Anlagerung) von CO_2 an Oberflächen wie z.B. den Wänden oder dem Mobiliar des Raums.
- Die Raumluft wird als vollständig durchmischt angenommen, d.h. die CO_2-Konzentration hat überall im Raum den gleichen Wert. Die Konzentration kann somit durch eine einzige Zahl für den ganzen Raum angegeben werden. Sie kann sich aber im Verlauf der Zeit ändern.

3.2. Modellgleichung

Aus der Physik ist bekannt, dass die Masse und – bei festem Volumen – auch die Konzentration (= Masse pro Volumen) Erhaltungsgrößen sind. Die CO_2-Konzentration in einem Raum kann sich also nur dann ändern, wenn der ursprünglichen Menge CO_2 entweder durch Quellen weiteres CO_2 hinzugefügt oder aber durch Senken entnommen wird.

Unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen sind die folgenden Quellen und Senken für die CO_2-Konzentration in der Raumluft relevant:

- Transport von CO_2 von der Raumluft in die Außenluft
- Transport von CO_2 von der Außenluft in die Raumluft
- Produktion von CO_2 im Raum durch evtl. anwesende Raumnutzer.

Damit lässt sich die Massenbilanz für das CO_2 in der Luft des zu betrachtenden Raums schließlich beschreiben als:

(1) $$V\frac{\partial C}{\partial t} = -nVC + nVC_a + S$$

mit C: CO_2-Konzentration in der Raumluft
C_a: CO_2-Konzentration in der Außenluft
V: Raumluftvolumen
n: Luftwechselrate
S: Pro Zeit in die Raumluft abgegebene CO_2-Masse
t: Zeit.

Die linke Seite von Gl. (1) gibt die zeitliche Veränderung der CO_2-Masse (m = VC) in der Raumluft an. Die drei Terme auf der rechten Seite von Gl. (1) beschreiben die oben aufgeführten Senken und Quellen (jeweils in gleicher Reihenfolge).

Auf die Größen Luftwechselrate (Kap. 3.3), CO_2-Konzentration in der Außenluft (Kap. 3.4) und CO_2-Produktion durch Raumnutzer (Kap. 3.5) wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

Für die Anfangsbedingung $C(t=0) = C_0$ lässt sich Gl. (1) leicht lösen:

(2) $$C(t) = \left[C_0 - C_a - S/(nV)\right] e^{-nt} + \left[C_a + S/(nV)\right]$$

mit C(t): CO_2-Konzentration zum Zeitpunkt t
C_0 : CO_2-Konz. in der Raumluft zur Zeit (t = 0).

3.3. Luftwechselrate

Maßgebend für die Erneuerung der Luft in einem Raum ist der Austausch der Raumluft mit der Umgebungsluft. Als Maß für die Intensität dieses Austausches wird die Luftwechselrate verwendet. Sie ist definiert als der Quotient aus dem pro Zeiteinheit ausgetauschten Luftvolumen und dem Raumvolumen. Die Luftwechselrate wird üblicherweise in der Einheit 1/h („Eins pro Stunde“) angegeben. Eine Luftwechselrate von beispielsweise 0,5 1/h bedeutet, dass (zumindest rechnerisch) die Hälfte der in einem Raum vorhandenen Luft innerhalb einer Stunde ausgetauscht wird. Für einen vollständigen Luftaustausch werden also in diesem Fall 2 Stunden benötigt.

Die in Untersuchungen experimentell ermittelten Luftwechselraten weisen auch dann eine relativ große Spannweite auf, wenn sie unter vergleichbaren örtlichen Verhältnissen ermittelt wurden, so dass die Angabe von allgemeingültigen Luftwechselraten schwer fällt. Trotz dieser Einschränkungen sollen hier für einige Szenarien typische Luftwechselraten angegeben werden, um dem Benutzer zumindest eine grobe Orientierung zu ermöglichen.

Bei geschlossenen Fenstern und Türen („natürlicher“ Luftwechsel) hängt die Luftwechselrate vorwiegend von Konstruktionsart, Alter und Dichtigkeit der Fenster und Türen ab. Die Luftwechselrate beträgt in Räumen mit modernen, dicht schließenden Fenstern und Türen etwa 0,2 – 0,4 1/h und in Räumen mit einfachen Fenstern etwa 0,5 – 0,8 1/h.

Bei geöffneten Fenstern oder Türen hängt die Luftwechselrate weniger von deren Bauweise als vielmehr von der Größe der geöffneten Fläche und von den äußeren meteorologischen Bedingungen wie z.B. Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur ab. Im Fall der Lüftung über gekippte Fenster (Kipplüftung) liegen typische Luftwechselraten im Bereich von 3 – 10 1/h (Maas, 1995). Bei weit geöffneten Fenstern z.B. liegt die (freie) Luftwechselrate in der Größenordnung von 10 – 20/h (UBA 2000). Bei „Durchzug“ kann die Luftwechselrate nochmals deutlich über diesem Wert liegen.

Tab. 1: Typische Luftwechselraten in 1/h.

Lüftungsart	Luftwechselrate
I solierfenster, geschlossen	0,2 – 0,4 1/h
Einfache Fenster, geschlossen	0,5 – 0,8 1/h
Kipplüftung	3 – 10 1/h
Fenster weit geöffnet	10 – 20 1/h

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Luftwechselraten in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten eine sehr hohe Variabilität aufweisen und die hier angegebenen Werte nur einen ungefähren Anhalt liefern können. Verlässliche Aussagen für einen bestimmten Raum sind daher nur auf der Basis von Luftwechselmessungen zu erhalten.

3.4. CO_2-Konzentration in der Außenluft

Seit Beginn der Industrialisierung ist die CO_2-Konzentration in der Außenluft von etwa 280 ppm auf knapp 370 ppm im Jahr 1998 gestiegen. Zurzeit steigt die CO_2-Konzentration um etwa 1,5 ppm pro Jahr (UBA, 2001). Neben dem langfristigen Trend gibt es aber auch eine jahreszeitliche und eine tageszeitliche Schwankung. So liegt die CO_2-Konzentration beispielsweise in der Heizperiode im Mittel um gut 10 ppm höher als in der Nichtheizperiode.

In Innenstädten mit ihren zusätzlichen größeren CO_2-Quellen wie beispielsweise Autoverkehr oder Energiegewinnung kann die CO_2-Konzentration durchaus im Bereich von 500 – 600 ppm liegen. Aber auch die Emissionen einer nahegelegenen einzelnen CO_2-Quelle (z.B. einer größeren Straße) können zu einer örtlich erhöhten CO_2-Konzentration führen.

