Bauen und Umwelt 173 (2020) 106749

Inhaltsverzeichnisse bei ScienceDirect verfügbar

Bauen und Umwelt

Homepage der Zeitschrift:

Die Beziehungen zwischen der Luftqualität im Klassenzimmer und der Schulische Leistungen

Pawel Wargocki [a,*], Jose Ali Porras-Salazar [b], Sergio Contreras-Espinoza [c], William Bahnfleth [d]

[ein] Internationales Zentrum für Umwelt und Energie in Innenräumen, DTU Bauwesen, Technische Universität Dänemark, Kongens Lyngby, Dänemark
[b] Schule für Architektur, Universität von Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
[c] Abteilung für Statistik, Universität für Bio- Bio, Bio-Bio, Chile
[d] Abteilung für Architekturingenieurwesen, Pennsylvania State University, PA, Vereinigte Staaten

ARTIKLEINEN

Schlüsselwö
rter:
Kinder
lernen
Kognitive Leistungen
Grundschulen Kohlendioxid

Dies ist eine automatische Übersetzung von SVLW. Es gilt die englische Version, speziell bei Formeln, Tabellen, Verweisen.

ABSTRACT

Die Daten aus veröffentlichten Studien wurden zur Ableitung systematischer Beziehungen zwischen den Lernergebnissen und der Luftqualität in den Klassenräumen verwendet. Zur Quantifizierung der Lernergebnisse wurden psychologische Tests zur Messung kognitiver Fähigkeiten und Fertigkeiten, Schulaufgaben einschließlich mathematischer und sprachbasierter Aufgaben, Bewertungsschemata und Tests zur Beurteilung des Lernfortschritts einschließlich der Jahrgangsstufen und Prüfungsergebnisse verwendet. Kurzfristige krankheitsbedingte Fehlzeiten wurden ebenfalls einbezogen, da sie den Lernfortschritt beeinflussen können. Die Luftqualität in den Klassenräumen wurde durch die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) charakterisiert. Bei psychologischen Tests und Schulaufgaben wurden fraktionierte Leistungsänderungen gegenüber den durchschnittlichen CO_2-Konzentrationen, bei denen sie auftraten, regressiert; alle Daten, die in Studien, die die Einschlusskriterien erfüllten, gemeldet wurden, wurden zur Ableitung der Beziehung herangezogen, unabhängig davon, ob die Leistungsänderung bei den untersuchten Stufen der Klassenraumluftqualität statistisch signifikant war. Die Analyse sagt voraus, dass eine Senkung der CO2-Konzentration von 2.100 ppm auf 900 ppm die Leistung von psychologischen Tests und Schulaufgaben um 12% in Bezug auf die Geschwindigkeit, mit der die Aufgaben ausgeführt werden, und um 2% in Bezug auf die Fehler, die gemacht werden, verbessern würde. Für andere Lernergebnisse und kurzfristigen Krankenstand waren nur die in den ursprünglichen Studien veröffentlichten Beziehungen verfügbar. Sie wurden daher zur Erstellung von Vorhersagen verwendet. Diese Beziehungen zeigen, dass eine Reduzierung der CO2-Konzentration von 2.300 ppm auf 900 ppm die Leistung bei den Tests zur Bewertung des Lernfortschritts um 5% verbessern würde und dass eine Reduzierung der CO_2-Konzentration von 4.100 ppm auf 1.000 ppm die tägliche Anwesenheit um 2,5% erhöhen würde. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass eine Erhöhung der Lüftungsrate in Klassenräumen im Bereich von 2 L/s- bis 10 L/s- Person erhebliche Vorteile in Bezug auf die Lernleistung und die Anwesenheit von Schülern bringen kann; für höhere Raten liegen keine Daten vor. Die Ergebnisse bieten einen starken Anreiz zur Verbesserung der Luftqualität in Klassenräumen und können in Kosten-Nutzen-Analysen verwendet werden.

1. Einführung

Klassenzimmer sind Orte, an denen die Kinder einen großen Teil ihrer wachen Stunden verbringen, um neues Wissen zu erwerben und verschiedene Fähigkeiten und Fertigkeiten zu entwickeln. Untersuchungen haben dokumentiert, dass die Umweltqualität in den Klassenzimmern von Grundschulen oft unzureichend ist [1-3]. Dies hat nachweislich negative Folgen für den Lernprozess [4,5]. In früheren Arbeiten von Wargocki et al. wurde gezeigt, dass die Temperatur in Klassenräumen einen starken Einfluss auf das Lernen hat [6]. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie die Leistung von Schulaufgaben durch die schlechte Luftqualität in den Klassenräumen beeinflusst wird.

Mehrere Studien haben gezeigt, dass die Luftqualität in Klassenräumen die kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten der Schülerinnen und Schüler beeinträchtigen, da sie sich nicht konzentrieren können oder von der Arbeit, die sie tun sollen, abgelenkt werden [7-11]. Diese Auswirkungen haben erhebliche sozioökonomische Folgen [4] und beeinträchtigen ihre Lebensqualität, z.B. durch zunehmenden Stress für die Eltern, die sich den Tag freinehmen müssen, an dem die Kinder wegen Krankheit zu Hause bleiben müssen [4,12]. Wenn die Luftqualität in den Klassenräumen schlecht ist, verschlechtern sich zudem die Arbeitsbedingungen für die Lehrer. Dies kann zu einer verminderten Lernleistung führen, weil die Fähigkeit der Lehrer, effektiv zu unterrichten, vermindert wird. Dies kann auch zu einem Anstieg der krankheitsbedingten Fehlzeiten der Lehrer führen. In der Folge sind weitere wirtschaftliche Verluste zu erwarten.

Um den Umfang der Auswirkungen der Luftqualität in Klassenräumen auf die Leistung der Schüler und den Krankenstand abzuschätzen, werden die Beziehungen zwischen der Luftqualität in Klassenräumen

* Korrespondierender Autor.
E-Mail-Adresse: paw@byg.dtu.dk (P. Wargocki).

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749
Eingegangen am 23. Dezember 2019; Eingegangen in überarbeiteter Form am 11. Februar 2020; Angenommen am 13. Februar 2020
Online verfügbar 17 Februar 2020
0360-1323/© 2020 Elsevier Ltd. Alle Rechte vorbehalten.

und Lernleistungsergebnisse, die veröffentlichte Daten zusammenfassen, wären nützlich. Solche Beziehungen gibt es derzeit nicht speziell für Lernleistungsergebnisse. Einige Studien haben jedoch Beziehungen zwischen der Luftqualität in Innenräumen und der kognitiven Leistung hergestellt, die im Folgenden zusammengefasst werden. In diesen Studien wurde die Belüftungsrate (Außenluftzufuhrrate) als Metrik der Raumluftqualität verwendet, wobei davon ausgegangen wurde, dass eine höhere Belüftungsrate einer verbesserten Raumluftqualität entspricht. Zur Beschreibung der kognitiven Leistung wurden verschiedene Ergebnisse verwendet, die von Tests des Neuroverhaltens zur Untersuchung von Fähigkeiten über die Ausführung verschiedener kognitiver Aufgaben bis hin zu regelmäßiger Büroarbeit reichen.

Sepp€anen et al. entwickelten eine Beziehung zwischen der Beatmungsrate und kognitive Leistungen, die hauptsächlich Büroarbeit darstellen [13]. Es zeigt, dass eine Verdoppelung der Lüftungsrate die Leistung um etwa 1,5% verbessern würde. Die Beziehung basiert auf den Ergebnissen von neun Studien. Sie wurden in Callcentern [14-18] durchgeführt, in denen die durchschnittliche Handhabungs-, Gesprächs- oder Nachbearbeitungszeit als Leistungsresultat verwendet wurde; in Labors, in denen simulierte Büroarbeitsaufgaben wie Tippen und Korrekturlesen als Leistungsresultat verwendet wurden [19,20]; und in einer Schule, in der neurobehaviorale kognitive Tests zur Messung der Auswirkungen auf die Leistung der Schüler verwendet wurden [8]. Folglich befasst sich diese Beziehung nicht speziell mit den Auswirkungen der Luftqualität in Klassenräumen auf das Lernen, da sie auf Daten aus verschiedenen Studien basiert, die in erster Linie die Auswirkungen der Luftqualität in Innenräumen auf die Büroarbeit untersucht haben.

Einige wenige Studien, die in Schulen durchgeführt wurden, verwendeten lernrelevante Leistungsergebnisse, wie z.B. Schulaufgaben, die aus arithmetischen und sprachbezogenen Aufgaben bestehen, oder die Ergebnisse jährlicher Tests, die den Lernfortschritt messen, um eine Beziehung zwischen den Leistungsergebnissen und der Luftqualität herzustellen [4,21]. Wargocki und Wyon erhielten eine Beziehung, die eine bis zu 14%ige Leistungssteigerung der Schülerinnen und Schüler vorhersagt, wenn die Außenluft
Das Angebot wird verdoppelt [4]. Haverinen-Shaughnessy et al. legten einen Zusammenhang fest, der eine Verbesserung des mittleren Mathematik-Scores der Schülerinnen und Schüler um 0,5% für jeweils 1 L/s pro Person Anstieg der Beatmung im Bereich von 0,9-7,1 L/s pro Person zeigt [21]. Diese Studien integrierten nicht die Ergebnisse aus mehreren Experimenten, wie es bei der Ableitung der Beziehungen von Seppa€nen et al. der Fall war [13], sondern verwendeten nur die Ergebnisse aus ihren eigenen Messkampagnen. Alfano et al. [22] schlugen eine Beziehung zwischen Schulleistung und Beatmungsraten vor, basierend auf den Ergebnissen einiger Studien, die in Schulen in Dänemark [23], Großbritannien [24], den Niederlanden [25] und den USA [26] durchgeführt wurden, die ausgewählte Schularbeiten und psychologische Tests als Ergebnisse zur Beschreibung der Auswirkungen auf das Lernen verwendeten. Die erhaltene Beziehung war in ihrer Form ähnlich der, die Seppa€nen et al. für Büroarbeit erhielten [13] und zeigte, dass eine Verdoppelung der Außenluftzufuhrrate die Leistung um 7%-8% verbessern würde. Diese Beziehung wurde nicht in der begutachteten Literatur veröffentlicht, sondern erschien im REHVA-Leitfaden 13 [22].

Es wurden weitere Beziehungen abgeleitet, um vorherzusagen, wie sich eine Änderung der Beatmungsrate auf die Prävalenz von Krankheit und Krankenstand auswirkt. Eine davon wurde von Fisk et al. entwickelt [27]. Sie zeigt eine 10-prozentige Verringerung der Zahl der Atemwegserkrankungen und der krankheitsbedingten Fehlzeiten, wenn die Luftwechselrate verdoppelt wird [27]. Für diese Beziehung standen nur wenige Daten aus Studien zur Verfügung, die in Krankenbaracken [28], Pflegeheimen [29], Gefängnissen [30] und Büros [31] durchgeführt wurden. Eine der von Fisk et al. [27] abgeleiteten Vorhersagen wurde mit Hilfe eines theoretischen Modells erstellt, das auf der Wells-Riley-Gleichung basiert, die den Effekt der Beatmung auf die Übertragung von infektiösen Atemwegserkrankungen beschreibt [32]. Die von Fisk et al. [27] abgeleitete Beziehung basierte auf Ergebnissen wie Atemwegserkrankungen, Grippe, Pneumokokkenkrankheit und kurzfristiger Krankheitsausfall und sagt daher nicht spezifisch die Krankheitsausfälle von Schülern in Schulen voraus. Eine weitere Beziehung wurde von Mendell et al. [12] hergestellt. Sie leiteten eine Beziehung zwischen der Belüftung von Klassenzimmern und dem kurzfristigen Krankenstand von Schülern an US-Grundschulen ab, indem sie ihre eigenen Langzeitmessungen an Schulen in Kalifornien [12] verwendeten. Die Beziehung sagt voraus, dass eine Erhöhung der Aussenluftzufuhrrate um 1 L/s pro Person
reduziert den Krankenstand der Schülerinnen und Schüler um etwa 1,4%-1,8%.

Die vorliegende Arbeit wurde durchgeführt, um die Größenordnung der Auswirkungen auf das Lernen und den Krankenstand, die aufgrund von Veränderungen der Luftqualität in den Klassenräumen zu erwarten sind, basierend auf den Ergebnissen von Studien, die in Archivzeitschriften veröffentlicht wurden. Das Ziel wurde erreicht, indem erstens die vorhandenen Daten über die Auswirkungen der Luftqualität in Klassenräumen auf die Lernergebnisse und den kurzfristigen Krankenstand von Grundschülern zusammengefasst wurden und zweitens, indem diese Daten zur Entwicklung von Beziehungen genutzt wurden, die beschreiben, wie die Luftqualität in Klassenräumen die Lernergebnisse beeinflusst.

