Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
University of Applied Sciences

Leitfaden zur Raumluftkonditionierung in Schulen bei Neubau und Sanierung unter Beachtung ökonomischer, ökologischer und soziokultureller Aspekte

In Kooperation zwischen:

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm) und
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin)

Impressum

Herausgeber

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Referat ZF V-I

Württembergische Straße 6

10707 Berlin

Inhalte und Bearbeitung

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller

M.Eng. Maxim Geier

M.Eng. Philipp Krimmel

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Dipl.-Ing. Wolfram Müller

Dipl.-Ing. Kathrin Richter-Kowalewski

Redaktionsstand: 21.08.2014

Kritik und Anregungen bitte weiterleiten an:

Wolfram Müller (ZF V-I 32)

wolfram.mueller@senstadtum.berlin.de

Tel. (030) 9(0)139-4321

Fax. (030) 9(0)139-4291

Information im Internet

http://lueftung-in-schulen.htw-berlin.de

Inhaltsverzeichnis

IMPRESSUM I

INHALTSVERZEICHNIS II

VORWORT 1

1 EINLEITUNG 2

1.1 PROBLEMSTELLUNG 3
1.2 ZIELE UND ZIELGRUPPEN 4
1.3 ANFORDERUNGEN AN RAUMLUFTQUALITÄT 6
1.4 LÜFTUNGSSYSTEME 14

2 LÜFTUNGSKONZEPTE 16

2.1 FREIE LÜFTUNG 16
2.1.1 Fensterlüftung 17
2.1.2 Schachtlüftung 19
2.2 MASCHINELLE LÜFTUNG 21
2.3 HYBRIDE LÜFTUNG 28

3 FESTLEGEN EINES LÜFTUNGSSYSTEMS 30

3.1 HINWEISE ZUR FENSTERLÜFTUNG 33
3.2 HINWEISE ZUR MASCHINELLEN LÜFTUNG 34

4 WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG MASCHINELLER LÜFTUNG 43

5 SIMULATION 54

5.1 PRIMÄRENERGIEBEDARF MASCHINELLER UND FREIER LÜFTUNG 56
5.2 EFFEKTIVITÄT VON SONNENSCHUTZSYSTEMEN 58
5.3 EFFEKTIVITÄT DER NACHTAUSKÜHLUNG 61

6 ZUSAMMENFASSUNG 67

7 LITERATURVERZEICHNIS 68

8 ANHANG 72

8.1 CHECKLISTE 72

Leitfaden zur Raumluftkonditionierung in Schulen

Vorwort

Der vorliegende Leitfaden beruht auf den Erkenntnissen aus der Kooperation zwischen der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm) und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin). Neben einer Literaturauswertung wurden 9 Schulen untersucht, davon 7 mit maschinellen Lüftungsanlagen. Zusätzlich wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. In Ergänzung zu diesem Leitfaden gibt es einen ausführlichen Projektbericht. Er ist im Internet unter http://lueftung-in-schulen.htw-berlin.de verfügbar.

Das Vorhaben wurde von einem Expertenkreis begleitet, deren Mitgliedern an dieser Stelle für die Unterstützung und die kritischen Anmerkungen gedankt wird.

1 Einleitung

Ein großer Teil der Schulgebäude im Bestand befindet sich in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Solche Gebäude weisen einen überdurchschnittlich hohen Energieverbrauch in Bezug auf Heizung und Strom auf. Das Wohlbefinden bei bestimmungsgemäßer Nutzung, unter hygienisch einwandfreien und lernfördernden Bedingungen, wird im Sommer durch Überwärmung und im Winter im Zusammenhang mit hoher CO_2-Konzentration in den Klassenräumen infolge nicht ausreichender Lüftung stark beeinträchtigt. In zahlreichen Studien wurde nachgewiesen, dass sich die Leistungsfähigkeit von Personen bei schlechter Raumluftqualität reduziert und gesundheitliche Beeinträchtigungen häufiger auftreten. Eine Verbesserung der Raumluftqualität führt zu einer Leistungssteigerung, reduziert gesundheitliche Beeinträchtigungen und steigert das allgemeine Wohlbefinden von Personen [3,31,32,33,47,48,49,50]. Eine ausreichende Lüftung ist notwendig, um die von Menschen eingebrachten Stoffwechselprodukte u.a. auch Feuchtigkeit sowie gasförmige und partikelgebundene Luftverunreinigungen abzuführen. Dies ist eine Grundvoraussetzung zur Sicherstellung gesundheitlich zuträglicher Atemluft.

Aus diesem Grund sind lüftungstechnische Maßnahmen bei Neubau und Sanierung unerlässlich, um eine weitgehend nutzerunabhängige und dauerhaft gute Luftqualität mit akzeptabler CO_2-Konzentration zu erreichen. Diesbezüglich kann von einem Paradigmenwechsel gesprochen werden.

Der vorliegende Leitfaden gibt konkrete Empfehlungen, welche Lüftungssysteme für vorhandene Schulbautypen am besten geeignet sind, beschreibt die Anforderungen an die Raumluftkonditionierung in Schulen bei Neubau und Sanierung und beinhaltet Vorgaben zur Planung raumlufttechnischer Anlagen.

1.1 Problemstellung

Die bislang geläufigste Art der freien Lüftung in Schulen ist die Fensterlüftung, d.h., dass die Luftqualität in Klassenräumen allein durch die Fensterlüftung sichergestellt werden muss. Messungen der CO_2-Konzentration zeigen, dass vor allem in den Wintermonaten die CO_2-Konzentrationen über weite Teile des Unterrichts im Bereich hygienisch auffälliger 1000 bis 2000 ppm und hygienisch inakzeptabler Werte über 2000 ppm liegen. Es werden dabei häufig Konzentrationen von bis zu 5000 ppm erreicht (weitere Informationen sind im Untersuchungsbericht und in der Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse im Bericht zum Leitfaden zu finden). Fenster werden aufgrund niedriger Außentemperaturen selten und nur kurzzeitig geöffnet. Die Anforderungen der EnEV verschärfen diese Situation. Neue oder sanierte Schulen haben bei geschlossenen Fenstern und Türen einen vernachlässigbar niedrigen freien Luftwechsel. So kann auch der durch die EnEV zum Zwecke der Gesundheit geforderte Mindestluftwechsel in Klassenräumen nicht sichergestellt werden. Die Anreicherung von CO_2 und anderen biologischen und chemischen Stoffen in der Luft verläuft demzufolge sehr schnell. Die Folgen sind erwartungsgemäß Konzentrationsschwierigkeiten, Müdigkeit, Kopfschmerzen, bis hin zu gesundheitsbezogenen Beschwerden wie z.B. Reizung von Augen, Nase und Rachen [47,56].
Aus energetischer Sicht ist freie Lüftung (Fenster- und Schachtlüftung) in der Winterzeit nicht sinnvoll, da sie erhebliche Wärmeverluste verursacht und aus Sicht der Behaglichkeit kommt es zu unzumutbaren Zugluftерscheinungen.

1.2 Ziele und Zielgruppen

Mit diesem Leitfaden soll die Raumluftqualität an Schulen verbessert und der Energieverbrauch der Schulen reduziert werden, die Behaglichkeit gesteigert und die CO_2-Konzentration in den Klassenräumen im hygienisch unbedenklichen Bereich gehalten werden. Belastungen durch flüchtige organische Verbindengen (VOC) sollen ebenfalls reduziert werden.

In [3] wird die Raumluftqualität wie folgt definiert: „Die Raumluftqualität umfaßt alle nichtthermischen Wirkungen der Raumluft, die Einfluß auf Wohlbefinden und Gesundheit des Menschen haben." Zu den nichtthermischen Wirkungen gehören z.B.:

Chemische Verunreinigungen:

- flüchtige organische Verbindungen (VOCs)
- CO_2
- Gerüche

Biologische Verunreinigungen:

- Viren
- Bakterien
- Sporen von Pilzen
- Endotoxine oder Glucane

Physikalische Faktoren:

- Lärm
- Beleuchtung

Psychologische Faktoren:

- Stress
- optische, akustische und olfaktorische Reize

In diesem Leitfaden wird die Luftqualität anhand von Konzentrationen für CO_2 und TVOC in Innenräumen definiert, da in Klassenräumen die Personen meistens die Hauptverunreinigungsquelle sind. Zusätzlich erfolgt die Bewertung der Raumluftqualität nach den Kriterien der thermischen Behaglichkeit. Dazu gehören:

- Raumlufttemperatur
- relative Luftfeuchte und

- lokale Luftgeschwindigkeiten am Arbeitsplatz

Thermische Behaglichkeit wird als der Zustand definiert, bei dem der Mensch mit seiner thermischen Umgebung zufrieden ist, sich insgesamt thermisch neutral fühlt [3].

Die Leitfadenempfehlungen ermöglichen, geeignete Lüftungssysteme für unterschiedliche Schulbautypen nach Stand der Technik auszuwählen, zu planen und wirtschaftlich zu betreiben. Durch intelligente Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten sollen Energieverbräuche der Lüftungsanlagen optimiert und den Nutzern ein technisch funktionales Gebäude zur Verfügung gestellt werden.