Die CO_2-Konzentration in der Außenluft ist im Vergleich zu den CO_2-Konzentrationen, die in Innenräumen auftreten können, aber meist deutlich niedriger. Dennoch muss sie bei Modellrechnungen berücksichtigt werden. Wenn keine Messungen der CO_2-Konzentration in der Außenluft vorliegen, kann in guter Näherung ein Schätzwert von 380 ppm verwendet werden.

3.5. CO_2-Produktion durch die Raumnutzer

Die CO_2-Abgaberate, d.h. die von einem Menschen pro Zeiteinheit abgegebene CO_2-Menge, ist im Wesentlichen von dessen Aktivität und dessen Alter abhängig. Bei einer (annähernd konstanten) CO_2-Konzentration in der Ausatemluft von etwa 40.000 ppm hängt die CO_2-Abgabe nur von der Atemrate (d.h. dem pro Zeiteinheit geatmeten Volumen) ab. Typische Atemraten sind für unterschiedliche Aktivitäten und Altersgruppen beispielsweise in den „Standards zur Expositionsabschätzung“ (AUH, 1995) angegeben. Die CO_2-Abgaberaten, die sich als Produkt aus der CO_2-Konzentration in der Ausatemluft von 40.000 ppm und der jeweiligen Atemrate nach den Standards zur Expositionsabschätzung ergeben, sind in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2: Typische CO_2-Abgaberaten pro Person in ℓ/h (Werte gerundet).

Alter in Jahren	<1	1-3	4-6	7-9	10-14	> 14
Ruhe	2,3	4,8	9,7	14	20	22
leichte Aktivität	4,8	9,7	20	28	38	43
mäßige Aktivität	9,7	20	38	58	77	85
intensive Aktivität	17	33	67	102	135	152

4. Systemvoraussetzungen, Installation und Deinstallation

Die vorliegende Version des CO_2-Modells wurde so konzipiert, dass sie möglichst geringe Anforderungen an Hard- und Software stellt. Für einen ungestörten Programmablauf müssen lediglich die folgenden Mindestanforderungen erfüllt sein:

- Betriebssystem: Windows 95, 98, NT 4.0 (oder höher)
- Festplatte: mindestens 1 Megabyte frei
- Bildschirm: VGA, Auflösung von 640x480

Die Installation ist so einfach, dass auf ein Installationsprogramm verzichtet wurde. Es muss lediglich die Programmdatei „CO2Modell.exe“ in ein geeignetes Verzeichnis kopiert werden. Beim ersten Programmstart wird in diesem Verzeichnis die Datei „CO2Modell.ini “ mit den aktuellen Programm-Einstellungen angelegt.

Die Deinstallation beschränkt sich auf das Löschen der beiden im letzten Absatz genannten Dateien. Vom Programm selbst werden weder Einträge in der Registrierdatenbank erzeugt noch Dateien in die Systemverzeichnisse geschrieben. Eventuell vom Benutzer explizit erzeugte Verknüpfungen auf dem Desktop sowie Skriptdateien (s. Kap. 6.3) oder Ergebnisdateien (s. Kap. 7.3, 8.1 und 8.2) müssen ebenso „per Hand“ entfernt werden.

5. Schnelleinstieg

Für diejenigen, die sich „nur mal eben“ einen Eindruck von der Modell-Software QUIRL/CO_2 verschaffen wollen, folgt hier eine Minimal-Anleitung, die aber zumindest für die allerersten Schritte ausreicht:

1. Nach dem Aufruf des Programms die Schaltfläche „Standard“ in der Gruppe „Steuerung“ wählen.
2. Geeignete Modellparameter in den Eingabefeldern „Raumhöhe“ bis „CO_2-Abgaberate“ eingeben. Hinter den Schaltflächen mit der Glühbirne verbergen sich für einige Felder Eingabehilfen.
3. Ein Klick auf die Schaltfläche „Start“ führt die Modellrechnung durch und das Ergebnis wird als Zeitreihe im Diagramm dargestellt. Der angegebene „Titel“ erscheint in der Legende.
4. Die Punkte 2 und 3 können mit unterschiedlichen Modellparametern mehrfach wiederholt werden. Die vorherigen Zeitreihen werden weiterhin angezeigt.
5. Dieser Kurzdurchlauf kann eine Vorstellung von der grundlegenden Funktionsweise des Programms ver-

mitteln. Für eine weitergehende Nutzung sollte das Handbuch vollständig gelesen werden.

6. Modellsteuerung

Die Bedienung des Programms folgt im wesentlichen den für Windows-Programme üblichen Konventionen. In der vorliegenden Beschreibung werden daher die grundlegenden Kenntnisse über Arbeitsweisen (wie z.B. die Menübedienung oder das „Klicken" mit der Maus) vorausgesetzt und nicht näher erläutert. In der Statuszeile am unteren Fensterrand werden zusätzliche kontextsensitive Hinweise und Hilfen angezeigt.

Das Modell kennt drei unterschiedliche Arten der Modellsteuerung: Im „Standard"-Modus werden die Modellparameter (z.B. Raummaße, Zeiten, Startkonzentrationen, ...) in den entsprechenden Eingabefeldern festgelegt. Mit Klick auf die Schaltfläche „Start" wird der Konzentrationsverlauf für den vorgegebenen Zeitabschnitt vom Modell berechnet und im Diagramm dargestellt. Die Modellparameter bleiben über den gesamten Simulationszeitraum unverändert. Im Gegensatz dazu wird die Simulation im Steuerungsmodus „Interaktiv" quasi „in Zeitlupe" ausgeführt und kann jederzeit vom Benutzer kurzzeitig angehalten werden, um Änderungen an den Modellparametern vorzunehmen und dann die Simulation wieder aufzunehmen. Die flexibelste Möglichkeit bietet der Steuerungsmodus „Skript", in dem ein minutengenauer Ablaufplan für die Simulation (z.B. zeitlich veränderliche Raumbelegung oder Luftwechselrate) erstellt werden kann.

Die drei Arten der Modellsteuerung werden über die entsprechenden Auswahlfelder des Hauptfensters ausgewählt und im Folgenden detailliert beschrieben.