2. Methoden

Die wissenschaftliche Literatur wurde mit Hilfe wichtiger elektronischer Datenbanken durchsucht, um Studien zu finden, die über Messungen der Raumluftqualität in Klassenzimmern, Lernergebnisse und kurzzeitigen Krankenstand berichten. Die Belüftungsraten und die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) wurden als Proxy für die Luftqualität in den Klassenzimmern verwendet. Es wurden nur Studien ausgewählt, die über Messungen in Grundschulen (Primar-, Mittel- und/oder Sekundarschulen) berichten,
d.h. für Studenten, die nicht älter als 18-19 Jahre sind. Daten von Hochschulen und Universitäten wurden ausgeschlossen. Auch Laborstudien wurden nicht berücksichtigt, und es wurden keine gefunden.

Es wurden verschiedene Lernergebnisse berücksichtigt, darunter typische Schulaufgaben wie arithmetische Berechnungen und Lese- und Verständnisübungen, psychologische Tests zur Messung kognitiver Fähigkeiten und der für die Ausführung von Schulaufgaben erforderlichen Fähigkeiten wie Tests zur Messung von Konzentration, Gedächtnis und Reaktionszeit, Ergebnisse von Eignungs- und Na- tionaltests zur Überprüfung des Lernfortschritts, die Ergebnisse von Zwischen- und Abschlussprüfungen sowie die Noten am Jahresende. Auch Studien, die den Anteil der Kurzzeit-Krankheitsfälle angeben, wurden einbezogen. Subjektiv bewertete Leistungen wurden nicht als gültige Metrik für die Lernergebnisse angesehen, weshalb keine Studien, die diese Metrik zur Charakterisierung der Lernergebnisse verwendeten, einbezogen wurden. Proxies für verminderte Leistung wie die Prävalenz und Intensität akuter Gesundheitssymptome, insbesondere Müdigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten, Schlafstörungen oder Kopfschmerzen, wurden nicht als ausreichend gültige Prädiktoren für Lernergebnisse angesehen. Wahrgenommener Ungehorsam, Verhaltensänderungen und gemeldete Beschwerden im Klassenzimmer wurden nicht als gültige Prädiktoren von Lernergebnissen akzeptiert.

Die Ergebnisse von Studien, die sowohl über Querschnitts- als auch über Interventionsexperimente berichteten, wurden einbezogen. Ähnliche Einschlusskriterien wurden vor allem von Wargocki et al. verwendet, die eine Beziehung zwischen der Raumtemperatur der Klasse und den schulischen Leistungen der Kinder entwickelten [6].

Zu den aus jeder Studie gewonnenen Informationen gehörten: der Studienort, die Art der Studie, die Anzahl der Probanden, Messungen der CO2-Konzentration, die Art der Leistungsmetrik, die zur Schätzung der Lernergebnisse verwendet wird, und die wichtigsten Ergebnisse. Diese Daten wurden tabellarisch zusammengestellt und sind in Tabelle 1 sowie in den Tabellen A.1 und A.2 im Zusatzmaterial dargestellt.

Da viele Studien zwar über CO2-Messungen berichteten, aber keine Belüftungsraten gemessen oder berichtet haben (die Belüftungsraten wurden überwiegend anhand der gemessenen CO2-Konzentrationen berechnet), wurde beschlossen, dass die CO2-Konzentration als Maß für die Raumluftqualität verwendet werden sollte. Alle Ergebnisse, die in den in der Literaturübersicht identifizierten Studien berichtet wurden, wurden unabhängig davon verwendet, ob die Veränderungen der Lernergebnisse infolge von Veränderungen der Luftqualität in den Klassenräumen statistisch signifikant waren oder nicht. Der gleiche Ansatz wurde zuvor von Wargocki et al. verwendet [6].

Es wurden drei verschiedene Beziehungen für verschiedene Ergebnisse zur Beschreibung der Leistungen der Kinder entwickelt, eine mit Daten über typische Schularbeiten, eine mit Daten aus Abschlussprüfungen und eine mit den Ergebnissen für den Krankheitsurlaub.

Der analytische Ansatz zur Entwicklung der Beziehungen, wenn Daten zur Lernleistung verfügbar waren, war derselbe, der von Sepp€anen et al. [13,40] und Wargocki et al. [6] verwendet wurde. Die gebrochene Veränderung der Leistung (λ) wurde zunächst für jedes Leistungsergebnis berechnet, wobei die Ergebnisse der in der Literaturübersicht identifizierten Studien verwendet wurden, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Die fraktionierte Änderung beschrieb die Leistungsänderung pro 100 ppm Änderung der CO2-Konzentration.

Die Ergebnisse der Schulleistungen wurden in den Studien in Form von absoluten und relativen Werten angegeben. Gleichung (1) wurde zur Schätzung der gebrochenen Veränderung (λ) für die Ergebnisse verwendet, die in Form von absoluten und relativen Werten angegeben wurden.

Tabelle 1
Zusammenfassung von Studien, die den Einfluss der Raumluftqualität auf die Lernergebnisse untersuchen.

Study	Year	Location	Season	Type	Bevölkerung (Schulen)	Bevölkerung (Schüler)	Alter der Schüler	CO2-Mittelung in der ursprünglichen Studie (Expositionsmetrik)
Myhrvold et al. [7] ❶	1996 1997	Norway Norway	Winter Winter	Messungen vor und nach der Intervention Messungen vor und nach der Intervention	22 Klassenzimmer in 5 Gymnasien 35 Klassenzimmer in 8 Gymnasien	20 19	15-Mittel-Konzentration während der Schulzeit 16-Mittel-Konzentration während der Schulzeit	
Myhrvold und Olsen [8] ❶								
Shaughnessy et al. [26] ❷	2006	USA (Mittlerer Westen)	Winter und spring	Eine Querschnittsstudie in einem Schulbezirk	54 Klassenzimmer in 54 Gymnasien	N.A.	10	Durchschnittliche CO2-Spitzenkonzentration (wird zur Berechnung der Belüftungsraten verwendet)
Coley et al. [9]	2007	England	Summer	❶ Measurements mit Fenster geöffnet und geschlossen	1 Klassenzimmer in 1 Grundschule	18	10-11 Konzentration am Anfang der Testperiode	
Bakó-Biró et al. [33] ❶	Intervention 2007	England	N.A.	vor Ort. Die Beatmungsraten wurden geändert	2 Klassenzimmer in 1 Grundschule	10	9-Mittelwert-Konzentration während die Testperiode	
Wargocki und Wyon [34] ❶	2007	Denmark	Spätsommer (August, September)	Intervention vor Ort. Die Beatmungsraten wurden geändert.	2 Klassenzimmer in 1 Grundschule	12	10-Wochen-Durchschnitt (wenn Schülerinnen und Schüler waren anwesend)	
Wargocki und Wyon [35] ❶	2007	Denmark	Winterliche Feldintervention.	Die Beatmungsraten wurden geändert	2 Klassenzimmer in 1 Grundschule	12	10-Wochen-Durchschnitt (wenn Schülerinnen und Schüler waren anwesend)	
Wargocki und Wyon [35] ❶	Spätsommer (August)		Feldeinsatz.	Die Beatmungsraten wurden geändert	2 Klassenzimmer in 1 Grundschule	10-Wochen-Durchschnitt (wenn die SchülerInnen anwesend waren)		
De Gids et al. [25] ❷	Intervention 2007	Nederlands	Spring	vor Ort. Die Beatmungsraten wurden geändert	Die Grundschule	47	10-620- 2.125(1,373)	Neuro-
Ribic [10]	2008	Austria	N.A.	❶ Measurements mit Fenster geöffnet und geschlossen	6 Klassenzimmer in 2 Gymnasien	152	15-Konzentration 16 zu Beginn der Testperiode	
Ribic [10]	2008	Austria	N.A.	❶ Measurements mit geöffneten und geschlossenen Fenstern	6 Klassenzimmer in 2 Gymnasien	152	15-Konzentration 16 zu Beginn der Testperiode	
Haverinen-Shaughnessy et al. [36] ❷	2011	USA (Mittlerer Westen)	Winter- und spring	Querschnittsstudie. Messungen bei geöffneten und geschlossenen Fenstern und Türen	104 Klassenzimmer in 104 Grundschulen	5178	10	Durchschnittliche CO2-Spitzenkonzentration (wird zur Berechnung der Belüftungsraten verwendet)
Bakó-Biró et al. [11] ❶	2012	England	Herbst, Winter, Frühling und Frühsommer	Intervention vor Ort. Die Beatmungsraten wurden geändert.	16 Klassenzimmer in 8 Grundschulen	10	9-Mittelwert-Konzentration während die Testperiode	
Gaihre et al. [37]	2014	Scotland	❶ Late Frühjahr (Mai -	Querschnittstudy	60 Klassenzimmer in 30 Grundschulen	N.A.	6-7, 10-11	Mittlere und Spitzenkonzentrationen
Haverinen-Shaughnessy und Shaughnessy [21] ❷	2015	USA (Südwest)	Winter und Frühling (Januar bis April)	Querschnittlichstudy	140 Klassenzimmer in 70 Grundschulen	3019	10	Durchschnittliche CO2-Spitzenkonzentration (wird zur Berechnung der Belüftungsraten verwendet)
Mendell et al. [38] ❷	2015	USA (Kalifornien)	Alle seasons	2-jährige Längsschnitt-Querschnittsstudie in 3 Schulbezirken	150 Klassenzimmer in 27 Grundschulen	5000	8-1510	Minuten gleitender Durchschnittswert der CO2-Konzentrationen (zur Berechnung der Belüftungsraten)
Toftum et al. [2] ❸	2015	Dänemark	Herbst und Winter	Querschnittsansicht mit retrospektive Daten zum Test Leistung	820 Klassenzimmer in 389 Grundschulen	N.A.	8-400-416	N.A.
❶ (September-Oktober)				❶ Measurements mit Fenster geöffnet und geschlossen Intervention vor Ort. Die Beatmungsraten wurden geändert	4 Klassenzimmer in 2 Grundschulen	12	10-Wochen-Durchschnitt (wenn Schülerinnen und Schüler waren anwesend)	
Petersen et al. [39]	2015	Dänemark	Herbst	Intervention vor Ort.				

❶ Die Daten aus dieser Studie wurden zur Berechnung der gebrochenen Veränderung der Leistung verwendet.

❷ Die Daten dieser Studie wurden verwendet, um die Beziehung zwischen der Luftqualität in den Klassenräumen und der Durchführung von Eignungstests oder und Abschlussprüfungen abzuschätzen.

❸ Die Daten aus dieser Studie wurden nicht zur Entwicklung einer Beziehung verwendet.

Änderung, während für die als Prozentsatz (oder als relative Änderung) angegebenen Ergebnisse die gebrochene Änderung (λ) mit Gleichung (2) wie folgt berechnet wurde:

$$\lambda = \frac{P(CL) - P(CH)}{P(CH) - P(CL)} \cdot 100 \quad (1)$$

wobei P ($_{CL}$) entweder die Geschwindigkeit, mit der die Aufgabe ausgeführt wurde, oder die Reaktionszeit bei der niedrigeren CO2-Konzentration ist, und P ($_{CH}$) entweder die Geschwindigkeit, mit der die Aufgabe ausgeführt wurde, oder die Reaktionszeit bei der höheren CO2-Konzentration ist, wobei $_{CL}$ die niedrigere CO2-Konzentration und $_{CH}$ die höhere CO2-Konzentration, bei der die Leistung gemessen wurde, in ppm darstellt.

$$\lambda = \frac{P(CL) - P(CH)}{CH - CL} \cdot 100 \quad (2)$$

wobei P ($_{CL}$) die Genauigkeit ist, die als Prozentsatz der Fehler bei der niedrigeren CO2-Konzentration ausgedrückt wird, und P ($_{CH}$) die Genauigkeit ist, die als Prozentsatz der Fehler bei der höheren CO2-Konzentration ausgedrückt wird, $_{CL}$ die niedrigere CO2-Konzentration und $_{CH}$ die höhere CO2-Konzentration, bei der die Leistung gemessen wurde, wiedergibt.

Um sicherzustellen, dass die Annahme der Linearität beibehalten wurde, wurde die mittlere gebrochene Änderung λ in der Mitte des Bereichs der CO2-Konzentrationen, über den die Auswirkung auf die Leistung gemessen wurde (λ_{mid}), nach der von Seppa€nen et al. vorgeschlagenen Methode und Gleichung berechnet [40].

$$\lambda_{mid} = \frac{\lambda}{1 + 0.005\lambda(CH - CL)} \quad (3)$$

wobei λ die gebrochene Veränderung der Leistung pro 100 ppm ist. $_{CL}$ steht wiederum für die niedrigere CO2-Konzentration und $_{CH}$ für die höhere $_{CO2\text{-}Konzentration}$.

Die berechneten gebrochenen Veränderungen der Lernergebnisse im mittleren Bereich (λ_{mid}) wurden gegenüber der durchschnittlichen CO2-Konzentration regressiert, die aus dem Bereich der CO2-Konzentrationen geschätzt wurde, für den λ_{mid} Werte berechnet wurden. Zur Bestimmung der besten Anpassung wurden fraktionierte Polynome verwendet [41]. Die 95%-Konfidenzintervalle wurden unter Verwendung der in dieser Publikation vorgeschlagenen Gleichung für die Varianz eines angepassten Wertes geschätzt.