Der Leitfaden richtet sich an alle Berufsgruppen, die an der Planung, Errichtung, Renovierung oder Sanierung aber auch der Bewirtschaftung und Nutzung von Schulgebäuden beteiligt sind.

Die Leitfadenempfehlungen sind in der zugehörigen Checkliste zusammengefasst (siehe Anhang). Diese sind zur Prüfung von Bauplanungsunterlagen und bei der Abnahme zu verwenden. In den Checklisten sind nur weiße Felder auszufüllen:

✔ Forderung eingehalten

– Forderung nicht eingehalten

/ nicht zutreffend

Hinweis:

Generell ist zu beachten, dass behagliche Bedingungen für die Nutzer sichergestellt sind. Dabei ist es für die Nutzer unerheblich, ob die Bedingungen mit Hilfe einer RLT-Anlage oder ohne Anlagentechnik eingehalten werden. Das bedeutet, dass Grenzwerte zur thermischen Behaglichkeit und Luftqualität immer gültig sind. Diese Werte gelten also auch dann, wenn sie in Richtlinien veröffentlicht sind, die für Räume mit maschineller Lüftung gelten (z.B. DIN EN 13779 [7]).

1.3 Anforderungen an Raumluftqualität

Gemäß Arbeitsstättenverordnung und der Arbeitsstättenregeln ASR A3.6 muss in umschlossenen Arbeitsräumen unter Berücksichtigung der Arbeitsverfahren, körperlicher Belastung und der Anzahl der Beschäftigten sowie der sonstigen anwesenden Personen gesundheitlich zuträgliche Atemluft in ausreichender Menge vorhanden sein [11,12]. Die Arbeitsstätten sind so einzurichten und zu betreiben, dass von ihnen keine Gefährdungen für die Sicherheit und die Gesundheit der Beschäftigten ausgehen [12]. Sollte die Außenluft im Sinne des Immissionsschutzrechts unzulässig belastet oder erkennbar beeinträchtigt sein, z. B. durch Fortluft aus Absaug- oder RLT-Anlagen, starkem Verkehr, schlecht durchlüftete Lagen, sind im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung gesonderte Maßnahmen (z. B. Beseitigung der Quellen, Verlegen der Ansaugöffnung bei RLT-Anlagen) zu ergreifen [11].

Die Konkretisierung der Forderungen der Arbeitsstättenverordnung erfolgt in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR A3.6). Gesundheitlich zuträgliche Atemluft ist sichergestellt, wenn die CO_2-Konzentration in der Raumluft von ≤ 1000 ppm eingehalten wird [11].

Für Schulgebäude ist der Außenluftvolumenstrom nach Stand der Technik so auszulegen, dass Lasten (Stoff-, Feuchte-, Wärmelasten) zuverlässig abgeführt werden und die CO_2-Konzentration von max. 1000 ppm in Klassenräumen eingehalten wird. Gemäß normativer Vorgaben (z. B. DIN-Normen und VDI-Richtlinien) wird empfohlen die Zuluftqualität anhand von Konzentrations-grenzen, die für bestimmte Verunreinigungen in der Raumluft gelten, (z. B. CO_2, VOC) zu definieren [5,6,11].

Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)[12]

Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) verfolgt das Ziel, Beschäftigte in Arbeitsstätten zu schützen und zur Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten beizutragen [13]. Sie enthält Mindestvorschriften für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten. Die Verordnung dient der nationalen Umsetzung der EG-Arbeitsstättenrichtlinie 89/654/EWG sowie der Richtlinie 92/58/EWG

des Rates der EG über Mindestvorschriften über die Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung am Arbeitsplatz [13].

Technische Regel für Arbeitsstätten (Arbeitsstättenregeln - ASR)

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (Arbeitsstättenregeln - ASR) beschreiben Maßnahmen und praktische Durchführungshilfen und legen dar, wie die in der Arbeitsstättenverordnung gestellten Schutzziele und Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten vom Arbeitgeber erreicht werden können [13]. Die ASR enthalten zum Zeitpunkt der Bekanntgabe den aktuellen Stand der Technik [13]. Im Gegensatz zur Arbeitsstättenverordnung ist die Anwendung der Technischen Regeln nicht gesetzlich vorgeschrieben [13]. Der Arbeitgeber kann eigenständig von den Vorgaben der ASR abweichen und die Schutzzielvorgaben der Arbeitsstättenverordnung einschließlich des Anhangs auch auf andere Weise erfüllen [13]. Dabei muss das gleiche Schutzniveau wie in der ASR beschrieben ("Stand der Technik") erreicht werden [13].

Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden (UBA)

Der Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden (UBA) verweist auf DIN EN 13779 als Planungsgrundlage für die Ausführung lüftungstechnischer Anlagen sowohl für Schulgebäude als auch für alle Nichtwohngebäude [7]. Wenn keine weiteren Angaben zur geforderten Raumluftqualität vorliegen, ist gemäß DIN EN 13779 die Auslegung der Volumenströme nach Raumluftkategorie IDA 2 vorzunehmen, siehe Tabelle 1[5].

Tabelle 1: Klassifizierung der Raumluftqualität nach DIN EN 13779 [5,7]

Kategorie	Beschreibung	Erhöhung der CO_2-Konzentration gegenüber der Außenluft [ppm]	Absolute CO_2-Konzentration in der Innenraumluft [ppm]	Lüftungsrate/ Außenluftvolumenstrom [l/s/Person] ([m3/h/Person])
IDA 1	Hohe Raumluft-qualität	≤ 400	≤ 800	> 15 (> 54)
IDA 2	Mittlere Raumluft-qualität	> 400-600	> 800-1000	> 10-15 (> 36-54)
IDA 3	Mäßige Raumluft-qualität	> 600-1000	> 1000-1400	> 6-10 (> 22-36)
IDA 4	Niedrige Raumluft-qualität	> 1000	> 1400	< 6 (< 22)

Zur Sicherstellung hygienisch einwandfreier Luftqualität in Innenräumen verweist der Leitfaden für Innenraumhygiene in Schulgebäuden (UBA) auf die Leit- und Richtwerte der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-kommission und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (Ad-hoc AG IRK/AOLG).

Die Bewertung für Kohlendioxid in Klassenräumen ist von Ad-hoc AG IRK/AOLG wie folgt festgelegt: „hygienisch unbedenklich“ (CO_2 < 1000 ppm), „hygienisch auffällig“ (CO_2 im Bereich zwischen 1000 - 2000 ppm) und „hygienisch inakzeptabel“ (CO_2 > 2000 ppm), siehe Tabelle 2. Bei Überschreiten eines CO_2-Wertes von 1000 ppm soll gelüftet werden, bei Überschreiten von 2000 ppm muss gelüftet werden. Eine Unterschreitung von 1000 ppm ist in beiden Fällen anzustreben. Kann durch Lüften allein die Situation auf Dauer nicht verbessert werden, sind lüftungstechnische Maßnahmen zu ergreifen oder ist eine Verringerung der Zahl der Schülerinnen und Schüler im Klassenraum vorzunehmen [2,10].

Tabelle 2: Gesundheitlich hygienische Leitwerte der Ad-hoc AG IRK/AOLG [2]

CO_2- Konzentration (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
< 1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000-2000	Hygienisch auffälig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raumes prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

Die in Tabelle 2 dargestellten CO_2-Leitwerte sind Momentanwerte der CO_2-Konzentrationen, die während der Messung (an einem repräsentativen Ort im Raum) mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung (Mittelungsdauer üblicherweise < 2 min) ermittelt werden. Messstrategie nach VDI 4300-9 [2].
Zur Bewertung flüchtiger organischer Verbindungen hat Ad-hoc-AG IRK/AOLG Richtwerte zur Begrenzung der Raumluftkonzentrationen erarbeitet. Die Tabelle 3 zeigt Leitwerte für den Gesamtgehalt an flüchtigen organischen Verbindungen.

Tabelle 3: Leitwerte für TVOC der Ad-hoc AG IRK/AOLG [15]

Stufe	Konzentrationsbereich [mg TVOC/m^3]	Hygienische Bewertung
1	≤0,3mg/m^3	Hygienisch unbedenklich
2	›0,3-1 mg/m^3	Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen
3	›1-3 mg/m^3	Hygienisch auffällig
4	›3-10 mg/m^3	Hygienisch bedenklich
5	›10 mg/m^3	Hygienisch inakzeptabel

Zusammenfassend empfiehlt Ad-hoc AG IRK/AOLG die Einhaltung von:

1. gesundheitlich abgeleiteten Richtwerten
   (RW I, Vorsorgerichtwerte)

Die Tabelle mit sämtlichen Richtwerten steht im Internet unter folgender Adresse zur Verfügung:

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/bilder/dateien/12_gesundheit_kommission_innraumlaufthygiene_empfehlungen_und_richtwerte20140617.xlsx

2. gesundheitlich-hygienischen Leitwerten

   CO_2-Leitwert: ≤ 1000 ppm

   TVOC-Leitwert: ≤ 1 mg TVOC/m^3 (hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen)

Die Richtwerte gelten für alle dauerhaft genutzten Innenräume. Bei der Einhaltung der CO_2-Konzentration von 1000 ppm in Innenräumen, in denen sich mehrere Personen aufhalten, weisen auch andere Schadstoffe, insbesondere Feinstaub gesundheitlich unbedenkliche Konzentrationen auf [10]. Die Formaldehydkonzentration ist ausreichend geregelt. Es besteht kein Bedarf Formaldehyd als Einzelwert aufzuführen [10].