6.1. Modellsteuerung „Standard"

Der Programmmodus „Standard" wird im Gruppenfeld „Steuerung" des Hauptfensters aktiviert. In den Eingabefeldern auf der linken Seite des Hauptfensters werden die Modellparameter vorgegeben. Im Feld „Titel" wird mit alphanumerischen Zeichen ein Name für die zu berechnende Zeitreihe gewählt; alle folgenden Eingabefelder verlangen numerische Eingaben. Wenn sich der Mauszeiger über einem Eingabefeld befindet, wird der zulässige Wertebereich des Modellparameters in der Statuszeile und auch als Kurzhinweis angezeigt. Im folgenden werden die Eingabefelder im Einzelnen beschrieben:

- **Titel:** Jeder Zeitreihe kann ein Titel zugeordnet werden, wobei die maximale Textlänge auf 30 Zeichen begrenzt ist. Der Titel wird in der Legende zur Kennzeichnung der Zeitreihe verwendet.
- **Raumhöhe / Grundfläche:** Die möglichen Eingaben sind für die Raumhöhe auf 10 m und für die Grundfläche auf 200 m² begrenzt.
- **Start- / Stoppzeit:** In den Eingabefeldern „Startzeit" und „Stoppzeit" wird der Simulationszeitraum über die entsprechenden Uhrzeiten in Stunden und Minuten festgelegt. Wenn der Simulationszeitraum über 24 Uhr des ersten Tages hinausgehen soll, werden die weiteren Stunden zu 24 Uhr hinzuaddiert. So würde 8 Uhr des Folgetages als 24+8 = 32 Uhr eingegeben. Die Eingaben für eine Simulation von 10 Uhr des Starttages bis 16 Uhr des übernächsten Tages müssten 10 Uhr für die Startzeit und 50 Uhr für die Stoppzeit lauten.
- **Luftwechselrate:** Die Werte für die Luftwechselrate können zwischen 0 pro Stunde (kein Luftaustausch) und 100 pro Stunde vorgegeben werden. Nähere Erläuterungen zur Wahl einer geeigneten Luftwechselrate in Abhängigkeit von der Lüftungssituation finden sich in Kap. 3.3 auf S. 6.
- **CO_2 anfangs / CO_2 außen:** Die anfängliche CO_2-Konzentrationen in der Raumluft sowie die CO_2-Konzentration in der Außenluft können in einem Bereich von 0 bis 10000 ppm gewählt werden. Weitere Hinweise zu typischen CO_2-Konzentrationen in der Außenluft finden sich in Kap. 3.4 auf S. 6.
- **Raumbelegung:** Die Zahl der Personen im Raum kann zwischen 0 und 100 Personen gewählt werden. Aus der Raumbelegung und der CO_2-Abgaberate (pro Person) ergibt sich die insgesamt im Raum pro Zeiteinheit freigesetzte CO_2-Menge.
- **CO_2-Abgaberate:** Die Abgaberate gibt die von jeder im Raum befindlichen Person abgegebene CO_2-Menge an. Die Werte müssen zwischen 0,1 und 200 Litern pro Stunde liegen. Nähere Erläuterungen zur Abgaberate finden sich in Kap. 3.5 auf S. 7.

Die physikalische Interpretation der einzelnen Parameter wurde bereits in Kap. 3 ausführlich erläutert. Es soll aber noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass nicht alle Kombinationen der Modellparameter, die vom Programm zugelassen werden, auch physikalisch sinnvoll sind (obwohl auch dann ein mathematisch „richtiges" Ergebnis berechnet wird). Auf eine Plausibilitätsprüfung der Parameterkombinationen wurde bewusst verzichtet, um den Spielraum für eigene „Experimente"

nicht unnötig einzuschränken.

Um die Auswahl von physikalisch sinnvollen und an das Problem angepassten Werten zu erleichtern, verfügen die Eingabefelder „Luftwechselrate“, „CO_2 außen“ und „CO_2-Abgaberate“ jeweils über ein eigenes Hinweisfenster, dass Tipps zu den entsprechenden Modellparametern gibt. Diese Hinweisfenster werden mit einem Klick auf die jeweilige Schaltfläche geöffnet.

Nach Festlegung der Modellparameter kann die Simulation schließlich mit Klick auf die Schaltfläche „Start“ durchgeführt werden.

6.2. Modellsteuerung „Interaktiv“

Der Modus „Interaktiv“ bietet im wesentlichen alle Möglichkeiten des Modus „Standard“ (s. Kap. 6.1). Die Simulation wird aber quasi in Zeitlupe ausgeführt und kann jederzeit vom Benutzer angehalten werden. Dieser kann nun die Modellparameter ändern und dann die Simulation an gleicher Stelle wieder fortsetzen. Auf diese Weise können – im Gegensatz zum „Standard“-Modus – auch Szenarien gerechnet werden, die zeitliche Veränderungen z.B. in der Raumbelegung oder in der Luftwechselrate aufweisen. In Kap. 9.2 sind hierzu einige Anwendungsbeispiele aufgeführt.

Die Simulation wird – wie im Modus „Standard“ – durch Klicken auf die Schaltfläche „Start“ begonnen. Die Zeitreihe wird schrittweise berechnet und gleich grafisch dargestellt; gleichzeitig wechselt die Beschriftung der Schaltfläche und zeigt nun die Aufschrift „Pause“. Mit Klick auf die Schaltfläche „Pause“ wird die Simulation unterbrochen und es ist möglich, die Parametereingaben zu verändern; gleichzeitig ändert sich wiederum die Aufschrift der Schaltfläche und zeigt nun die Aufschrift „Weiter“. Klicken auf „Weiter“ setzt die Simulation mit den möglicherweise veränderten Parametern fort. Mit Klick auf die Schaltfläche „Abbruch“ kann die laufende Simulation vorzeitig beendet werden. Der bereits berechnete Teil der Zeitreihe wird im Diagramm dargestellt.

Der Zeitlupenfaktor kann mit dem Schieberegler von „Langsam“ bis „Schnell“ an die Erfordernisse angepasst werden. Beeinflusst wird von dieser Einstellung nur die Darstellungsgeschwindigkeit im Diagramm, nicht aber das Simulationsergebnis.

6.3. Modellsteuerung „Skript“

Im Steuerungsmodus „Interaktiv“ (s. Kap. 6.2) können die Modellparameter (z.B. die Raumbelegung) bei laufender Simulation zu jedem Zeitpunkt „manuell“ geändert werden. Der Steuerungsmodus „Skript“ bietet nun die Möglichkeit, den zeitlichen Ablauf der Simulation im vorhinein in einem minutengenauen Ablaufplan festzulegen. Dieser Ablaufplan wird im folgenden als Skript bezeichnet und im Skripteditor (nur sichtbar im Steuerungsmodus „Skript“) bearbeitet. Die Regeln, nach denen ein Skript aufgebaut ist, werden in diesem Kapitel eingehend beschrieben. Um den Einstieg zu erleichtern, soll diesen Regeln ein Beispiel für ein einfaches Skript vorangestellt werden, um einen ersten Eindruck vom grundsätzlichen Aufbau eines Skripts zu geben.