Die Leistung von Schulaufgaben bei einer bestimmten CO2-Konzentration im Vergleich zur Leistung bei einer Referenz CO2-Konzentration wurde berechnet und verwendet, um Beziehungen zwischen der CO2-Konzentration und den Lernleistungsergebnissen herzustellen. Es wurde eine CO2-Referenzkonzentration von 900 ppm gewählt, da die niedrigste durchschnittliche CO2-Konzentration, für die eine fraktionierte Leistungsänderung verfügbar war, 890 ppm betrug. Die bei 900 ppm gemessene Leistung wurde mit 100% angenommen. Unabhängig von dieser Annahme wurden die Beziehungen auf niedrigere $_{CO2\text{-}Konzentrationen}$ extrapoliert, um das Ausmaß der Auswirkungen der Luftqualität auf die Leistung unterhalb einer Konzentration von 900 ppm vorherzusagen. Die höchste durchschnittliche CO2-Konzentration, für die die fraktionierte Leistungsänderung verfügbar war, betrug 2.100 ppm, so dass dies als die Obergrenze angesehen wurde, bei der die Beziehungen gültig sind.

Eine Bootstrapping-Methode wurde zur Schätzung der 95%-Konfidenzintervall-Bänder für die oben genannten Beziehungen verwendet [42]. Eintausend Zufallsstichproben wurden nach den Empfehlungen von Field [43] erstellt, und die Kurven, die diesen Stichproben am besten entsprachen, wurden unter Verwendung der funktionalen Form der Regressionslinie geschätzt, die die Beziehungen zwischen der fraktionierten Leistungsänderung und der CO2-Konzentration beschreibt. Unter Verwendung dieser Kurven wurde die Leistung für alle CO2-Konzentrationen zwischen 900 ppm und 2.100 ppm geschätzt, für die die Beziehungen gültig waren, wobei ein Schritt von 100 ppm 1.000 Leistungsschätzungen für jedes CO2-Konzentrationsniveau ergab. Diese Daten wurden zur Berechnung des 2,5. Perzentils und des 97,5. Perzentils verwendet, die zur Anpassung der Kurven verwendet wurden und das 95%-Konfidenzintervall darstellen sollten.

Die gebrochenen Leistungsänderungen konnten nur für die typischen Schularbeiten und psychologischen Tests berechnet werden. Für die Ergebnisse von Eignungs- und nationale Tests zur Überprüfung der Lernfortschritte, die sich aus dem Prozentsatz der Schüler, die die Ergebnisse der Zwischen- und Abschlussprüfungen oder die Ergebnisse dieser Prüfungen bestanden haben, aus den Beziehungen, die von den

Es wurden Studien verwendet, die Daten zu diesem Thema liefern. Die Beziehungen zeigten, wie sich die Lernleistung bei unterschiedlicher Beatmungsrate veränderte. Sie wurden für den Bereich der Beatmungsraten aufgetragen, für den sie

gültig waren. Unter der Annahme, dass der CO2-Ausstoß in Klassenräumen 0,0039 L/ s pro Person beträgt [44], wurde der in den Studien, aus denen die Daten gewonnen wurden, gefundene Wert, die CO2-Konzentration berechnet und die Relationsschiffe unter Verwendung der CO2-Konzentration als unabhängige Variable neu dargestellt. Es ist zu beachten, dass die ursprünglichen Studien die Belüftungsraten nicht direkt gemessen, sondern aus der gemessenen CO2-Konzentration entweder im stationären Zustand oder nahe dem stationären Zustand berechnet haben. Für den $_{CO2\text{-}Bereich}$, über den alle Beziehungen gültig waren, wurde der gewichtete Effekt auf die Lernleistung unter Verwendung der Anzahl der Klassenräume als Gewichtungskoeffizient berechnet. Die gewichtete Leistung wurde zur Erstellung der endgültigen Beziehung verwendet. Ein Konfidenzintervall wurde für diese Beziehung aufgrund der begrenzten Datenmenge nicht geschätzt.

Im Falle der Beziehung zwischen Krankenstand und Luftqualität in Klassenräumen konnte der Ansatz mit der fraktionierten Veränderung ebenfalls nicht verwendet werden. Da die einschlägigen Studien zu diesem Thema die Beziehungen zwischen krankheitsbedingter Abwesenheit und entweder der Belüftung oder dem $_{CO2\text{-}Gehalt}$ in den Klassenräumen darstellten, wurde ein ähnlicher Ansatz wie im Falle der Beziehung für Eignungsprüfungen und Abschlussprüfungen verwendet. Wie im Fall der Beziehung für die Leistung wurde aufgrund der begrenzten Datenmenge kein Konfidenzintervall geschätzt.

3. Ergebnisse

Zwanzig Studien, die in der Literaturübersicht identifiziert wurden, trafen auf die Aufnahme

Kriterien, die oben im Abschnitt Methoden beschrieben sind. Sie sind in den Tabellen 1 und 2 kurz zusammengefasst. Weitere Einzelheiten zu diesen Studien sind im Zusatzmaterial in den Tabellen A1 und A2 zu finden. Die Studien wurden zwischen 1996 und 2015 veröffentlicht. Sie stammen daher aus fast zwei Jahrzehnten Forschung über die Auswirkungen der Luftqualität in Klassenräumen auf die Lernleistungen von Kindern in Grundschulen. Die Studien wurden in > 760 Schulen, > 2.000 Klassenräumen und in über 15.000 Fächern durchgeführt.

In den meisten Studien wurde die Luftqualität in den Klassenräumen anhand der gemessenen CO2-Konzentration charakterisiert. In einigen wenigen Fällen wurden auch die Außenluftzufuhrraten angegeben. Die Außenluftzufuhrraten wurden entweder direkt gemessen oder aus den gemessenen $_{CO2\text{-}Konzentrationen}$ berechnet. Im letzteren Fall wurden entweder $_{CO2\text{-}Spitzenkonzentrationen}$ verwendet oder es wurde ein Massenbilanzmodell verwendet und an die Bildung von CO2-Konzentrationen in den Klassenräumen angepasst. Die Messungen der CO2-Konzentration wurden in den Klassenräumen während ihrer Belegung durchgeführt.

Die gemessenen CO2-Konzentrationen lagen zwischen 600 ppm und 4.300 ppm. Die Studien berichteten entweder über durchschnittliche Tages-, Wochen- oder Spitzenwerte der $_{CO2\text{-}Konzentration}$. Die Maßnahmen zur Veränderung der Luftqualität in den Klassenzimmern umfassten entweder das Öffnen/Schließen von Fenstern und Türen oder die Verwendung vorhandener Belüftungssysteme oder eines speziell angefertigten mobilen Belüftungssystems [11,33].

Alle Studien wurden in gemäßigten Klimazonen durchgeführt; keine Studie wurde in tropischen oder subtropischen Klimazonen durchgeführt. Sie wurden sowohl in der Heiz- als auch in der Nicht-Heizperiode durchgeführt.

Vier Studien berichteten über die Ergebnisse nationaler Eignungstests oder Prüfungen und drei berichteten über Abwesenheitsraten, während neun Studien ausreichende Daten zur Berechnung der fraktionierten Leistungsänderung in Abhängigkeit von Änderungen der Luftqualität lieferten.

Die Beziehung zwischen der CO2-Konzentration und der beobachteten fraktionalen Änderung der Geschwindigkeit oder Reaktionszeit ist in Abb. 1a dargestellt. Eine ähnliche Beziehung für die fraktionierte Änderung der Genauigkeit ist in Abb. 1b dargestellt. Zur Entwicklung der Beziehungen zwischen Geschwindigkeit oder Reaktionszeit und CO2-Konzentration wurden Daten aus 35 Aufgaben verwendet, während Daten aus 37 Aufgaben einbezogen wurden, wenn die Genauigkeit das Ergebnis war. Die Abbildungen zeigen, wie die fraktionierte Änderung als Folge von Änderungen der durchschnittlichen CO2-Konzentration variieren würde. Sie zeigen, dass die relative Änderung der Leistungsausgänge höher war, d.h. die absolute gebrochene Änderung $_{\lambda mid}$ war höher, bei

Tabelle 2
Zusammenfassung von Studien, die den Einfluss der Luftqualität in Klassenräumen auf die Abwesenheit von Schülern untersuchen.

Study von	Year	Location	Season	Type	Population		Alter	CO_2	Wirkung
					Schulen	Schüler	Schülerinnen und Schüler	Konzentration (ppm)	
Shendell et al. [45]	2004	USA	N/A	Cross-sectional	409 traditionell und 25 tragbare Klassenräume in 22 Grundschulen	N.A. 580-	6-Durchschnitt12 :	1.510 (oben im Freien) Min-Max: 10-4230 (oben im Freien)	1.000 ppm $_{CO2\text{-}Zunahme}$ entspricht einem Rückgang der jährlichen Anwesenheit von 0,5-0,9%, was einem relativen Anstieg der Abwesenheit von Studenten um 10-20% entspricht.
Mendell et al. [12]	2013	USA (Kalifornien)	Alleseasons	Längsschnitt 2 Jahre lange Querschnittsstudie in 3 Schulbezirken	162 Klassenzimmer in 28 Grundschulen	8-Mittelhoch:		1,140-2,380 Min-Max-Spitze: 654-2,490	Für weitere 1 L/s pro Person reduziert sich die Abwesenheitsrate um 1,4-1,8%%.
Gaihre et al. [37]	2014	Scotland	Später Frühling (Mai-Juni)	Querschnittsstudie	60 Klassenzimmer in 30 Grundschulen	N.A.	6-7, 10-11	Durchschnittlich: 1,086 Min-Max: 595-2,115	Ein Anstieg von 100 ppm $_{CO2}$ führt schätzungsweise zu einer jährlichen Verringerung der Abwesenheit um 0,2% (Bereich 0,04-0,4%) (P < 0,05) das sind etwa 0,4 Abwesenheitstage weniger pro Jahr pro 100 ppm

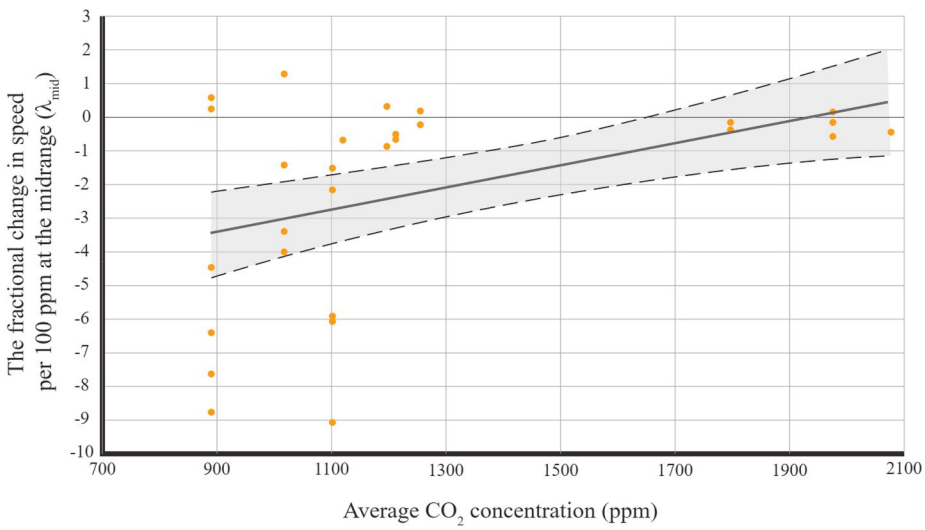

Abb. 1a. Bruchteilhafte Änderung der Geschwindigkeit, mit der die Tests und Aufgaben durchgeführt wurden, pro Änderung von 100 ppm im mittleren Bereich (λ_{mid}) der CO2-Konzentration, aufgetragen gegen die durchschnittliche CO2-Konzentration über den Bereich, für den die Bruchteiländerung berechnet wurde. Negative Werte weisen auf eine verringerte Leistung bei erhöhter CO2-Konzentration hin. Die Regression (durchgezogene Linie) wird mit 95%-Konfidenzbändern (gestrichelte Linien) dargestellt. Die Punkte zeigen die geschätzte $_{Mitte\ von}$ λ für einzelne Tests oder Aufgaben (siehe Tabelle A.1 im Zusatzmaterial für Einzelheiten). Die Form der Beziehung ist wie folgt: λ $_{Mitte}$ ¼ 3.3E-05 $_{CO2}$ - 0.0636; wobei $_{CO2}$ die durchschnittliche CO2-Konzentration. ^{R2} ¼ 0,27; p < 0,001.