Thermische Behaglichkeit

Es ist zu beachten, dass der generelle Hinweis bezüglich der Anwendbarkeit von Grenzwerten aus Abschnitt 1.2 auch hier gilt.

Innenraumtemperatur

Die normative Empfehlung zur Auslegung der Innentemperatur in Klassenräumen in der Heizperiode liegt bei mindestens 20°C [35]. Die optimale operative Temperatur gemäß der Behaglichkeitsanforderungen beträgt in der Heizperiode 22,0 °C ± 2,0 °C, in der Kühlperiode 24,5 °C ± 1,5 °C [4,6]. Zur Vermeidung einer schnellen Erhöhung der Raumlufttemperatur aufgrund der übermäßigen Sonneneinstrahlung sind Sonnenschutzsysteme unerlässlich [16]. Beispiele für Sonnenschutzsysteme sind in der ASR A3.5 zu finden.

Relative Feuchte

Bei Anwendung von Be- oder Entfeuchtungsanlagen werden laut DIN EN 15251 für Kategorie II folgende Auslegungswerte empfohlen (Tabelle 4) [6].

Tabelle 4: Beispiel für empfohlene Auslegungskriterien für die Feuchte in Aufenthaltsbereichen bei installierten Be- und Entfeuchtungsanlagen [6]

Art des Gebäudes bzw. Raumes	Kategorie	Auslegungswert der relativen Feuchte für Entfeuchtung, in %	Auslegungswert der relativen Feuchte für Befeuchtung, in %
Räume, in denen die Feuchtekriterien durch die Belegung durch Personen bestimmt werden. Besondere Räume (Museen, Kirchen usw.) können andere Grenzen erfordern	I	50	30
	II	**60**	**25**
	III	70	20
	IV	> 70	< 20

Für die ausgewiesenen Aufenthaltszonen gilt laut DIN EN 15251 der obere Grenzwert von 65 % relativer Feuchte [6]. Zum unteren Grenzwert macht die DIN EN 15251 keine eindeutigen Angaben gibt jedoch einen Hinweis, dass unter 30 % relativer Feuchte gesundheitliche Beeinträchtigungen (z. B. trockene Schleimhäute) und störende, statische Aufladungen auftreten können [6]. Erhöhte Infektionsgefahr als Folge trockener Luft in Innenräumen ist laut Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) noch nicht endgültig wissenschaftlich geklärt [39]. Gemäß ASR A3.6 braucht die Raumluft nicht befeuchtet zu werden. Für den Fall, dass Beschwerden auftreten, ist im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zu prüfen, ob und ggf. welche Maßnahmen zu ergreifen sind [11].

Personen besitzen im Gegensatz zum Temperatursinn keine Möglichkeit die Raumluftfeuchte zu fühlen. Die Feuchte ist nur über sekundäre Symptome spürbar. Um die relative Feuchte in der Heizperiode in Innenräumen anzuheben, ist eine maschinelle Luftbefeuchtung erforderlich. Eine Entfeuchtung der Luft in der Kühlperiode kann nur durch maschinelle Kühlung der Luft erfolgen. In Klassenräumen befindet sich die relative Feuchte der Luft in der Heizperiode häufig unterhalb von 30 %, siehe Messergebnisse im

Untersuchungsbericht. Eine Befeuchtung der Raumluft in Schulgebäuden ist bisher nicht vorgesehen.

Luftgeschwindigkeiten am Arbeitsplatz

Die Luftgeschwindigkeit lokal am Arbeitsplatz kann das Behaglichkeitsempfinden der Personen stark beeinflussen. Die als behaglich empfundene Luftgeschwindigkeit ist in geringem Maße abhängig von der Lufttemperatur. Die mittlere lokale Luftgeschwindigkeit kann deswegen als Funktion der lokalen Lufttemperatur und des Turbulenzgrades betrachtet werden. Der Turbulenzgrad beschreibt dabei die Schwankungen der Luftgeschwindigkeit, welche einen großen Einfluss auf das Gefühl von Zugluft einer Person haben [3]. Richtwerte sind in DIN EN ISO 7730 zu finden [4]. So beträgt die maximale Luftgeschwindigkeit für Klassenräume in der Kategorie B im Sommer (Kühlperiode) 0,19 m/s, im Winter (Heizperiode) 0,16 m/s [4].
Entscheidend für den Turbulenzgrad ist die Lüftungsart bzw. Raumströmungsart und der Impuls mit dem die Luft in die Räume eingebracht wird. In Räumen mit Quellllüftung oder ohne maschinelle Lüftung ist der Turbulenzgrad deutlich geringer im Vergleich zu Mischlüftung. Unabhängig davon auf welche Weise die Luft in den Raum eingebracht wird, darf im Aufenthaltsbereich keine unzumutbare Zugluft auftreten (ASR A3.6) [11]. Beim Lüften mit Fenstern oder mit einem Schachtlüftungssystem ist es im Winter aufgrund niedriger Außentemperaturen nicht möglich, dauerhaft und gleichzeitig eine akzeptable Luftqualität und thermische Behaglichkeit sicherzustellen, siehe Untersuchungsergebnisse zur Fenster- und Schachtlüftung im Bericht zum Leitfaden.

Mindestluftwechsel

EnEV 2014 fordert, dass zum Zwecke der Gesundheit der erforderliche Mindestluftwechsel sichergestellt ist. Anhaltswerte für Mindestluftwechselzahlen können der DIN EN 12831 entnommen werden. Für Klassenräume liegt die Mindestluftwechselzahl n_{min} bei 2,0 h^{-1} [35]. Für die belegungsfreie Zeit beträgt der laut DIN EN 13779 und DIN EN 15251 empfohlene

Mindestluftwechsel 0,1 l/s*m² bis 0,2 l/s*m², dies entspricht 0,36 m³/h*m² bis 0,72 m³/h*m²[5,6].
Durch die Installation neuer Fenster bei Modernisierungen werden diese Werte deutlich unterschritten. Das Gebäude ist dann als nahezu dicht anzusehen.

1.4 Lüftungssysteme

Im Fall grundlegender Sanierung oder Neubau einer Schule ist das Lüftungssystem nach den unterschiedlichen Ausgangsdaten (z.B. bauliche Voraussetzungen, Standortbedingungen etc.) zu betrachten. Im Folgenden sollen modellhaft Empfehlungen für das planerische Vorgehen aufgezeigt werden. Für jeden der folgenden Schulbautypen gilt es, das passende Lüftungssystem und Lüftungskonzept unter Berücksichtigung funktionaler Kriterien und zur Sicherstellung gesundheitlich hygienischer Anforderungen sowie Behaglichkeitsanforderungen auszuwählen.

Neubau:	Schulgebäude, die neu geplant und errichtet werden
Bestandsgebäude:	bereits existierende Schulgebäude
Bestandsgebäude: (Denkmalschutz)	bereits existierende Schulgebäude mit Denkmalschutzanforderungen

Bei Lüftungskonzepten mit maschinellen Lüftungssystemen sind folgende baulich, funktionale Kriterien bezüglich der Installation von Lüftungsanlagen zu beachten und zu prüfen:

- statische Eigenschaften der Außenwand des Daches und der Decken
- ausreichende Platzverhältnisse für Lüftungszentrale/n und Lüftungskanäle
- Deckenhöhe

Grundsätzlich werden Lüftungssysteme in freie, maschinelle und hybride Systeme (Kombination aus freier und maschineller Lüftung) unterteilt. Abbildung 1 zeigt eine Systematik zur Unterteilung verschiedener Lüftungssysteme. Zur freien Lüftung gehört die Fensterlüftung und Schachtlüftung. Bei maschineller Lüftung können dezentrale Geräte mit ihren vielfältigen Ausführungsvarianten und zentrale RLT-Anlagen unterschieden werden. Hybride Lüftungssysteme beinhalten eine Kombination aus maschineller und freier Lüftung, wobei die maschinelle Lüftung nur einen Teil des erforderlichen Luftvolumenstroms abhängig von den Außenluftzuständen zur Verfügung stellt.