Beispielskript: Im Beispielskript (Abb. 1) enthält die erste Zeile einen durch ein Semikolon eingeleiteten Kommentar und wird nicht weiter ausgewertet. Die folgenden acht Zeilen bilden den Vorspann, in dem Titel und Anfangsbedingungen gesetzt werden. Im nun folgenden Regieteil werden die Zeiten angegeben, zu denen einzelne oder auch alle Angaben des Vorspanns geändert werden sollen. Die Anweisung „Start“ setzt den Beginn des Simulationszeitraumes auf acht Uhr. Danach folgen Anweisungen, die die Raumbelegung und die Lüftung zeitlich ändern (z.B. intensive Lüftung in der Zeit von 13:00 bis 13:15). Jedes Skript muss mit der Anweisung „Stopp“ in der letzten Zeile abgeschlossen werden.

Vorspann

```
;Beispiel-Skript

Titel           = Beispiel
Raumhöhe        = 2.5
Grundfläche     = 20
Canfangs        = 360
Caußen          = 360
Luftwechselrate = 0.2
Personen        = 0
Abgaberate      = 10
```

Regieteil

```
 8:00 Start
 8:30 Personen = 1
11:00 Personen = 4
13:00 Luftwechselrate = 2
13:15 Luftwechselrate = 0.2
14:00 Personen = 0
17:15 Stopp
```

Abb. 1: Beispiel für ein einfaches Skript

Tab. 3: Liste aller Schlüsselwörter, der korrespondierenden Modellvariablen, Maßeinheiten und Parametertypen sowie des Skriptabschnitts, in dem das Schlüsselwort verwendet werden kann.

Schlüsselwort	Modellvariable	Maßeinheit	Parameter	Skriptabschnitt
`Titel`	Titel	—	Zeichenkette	Vorspann
`Raumhöhe`	Raumhöhe	m	Dezimalzahl	Vorspann/Regieteil
`Grundfläche`	Grundfläche	m²	Dezimalzahl	Vorspann/Regieteil
`Start`	Startzeit	—	—	Beginn Regieteil
`Stopp`	Stoppzeit	—	—	Ende Regieteil
`Canfangs`	CO_2 anfangs	ppm	Dezimalzahl	Vorspann
`Caußen`	CO_2 außen	ppm	Dezimalzahl	Vorspann/Regieteil
`Luftwechselrate`	Luftwechselrate	1/h	Dezimalzahl	Vorspann/Regieteil
`Personen`	Raumbelegung	Personen	Ganzzahl	Vorspann/Regieteil
`Abgaberate`	CO_2-Abgaberate	Liter/h/Person	Dezimalzahl	Vorspann/Regieteil

Beschreibung der Skriptregeln: Ein Skript untergliedert sich in einen Vorspann und einen nachfolgenden Regieteil.

- Im Vorspann werden die Anfangsbedingungen angegeben, d.h. die Werte, die die Modellvariablen (z.B. die Anfangskonzentration) zu Beginn der Simulation haben sollen.
- Im Regieteil wird der zeitliche Ablauf der Simulation festgelegt. Die Anweisungen im Regieteil sind gegenüber den Anweisungen im Vorspann um die Angabe einer Uhrzeit erweitert: {*Uhrzeit*} {*Anweisung*}. Die Anweisungen im Regieteil müssen zeitlich aufsteigend sortiert sein. Die erste bzw. letzte Anweisung des Regieteils bildet die Start- bzw. die Stopp-Anweisung.
- Eine Anweisung hat die Form {*Schlüsselwort*} = {*Wert*}, wobei jede Skriptzeile genau eine Anweisung enthalten kann. Die zur Verfügung stehenden Schlüsselwörter entsprechen weitestgehend den Bezeichnungen der Eingabefelder, die im Modellsteuerungsmodus „Standard“ zur Verfügung stehen. Die Schlüsselwörter sind in Tab. 3 vollständig aufgeführt. Um beispielsweise die CO_2-Konzentration in der Außenluft auf 380 ppm zu setzen, muss die folgende Anweisung in das Skript eingefügt werden: „`Caußen=380`“. Dabei ist zu beachten, dass allen Modellvariablen Startwerte zugewiesen werden müssen, d.h. es gibt keine Standardwerte bzw. Vorbelegungen. Lediglich die Angabe eines Titels ist optional. Zwischen Groß- und Kleinschreibung wird grundsätzlich nicht unterschieden (Ausnahme: Angabe eines Simulationstitels).
- Leerzeilen und Kommentare: Zur optischen Gliederung eines Skriptes können Leerzeilen eingefügt werden, die nicht weiter ausgewertet werden. Bei umfangreicheren Skripten wird es in der Regel sinnvoll sein, Kommentare zu den einzelnen Anweisungen direkt in das Skript einzufügen. Kommentare werden durch ein Semikolon eingeleitet; der Rest der Zeile nach dem Semikolon wird nicht weiter ausgewertet.
- Zahlenangaben: Als Dezimalzeichen wird im Skript – unabhängig von den Einstellungen des Betriebssystems – der Punkt anstelle des Kommas verwendet (z.B. 3.5 statt 3,5).
- Uhrzeiten: Die Uhrzeiten können sowohl in Stunden-Minuten-Schreibweise (z.B. „`14:15`“) oder in Dezimalschreibweise (z.B. „`14.25`“ statt „`14:15`“) angegeben werden. Für Zeiten, die über den ersten Tag hinausgehen, gelten die gleichen Konventionen wie in den Eingabefeldern der anderen Steuerungsmodi (s. Kap 6.1). Die Zeitangaben werden über 24 Uhr hinaus einfach weitergeführt. So würde „`8:00`“ Uhr des Folgetages als 24+8 = „`32:00`“ Uhr angegeben. Soll beispielsweise die Raumbelegung so gesteuert werden, dass sich ab halb zwölf 5 Personen im Raum aufhalten, so müsste die entsprechende Anweisung im Regieteil des Skripts lauten: „`11:30 Personen=5`“.

Skript starten: Mit Klick auf die Schaltfläche „Start“ wird zunächst das Skript auf formale Richtigkeit geprüft. Gegebenenfalls wird eine Fehlermeldung angezeigt und der Cursor in die entsprechende Skriptzeile gesetzt. Wenn alle Fehler beseitigt sind, kann die Simulation mit Klick auf die Schaltfläche „Start“ gestartet und das Skript abgearbeitet werden.