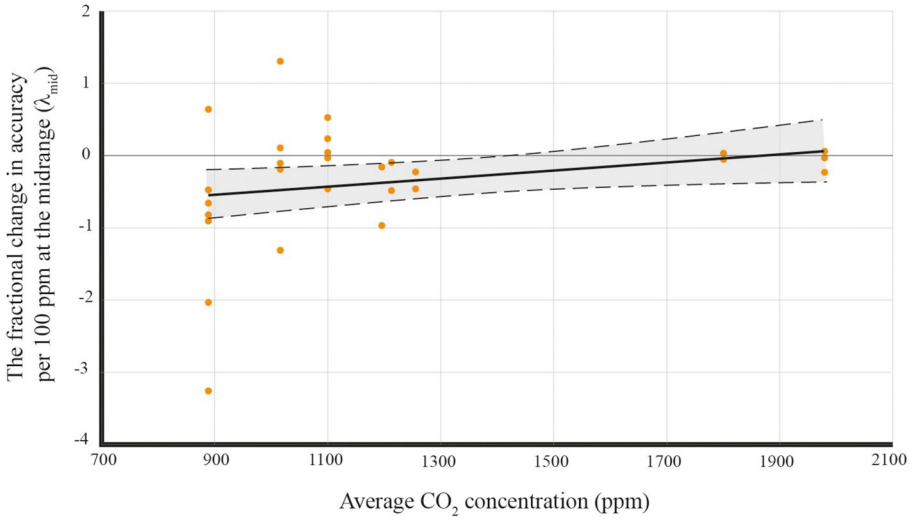

Abb. 1b. Die gebrochene Änderung der Genauigkeit, mit der die Tests und Aufgaben pro 100 ppm im mittleren Bereich (λ_{mid}) durchgeführt wurden, aufgetragen gegen die durchschnittliche CO2-Konzentration über den Bereich, für den die gebrochene Änderung berechnet wurde. Negative Werte weisen auf eine verringerte Leistung bei erhöhter CO2-Konzentration hin. Die Regression (durchgezogene Linie) mit 95%-Konfidenzbändern (gestrichelte Linien) sind dargestellt. Die Punkte zeigen die geschätzte λ $_{Mitte}$ für einzelne Tests oder Aufgaben (siehe Tabelle A.1 im Zusatzmaterial für Details). Die Form der Beziehung ist wie folgt: λ $_{mid}$ ¼ 5.5E-06 $_{CO2}$ - 0,0104; wobei CO2 die durchschnittliche CO2-Konzentration ist.
tration. ^{R2} ¼ 0,10; p < 0,001.

die niedrigeren durchschnittlichen CO2-Konzentrationen. Sie zeigt zudem an, dass die Veränderung der Leistungsergebnisse nicht konstant war. Die Linie, die das obere 95%-Konfidenzniveau in Abb. 1a zeigt, deutet darauf hin, dass die geschätzten Auswirkungen auf die Leistung bei $_{CO2\text{-}Konzentrationen}$ > 1.600 ppm bei p ¼ 0,05 möglicherweise nicht signifikant sind, weil λmid ¼ 0 in das Konfidenzintervall fällt. Im Fall von Abb. 1b geschieht dies bei CO2-Konzentrationen > 1.500 ppm.

Die in Abb. 1a und 1b gezeigten Regressionslinien wurden verwendet, um die in Abb. 2a und b gezeigten Beziehungen herzustellen. Die Beziehung in Abb. 2a zeigt an, dass eine Reduzierung der CO2-Konzentration im Klassenzimmer von 2.100 ppm auf 900 ppm voraussichtlich die Geschwindigkeit erhöhen oder die Zeit, die für die Durchführung von Schulaufgaben oder kognitiven Tests zur Messung von Aspekten der Fähigkeit, Schularbeiten zu erledigen, benötigt wird, um etwa 12% reduzieren wird. Der größte Teil der Verbesserung, 11%, tritt ein, wenn die CO2-Konzentration von 1.500 ppm auf 900 ppm geändert wird. Die Beziehung in Abb. 2b zeigt, dass eine Verringerung der $_{CO2\text{-}Konzentration}$ im Klassenzimmer von 2.100 ppm auf 900 ppm die Genauigkeit, mit der Kinder Schulaufgaben oder kognitive Tests zur Messung verschiedener Fähigkeiten zur Ausführung von Schularbeiten durchführen, um 2% verbessern dürfte.

Vier Querschnittsstudien korrelierten die Standardtestergebnisse und die Ergebnisse der Ex-Aminierung mit der gemessenen CO2-Konzentration. Keine von ihnen, außer Mendell et al. [12], misst Leistungsergebnisse, die mit der CO2-Konzentration oder der Belüftungsrate übereinstimmen. Die $_{CO2\text{-}Konzentration}$ wurde über einen Zeitraum von einer Woche gemessen und es wurde angenommen, dass sie typische Bedingungen für das gesamte Schuljahr darstellt. In keiner der Studien wurden direkte Messungen der Belüftungsraten vorgenommen. Die CO2-Konzentration wurde gemessen und die Belüftungsraten wurden anhand dieser Messungen geschätzt. Der Zusammenhang, der die Ergebnisse dieser vier Studien zusammenfasst, ist in Abb. 3 dargestellt. Sie zeigt, dass die Reduzierung der $_{CO2\text{-}Konzentration}$ im Klassenzimmer von etwa

Bei 2.400 ppm bis 900 ppm ist eine Verbesserung der Perforation von Kindern zu erwarten.

der nationalen Tests um etwa 5%. Die größte Veränderung der Leistung trat ein, als die CO2-Konzentration von 1.600 ppm auf 900 ppm wechselte. Abb. 4 zeigt, wie sich die tägliche Anwesenheit aufgrund von Änderungen der $_{CO2\text{-}Konzentration}$ ändern würde. Da Mendell et al. [12] eine lineare Funktion ableiteten, die die Beziehung zwischen Belüftungsrate und Krankenstand beschreibt, wurde mit ihren Daten eine nichtlineare (logarithmische) Funktion zwischen Krankenstand und CO2-Konzentration geschätzt und dann in eine diskrete Variable umgewandelt, bevor eine lineare Funktion angepasst wurde. Dies geschah, um ihre Ergebnisse mit den von Shendell et al. [45] und Gaihre et al. [37] entwickelten Beziehungen abzugleichen. Um die in Abb. 4 gezeigte Beziehung zu erhalten, wurden die Effekte auf die tägliche Anwesenheit in den drei Studien, aus denen Daten verfügbar waren [12,45,37], gewichtet und gemittelt. Die Beziehung ist für CO2-Konzentrationen zwischen 1.000 ppm und 4.100 ppm gültig. Eine Reduzierung der $_{CO2\text{-}Konzentration}$ in diesem Bereich würde in die tägliche Anwesenheit um 2,4% zu erhöhen.

4. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die derzeit verfügbaren Erkenntnisse über die Auswirkungen der Raumluftqualität in Schulklassenräumen auf die Lernergebnisse, die in verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Methoden erzielt wurden, systematisch zu vergleichen und zu integrieren. Sie liefert eine grobe Schätzung der Einflussnahme der Luftqualität in Klassenräumen auf die Leistung der Schüler in Schulen. Die Leistung der Schülerinnen und Schüler wurde durch die Fähigkeit charakterisiert, Schularbeiten, Prüfungen und Eignungstests durchzuführen, und das Wohlbefinden der Schülerinnen und Schüler wurde durch Krankenstand charakterisiert. Studien in Grund- und Sekundarschulen wurden einbezogen. Da es keine anerkannte Metrik für die Luftqualität in Innenräumen gibt, wurde ein Proxy für die Luftqualität verwendet. In der Regel werden die Lüftungsraten oder die $_{CO2\text{-}Konzentration}$ als Proxy für die Raumluftqualität verwendet. In der vorliegenden Arbeit wurde letzteres verwendet. Mit anderen Worten, in den dargestellten Beziehungen ist die CO2-Konzentration keine Konzentration von reinem $_{CO2}$, sondern stellt eine bestimmte Belüftung mit Außenluft unter bestimmter Belegung in Klassenräumen dar. Die Entscheidung für die Verwendung von $_{CO2}$ wurde durch die zur Erstellung der Beziehungen verfügbaren Daten gerechtfertigt. Da in den meisten für die vorliegende Arbeit relevanten Studien die $_{CO2\text{-}Konzentration}$ angegeben wurde und die Belüftungsrate nicht direkt gemessen wurde, wurde beschlossen, Beziehungen zwischen der gemessenen $_{CO2\text{-}Konzentration}$ und den Lernergebnissen herzustellen. Die CO2-Konzentration ist eine häufig verwendete Messgröße für die Luftqualität, so dass diese Wahl sowohl logisch als auch wahrscheinlich von größtem praktischen Nutzen für den Betrieb von Schulgebäuden ist. $_{CO2}$ wird von Menschen während der Stoffwechselprozesse erzeugt, daher kann die CO2-Konzentration zur Anzeige der momentanen/internen Luftqualität verwendet werden, wenn sich Menschen in Innenräumen aufhalten. Die CO2-Konzentration kann je nach der Anzahl der Personen, ihrer Stoffwechselrate, der Dauer des Aufenthalts, der Belüftungsrate und der Luftmischung variieren. In der vorliegenden Arbeit sollte die $_{CO2\text{-}Konzentration}$ in den Beziehungen als stationäres Niveau interpretiert werden. Da Klassenräume mit Schülern der gleichen Altersgruppe ausgewählt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass ihre CO2-Emissionsraten von Studie zu Studie nicht sehr unterschiedlich waren, obwohl ein gewisses Maß an Variation dieser Emissionsraten nicht ausgeschlossen werden kann.

Obwohl einige Studien zeigen, dass reines $_{CO2\ die}$ Entscheidung beeinflussen kann.

Leistung, die Leistung von Berufspiloten oder das Korrekturlesen, wie sie von Fisk et al. [46] zusammengefasst wurden, haben andere Studien keine ähnlichen Ergebnisse gefunden. Die hier abgeleiteten Beziehungen sollten nicht so interpretiert werden, dass sie zeigen, wie reines $_{CO2}$ die Leistung beeinflusst. $_{CO2}$ wird in der vorliegenden Arbeit nur als Marker für die Luftqualität im Klassenzimmer verwendet, der Veränderungen in den Konzentrationen vieler anderer Schadstoffe anzeigt, die meisten davon Bioabwässer, da diese die dominierenden Luftschadstoffe in besetzten Klassenräumen sind [47]. Zhang et al. [48] schlugen eine versuchsweise Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Höhe der Bioabflüsse (beschrieben durch die Höhe des $_{CO2\text{-}Gehalts}$) und verschiedenen Ergebnissen beim Erwachsenen vor. Sie schlugen vor, dass bei

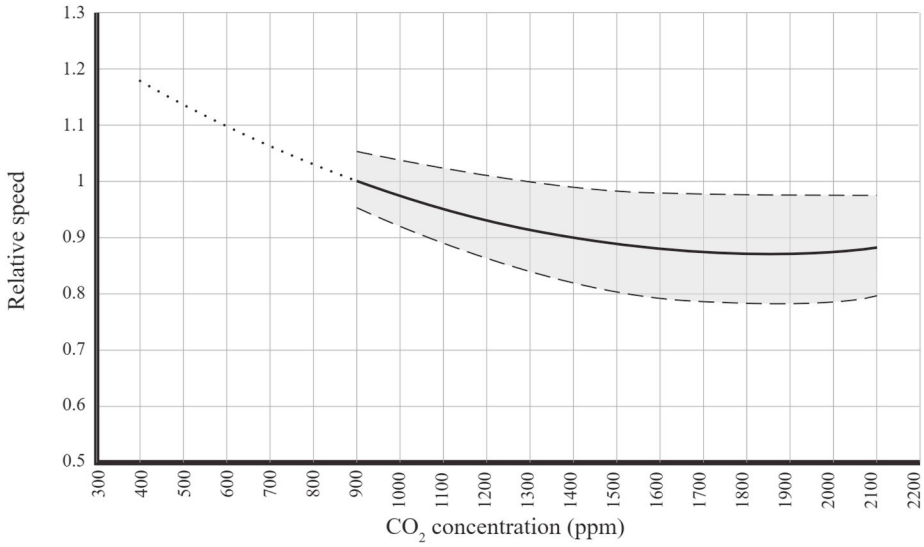

Abb. 2a. Leistung der Schularbeiten (Geschwindigkeit oder Verweilzeit) in Abhängigkeit von der CO2-Konzentration im Klassenzimmer, abgeleitet mit Hilfe der in Abb. 1a dargestellten Beziehung; die gestrichelten Linien zeigen das 95%-Vertrauensintervall. Die Leistung wurde willkürlich auf 100% bei 900 ppm festgelegt. Die Form der Korrelation (durchgezogene Linie) ist y ¼ 1,5E-07 ^{CO2} - 0,0005 $_{CO2}$ þ 1,3002; wobei $_{CO2}$ die Kohlendioxid-Konzentration. Die Beziehung wurde über 900 ppm hinaus extrapoliert, um den potentialen Effekt bei niedrigerer CO2-Konzentration (gepunktete Linie) vorherzusagen, für die keine Daten verfügbar waren.