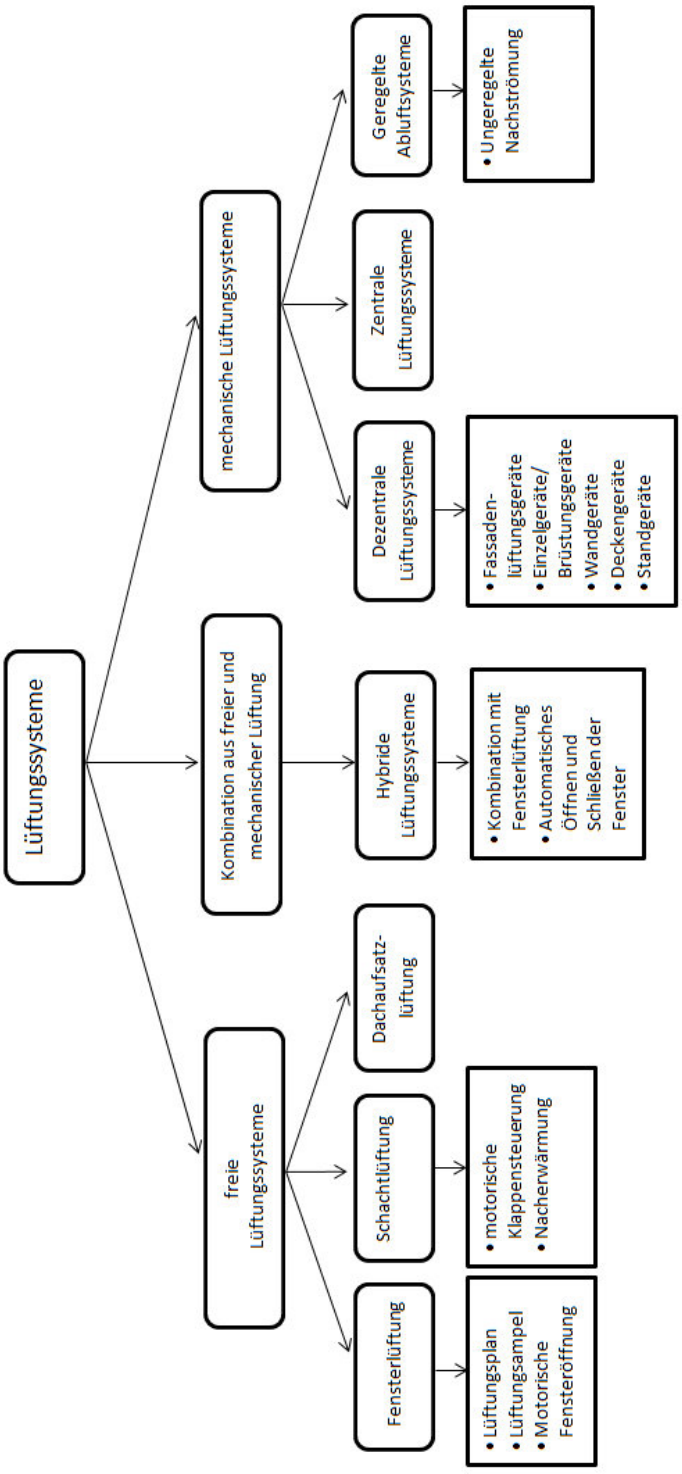

Abbildung 1: Lüftungssysteme

2 Lüftungskonzepte

Die technische Gebäudeausrüstung ist nach Stand der Technik und unter Einhaltung nationaler Regelwerke und Leitlinien zu planen und auszuführen (ausführliche Informationen sind dem Bericht zum Leitfaden dem Kapitel: Normative Vorgaben, Richtlinien und Empfehlungen zu entnehmen). Öffentliche Investitionen folgen stets dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Sparsamkeit. Maschinelle und freie Lüftungskonzepte müssen deswegen optimal für den jeweiligen Schulbautyp ausgewählt und angepasst sein.

2.1 Freie Lüftung

Das Prinzip der freien Lüftung ist dadurch gekennzeichnet, dass der Lufttransport ohne den Einsatz von technischen Geräten erfolgt. Der Luftaustausch erfolgt durch Druckdifferenzen oder Dichtedifferenzen. Diese treten auf Grund von Temperaturdifferenzen und Wind auf. Aufgrund von vielen Einflussfaktoren ist mit der freien Lüftung kein definierter Luftwechsel möglich. Thermische Behaglichkeit und hygienisch unbedenkliche Raumluftqualität zur gleichen Zeit kann bei niedrigen Außentemperaturen durch freie Lüftung in Räumen mit hoher Belegungsdichte nicht sichergestellt werden [36,37]. So hat eine gute Raumluftqualität bei niedrigen Außentemperaturen eine Absenkung der Raumlufttemperatur zur Folge. Wenn thermische Behaglichkeit sichergestellt werden soll, verschlechtert sich die Luftqualität [36,37]. Die CO_2-Konzentration liegt schnell im hygienisch inakzeptablen Bereich. Bei Einhaltung einer hygienisch unbedenklichen Luftqualität (CO_2 < 1000 ppm) sind Luftvolumenströme von ca. 30 m³/h und Person erforderlich. Bei freier Lüftung ergibt sich bei diesem Luftvolumenstrom ein hoher Heizenergiebedarf, der hohe Energiekosten zur Folge hat.

2.1.1 Fensterlüftung

Fensterlüftung ist die einfachste und am weitesten verbreitete Form der freien Lüftung. Bei der Öffnungsart der Fenster wird in Drehfenster (vertikale Drehachse) bzw. Dreh-Kipp-Fenster (vertikale und horizontale Drehachse) unterschieden. Je nach Öffnungsart variiert der Luftaustausch. Für eine Stoßlüftung mit einem quantitativ deutlichen Luftwechsel kommen weit zu öffnende Drehfenster (vertikale Drehachse) in Betracht. Zum Dauerlüften im Sommer und der Übergangszeit sind Kippfenster und zu öffnende Oberlichter sinnvoll.

Beim Lüften über Fenster muss die Abhängigkeit von den Wetterbedingungen berücksichtigt werden. Bei Schnee/Regen oder Wind ist es nicht immer möglich die Fenster vollständig z.B. für eine Stoßlüftung zu öffnen.

Lüften über Kippfenster ist auch bei Schnee, Regen, Wind und vor allem in der Heizperiode möglich. Die einströmende kalte Luft fällt zu Boden und bildet eine Frischluftschicht, dabei vermischt sie sich mit der Raumluft. Die frische Luft steigt an Wärmequellen aufgrund des thermischen Auftriebs nach oben und verdrängt dabei die verbrauchte, mit Verunreinigungen angereicherte Luft. In [20] heißt es, dass die Raumströmung bei dieser Art der Lüftung (Fenster in Kippstellung) einer Quellluftströmung entspricht. Die Luftgeschwindigkeiten bei der Quellluftströmung sind niedrig (< 0,15 m/s), so dass Zugerscheinungen in der Regel nicht auftreten. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen kann es trotz niedriger Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Fenster ziehen und zu kalt sein. Ausführliche Informationen zu Fensterlüftung sind im Bericht zum Leitfaden im Kapitel „Freie Lüftung" zu finden. Da die Öffnungsfläche bei gekippten Fenstern gering ist, kann durch den geringen Luftwechsel in belegten Klassenräumen keine akzeptable Raumluftqualität allein durch die Kippfenster sichergestellt werden. Kippfenster ermöglichen nur einen Teil des erforderlichen Luftwechsels. Für automatisierte Fensterlüftungskonzepte (Hybrid Lüftung) sind Kippfenster gut geeignet.

Aus energetischer Sicht ist Fensterlüftung unabhängig von der Lüftungsart (Stoßlüftung, Kipplüftung) im Winter ungeeignet. Um die Wärmeenergie-verluste die durch geöffnete Fenster entstehen zu reduzieren, ist eine

automatische Abschaltung der Heizung, wenn Fenster geöffnet werden, notwendig. Bei Kippfenstern wird es dann unbehaglich. Simulationsuntersuchungen haben gezeigt, dass der Energieverlust bei Fensterlüftung, wenn der CO_2-Gehalt < 1000 ppm eingehalten werden soll, größer ist als der Energiebedarf einer RLT-Anlage zur Sicherstellung derselben Luftqualität, siehe Kapitel 5. (ausführliche Ergebnisse können im Simulationsbericht eingesehen werden).

CO_2-Ampeln bzw. Anzeigen

CO_2-Ampeln oder digitale Anzeigen in Unterrichtsräumen geben visuell (und ggf. akustisch) Auskunft über die CO_2-Konzentration. Sie können im Rahmen von Lüftungskonzepten sinnvoll sein, bei denen die Lüftung über manuell zu bedienende Fenster erfolgt. Nachteilig erweist sich, dass jüngere Schüler sich dadurch häufig ablenken lassen. Bei Lehrern ist eine zunehmende Ignoranz festzustellen. Zusätzlich ist die Frage zu klären, wie bei häufig ungünstigen Außenbedingungen gelüftet werden soll. Ist für die Zeit der Lüftung der Unterricht zu unterbrechen? Wie ist im Fall von Klassenarbeiten zu lüften?