Erzeugen, Öffnen und Speichern von Skripten: Mit Klick auf die Schaltfläche „Skript ...“ öffnet sich ein Menü mit vier Einträgen für die Skriptverwaltung. Mit dem Menüpunkt „Neu“ wird ein neues Skript auf der Basis der

aktuellen Einstellungen der Steuerungsmodi „Standard“ bzw. „Interaktiv“ generiert. Das so erzeugte Skript kann dann im Skripteditor in einem weiteren Schritt an die Erfordernisse angepasst werden. Ein modifiziertes Skript kann mit dem Menüpunkt „Speichern“ als Datei auf die Diskette oder Festplatte geschrieben werden. Skript-Dateien erhalten standardmäßig die Dateinamenserweiterung „.CO2“ und sind reine Textdateien ohne besondere Formatierung. Mit dem Menüpunkt „Speichern unter“ kann das Skript unter einem anderen Namen abgelegt werden. Ein so gespeichertes Skript kann mit dem Menüpunkt „Öffnen“ wieder in den Skripteditor geladen werden. Ist das aktuelle Skript noch nicht gespeichert, erfolgt zuvor eine entsprechende Sicherheitsabfrage.

7. Diagrammdarstellung

Die mit dem Modell berechneten Zeitreihen werden im Diagramm dargestellt. Wenn sich der Mauszeiger im Ausgabebereich des Diagramms befindet, wird der Mauszeiger als Fadenkreuz angezeigt und die Position des Mauszeigers kann in der Statuszeile als Zeit „t“ und Konzentration „C“ abgelesen werden.

In Abhängigkeit von der Einstellung der Programm-Optionen (s. Kap. 7.5) wird im Diagramm zusätzlich zu den Zeitreihen der Referenzwert von 1500 ppm (s. Kap. 2) als horizontale Linie dargestellt.

Die einzelnen Diagramm-Funktionen werden im Folgenden beschrieben.

7.1. Achsenbereich ändern (Zoomen)

Standardmäßig werden die Achsenbereiche des Diagramms vom Programm automatisch so angepasst, dass alle Zeitreihen vollständig dargestellt werden. Interessieren aber nur Teilbereiche des Diagramms, so kann der Benutzer einen Teilausschnitt auswählen. Hierfür stehen zwei Methoden zur Verfügung:

- Zoomen mit der Maus:
  Hierzu klickt man mit der linken Maustaste einen Eckpunkt dieses Bereichs an und zieht bei gedrückter Maustaste ein Rechteck über den entsprechenden Bereich auf.
- Zoomen mit dem Dialog “Achsen skalieren”:
  Durch Doppelklick auf die Diagrammachsen oder im Kontextmenü des Diagramms kann der Dialog „Achsen skalieren“ aufgerufen werden. Dieser Dialog bietet über die Angabe der Achsenendwerte hinaus auch die Möglichkeit, die Achsenteilungen festzulegen. Mit den Kontrollfeldern “Auto” kann wieder die automatische Wertauswahl durch das Programm aktiviert werden.

Wenn manuell ein Diagrammausschnitt gewählt wurde, erscheint in der unteren linken Ecke des Diagramms die zusätzliche Schaltfläche . Durch Klicken auf diese Schaltfläche wird die manuelle Ausschnittswahl wieder aufgehoben. Alternativ kann der Menüpunkt “Zoom aufheben” des Kontextmenüs (aufzurufen mit einem Doppelklick auf die Diagrammfläche) verwendet werden.

7.2. Externe Daten hinzufügen

Neben den vom Modell berechneten Zeitreihen können zusätzlich externe Daten in das Diagramm eingebunden werden, um beispielsweise die Modellergebnisse mit Messdaten zu unterlegen. Das Einbinden erfolgt über den Dialog „Externe Daten hinzufügen“, der über das Kontextmenü des Diagramms (Aufruf mit Doppelklick oder Klick mit der rechten Maustaste auf die Diagrammfläche) aufgerufen werden kann.

Die externen Daten müssen als unformatierter Text (in ASCII- oder ANSI-Kodierung) vorliegen. Als Trennzeichen zwischen den einzelnen Werten innerhalb einer Zeile sind Leerzeichen, Tabulatoren oder Kommata erlaubt. Für eine größtmögliche Flexibilität wird automatisch versucht, die Verwendung von Punkt oder Komma als Dezimaltrennzeichen aus den Messdaten selbst zu bestimmen. Die Messdaten können auf zwei unterschiedlichen Wegen in das Programm übernommen werden:

- Externe Daten aus der Zwischenablage einfügen:
  Daten können aus anderen Programmen in die Zwischenablage kopiert und aus dieser wieder in QUIRL/CO_2 eingefügt werden. Dies funktioniert in der Regel auch direkt mit den Daten aus Arbeitsblättern von Tabellenkalkulationen. Im Dialog „Externe Daten hinzufügen“ muss hierzu als „Datenquelle“ die Zwischenablage gewählt werden.
- Externe Daten aus einer Datei lesen:
  Daten können aus einer Datei gelesen werden, die die Daten in Textkodierung enthält. Binäre Dateien z.B. von Tabellenkalkulationen können nicht eingelesen werden. Zur Auswahl der Datei wird im Dialog „Externe Daten hinzufügen“ zunächst als Datenquelle „...

Datei importieren“ eingestellt und dann mit der Schaltfläche „Durchsuchen“ die entsprechende Datei angegeben.

Nach der Auswahl der Datenquelle werden die Daten im Vorschaufenster angezeigt. Im nächsten Schritt ist die Datenstruktur zu bestimmen. Hierzu wird die jeweilige Spalte, in der die Zeitangabe und die Konzentrationsangabe steht, in den entsprechenden Eingabefeldern ausgewählt. Zusätzlich kann eingestellt werden, ob Zeilen am Dateianfang (z.B. Tabellenüberschriften) überlesen werden sollen.

Schließlich kann noch ein Titel für die externen Daten angegeben werden, der in der Legende des Diagramms verwendet wird.