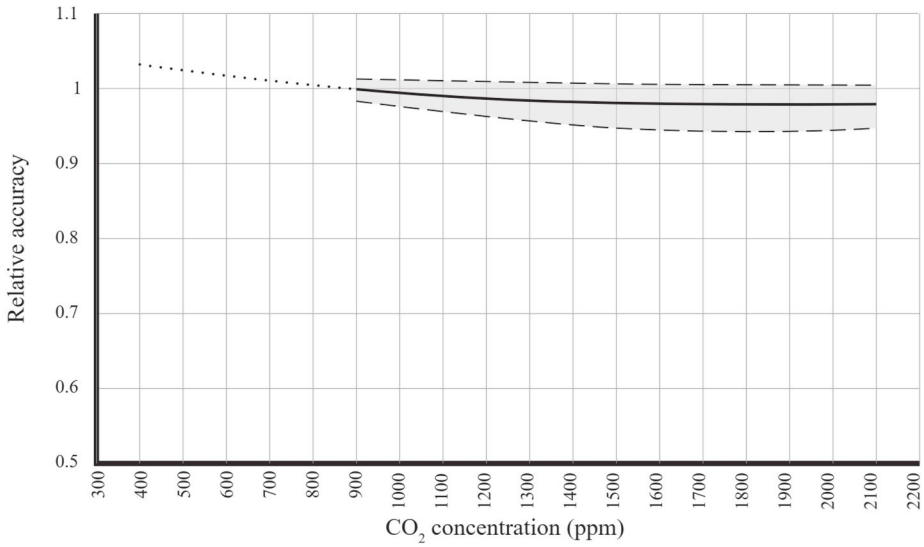

Abb. 2b. Leistung der Schularbeiten (Genauigkeit) als Funktion der CO2-Konzentration im Klassenzimmer, abgeleitet unter Verwendung der in Abb. 1b dargestellten Beziehung; die gestrichelten Linien zeigen das 95%-Konfidenzintervall.
Die Leistung von 100% wurde willkürlich auf 900 ppm festgelegt. Die durchgezogene Linie ist wie folgt y ¼ 2.þE-08 CO2 - 1E-05 CO2 1.0495; wobei CO2 die Kohlendioxid-Konzentration ist. Die Beziehung wurde auf unter 900 ppm extrapoliert, um die potenzielle Wirkung bei
niedrigere CO2-Konzentrationen (gepunktete Linie), für die keine Daten verfügbar waren.

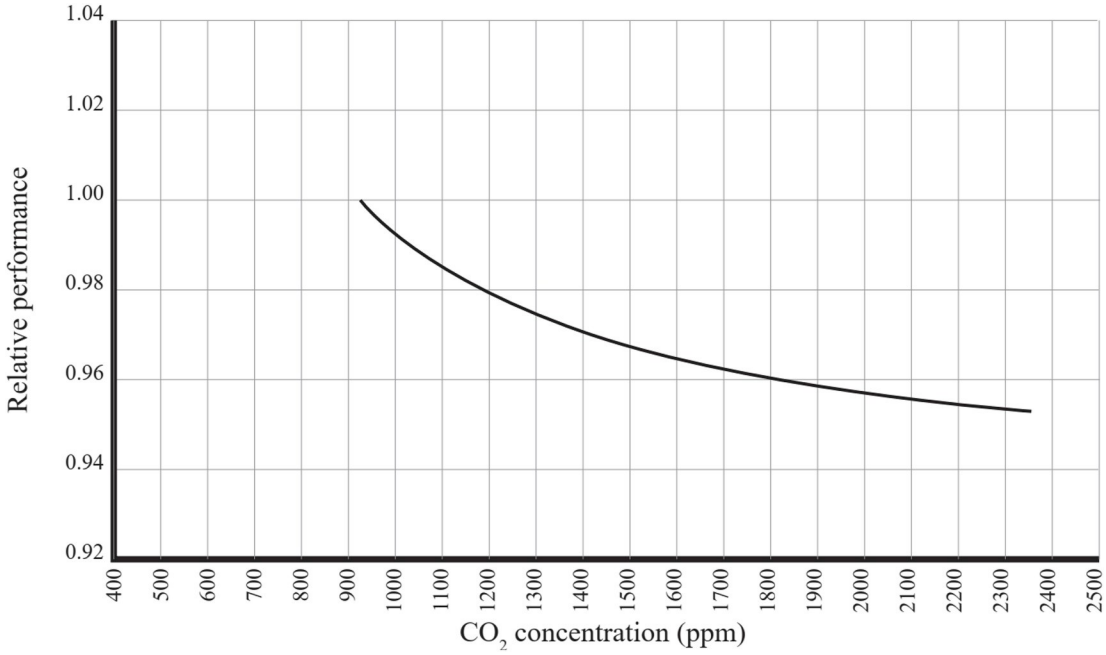

Abb. 3. Durchführung von nationalen und Eignungstests und Prüfungen in Abhängigkeit von der CO2-Konzentration im Klassenzimmer. Die Leistung ist der Prozentsatz der bestandenen Schüler oder die erzielte Punktzahl (siehe Tabelle 2 für Einzelheiten). Die durchgezogene Linie ist wie folgt y ¼ -2E-11 CO3 þ 1E-07 CO2 - 0,0003 CO þ 1,1665; wobei CO das Kohlendioxid ist

2 2 2 2

Konzentration

Bioabflussmengen, die CO2-Konzentrationen > 1.800 ppm entsprechen, wird die Exposition gegenüber Bioabfluss wahrscheinlich akute Gesundheitssymptome hervorrufen und negative Auswirkungen auf die kognitive Leistungsfähigkeit haben. Die vorliegenden Ergebnisse basieren auf den Reaktionen von Kindern im Schulalter und zeigen, dass diese Effekte auch bei noch niedrigeren Werten auftreten können. Der Grund für diesen Unterschied sollte in zukünftigen Experimenten untersucht werden, aber es kann die Hypothese aufgestellt werden, dass er darauf zurückzuführen ist, dass die Exposition in Klassenzimmern nicht nur eine Exposition gegenüber Bioabwässern, sondern auch gegenüber anderen Schadstoffen mit sich bringt [47], während die von Zhang et al. vorgeschlagene Beziehung nur für Bioabwässer gilt.

Die in Abb. 2-4 dargestellten Beziehungen können nur dann verwendet werden, wenn die
folgende Annahmen erfüllt sind. Erstens gelten sie für die stationären oder nahezu stationären CO2-Konzentrationen, wie oben dargelegt. Zweitens muss die Luftmischung in den Klassenräumen gut sein. Drittens muss die Stoffwechselrate der Schüler der sitzenden Tätigkeit entsprechen. Schließlich sind sie nur im Bereich der CO2-Konzentrationen zwischen 900 ppm und 1.900 ppm (Geschwindigkeit und Genauigkeit der Schularbeiten), 900 ppm und 2.400 ppm (nationale und Eignungstests) sowie 1.000 und 4.200 ppm (Krankenstand oder Schulbesuch). Wenn diese Annahmen nicht erfüllt sind, kann die Verwendung der in der vorliegenden Arbeit erstellten Beziehungen zu ungenauen Vorhersagen führen. Insbesondere sollten die Beziehungen nicht auf dy-namische oder variable Bedingungen angewendet werden.

Es wurde beschlossen, 900 ppm, die niedrigste durchschnittliche CO2-Konzentration, für die die gebrochene Leistungsänderung geschätzt wurde, als Referenz CO2-Konzentration zu verwenden, bei der die Leistung 100% beträgt. Ob eine weitere Reduzierung der CO2-Konzentration eine zusätzliche Verbesserung der Leistung bewirken würde, bedarf eindeutig weiterer Untersuchungen, scheint aber wahrscheinlich. Eine Analyse von Jacobs et al. legt beispielsweise nahe, dass die Leistung von Schularbeiten durch eine Reduzierung der CO2-Konzentration unter 900 ppm weiter gesteigert werden könnte [49]. Darüber hinaus entspricht eine CO2-Konzentration von 900 ppm etwa 10 L/s pro Person, während veröffentlicht

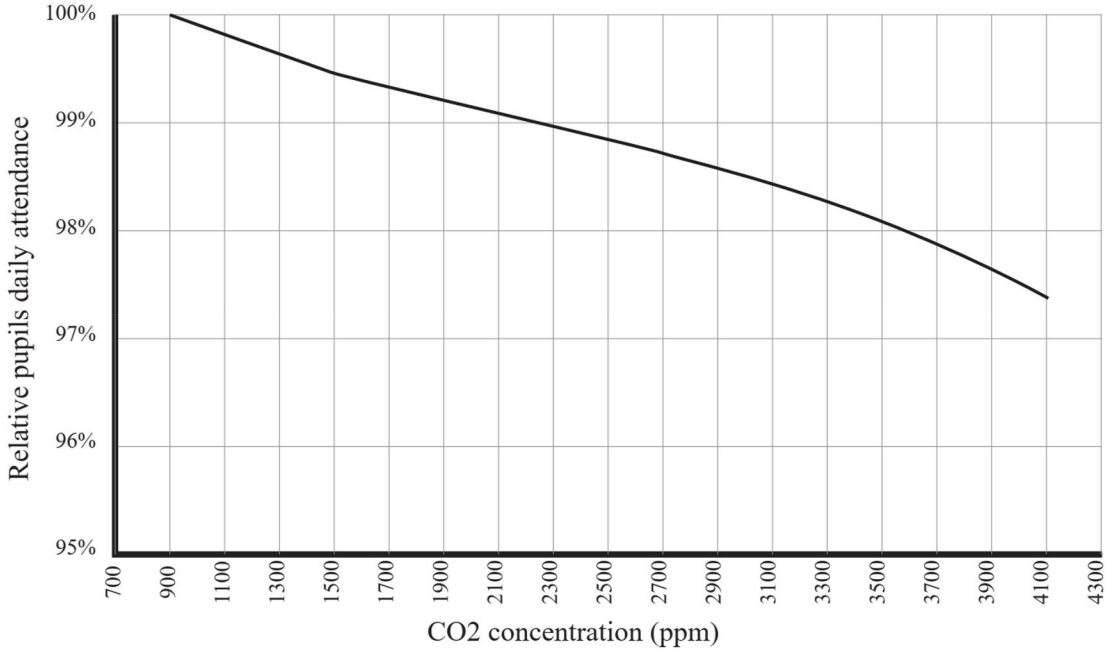

Abb. 4. Die tägliche Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler in Abhängigkeit von der CO2-Konzentration im Klassenzimmer. Die durchgezogene Linie ist wie folgt y ¼ -6E-13 CO3 þ 4E-09 $_{CO2}$ - 1E-05 $_{CO2}$ þ 1,0104; wobei

$_{CO2}$ ist die Kohlendioxid-Konzentration.

Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass sich die kognitive Leistung mit einer Erhöhung der Beatmungsraten bis zu 15 L/s pro Person [50] und sogar bis zu 25 L/s pro Person [51,52] verbessern kann. Eine Beatmungsrate von 25 L/s pro Person entspricht einer CO2-Konzentration von etwa 600 ppm. Eine Extrapolation der gegenwärtigen Beziehungen von $_{CO2}$ bei 900 ppm auf $_{CO2}$ bei 600 ppm würde eine zusätzliche Leistungssteigerung von 10% voraussagen, wie in Abb. 2a, b, 5a, 5b dargestellt. Es könnte auch sein, dass sich die erwartete Leistungssteigerung bei erhöhter Belüftungsrate so lange fortsetzt, bis die CO2-Konzentration im Klassenraum das Außenniveau von 400 ppm erreicht hat, aber eine solche Änderung würde eine massive Erhöhung der Belüftungsraten erfordern, die technisch anspruchsvoll umzusetzen und wirtschaftlich schwer zu rechtfertigen wäre.

Bei CO2-Konzentrationen von mehr als 2.100 ppm kann die Leistung der Schularbeiten mit zunehmender $_{CO2\text{-}Konzentration}$ weiter abnehmen, aber es gibt in der vorliegenden Analyse keine Daten, die dies belegen. Andererseits kann man annehmen, dass CO2-Konzentrationen nahe 2.000 ppm eine so schlechte Luftqualität definieren, dass ein weiterer Anstieg der $_{CO2}$ würde nicht zu einer weiteren Leistungsminderung führen. Eine CO2-Konzentration von 2.100 ppm entspricht einer sehr niedrigen Beatmungsrate (ca. 2 L/s pro Person). In Dänemark wird eine CO2-Konzentration von 2.000 ppm als ein Aktionswert angesehen, bei dem Verbesserungen der Belüftung von Klassenräumen vorgenommen werden müssen [53], und die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass dieser Wert als Obergrenze für die Exposition betrachtet werden kann, die sich negativ auf das Lernen auswirkt. Nach Fanger [54] würden 2 L/s pro Person nur etwa 45% der Bewohner beim Betreten eines Klassenraumes mit der Raumluftqualität unzufrieden sein, so dass im Hinblick auf die subjektive Wahrnehmung eine weitere Verschlechterung der Luftqualität bei niedrigeren Lüftungsraten/hohen CO2-Konzentrationen möglich erscheint. ISO-Norm 17772-1 [55] empfiehlt, dass die minimalen Beatmungsraten nicht unter 4 L/s pro Person liegen sollten, entsprechend den Empfehlungen des Health-Vent-Projekts [56].