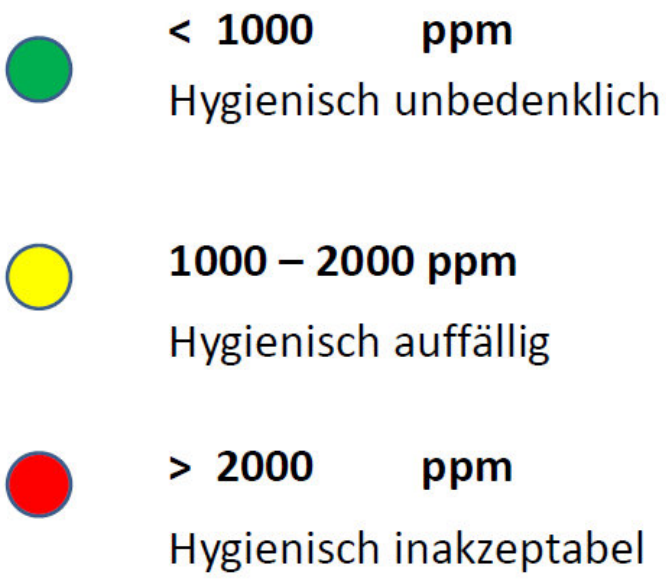

Abbildung 2: Beispiel einer optischen Anzeige der CO_2-Konzentration mittels einer Lüftungsampel [10]

Lärmbelastung:

Es ist zu beachten, dass bei geöffneten Fenstern Außenlärm nahezu ungemindert im Klassenraum wahrgenommen wird. Dabei ist nicht nur der Geräuschpegel zu beachten (maximal 35 dB(A) [26, 40]) sondern auch einzelne Geräusche können schnell als störend im Unterricht empfunden werden. Werden die Fenster dann geschlossen, können die Grenzwerte für die Luftqualität und Behaglichkeit nicht eingehalten werden.

2.1.2 Schachtlüftung

Schachtlüftung ist eine weitere Form der freien Lüftung. Hierfür sind ein oder mehrere vertikale Lüftungsschächte erforderlich. Voraussetzung für eine effektive Lüftung sind ausreichend hohe Schächte, Temperaturdifferenzen sowie ein widerstandsarmer Strömungsweg von der Zuluftöffnung bis zum Schachtende [19].

Ältere Schulen die zwischen 1900 bis kurz nach dem zweiten Weltkrieg erbaut wurden, verfügten oft über derartige Schachtlüftungssysteme.

Die vielen Einflussfaktoren der freien Lüftung haben auch hier zur Folge, dass kein definierter Luftwechsel möglich ist. Durch große Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen können im Winter hohe Luftvolumenströme entstehen. Sind im Sommer die Außenluft- und Raumlufttemperatur ähnlich, findet kein ausreichender Luftaustausch statt. Ist es im Sommer außen wärmer als innen, kehrt sich die Bewegungsrichtung der Luft um und warme Luft dringt durch den Schacht ein.

In zwei Schulgebäuden wurden Schachlüftungssysteme untersucht, siehe Kapitel „Schachtlüftung in Schulen“ im Bericht zum Leitfaden.

Im Sommer wurden Effekte wie Strömungsumkehr und verminderte Durchlüftung festgestellt. Im Winter konnte durch die Einbringung der kalten Luft die thermische Behaglichkeit nicht eingehalten werden. Um die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit zu erfüllen, muss im Winter die einströmende Luft erwärmt werden [52,53]. Die Installation von Lufterwärmern erhöht den Strömungswiderstand so weit, dass die Funktion nicht sichergestellt ist.

Im Vergleich zu Fensterlüftung erfordert die Schachtlüftung einen zusätzlichen baulichen und technischen Aufwand und bringt keine wesentlichen Vorteile gegenüber Fensterlüftung. Die Nachteile der freien Lüftung bleiben weiterhin bestehen.
Aus diesem Grund wird Schachtlüftung im Folgenden nicht weiter betrachtet.

2.2 Maschinelle Lüftung

Die Anforderungen der EnEV in Bezug auf die Luftdichtheit der Gebäudehülle zur Minimierung der Transmissionswärmeverluste haben zur Folge, dass so gut wie kein Luftwechsel in Innenräumen aufgrund von Undichtigkeiten oder Fugen in der Gebäudehülle möglich ist. Somit ist lediglich das Lüften mit Fenstern oder durch eine Lüftungsanlage möglich. In der Heizperiode ist das Lüften mit Fenstern aus energetischer Sicht nicht zufriedenstellend. Es ist keine Wärmerückgewinnung möglich, daher geht Energie verloren. Das Lüften mit Fenstern ist auch nicht ausreichend, um unter Einhaltung von Behaglichkeitsanforderungen eine gesundheitlich hygienisch notwendige Luftqualität sicherzustellen.
Maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung verursacht geringere Energiekosten und kann gleichzeitig bei definierten Luftvolumenströmen eine hygienisch unbedenkliche Luftqualität und thermische Behaglichkeit sicherstellen. Ein Vergleich der Energiekosten maschineller und freier Lüftung ist in Kapiteln 5 und 6 beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung ist im Simulationsbericht zu finden.

<u>Regelung der RLT-Anlagen</u>
Für die Steuerung und Regelung von raumlufttechnischen Anlagen ist eine bedarfsgerechte Auslegung der Regelung erforderlich. Der Luftvolumenstrom ist in Abhängigkeit von der Verunreinigung der Raumluft, der Anwesenheit von Personen im Klassenraum in Verbindung mit einer Zeitsteuerung zu regeln. Als Eingangssignal wird die CO_2-Konzentration als wichtigste Verunreinigung bzw. Emission in Klassenräumen empfohlen. Folgende Parameter werden empfohlen:

a. Die Lüftungsanlage soll während der Belegungszeit den Luftvolumenstrom in Abhängigkeit von der CO_2-Konzentration so regeln, dass 1000 ppm (Absolutwert) im Innenraum eingehalten werden. (Hinweis: Im Falle einer zusätzlichen Lüftung über Fenster, reduziert die Lüftungsanlage automatisch in Abhängigkeit von der CO_2-Konzentration den Luftvolumenstrom.)
b. Bei Abwesenheit von Personen soll die Anlage sich in Betriebsbereitschaft befinden. Eine Aktivierung der Anlage erfolgt über Präsenzmelder.

c. Der Übergang in die Bereitschaft erfolgt, wenn keine Präsenz mehr erfasst wird und die CO_2-Konzentration im Innenraum nahe der Außenkonzentration liegt.
d. Vor Unterrichtsbeginn soll eine einstündige Spülung der Räume mit einem einfachen Luftwechsel erfolgen. Die Startzeit ist der Nutzung anzupassen.
e. Die Lüftungsanlage ist während der Heizperiode und bei Bedarf auch in der Kühlperiode, wenn die Fensterlüftung z.B. aufgrund des Umgebungslärms oder der Wetterbedingungen nicht möglich oder nicht ausreichend ist in Betrieb.
f. In der Kühlperiode ist die Möglichkeit einer Nachtauskühlung durch die Anlage vorzusehen.
g. Die Nachtauskühlung erfolgt ohne Wärmerückgewinnungssystem und ohne Nacherhitzer.
h. Für die Nachtauskühlung ist eine Regelung vorzusehen, die die Wärmelasten effektiv abführt. Aufgrund der thermischen Speichermasse des Gebäudes muss die Regelung gebäudespezifisch erfolgen. Zum Unterrichtsbeginn darf die Raumlufttemperatur jedoch nicht unter 20°C liegen.
i. Bei einer Kombination von maschineller Lüftung mit automatisierter Fensterlüftung (Hybrid Lüftung) sind die Regelungsparameter für die automatisierte Fensterlüftung zu verwenden, siehe Kapitel „Hybride Lüftung". Bei hybriden Lüftungskonzepten soll maschinelle Lüftung mindestens eine Grundlüftung sicherstellen.

<u>Koordination mit Brandschutz</u>

Die technischen Anlagen und Einrichtungen zum Brandschutz und die Lüftungsanlage sind aufeinander abzustimmen. Die Planung soll möglichst durch eine Firma erfolgen. Sie sollen möglichst von einer Firma gewartet und zusammen abgenommen werden.

Anforderungen an das Luftkanalnetz

Bei einer zentralen Be- und Entlüftungsanlage ist das Luftkanalnetz so aufzubauen, dass eine optimale Luftverteilung im Kanalnetz erzielt wird. Im Hinblick auf Druckverlust und Energiebedarf ist das Luftleitungssystem so kurz wie möglich zu planen. Die Druckverluste von einzelnen Bauteilen im Kanalnetzt sollen gemäß DIN EN 13779 normal bis niedrig sein (Tabelle 5) [5].