7.3. Diagramm exportieren

Über die Möglichkeit des Druckens hinaus kann das Diagramm auch exportiert und in anderen Programmen weiterverarbeitet werden. Hierfür sind zwei grundsätzliche Möglichkeiten vorgesehen:

- Export über die Zwischenablage:
  Im Kontextmenü, dass mit Doppelklick auf das Diagramm aufgerufen wird, stehen die drei Menüpunkte „Kopieren als ...“ zur Verfügung, mit denen das Diagramm in die Zwischenablage kopiert wird. Als Ausgabeformat kann WMF (Windows Metafile), EMF (Windows Enhanced Metafile) oder BMP (Bitmap) gewählt werden. Das Diagramm kann dann in ein anderes Anwendungsprogramm (z.B. Textverarbeitung) übernommen werden (i.d.R. dort mit dem Menüpunkt „Bearbeiten/Einfügen“).
- Export in eine Datei:
  Mit dem Menüpunkt „Speichern in Datei“ des Kontextmenüs des Diagramms wird das Diagramm als Grafik in eine Datei geschrieben. Im Dateiauswahldialog kann neben Verzeichnis und Dateinamen auch der Dateityp (EMF / WMF / BMP, s.o.) angegeben werden.

7.4. Diagramm drucken

Wenn mindestens eine Zeitreihe angezeigt wird, kann das Diagramm gedruckt werden. Hierzu wird mit einem Doppelklick auf das Diagramm das Kontextmenü aufgerufen und der Menüpunkt „Drucken“ ausgewählt. Vor dem Druckbeginn wird der Standarddruckdialog geöffnet, mit dem der Drucker sowie die Druckeinstellungen geändert werden können. Gedruckt wird das Diagramm so wie auf dem Bildschirm dargestellt, d.h. die Achsenteilungen, Zoombereiche und Beschriftungen usw. werden wie angezeigt übernommen.

7.5. Diagramm-Optionen

Mit der Schaltfläche „Optionen“ kann ein Dialog aufgerufen werden, mit dem die Einstellungen u.a. für die Diagramm-Darstellung verändert werden können. So können beispielsweise die Linienstärken der im Diagramm dargestellten Zeitreihen verändert oder die Kurzhinweise abgeschaltet werden.

Zusätzlich zu den Zeitreihen kann zur leichteren Orientierung der CO_2-Referenzwert von 1500 ppm im Diagramm als horizontale Linie dargestellt werden. Farbe, Linienstärke und Wert können frei gewählt werden.

8. Zeitreihen

Die Funktionen zum Bearbeiten der im Diagramm angezeigten Zeitreihen sind über das Kontextmenü zu erreichen, dass mit einem Doppelklick auf den Legendeneintrag der entsprechenden Zeitreihe aufgerufen wird. In diesem Kontextmenü stehen für jede Zeitreihe die folgenden Funktionen zur Verfügung:

8.1. Skript der Zeitreihen anzeigen / exportieren

Jeder mit dem CO_2-Modell berechneten Zeitreihe ist ein Skript zugeordnet (s. Kap. 6.3), dass die verwendeten Modellparameter dokumentiert. Bei externen Zeitreihen (s. Kap. 7.2) wird im Skript lediglich die Datenquelle (Dateiname oder Zwischenablage) als Kommentar vermerkt. Das Skript jeder Zeitreihe kann mit dem Menüpunkt „Skript zeigen“ in einem neuen Fenster angezeigt, nicht aber bearbeitet werden. Zusätzlich stehen zwei Möglichkeiten der Weiterverarbeitung zur Verfügung. Zum einen kann das Skript mit der Schaltfläche „Kopieren“ in die Zwischenablage kopiert werden, zum anderen kann das Skript mit der Schaltfläche „Speichern in Datei“ permanent gesichert werden.

8.2. Daten der Zeitreihen anzeigen / exportieren

Ebenso wie das Skript können auch die Einzeldaten der ausgewählten Zeitreihe als Tabelle angezeigt werden. In den Spalten der Tabelle stehen von links nach rechts die Rechenschrittnummer, die Zeit in Stunden:Minuten-Schreibweise, die Zeit in Dezimalschreibweise sowie die berechnete Konzentration in ppm. Die Tabelle wird nur angezeigt, kann aber nicht verändert werden. Es bestehen jedoch wieder zwei Möglichkeiten der Weiterverarbeitung: Zum einen kann die Tabelle mit der Schaltfläche „Kopieren“ in die Zwischenablage kopiert werden. Die meisten Tabellenkalkulationsprogramme können diese Daten direkt aus der Zwischenablage übernehmen (i.d.R. dort mit dem Menüpunkt „Bearbeiten/Einfügen“). Zum anderen kann die Tabelle mit der Schaltfläche „Speichern in Datei“ permanent gesichert werden.

8.3. Kennwerte der Zeitreihen anzeigen

Die Übersichtsdaten aller dargestellten Zeitreihen werden im Dialog „Kennwerte anzeigen“ tabellarisch dargestellt. Neben den statistischen Basisgrößen Anzahl der Messwerte, Minimum, Maximum und arithmetischem Mittelwert werden auch die Überschreitungen des lufthygienischen Referenzwerts von 1500 ppm als Häufigkeit, Mittelwert und Index angegeben. Die Bewertung des Überschreitungsindexes erfolgt nach dem in Kap. 2 angegebenen dreistufigen Schema und wird im Programm durch die Ampelfarben visualisiert (s. Tab. **4**).

Tab. 4: Bewertungsschema der Luftqualität.

Überschreitungsindex	Bewertung	Ampel
0 ppm*%	gut	grün
bis 15000 ppm*%	zufriedenstellend	gelb
über 15000 ppm*%	unzureichend	rot

8.4. Zeitreihen umbenennen

Die ausgewählte Zeitreihe kann über den Menüpunkt „Umbenennen“ mit einem neuen Titel versehen werden. Der neue Titel wird in der Legende angezeigt. Im Skript wird der neue Titel ebenfalls geändert und ein Hinweis auf die Umbenennung als Kommentar eingefügt.

8.5. Zeitreihen löschen

Die ausgewählte Zeitreihe kann über den Menüpunkt „Löschen“ nach vorheriger Bestätigungsabfrage endgültig gelöscht werden. Der Menüpunkt „ALLE löschen“ löscht – wiederum nach vorheriger Bestätigungsabfrage –alle dargestellten Zeitreihen endgültig. Das Löschen einer Zeitreihe kann nicht rückgängig gemacht werden.