Bei der Entwicklung ihrer Beziehungen zwischen Lüftung und Büroarbeit verwendeten Seppanen et al. willkürlich ausgewählte Gewichtungskoeffizienten, um die Unterschiede zwischen den Messmethoden zu berücksichtigen

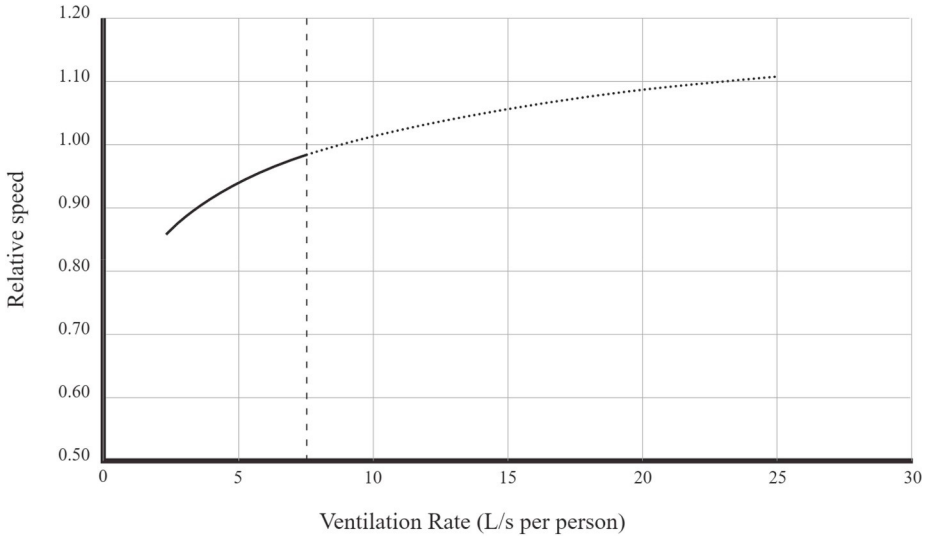

Abb. 5a. Durchführung von Schulaufgaben (Geschwindigkeit oder Reaktionszeit) in Abhängigkeit von den Belüftungsraten der Klassenräume (VR). Die durchgezogene Linie zeigt die aus der Kurve in Abb. 2a abgeleitete Beziehung unter Verwendung eines einfachen Massenbilanzmodells (siehe Annahmen im Text). Die Funktion, die die Beziehung zwischen relativer Leistung und VR beschreibt, beträgt y 0,1062ln (VR) 0,7683; wobei VR die Lüftungsraten in L/s pro Person sind. Die Beziehung wurde auf über 7,5 L/s pro Person extrapoliert, um den potenziellen Effekt bei höheren Beatmungsraten (gepunktete Linie) vorherzusagen, für die keine Daten verfügbar waren.

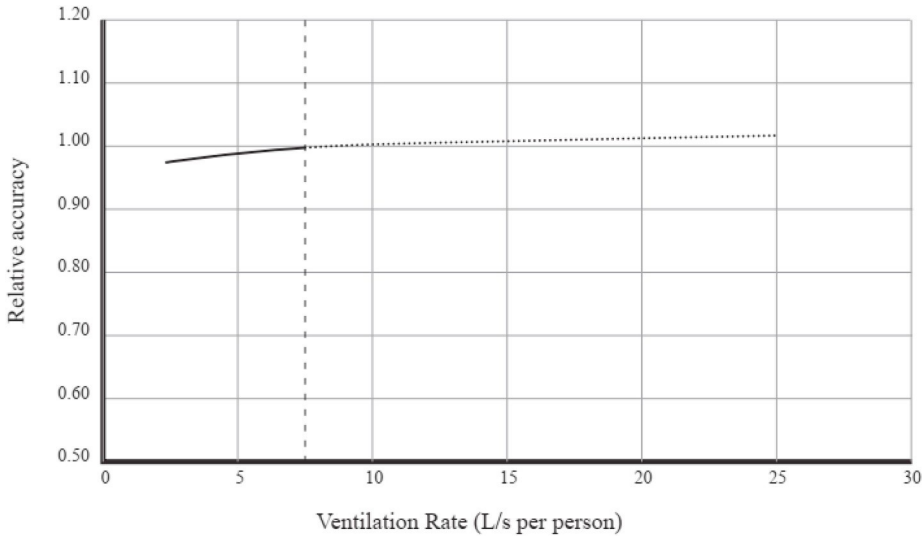

Abb. 5b. Leistung der Schularbeiten (Genauigkeit) als Funktion der Klassenzimmer-Lüftungsraten (VR). Die durchgezogene Linie ist die Beziehung, die aus der Kurve in Abb. 2b unter Verwendung eines einfachen Massenbilanzmodells abgeleitet wurde (siehe Annahmen im Text). Die Funktion, die die Beziehung zwischen relativer Leistung und VR beschreibt, beträgt y 0,0489ln (VR) 0,959; wobei VR die Lüftungsraten in L/s pro Person sind. Die Beziehung wurde auf über 7,5 L/s pro Person extrapoliert, um den potenziellen Effekt bei höheren Beatmungsraten (gepunktete Linie) vorherzusagen, für die keine Daten verfügbar waren.

Leistung [13,57]. Die Verwendung dieser Koeffizienten hatte in ihrer Analyse einen gewissen, aber keinen großen Einfluss auf die Form der Beziehung und die Größe des Effekts auf die Leistung als Folge der sich ändernden Beatmungsrate. In der vorliegenden Arbeit wurden keine Gewichtungskoeffizienten verwendet, um die Unterschiede bei den Aufgaben und Tests zur Messung der Schularbeit zu berücksichtigen. Dies lag daran, dass Wargocki et al. [6] in der Literatur keine Belege fanden, die die Verwendung irgendeiner Art von Gewichtung rechtfertigen würden, und argumentierten, dass jede Maßnahme sich auf verschiedene Aspekte der kognitiven Leistung bezieht und dass sie alle für effizientes und effektives Lernen wichtig sein können [6].

Die vorliegenden Beziehungen wurden anhand von Daten von Kindern entwickelt, die eine Grund- oder Oberschule besuchen (6-19 Jahre), so dass sie nicht auf andere Bildungsbereiche übertragen werden sollten, z.B. auf Universitätsstudenten oder Erwachsene, die an einer Weiterbildung teilnehmen, oder auf Kinder im Kindergartenalter. Die Leistung wurde durch psychologische Tests bewertet, die die Fähigkeit zur Durchführung von Schularbeiten oder repräsentative Schulaufgaben als Lernergebnisse untersuchen. Abwesenheitsraten können zwar einen negativen Einfluss auf das Lernen von Schülern haben, die nicht in der Lage sind, den Krankenstand zu kompensieren, können aber nicht als Leistungsergebnisse angesehen werden und sollten separat ausgewertet.

Es ist relevant zu fragen, ob die Lernergebnisse, die zur Erstellung der in Abb. 2a und 2b dargestellten Beziehungen verwendet wurden, den tatsächlichen Lerneffekt darstellen, wie er durch die nationalen Tests, die Jahrgangsstufen oder die Ergebnisse der Ex-Aminationen gemessen wurde (Abb. 3). Da die psychologischen Tests und Aufgaben zur Messung der Schularbeiten in der Regel kurz sind, kann argumentiert werden, dass sie nur den unmittelbaren oder kurzfristigen Effekt der Klassenzimmerbedingungen auf die Leistung darstellen, während andere Tests den kumulativen Effekt der Bedingungen in den Klassenzimmern auf die Lernergebnisse besser vorhersagen. Ob dies der Fall ist, sollte in zukünftigen Experimenten genauer untersucht werden. Vergleicht man die Größenordnung der in Abb. 2 und 3 dargestellten Effekte, so kann man zu dem Schluss kommen, dass die Leistung der Schulaufgaben die Größenordnung der Auswirkungen der Luftqualität auf nationale Tests und Schulabschlussprüfungen leicht überschätzt.

Unter Verwendung der CO2-Konzentrationen zur Schätzung der Belüftungsraten wurden die in Abb. 2a und 2b dargestellten Re- lationsschiffe in Relationen zwischen Belüftungsraten und Lernergebnissen umgewandelt (Abb. 5a und 5b). Dies wurde mit einem einfachen Massenbilanzansatz erreicht, für den einige Annahmen getroffen werden müssen. Zunächst muss angenommen werden, dass die Luft in einem Klassenraum gut gemischt ist, was eine faire Annahme ist, wenn man bedenkt, dass die Klassenräume von vielen Schülern bevölkert sind, die sowohl durch ihre Bewegungen als auch durch den Einfluss ihrer Wärmeabstrahlung eine Vermischung erzeugen. Eine weitere Annahme betrifft die CO2-Erzeugungsrate der Schüler und Lehrer in einem Klassenraum. In den vorliegenden Berechnungen wurden 0,0039 LCO2/s pro Person für Schüler und 0,0052 LCO2/s pro Person für einen erwachsenen Lehrer angenommen [44]. Ähnliche Annahmen wurden in einigen der verwendeten Studien getroffen in der vorliegenden Arbeit [21,36]. Schließlich muss eine Annahme bezüglich der CO2-Konzentration im Freien getroffen werden. In den vorliegenden Berechnungen wurde sie mit 400 ppm angenommen. Mit diesen Annahmen wurden die CO2-Konzentrationen in Abb. 2a und 2b in Lüftungsraten umgerechnet und die Abb. 5a und 5b erstellt. Sie legen nahe, dass eine Verdoppelung der Belüftungsraten die Geschwindigkeit, mit der die Aufgaben, die Schularbeiten und Tests zur Prüfung der Schulfähigkeit darstellen, durchgeführt werden, um 7 % erhöhen würde, während eine Verringerung der Fehlerquote um 1 % erwartet wird. Darüber hinaus liefert Abb. 5a eine Erklärung dafür, warum der größte Anstieg der in Abb. 2a gezeigten Leistungsmaße für Lernergebnisse zwischen CO2-Werten von 1.500 ppm und 900 ppm beobachtet wurde. Dieser CO2-Bereich entspricht einem großen Anstieg der Beatmungsraten, von etwa 4 L/s pro Person auf etwa 10 L/s pro Person, während der verbleibende Bereich der CO2-Konzentrationen, für den die Beziehung in Abb. 2a erstellt wurde, d.h. zwischen 2.100 ppm und 1.500 ppm, einer relativ geringen Änderung der Beatmungsraten von etwa 3 L/s pro Person auf 4 L/s pro Person entspricht. Über den letztgenannten Bereich wurde eine relativ geringe Veränderung der Leistung der Lernergebnisse beobachtet. Abb. 5a zeigt auch, dass die meisten der verfügbaren Daten zur Lernleistung für Beatmungsraten unter 10 L/s pro Person vorliegen.

Abb. 5a zeigt, dass eine Leistungssteigerung von 7% erwartet werden kann. wenn die Beatmungsrate verdoppelt wird. Ein ähnlicher Effekt wurde von Alfano et al. vorhergesagt, die Lernergebnisse aus verschiedenen Studien kombinierten, wie bereits im Einleitungsteil [22] erwähnt. Ein kleinerer Effekt wurde von Seppa€nen et al. [13] und ein größerer von Wargocki und Wyon [4] vorhergesagt, ebenfalls wie im Einführungsabschnitt erwähnt. Die erstgenannte Studie zeigte, dass eine Verdoppelung der Belüftungsrate die Leistung der Büroarbeit um 1,5 % steigern dürfte, und die zweite, dass eine Verdoppelung der Belüftungsrate die Geschwindigkeit der Schularbeit um bis zu 14 % erhöhen dürfte. Die letztgenannte Studie fand keine signifikante Auswirkung der Lüftungsrate auf Fehler, was mit den in Abb. 5b dargestellten Ergebnissen übereinstimmt. Vergleicht man die Ergebnisse dieser verschiedenen Studien, so kann man zu dem Schluss kommen, dass die Auswirkungen der Luftqualität auf die Lernergebnisse etwa fünfmal höher sind als ihre Auswirkungen auf die Ausführung von Büroarbeiten. Es scheint wahrscheinlich, dass geringere Anpassungsmöglichkeiten und die höhere Empfindlichkeit der Kinder auf eine verminderte Luftqualität in Klassenräumen eine Erklärung für diesen Unterschied liefern.

Wie in Abb. 5a und 5b zeigen die Abb. 6 und 7 die Beziehungen zwischen den Beatmungsraten und der Durchführung der nationalen Tests sowie der täglichen Anwesenheit der Schüler. Sie zeigen, dass eine Erhöhung der Belüftungsraten von 2 auf 7,5 l/s die Leistung der Schülerinnen und Schüler in nationalen Tests um 5% verbessert. Ebenso zeigt Abb. 7, dass eine Verdoppelung der Beatmungsraten von 2 auf 4 L/s pro Person die tägliche Anwesenheit der Kinder um 1% erhöht und dass weitere 0,5% erwartet werden, wenn die Beatmungsraten erneut von 4 auf 8 L/s pro Person verdoppelt werden.