Tabelle 5: Beispiele für die Druckverluste von Bauteilen in Luftbehandlungseinheiten [5]

Bauteil	Druckabfall in Pa		
	Niedrig	Normal	Hoch
Luftleitungssystem Zuluft	200	300	600
Luftleitungssystem Fortluft	100	200	300
Heizregister	40	80	100
Kühlregister	100	140	200
Wärmerückgewinnungseinheit H3[a]	100	150	250
Wärmerückgewinnungseinheit H2-H1[a]	200	300	400
Befeuchter	50	100	150
Luftwäscher	100	200	300
Luftfilter F5-F7 je Filterstufe[b]	100	150	250
Luftfilter F8-F9 je Filterstufe[b]	150	250	400
HEPA-Filter	400	500	700
Gasfilter	100	150	250
Schalldämpfer	30	50	80
Luftdurchlass	30	50	100
Lufteinlass und -auslass	20	50	70

[a] Klasse H1-H3 nach EN 13053.

Die einzelnen Lüftungsstränge sowie einzelne Räume sollen entsprechend der Anforderungen regelbar sein. Die Ventilatoren sind genau zu dimensionieren und müssen stufenlos regelbar sein. Es muss eine druckgeführte Volumenstromregelung erfolgen, so dass immer nur der Druck, der am ungünstigsten Luftauslass erforderlich ist, aufgewendet wird. Vor Inbetriebnahme der Anlage ist eine Einregulierung durchzuführen und zu dokumentieren. Empfehlungen des Energetischen Pflichtenhefts zum Leitfaden fürs Nachhaltige Bauen sind zu beachten [45].

Monitoring

Das Monitoring muss genutzt werden, um Korrekturen innerhalb der Gewährleistungsfrist umzusetzen. Für 2 Jahre ist eine „systematische

Inbetriebnahme" durch die Errichter-Firma durchzuführen. Diese Leistung ist bereits bei der Auftragsvergabe zum Bau zu beauftragen.

Das optimale Zusammenwirken von RLT-Anlage, Sonnenschutzvorrichtungen, ggf. Fensteröffnungsmechanik und Heizung ist über Steuer- und Regelungstechnik und ggf. Automation einzuregeln.

Die für das Monitoring notwendige Messtechnik sowie eine Gebäudeautomation sind vorzusehen. Folgende Daten müssen aus der Anlage abrufbar sein. Dabei erfolgt die Erfassung und Aufzeichnung der Werte im 5 min Rhythmus:

- Sollwert der Zulufttemperatur
- Istwert der Zulufttemperatur
- Sollwert der Raumtemperatur
- Istwert der Raumlufttemperatur
- Zu- und Abluftvolumenstrom je Klassenraum
- Ablufttemperatur und rel. Feuchte je Klassenraum
- Sollwert der CO_2-Konzentration je Klassenraum
- Istwert der CO_2-Konzentration je Klassenraum
- Energieverbrauch der RLT-Anlage/n
- Betriebszeiten der RLT-Anlage/n
- Zustandsmeldung der Anwesenheitssensoren
- Fensterstellung (offen/geschlossen)

Die Datenausgabe aus der Anlage soll in einem gängigen Datenformat erfolgen, so dass die Daten mit einem Tabellenkalkulationsprogramm eines Office-Programms eingelesen und ausgewertet werden können.

<u>Wärmerückgewinnungssystem</u>

In Schulgebäuden wird bei zentralen RLT-Anlagen aus hygienischen Gründen keine regenerative Wärmerückgewinnung (Rotationswärmetauscher) eingesetzt. Es sind rekuperative energieeffiziente Wärmerückgewinnungs-systeme (Plattenwärmetauscher) oder KVS-Systeme für zentrale RLT-Anlagen vorzusehen. Bei dezentralen Lüftungsgeräten können zur Wärmerück-gewinnung sowohl Rotationswärmetauscher als auch Plattenwärmetauscher verwendet werden. Die Mindestanforderungen an den Wärmerückgewinnungs-grad gemäß EnEV (Klassifizierung H3 nach DIN EN 13053) sind einzuhalten,

siehe Tabelle 6 [54]. Die Empfehlungen der AMEV sind zu beachten. Laut AMEV ist der Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen bei den RLT-Anlagen mit Betriebszeiten größer 1.000 h/a mit der bestmöglichen Rückwärmezahl von > 0,8 in der Regel wirtschaftlich [42].

Tabelle 6: Wärmerückgewinnungsklassen nach DIN EN 13053 [55]

Klasse	$\eta_{e\,1:1}\,\mathbf{min}\,[\%]$
Klasse H1	≥ 71
Klasse H2	≥ 64
Klasse H3	≥ 55
Klasse H4	≥ 45
Klasse H5	≥ 36
Klasse H6	keine Anforderungen
ANMERKUNG: Die Werte gelten für ausgeglichene Massenströme (1:1). Die Klassen definieren die Qualität der WRG und haben einen starken Einfluss auf den thermischen Energieverbrauch. In nordischen Ländern sind höhere und in südlichen Ländern geringere Klassen gebräuchlich.	

Energieeffizienz

Die Energiekosten für den Betrieb von Ventilatoren haben einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtbetriebskosten. Die Mindestanforderungen bezüglich der Effizienzklasse gemäß EnEV sind einzuhalten. Die spezifische Ventilatorleistung (SFP) soll die Kategorie SFP 4 aus DIN EN 13779 nicht überschreiten, siehe Tabelle 7. [54]. Bessere Effizienzklassen (SFP 1 … 3) sind anzustreben.

Tabelle 7: Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung nach DIN EN 13779 [5]

Kategorie	P_{SFP} in $W \cdot m^{-3} \cdot s$
SFP 1	< 500
SFP 2	500 – 750
SFP 3	750 – 1 250
SFP 4	1 250 – 2 000
SFP 5	2 000 – 3 000
SFP 6	3 000 – 4 500
SFP 7	> 4 500

Anforderungen an den Lärmpegel der RLT-Anlagen

In Klassenräumen gelten hohe Anforderungen an den Schalldruckpegel. Gemäß VDI 2081 und DIN 4109 darf der Schalldruckpegel von RLT-Anlagen in Unterrichts- und Arbeitsräumen den Wert von 35 dB(A) nicht überschreiten [26,40].

Raumluftkonditionierung

Es erfolgt bisher keine Be- und Entfeuchtung und keine Kühlung der Luft. Somit können behagliche Raumbedingungen im Sommer nicht in jedem Fall eingehalten werden. Im Winter kann die Raumluftfeuchte unter die angegebenen Grenzwerte fallen. Raumlufttechnische Anlagen ohne Kühlfunktion und ohne geregelte Be- und Entfeuchtung dienen nur der Sicherstellung des erforderlichen Luftwechsels.

Schriftdokumente/Einweisung (zusätzliche Leistung)

a. Anlagenbeschreibung mit Funktionsbeschreibung und Regelkonzept
b. Betriebs-, Wartungs- und Bedienungsanleitungen mit allen für den Betrieb relevanten Angaben sowie Funktionsbeschreibungen sind zu erstellen und dem Auftraggeber zu übergeben.
c. Nach Fertigstellung der RLT-Anlage sind die Nutzer über den Betrieb der Anlage aufzuklären. Zu dem Lüftungskonzept ist eine Erläuterung für die Nutzer vorzulegen. Die Erläuterung enthält Informationen über die ordnungsgemäße Bedienung, Steuerung und Betrieb von Lüftungstechnik, Fenstern und Heizung.

d. Für den Hausmeister ist eine zusätzliche Anleitung mit den für ihn zugänglichen Funktionen anzufertigen. Der Hausmeister ist in diese Funktionen einzuweisen.

Hinweis: Die unter Schriftdokumente/Einweisung aufgeführten Leistungen sind zusätzliche Leistungen und müssen gemäß HOAI separat vergütet werden und als besondere Leistung mit ausgeschrieben werden. Dies ist auch bei der Ausschreibung der Installationsarbeiten zu berücksichtigen.

Bauform bei dezentralen RLT-Anlagen

Bei dezentralen Lüftungsgeräten ist die erforderliche Bauform mit dem Auftraggeber abzustimmen. Mögliche Beschädigungen durch Vandalismus sind durch konstruktive Maßnahmen zu verhindern. Deckengeräte befinden sich aufgrund ihres Einbauortes nicht in unmittelbarer Reichweite der Schüler im Vergleich zu anderen Ausführungen.

2.3 Hybride Lüftung

Als hybride Lüftung wird eine Kombination aus maschineller Lüftung und Fensterlüftung bezeichnet. Dabei kommen motorisch betriebene Fenster zum Einsatz. In Verbindung mit hybrider Lüftung wobei Grundlüftung z.B. über maschinelle Lüftung realisiert wird, werden Fenster automatisch angesteuert, so dass das Lüften über Fenster motorisch geregelt wird. Der Außenluftvolumenstrom wird so geregelt und angepasst, dass das Raumklima auf einem thermisch behaglichen Niveau gehalten wird. Beim automatischen Öffnen und Schließen der Fenster gelten dieselben Anforderungen an Raumluftqualität und Behaglichkeit wie bei jeder anderen Lüftungsmethode. Es kann sinnvoll sein, die Raumheizung bei geöffneten Fenstern eingeschaltet zu lassen, um die einströmende Außenluft vorzuwärmen. Eine Wärmerück-gewinnung wäre über das RLT-Gerät teilweise möglich. Ein derartiges Konzept muss genau ausgearbeitet werden und bei der Ausführung eng begleitet werden. Die Funktion ist durch ein Monitoring nachzuweisen.