9. Anhang

9.1. Literatur

- **AUH (Ausschuss für Umwelthygiene), 1995:** Standards zur Expositionsabschätzung. Bericht des Ausschusses für Umwelthygiene. Behörde für Arbeit, Gesundheit und Soziales Hamburg (Hrsg.), Hamburg. 163 Seiten.
- **DIN 1946-2, 1994:** Raumlufttechnik – Gesundheitliche Anforderungen. DIN 1946, Teil 2. Beuth-Verlag, Berlin.
- **Grams, H., O. Hehl, J. Dreesman, 2003:** Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen, in Vorbereitung.
- **Maas, A., 1995:** Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel. 102 Seiten.
- **Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, 2003:** Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Abschlussbericht, Hannover. Internet: „www.nlga.niedersachsen.de/umwelt/schul.htm“. 39 Seiten.
- **Umweltbundesamt, 2001:** Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Erich Schmidt Verlag, Berlin. ISBN 3-503-05973-3. 380 Seiten.
- **VDI 4300, Blatt 7, 2001:** Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Beuth-Verlag, Berlin.

9.2. Anwendungsbeispiel

Die Möglichkeiten und die typischen Bedienungsabläufe der Software QUIRL/CO_2 soll im Folgenden anhand eines einfachen Anwendungsbeispiels für einen fiktiven Schultag verdeutlich werden.

Als Ausgangssituation wird ein großer Klassenraum mit einer Grundfläche von 90 m² und einer Raumhöhe von 3 m betrachtet, der mit 25 Grundschülern belegt ist (Die Lehrkraft wird zur Vereinfachung als Schüler betrachtet).

Der Unterrichtstag beginnt um 8:00 und endet nach der 5. Stunde um 12:25 (45-minütige Schulstunden, dazwischen kleine Pausen (5 min) und großen Pausen (15 min) im Wechsel). Die CO_2-Konzentration betrage in der Außenluft 380 ppm (s. Kap. 3.4). Der Klassenraum ist zu Unterrichtsbeginn gut gelüftet, so dass die CO_2-Konzentration im Raum ebenfalls 380 ppm beträgt. Der Klassenraum hat einfache Fenster, so dass für die Luftwechselrate ein Wert von 0.6 1/h (s. Tab. 1) angesetzt wird. Die CO_2-Abgaberate wird nach Tab. 2 für die Alterstufe von 7-9 Jahren und sitzende Tätigkeit (Ruhe) mit 14.3 ℓ/h pro Person angenommen. Für die CO_2-Außenkonzentration, die Luftwechselrate und die CO_2-Abgaberate lassen sich über die Schaltflächen (rechts neben den jeweiligen Eingabefeldern) Auswahlhilfen aufrufen. Im Steuerungsmodus „Standard" sollte die Eingabemaske mit den angegebenen Werten jetzt wie in Abb. 2 aussehen.

Durch Maus-Klick auf die Schaltfläche „Start" wird der Modelllauf gestartet und die berechnete Zeitreihe im Diagrammfenster angezeigt (Abb. 3). Unter den gewählten Bedingungen wird bereits nach gut einer Stunde der Referenzwert von 1500 ppm überschritten. Die maximale Konzentration von über 2400 ppm wird am Ende des Unterrichtstages erreicht.

Als erste Erweiterung des Beispiels sollen die Schüler in den großen Pausen (9:35–9:50 und 11:25–11:40) den Klassenraum verlassen. In dieser Zeit wird also kein CO_2 im Raum freigesetzt. Solche zeitlich veränderlichen Rahmenbedingungen können im Modell durch ein Skript beschrieben werden. Hierzu wird zunächst die Modellsteuerung „Skript" aktiviert (s. Kap. 6.3). Mit Klick auf die Schaltfläche Skript ... und dann weiter auf „Neu" wird im Skript-Editor ein Skript auf der Basis der Werte der Eingabemaske (s. Abb. 2) erzeugt, das nun entsprechend erweitert werden kann. So wird beispielsweise mit der Skriptzeile „`9:35 Personen = 0`" die Schülerzahl zu Beginn der 1. großen Pause auf Null gesetzt. Abb. 4 zeigt das erweiterte Skript, wobei die eingefügten Zeilen grau unterlegt sind. Das Skript kann wieder mit Klick auf die Schaltfläche „Start" ausgeführt werden. Die neue Zeitreihe wird zusätzlich im Diagramm angezeigt (Abb. 5). Durch die Berücksichtigung der in den Pausen leeren Klassenräume geht die CO_2-Konzentration in den Pausen leicht zurück; das Maximum der CO_2-Konzentration liegt mit knapp 2200 ppm etwas niedriger als für die zuvor berechnete Konstellation.

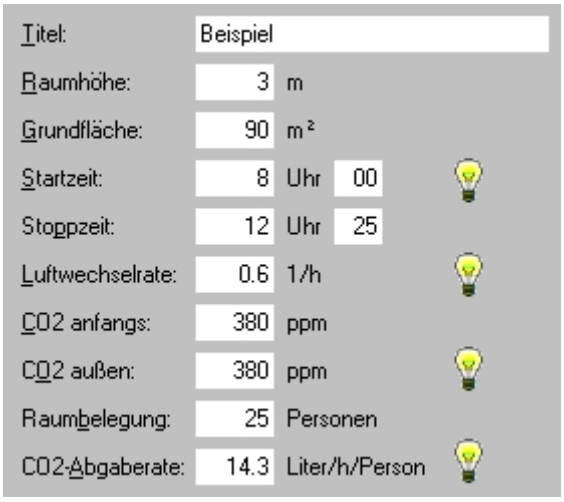


Abb. 2: Eingabemaske für das Anwendungsbeispiel

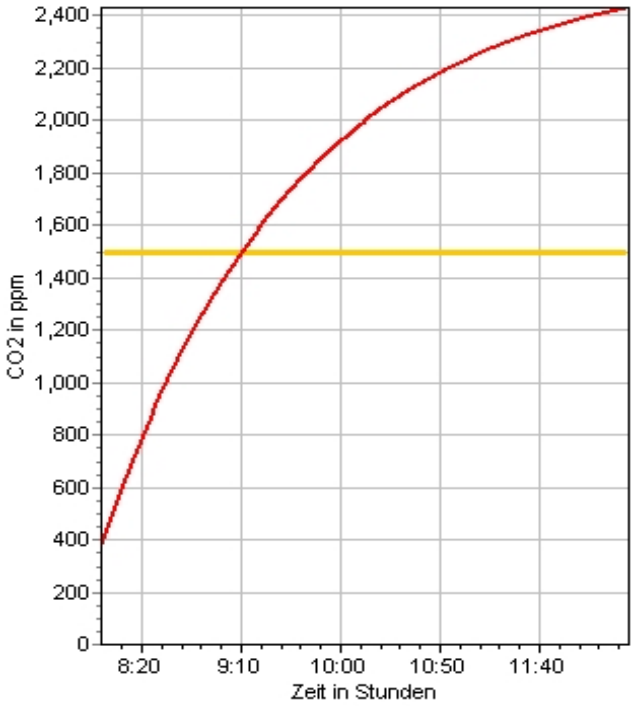


Abb. 3: Simulierte CO_2-Konzentration im Klassenraum für das Ausgangsbeispiel. Zusätzlich ist der Referenzwert dargestellt (hell).

```
Titel            = In Pausen: Raum leer
Raumhöhe         = 3
Grundfläche      = 90
Canfangs         = 380
Caußen           = 380
Luftwechselrate  = 0.6
Personen         = 25
Abgaberate       = 14.3

 8:00  Start
 9:35  Personen = 0
 9:50  Personen = 25
11:25  Personen = 0
11:40  Personen = 25
12:25  Stopp
```