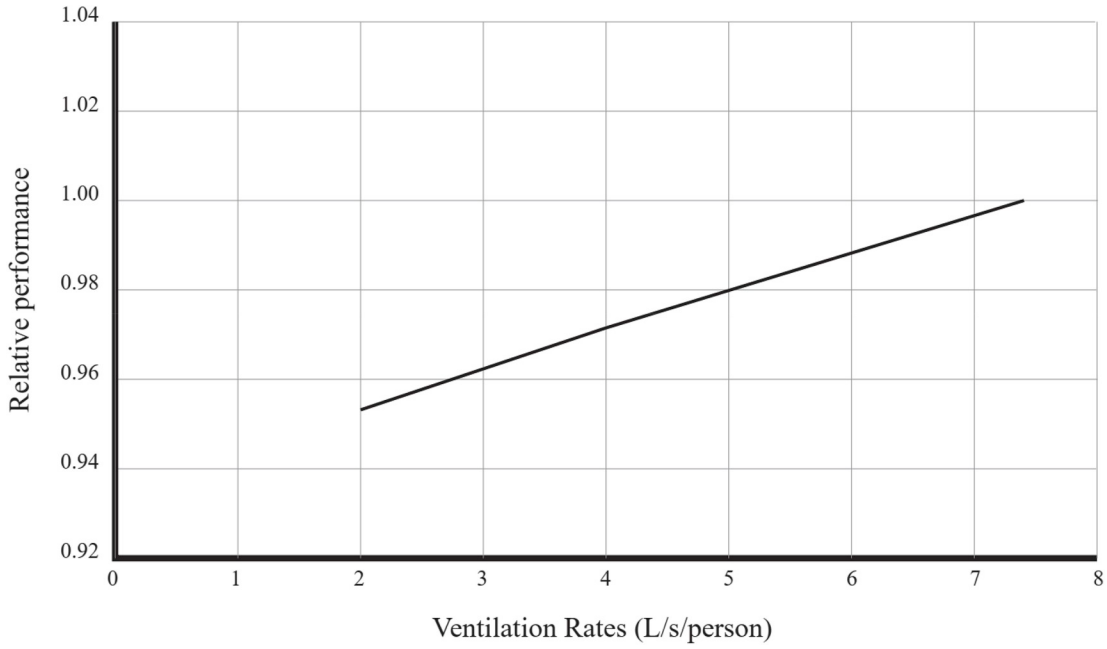

Abb. 6. Durchführung von nationalen und Eignungstests und -prüfungen in Abhängigkeit von den Belüftungsraten in den Klassenräumen (VR). Die durchgezogene Linie ist die Beziehung, die aus der Kurve in Abb. 3 unter Verwendung eines einfachen Massenbilanzmodells abgeleitet wurde (siehe Annahmen im Text). Die Leistung ist der Prozentsatz der bestandenen Schüler oder die erzielte Punktzahl (siehe Tabelle 2 für Einzelheiten). Die Funktion, die die Beziehung zwischen relativer Leistung und VR beschreibt, ist wie folgt y 0,0086 (VR) 0,9368; wobei VR die Beatmungsraten in L/s pro Person sind.

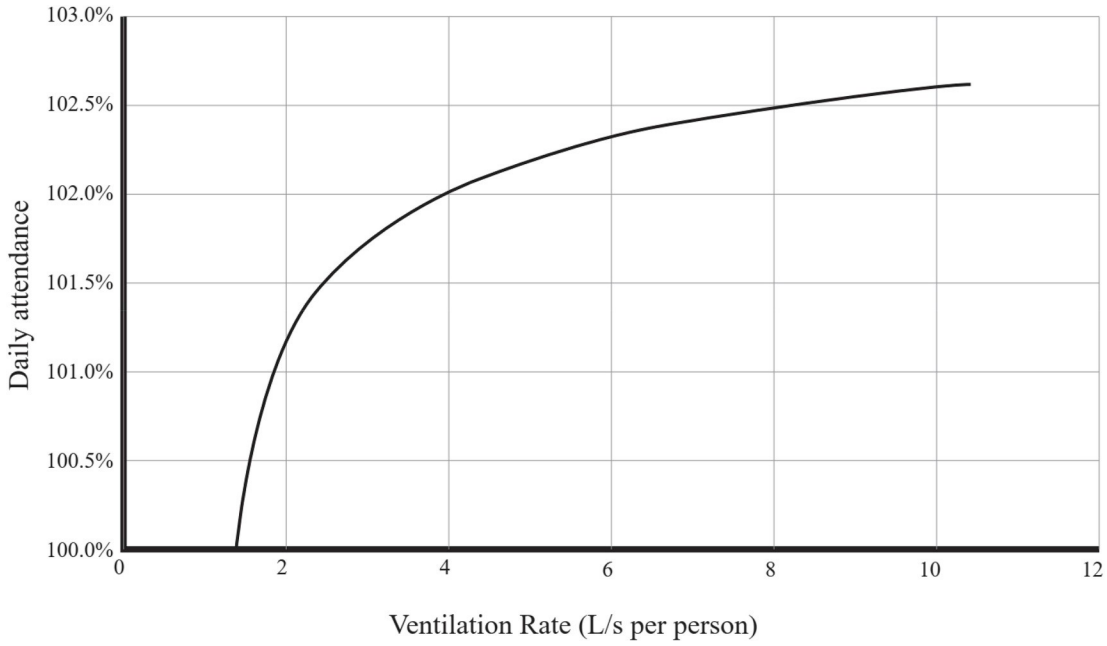

Abb. 7. Die tägliche Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler in Abhängigkeit von den Belüftungsraten der Klassenzimmer (VR). Die durchgezogene Linie ist die Beziehung, die aus der Kurve in Abb. 4 unter Verwendung eines einfachen Massenbilanzmodells abgeleitet wurde (siehe Annahmen im Text).

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen der Luftqualität in den Klassenräumen auf die Leistung in der Schule nicht trivial und höher sind als die Auswirkungen der Luftqualität in den Büros. Die sozio-ökonomischen Folgen der beobachteten Effekte sind voraussichtlich hoch, aber es gibt nur wenige veröffentlichte ökonomische Analysen zu diesem Thema. Eine hypothetische Analyse der sozioökonomischen Vorteile, die sich aus der Verbesserung der Luftqualität in den Klassenräumen dänischer Schulen ergeben, zeigte, dass eine Erhöhung der Lüftungsraten von 6 L/s pro Person auf 8,5 L/s pro Person

würde das Bruttoinlandsprodukt (BIP) Dänemarks um 173 Millionen Euro pro Jahr steigen [51]. Diese wirtschaftlichen Vorteile wären das Ergebnis der höheren Produktivität von besser ausgebildeten Schülern nach Abschluss ihrer Ausbildung und dem Eintritt ins Berufsleben, der geringeren Kosten aufgrund des früheren Schulabschlusses und der Einsparungen durch den geringeren Krankenstand der Lehrer. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Beziehungen liefern ein überzeugendes Argument für Entscheidungsträger und Aufsichtsbehörden, die Codes und Standards so zu überarbeiten, dass der Schüler, der Lehrer und die optimale Lernumgebung immer im Fokus bleiben, unabhängig davon, ob das Ziel darin besteht Schulgebäude zu entwerfen, zu renovieren oder zu betreiben. Sie können die Grundlage für Kosten-Nutzen-Analysen ähnlich der von Wargocki et al. vorgelegten [58] bilden.

Die vorliegenden Ergebnisse konzentrieren sich auf die Lernergebnisse der Schülerinnen und Schüler, aber es ist wahrscheinlich, dass eine schlechte Luftqualität in den Klassenräumen auch negative Auswirkungen auf die Lehrerinnen und Lehrer hat. Es hat sich kürzlich gezeigt, dass die von Lehrern in finnischen Klassenräumen gemeldete Häufigkeit von Stimmstörungen durch schlechte Luftqualität im Klassenraum erhöht wird [59], wobei allerdings nicht festgestellt werden konnte, ob dies eine direkte Auswirkung auf die Stimmbänder ist oder dadurch verursacht wird, dass die Lehrer ihre Stimme erheben müssen, weil die Schüler unruhiger werden, wenn ihre Leistung durch die schlechte Luftqualität negativ beeinflusst wird. Negative Auswirkungen auf die Lehrer tragen zu einem allgemeinen Rückgang der Lernergebnisse bei. Es gibt jedoch keine Studien, die den Einfluss der Luftqualität in Klassenräumen auf die Lehrleistung belegen. Ein solcher Nachweis wäre nützlich und sollte als eine zukünftige Forschungspriorität betrachtet werden. Bevor Daten verfügbar sind, wäre es vernünftig anzunehmen, dass die Leistung von Lehrern in Schulen durch die verminderte Luftqualität mindestens in gleichem Maße beeinflusst wird wie die Leistung von Angestellten in Bürogebäuden, wie Wargocki und Seppänen [60] zusammenfassen.

Zusammen mit einer kürzlich entwickelten Beziehung zwischen der Klassenraumtemperatur und der Leistung von Schulaufgaben [6] zeigen die vorliegenden Ergebnisse deutlich, dass sowohl die thermischen Bedingungen als auch die Raumluftqualität in Klassenräumen wesentliche Determinanten des Lernens sind, die nicht vernachlässigt werden sollten, wenn Maßnahmen zur Verbesserung des Lernens in Betracht gezogen werden. Es ist nicht bekannt, ob die Größenordnung der Verbesserungen der Leistung von Schularbeiten additiv ist, wenn sowohl die Klassenraumtemperatur als auch die Luftqualität gleichzeitig verbessert werden, da es fast keine Daten über die kombinierten Auswirkungen der verschiedenen Parameter der Raumluftqualität auf die Leistung gibt. Es wurden additive Effekte vorgeschlagen [61], aber es sind mehr Ergebnisse erforderlich, um diese Hypothese zu unterstützen oder zu verwerfen. Daten zu kombinierten Effekten wären nützlich, da sie eine rationale Grundlage dafür liefern würden, wie die Ressourcen zur Verbesserung der Qualität der Klassenraumumgebung am effektivsten verteilt und genutzt werden könnten. Bis mehr Daten vorliegen, wäre es ratsam, eine konservative Annahme zu treffen und den größeren der Effekte auf die Leistung zu verwenden, wenn sich die Lüftungsrate und die Temperatur gleichzeitig ändern, wie zuvor von Wargocki und Seppänen [60].

5. Schlussfolgerungen

Es wurden Beziehungen zwischen der Luftqualität in den Klassenzimmern der Grund- und Sekundarschule und den Lernergebnissen entwickelt. Die Luftqualität wurde in Bezug auf die CO-Konzentration und die Belüftungsrate bewertet. Die Beziehungen sagen voraus, wie die Leistung der Schularbeiten und der nationalen Lerntests durch die sich ändernde Luftqualität in den Klassenräumen beeinflusst wurde, wobei mehrere Metriken verwendet wurden. Zu den Metriken für Schulaufgaben gehörten die Fähigkeit, arithmetische Berechnungen durchzuführen, die Ausführung sprachbasierter Aufgaben, die Lesefähigkeit und Verständnis erfordern, sowie psychologische Tests, die Konzentration, Gedächtnis und Reaktionszeit untersuchen. Die nationalen Lerntests umfassten den Prozentsatz der Schüler, die die Tests bestanden, und die tatsächlichen Ergebnisse dieser Tests. Die erhaltenen Beziehungen zeigen, dass eine Senkung der CO-Konzentration in den Klassenräumen von 2.100 auf 900 ppm die Leistungsgeschwindigkeit um 12% und die Genauigkeit um 2% erhöhen würde.

Eine Senkung der CO2-Konzentration von 2.400 ppm auf 900 ppm würde die Leistung der nationalen Tests und Schulabschlussprüfungen um 5% und eine Senkung der CO2-Konzentration von 4.200 ppm auf 1.000 ppm die tägliche Anwesenheit der Kinder um 2,5% erhöhen. In Bezug auf die Belüftungsraten deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass eine Erhöhung der Belüftungsraten in L/s pro Person von 2 auf 7,5 die Leistung der Schüler bei nationalen Tests um 5% und die tägliche Anwesenheit der Kinder um 1,5% verbessern würde.

Diese Effekte sind nicht vernachlässigbar und höher als die Effekte, die bei der Büroarbeit von Erwachsenen unter ähnlichen Bedingungen festgestellt wurden. Diese Ergebnisse sollten berücksichtigt werden, wenn Investitionen in Betracht gezogen werden, deren Zweck es ist, das Lernen in Schulen zu fördern. Es wird davon ausgegangen, dass eine Verringerung der negativen Auswirkungen schlechter Luftqualität in den Klassenzimmern zu erheblichen sozioökonomischen Vorteilen und zu einer verbesserten Lebensqualität für Schüler in der Primar- und Sekundarstufe führen würde.

Erklärung des konkurrierenden Interesses

Die Autoren erklären, dass ihnen keine konkurrierenden finanziellen Interessen oder persönlichen Beziehungen bekannt sind, die die in diesem Papier berichtete Arbeit beeinflusst haben könnten.

Danksagungen

Diese Arbeit wurde teilweise vom Büro für internationale Angelegenheiten und externe Zusammenarbeit (OAICE) der Universität von Costa Rica unterstützt. Bjarne Saxhofs und RealDania Stiftungen und VELUX A/S sind ebenfalls für die finanzielle Unterstützung anerkannt. Prof. David P. Wyon wird ausdrücklich für seine Kommentare zum Entwurf des vorliegenden Manuskripts gedankt. Ein Teil der in diesem Manuskript enthaltenen Arbeit wurde von Dr. Jose Ali Porras-Salazar geleistet, als er an der Technischen Universität von Dänemark im Rahmen seiner Doktorarbeit tätig war.

Anhang A. Ergänzende Daten

Ergänzende Daten zu diesem Artikel finden Sie online unter https://doi. org/10.1016/j.buildenv.2020.106749.