Folgende Parameter sind bei der Regelung von hybriden Lüftungssystemen zu beachten [38]:

- Regelgrößen (Raumluftqualität, Raumlufttemperatur)
- Variable Eigenschaften der Raumströmung, Volumenströme, Zuluft-temperatur
- Störgrößen (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Außentemperatur, Niederschlag)
- Regelung der Heizung

Des Weiteren sind diverse Wechselwirkungen der Fensterlüftung mit weiteren Anforderungen zu berücksichtigen:

- Unfallverhütung
- Schlagregen
- Einbruchsicherheit
- Umgebungslärm
- Maschinelle Lüftungsanlage

Die Regelung der motorisch betriebenen Fenster gestaltet sich aufwendig, weil zum einen viele Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind und zum anderen, oftmals in der Heizperiode, thermische Behaglichkeit und hygienisch

unbedenkliche Raumluftqualität zur gleichen Zeit nicht sichergestellt werden können [36,37]. Im Sommer lassen sich motorisch betriebene Fenster energieeffizient zur Nachtauskühlung einsetzen, allerdings muss dazu eine Querlüftungsmöglichkeit vorhanden sein.

3 Festlegen eines Lüftungssystems

Die Wahl eines passenden Lüftungssystems hängt vom Schulbautyp, baulichen Gegebenheiten und funktionalen Kriterien ab. Die Kosten dafür setzen sich aus den Investitions- und Betriebskosten zusammen, die für jede Anlagenart bei der Planung zu bestimmen sind. Je nach vorliegenden baulichen Gegebenheiten kann im Sanierungsfall eine dezentrale Anlage die einzig geeignete Lösung darstellen. Grundsätzlich gilt für dezentrale Anlagen, dass sie höhere Betriebskosten im Vergleich zu zentralen RLT-Anlagen verursachen, siehe Kapitel „Wirtschaftliche Betrachtung maschineller Lüftung". Die Wartung dezentraler Lüftungsgeräte erfordert mehr Zeit- und Materialaufwand und kann nur außerhalb der Unterrichtszeit stattfinden, da sie direkt an den Geräten in den Klassenräumen durchgeführt wird. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es empfehlenswert beim Neubau von Schulgebäuden immer von vornherein zentrale RLT-Anlagen zu planen und bei der Planung den notwendigen Platzbedarf für Technikzentrale/n und Lüftungskanäle vorzusehen. Die Wartung zentraler RLT-Anlagen erfolgt in der Technikzentrale und ist nahezu unabhängig von der Unterrichtszeit durchführbar. Bei Bestandsgebäuden, die jeweils die Kriterien für beide Arten der RLT-Anlagen erfüllen, ist eine zentrale RLT-Anlage einer dezentralen vorzuziehen. Denkmalgeschützte Schulgebäude sind meistens für dezentrale Lüftungsgeräte ungeeignet, da die Fassade nicht verändert werden darf. Die Vorgehensweise bei der Festlegung eines Lüftungssystems sieht wie folgt aus:

Zunächst ist die Art des Vorhabens (Schulbautyp) zu bestimmen, dabei wird unterschieden nach:

- Neubau
- Bestandsgebäude
- Bestandsgebäude (Denkmalschutz)

In Abhängigkeit vom Vorhaben werden funktionale Kriterien zur Installation von Lüftungsanlagen untersucht, dabei handelt es sich um:

- statische Eigenschaften der Außenwand
- statische Eigenschaften des Daches und der Decken

- ausreichende Platzverhältnisse für Lüftungszentrale/n und Lüftungskanäle
- Deckenhöhe

Funktionale Kriterien sind sowohl für zentrale als auch dezentrale Lüftungssysteme zu prüfen. In Abbildung 3 ist ein Ablaufschema zur Auswahl eines passenden maschinellen Lüftungssystems für eine Bestandsschule dargestellt.

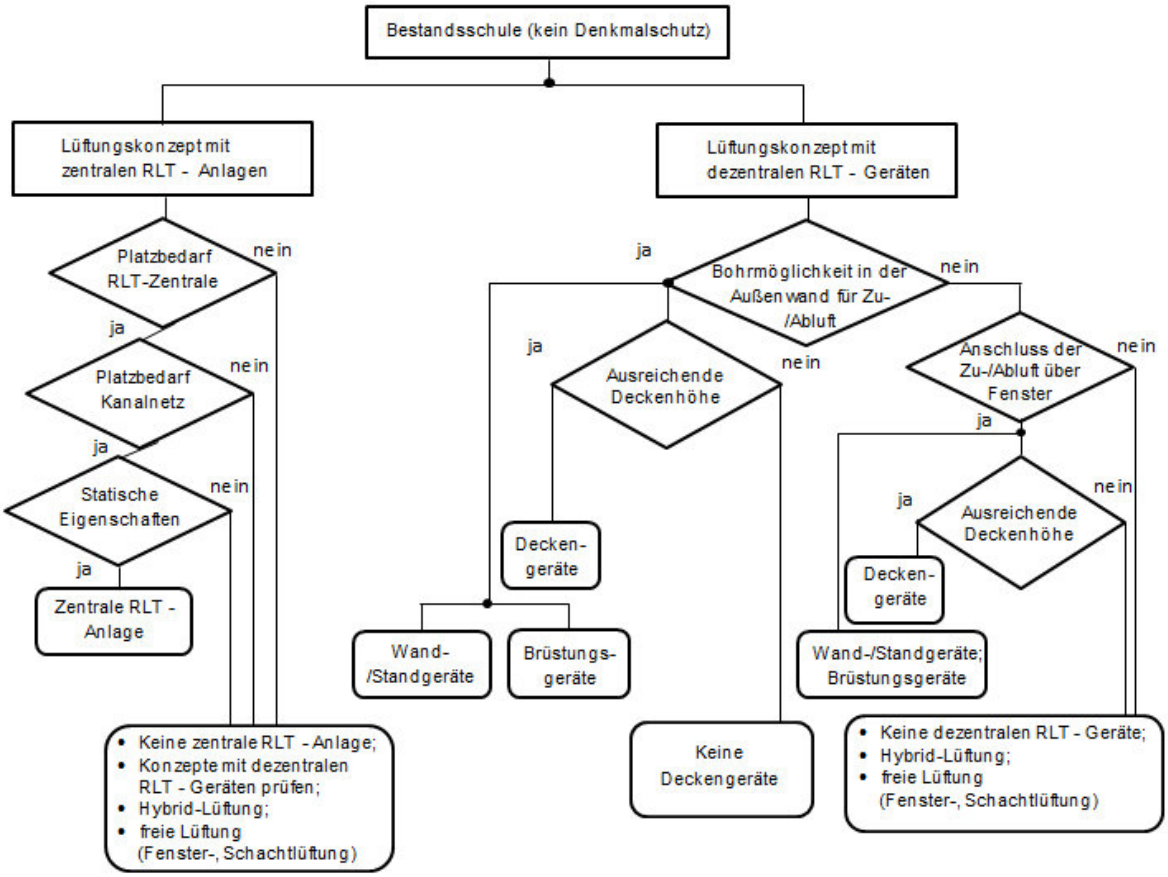

Abbildung 3: Ablaufschema zur Wahl eines maschinellen Lüftungssystems für Bestandsschule bei Sanierung

Bei einem zentralen Lüftungskonzept ist zu prüfen, ob folgende Bedingungen:

- Platzbedarf für RLT-Zentrale/n
- Platzbedarf für Kanalnetz
- Statische Eigenschaften des Aufstellortes

erfüllt sind. Wenn alle Kriterien zutreffen, können zentrale Lüftungskonzepte angewendet werden. Ist der Einbau eines zentralen Lüftungssystems nicht möglich, sind die Bedingungen für dezentrale Lüftungskonzepte zu prüfen.

Dezentrale Lüftungsgeräte werden direkt in die Räume eingebaut und benötigen eine Zu- und Abluftöffnung entweder in der Außenwand oder im Fenster. Ist mindestens eine Anschlussmöglichkeit realisierbar, können Wand-/Standgeräte oder Brüstungsgeräte für die Belüftung verwendet werden. Bei ausreichender Deckenhöhe, können auch Deckengeräte installiert werden. Die erforderliche Deckenhöhe ist herstellerspezifisch und hängt von dem jeweiligen Gerät ab.