Abb. 4: Skript 1 zum Anwendungsbeispiel (Keine Schüler im Raum in den großen Pausen)

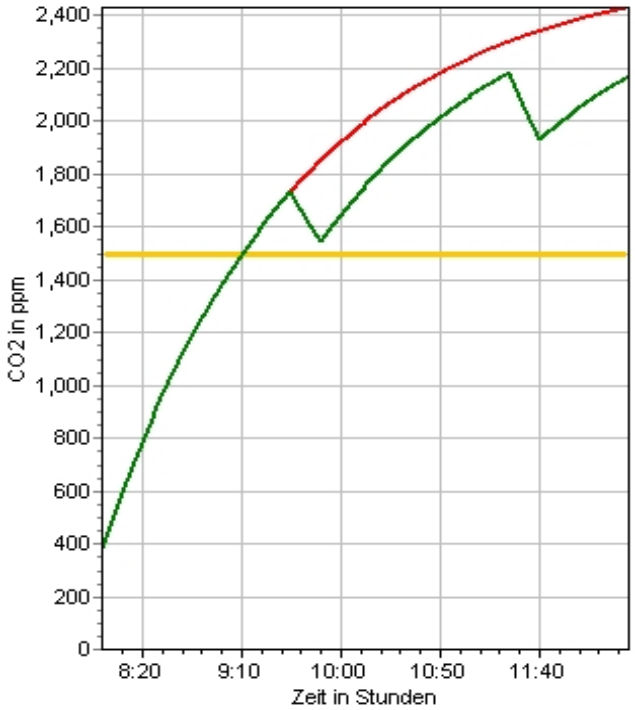


Abb. 5: Simulierte CO_2-Konzentration im Klassenraum. Die untere Zeitreihe wurde mit Skript 1 berechnet (keine Schüler im Raum in den zwei großen Pausen).

```
Titel            = Lüften in den Pausen
Raumhöhe         = 3
Grundfläche      = 90
Canfangs         = 380
Caußen           = 380
Luftwechselrate  = 0.6
Personen         = 25
Abgaberate       = 14.3

 8:00  Start
 9:35  Personen = 0
 9:35  Luftwechselrate = 15
 9:40  Luftwechselrate = 0.6
 9:50  Personen = 25
11:25  Personen = 0
11:25  Luftwechselrate = 15
11:30  Luftwechselrate = 0.6
11:40  Personen = 25
12:25  Stopp
```

Abb. 6: Skript 2 zum Anwendungsbeispiel (5 min. Stoßlüftung zu Beginn der großen Pausen)

Wie würde sich eine Stoßlüftung in den Pausen auf den CO_2-Verlauf auswirken? Um diese Frage zu beantworten wird angenommen, dass in den ersten 5 Minuten jeder großen Pause die Fenster weit geöffnet werden. Die Luftwechselrate für diesen Fall wird nach Tab. 1 mit 15 1/h angesetzt und das Skript durch die in Abb. 6 grau unterlegten Zeilen erweitert. Nach Ausführen des Skripts werden nun alle drei Varianten (Keine Pausenberücksichtigung; leere Klassenräume in den Pausen; Stoßlüftung zu Pausenbeginn) im Diagramm dargestellt (Abb. 7). Durch die Stoßlüftung werden die CO_2-Konzentrationen sowohl im Mittel als auch in den Spitzen deutlich abgesenkt. Der Referenzwert von 1500 ppm wird dabei nur kurzzeitig und nur geringfügig überschritten. Einen Überblick über die mit den drei Varianten berechneten CO_2-Konzentrationen erhält man am einfachsten im Dialogfenster „Kennwerte aller Zeitreihen“ (Aufruf durch Klick auf einen Legendeneintrag und dann „Kennwerte zeigen“ (s. Kap. 8.3)).

Hiermit soll das kurze Anwendungsbeispiel beendet werden. Der Weg für eigene „Experimente“ ist damit aufgezeigt. Würde die CO_2-Konzentration im gewählten Beispiel wohl unterhalb des Referenzwerts bleiben, wenn in den kleinen Pausen kippgelüftet würde?

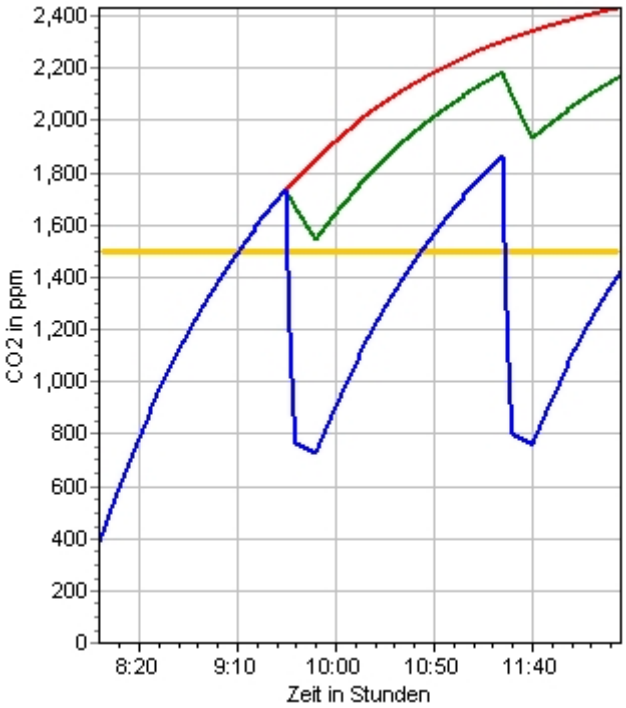


Abb. 7: Simulierte CO_2-Konzentration im Klassenraum. Die unterste Zeitreihe wurde mit Skript 2 berechnet (fünfminütige Stoßlüftung jeweils zu Beginn der zwei großen Pausen).