[1] O. Sepp€anen, W.J. Fisk, Q.H. Lei, Einfluss der Temperatur auf die Leistung von Aufgaben in der Büroumgebung, in: Proc. 5. Int. Konf. Kaltes Klima. Entlüftung. Air Cond., Moskau, Russland, 2006.

[2] C. Federspiel, W.J. Fisk, P.N. Price, G. Liu, D. Faulkner, D.L. Dibartolomeo, D. P. Sullivan, M. Lahiff, Worker performance and ventilation in a call center: analyses of work performance data for registered nurses, Indoor Air 14 (Suppl 8) (2004) 41-50, https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00299.x.

[3] K.W. Tham, H.C. Willem, Auswirkungen von berichteten neurobiologischen Symptomen auf die Leistung von in den Tropen, in: G. da Silva (Hrsg.), RoomVent 2004 Conf., Coimbra, Portugal, 2004.

[4] K.W. Tham, Effects of temperature and outdoor air supply rate on the performance of call center operators in the tropics, Indoor Air (2004) 119-125, https://doi.org/ 10.1111/j.1600-0668.2004.00280.x. Suppl. 14. Heschong-Mahone-Gruppe, Fenster und Büros: Eine Studie über die Leistung von Büroangestellten und das Umfeld in Innenräumen, 2003. Kalifornien, USA.

[5] P. Wargocki, D.P. Wyon, P.O. Fanger, The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates, Indoor Air 14 (2004) 7-16.

[6] P. Wargocki, D.P. Wyon, J. Sundell, G. Clausen, P.O. Fanger, The effects of outdoor air supply rate in a office on perceived air quality , Sick Building Syndrome (SBS), Indoor Air 10 (2000) 222-236.

[7] Z. Bako□-Biro□, Menschliche Wahrnehmung, SBS-Symptome und Leistung der Büroarbeit während der Exposition gegenüber durch Baumaterialien und Personalcomputer verunreinigter Luft, Technische Universität Dänemark, 2004.

[8] U. Haverinen-Shaughnessy, R.J. Shaughnessy, Effects of classroom ventilation rate and temperature on students' test scores, PloS One 10 (2015) 1-14, https://doi. org/10.1371/journal.pone.0136165.

[9] F.R.D.A. Alfano, L. Bellia, A. Boerstra, F. van Dijken, E. Ianniello, G. Lopardo, F. Minichiello, P. Romagnoni, M.C.G. da Silva, Umwelt in Innenräumen und Energieeffizienz in Schulen. REHVA-Führer 13, REHVA, Brüssel, Belgien, 2010.

[10] P. Wargocki, D.P. Wyon, B. Matysiak, S. Irgens, The effects of classroom Air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children, in: Raumluft, 2005, S. 368-372.

[11] Z. Bako□-biro□, N. Kochhar, H.B. Awbi, M. Williams, Belüftungsraten in Schulen und die Leistung der Schülerinnen und Schüler mit Hilfe von computergestützten Einstufungstests, Indoor Air (2008) 17-22.

[12] W.F. de Gids, C.J. van Oel, J.C. Phaff, A. Kalkman, The effect of ventilation on the cognitive performance of primary school pupils, 2007. Delft.

[13] R.J. Shaughnessy, U. Haverinen-Shaughnessy, A. Nevalainen, D. Moschandreas, Eine vorläufige Studie über den Zusammenhang zwischen der Belüftungsrate in Klassenräumen und der Leistung der Schüler, Indoor Air 16 (2006) 465-468, https://doi.org/10.1111/ j.1600-0668.2006.00440.x.

[14] W.J. Fisk, O. Seppa€nen, D. Faulkner, J. Huang, Economizer system cost effectiveness: accounting for the influence of ventilation rate on sick leave permalink, in: ISIAQ 7. Int. Konf. Heilen. Build., Singapur, 2003.

[15] J.F. Brudage, R.M. Scott, W.M. Lednar, D.W. Smith, R.N. Miller, Gebäude-assoziiertes Risiko fieberhafter akuter Atemwegserkrankungen bei Auszubildenden der Armee, JAMA 259 (1998) 2018-2112.

[16] P. Drinka, P. Krause, M. Schilling, B.A. Miller, P. Shult, S. Gravenstein, Bericht über einen Ausbruch: Pflegeheimarchitektur und Influenza-A-Angriffsraten, J. Am. Geriatr. Soz. 44 (1996) 910-913.

[17] C.W. Hoge, M.R. Reichler, E.A. Dominguez, J.C. Bremer, T.D. Mastro, K. A. Hendriks, D.M. Musher, J.A. Elliott, R.R. Facklam, R.F. Breiman, Eine Epidemie von Pneumokokken in einem überfüllten, unzureichend belüfteten Gefängnis, N. Engl. J. Med. 331 (1994) 643–648.

[18] D.K. Milton, P.M. Glencross, M.D. Walters, D.K. Milton, P.M. Glencross, M. D. Walters, Risiko von Krankheitsausfällen in Verbindung mit dem Belüftungsniveau im Freien, der Befeuchtung und Beschwerden im Zusammenhang mit dem Gebäude, Innenluft 10 (2000) 212-221, 2000.

[19] E.A. Nardell, J. Keegan, S.A. Cheney, S.U.E.C. Etkind, Airborne infection, Am. Pfarrer Respir. Dis. 144 (1991) 302–306.

[20] Z. Bako□-Biro□, N. Kochhar, H.B. Awbi, M. Williams, Belüftungsraten in Schulen und Lernleistungen, in: CLIMA 2007 WellBeing Indoors. 9. REHVA-Weltkongress, Helsinki, Finnland, 2007, S. 1434-1440.

[21] P. Wargocki, D.P. Wyon, The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children, HVAC&R Research 13 (2) (2007) 193-220, https://doi.org/10.1080/ 10789669.2007.10390951.

[22] P. Wargocki, D.P. Wyon, The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children, HVAC&R Research 13 (3) (2007) 165-191, https://doi.org/10.1080/ 10789669.2007.10390950.

[23] U. Haverinen-Shaughnessy, D.J. Moschandreas, R.J. Shaughnessy, Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement, Indoor Air 21 (2011) 121-131, https://doi.org/10.1111/j.1600- 0668.2010.00686.x.

[24] S. Gaihre, S. Semple, J. Miller, S. Fielding, S. Turner, Kohlendioxidkonzentration im Klassenzimmer, Schulbesuch und Bildungsgrad, J. Sch. Health 84 (2014) 569-574, https://doi.org/10.1111/josh.12183.

[25] M.J. Mendell, E.A. Eliseeva, M.M. Davies, A. Lobscheid, Beeinflussen die Belüftungsraten in den Klassenzimmern kalifornischer Grundschulen die standardisierten Testergebnisse? Ergebnisse einer prospektiven Studie, Indoor Air 26 (4) (2015) 546-557, https://doi.org/ 10.1111/ina.12241.

[26] S. Petersen, K.L. Jensen, A.L.S. Pedersen, H.S. Rasmussen, The Effect of Increased Classroom Ventilation Rate Indicated by Reduced CO2 Concentration on the Performance of Schoolwork by Children, Indoor Air 26 (3) (2015) 366-379.

[27] O. Sepp€anen, W.J. Fisk, Q.H. Lei, Belüftung und Leistung bei der Büroarbeit, Innenluft 16 (2006) 28-36, https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00394.x.

[28] P. Royston, W. Sauerbrei, Multivariabler Modellbau: Ein pragmatischer Ansatz zur Regressionsanalyse auf der Grundlage fraktioneller Polynome zur Modellierung kontinuierlicher Variablen, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2008, https://doi.org/ 10.1002/sim.3499.

[29] A.J. Canty, A.C. Davison, D.V. Hinkley, V. Ventura, Bootstrap-Diagnostik und Heilmittel, Can. J. Stat. 34 (2006) 5-27, https://doi.org/10.1002/cjs.5550340103.

[30] A. Feld, Ein Abenteuer in der Statistik. The Reality Enigma, SAGE-Veröffentlichungen, London, Großbritannien, 2016.

[31] ASTM International, D6245-18, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, 2018, S. 1-10, https://doi.org/10.1520/D6245-12.

[32] D.G. Shendell, R. Prill, W.J. Fisk, M.G. Apte, D. Blake, D. Faulkner, Zusammenhänge zwischen der CO2-Konzentration im Klassenzimmer und der Anwesenheit der Schüler in Washington und Idaho, Indoor Air 14 (2004) 333-341, https://doi.org/10.1111/j.1600- 0668.2004.00251.x.

[33] W.J. Fisk, P. Wargocki, X. Zhang, Beeinflussen die CO2-Werte in Innenräumen direkt die wahrgenommene Luftqualität, die Gesundheit oder die Arbeitsleistung? ASHRAE J. 61 (2019) 70-77.

[34] X. Tang, P.K. Misztal, W. Nazaroff, A.H. Goldstein, Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen von Menschen in Innenräumen, Umwelt. Wissenschaftlich-technische. 50 (2016) 12686-12694, https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04415.

[35] X. Zhang, P. Wargocki, Z. Lian, J. Xie, J. Liu, Reaktionen auf menschliche Bioabwässer in den von den Belüftungsstandards empfohlenen Mengen, Procedia Eng. 205 (2017) 609-614, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.415.

[36] P. Jacobs, F. Van Dijken, A. Boerstra, P. Jacobs, F. Van Dijken, A. Boerstra, Leistung der Lüftung in Klassenräumen. Begrenzung von Infektionskrankheiten und Verbesserung des Lernens; Leistung der Lüftung in Klassenräumen. Begrenzung von Infektionskrankheiten und Verbesserung des Lernens; Heizung. Entlüftung. (2007) 64, 2007.

[37] O. Sepp€anen, W.J. Fisk, M.J. Mendell, Verband der Lüftungsraten und CO2 Konzentrationen mit gesundheitlichen und anderen Reaktionen in kommerziellen und institutionellen Gebäuden, Indoor Air 9 (1999) 226-252, https://doi.org/10.1111/j.1600- 0668.1999.00003.x.

[38] P. Wargocki, J. Sundell, W. Bischof, G. Brundrett, P.O. Fanger, F. Gyntelberg, S. O. Hanssen, P. Harrison, A. Pickering, O. Sepp€anen, P. Wouters, Lüftung und Gesundheit in nicht-industriellen Innenräumen, 2001.

[39] J. Sundell, H. Levin, W.W. Nazaroff, W.S. Cain, W.J. Fisk, D.T. Grimsrud, F. Gyntelberg, Y. Li, A.K. Persily, A.C. Pickering, J.M. Samet, J.D. Spengler, S. T. Taylor, C.J. Weschler, Ventilation rates and health: multidisziplinärer Überblick über die wissenschaftliche Literatur, Indoor Air 21 (2011) 191-204, https://doi.org/10.1111/ j.1600-0668.2010.00703.x.

[40] Dänische Arbeitsumweltbehörde, Leitfaden über die häufigsten Ursachen für die häufigsten Innenraumklima-Gene und mögliche Lösungen. A-Guidance A.1.2-1., 2018. Kopenhagen, Dänemark.

[41] P.O. Fanger, Einführung der olf- und der decipol-Einheiten zur Quantifizierung der vom Menschen in Innenräumen und im Freien wahrgenommenen Luftverschmutzung, Energieaufbau. 12 (1) (1988) 1–6.

[42] ISO, B., 17772-1, Energieleistung von Gebäuden. Umweltqualität in Innenräumen. Umweltparameter in Innenräumen für die Gestaltung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden, 2017.

[43] P. Carrer, E. de Oliveira Fernandes, H. Santos, O. H€anninen, S. Kephalopoulos, P. Wargocki, Über die Entwicklung gesundheitsbasierter Beatmungsrichtlinien: Prinzipien und Rahmenbedingungen, Int. J. Umwelt. Res. Publ. Gesundheit 15 (7) (2018) 1360.

[44] O. Sepp€anen, W.J. Fisk, Q.H. Lei, Raumtemperatur und Produktivität im Büro Arbeit, 2006. Berkeley, Kalifornien, http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-60952.

[45] P. Wargocki, P. Foldbjerg, K.E. Eriksen, L.E. Videbæk, Sozioökonomische Folgen einer verbesserten Innenraumluftqualität in dänischen Grundschulen, in: Proc. Raumluft 2014, Hongkong, 2014.

[46] H. Vertanen-Greis, E. Uitti, J. Stimmstörungen sind verbunden mit Stress bei Lehrern: eine Querschnittsstudie in Finnland, J. Voice (2018), https:// doi.org/10.1016/j.jvoice.2018.08.021. In der Presse.

[47] P. Wargocki, O. Sepp€anen, Wie man die Produktivität in die Analyse der Lebenszykluskosten integriert der Gebäudetechnik. Rehva:(Finnland)., in: REHVA-Anleitung. B. Nr. 6. Innenklima. Produkt. Off., Finnland, 2006.

[48] G. Clausen, D.P. Wyon, The combined effects of many different indoor environmental factors on acceptability and office work performance die kombinierten Auswirkungen vieler verschiedener Umweltfaktoren in Innenräumen auf die Akzeptanz, HVAC R Res. 14 (2008) 103-113, https://doi.org/10.1080/10789669.2008.10390996.