Wenn der Einbau von dezentralen Lüftungsgeräten nicht möglich ist, sind als Sonderlösung hybride und freie Lüftungskonzepte zu prüfen. Bei hybriden Lüftungskonzepten stellt maschinelle Lüftung nur einen Teil des erforderlichen Volumenstroms zur Verfügung, z.B. nur Grundlüftung und kann deshalb kleiner dimensioniert werden. Die funktionalen Kriterien für maschinelle Lüftung sind gemäß Abbildung 3 zu prüfen. Für die Ansteuerung der Fenster sind Hinweise im Kapitel „Hybride Lüftung" zu beachten. Bei freien Lüftungskonzepten handelt es sich um Fenster- und Schachtlüftung. Hinweise zur Beschaffenheit der Fenster sind Kapitel „Hinweise zur Fensterlüftung" zu entnehmen. Schachtlüftung erfordert einen zusätzlichen baulichen und technischen Aufwand und bringt keine wesentlichen Vorteile gegenüber Fensterlüftung und wird in diesem Leitfaden nicht weiter betrachtet.

In Bestandsschulen mit Denkmalschutz ist der Einsatz von dezentralen Lüftungsgeräten häufig nicht möglich, weil die Fassade und die Fenster nicht verändert werden dürfen.

Für jedes Lüftungskonzept ist ein Nachweis zu erbringen, dass die Planungsgrundlagen eingehalten werden. Dazu gehören:

- Anforderungen an Raumluftqualität (CO_2-Konzentration < 1000 ppm)
- Anforderungen an thermische Behaglichkeit
- EnEV-Nachweis mit dem für eine akzeptable Luftqualität (CO_2-Konzentration < 1000 ppm) erforderlichen Luftwechsel

Für ausgewählte Lüftungssysteme ist eine Wirtschaftlichkeitsvorbetrachtung nach VDI 2067 durchzuführen. Nutzungsparameter sind DIN V 18599-10 zu entnehmen.

3.1 Hinweise zur Fensterlüftung

Bei der Fensterlüftung sowie zur Beschaffenheit der Fenster sind die Vorgaben der ASR A3.6 sowie der GUV-V S1 zu berücksichtigen. Ferner ergeben sich bei der Fensterlüftung Wechselwirkungen mit weiteren Anforderungen an einen ordnungsgemäßen Schulbetrieb, die manuell oder technisch zu berücksichtigen sind: Unfallverhütung, Schlagregen, Einbruchsicherheit, Umgebungslärm. Es ist einzuplanen, dass die Fenster, die zur Stoßlüftung vorgesehen sind, den erforderlichen Luftwechsel ermöglichen (Größe, Ausrichtung der vertikalen Drehachsrichtung, ggf. Motorantrieb mit zentraler Steuerung). Sicherheit ist bei geöffneten Fenstern sicherzustellen.

Anforderungen an Fensterlüftung gemäß ASR A3.6 [11]

Die Fensteröffnungen sind so anzuordnen, dass eine ausreichend gleichmäßige Durchlüftung der Arbeitsräume sichergestellt ist. Dauer und Intensität des Luftaustausches bei freier Lüftung sind so zu gestalten, dass Zugluft möglichst vermieden wird (ASR A3.6) [11]. Vorgaben zur Öffnungsfläche zur Sicherung des Mindestluftwechsels sowie maximal zulässige Raumtiefen sind einzuhalten (ASR A3.6) [11].

Anforderungen der Unfallverhütungsvorschrift (GUV-V S1)[41]

Gemäß GUV-V S1 müssen Fenster so gestaltet sein, dass sie beim Öffnen und Schließen sowie in geöffnetem Zustand Schülerinnen und Schüler nicht gefährden. Folgende Maßnahmen werden empfohlen:

- gegen Herabfallen gesicherte Kipp- und Schwingflügel,
- Öffnungsbegrenzung bei Schwingflügeln,
- Sperrsicherung an Dreh-Kipp-Beschlägen,
- Vorrichtungen an Schiebefenstern, durch die der Schließvorgang so abgebremst wird, dass Personen nicht eingeklemmt werden können.

Trotz aller Maßnahmen zum Ausschluss jeglicher Gefährdung muss die vollständige Lüftungsfunktion bei Bedarf hergestellt werden können (GUV-V S1) [41]. Öffnungsbegrenzung hat eine Reduzierung des Außenluftvolumenstroms zur Folge.

3.2 Hinweise zur maschinellen Lüftung

Platzbedarf für zentrale RLT-Anlage/n

Ein wesentliches Kriterium für den Einbau zentraler RLT-Anlagen ist der erforderliche Platzbedarf. In Abhängigkeit vom Auslegungsluftvolumenstrom ist eine bestimmte Raumfläche und Raumhöhe im Installationsraum erforderlich. Richtwerte aus DIN EN 13779 sind in Abbildung 4 dargestellt.

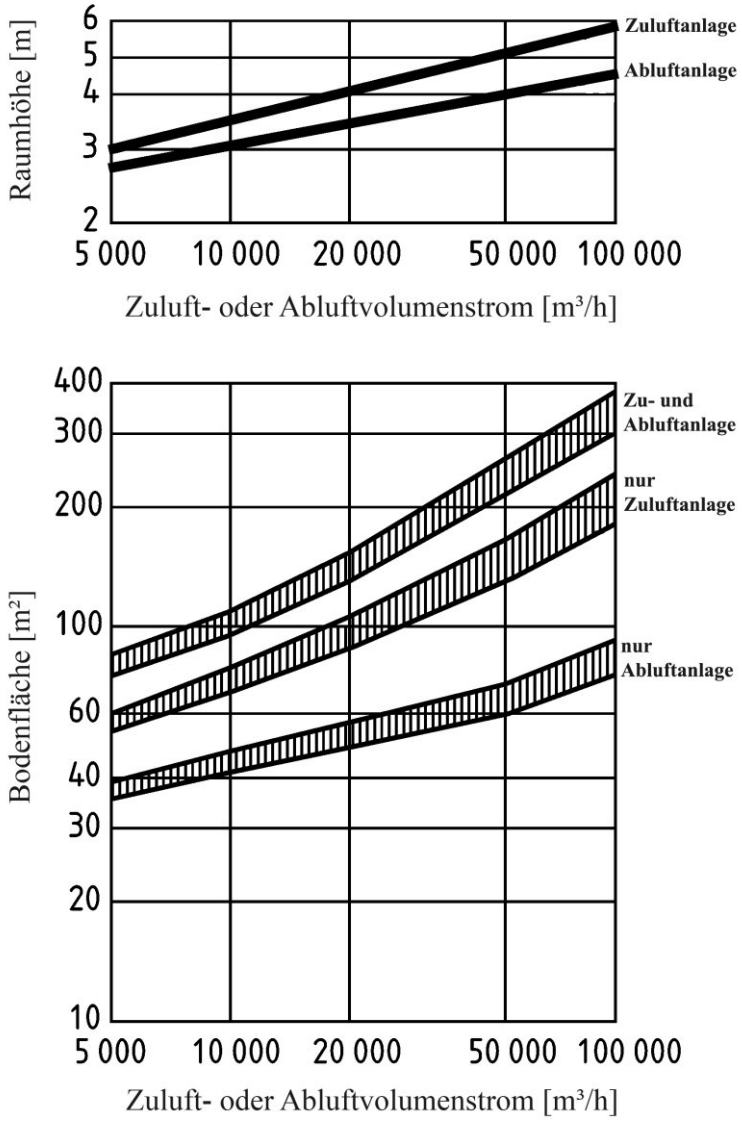

Abbildung 4: Raumbedarf für RLT-Anlagen nach DIN EN 13779 [5]

Anforderungen an Installationsräume gemäß Abbildung 4 sollen erfüllt sein, um leistungsfähige und leicht zu wartende Lüftungs- und Klimaanlagen zu ermöglichen [5]. Bei einem Luftvolumenstrom von 30 m³/h und Person ergibt

sich z.B. bei 400 Schülern ein Gesamtluftvolumenstrom von 12.000 m³/h. Laut DIN EN 13779 (Abbildung 4) ist für eine Zu- und Abluftanlage mit 12.000 m³/h eine Bodenfläche zwischen 100 m² - 120 m² und eine Raumhöhe von ca. 3,5 m erforderlich.

Bauausführung von RLT-Anlagen

Gesundheitlich zuträgliche Raum- und Atemluft wird weitgehend durch die hygienegerechte Planung von RLT-Anlagen bestimmt [23]. Ausführliche Beschreibung ist VDI 6022 zu entnehmen [23].

a. Sämtliche Komponenten an der RLT-Anlage müssen für die erforderlichen Inspektions- und Reinigungsarbeiten zugänglich sein.
b. Die Materialien, die Oberflächengestaltung und die geometrischen Formen der Anlagenkomponenten sollen einer Anhaftung und Ablagerung von Verunreinigungen vorbeugen.
c. Die RLT-Anlage muss im luftführenden Bereich aus Materialien bestehen, die keine gesundheitsgefährdenden Stoffe emittieren.
d. Alle luftführenden Komponenten sind nach Fertigung zu reinigen.
e. Der Transport und die Lagerung der Komponenten muss witterungsgeschützt, trocken und sauber erfolgen.
f. Die Verpackung und der Schutz der Komponenten darf erst unmittelbar vor der Montage entfernt werden.
g. Vor und während der Montageunterbrechungen sind die offenen Enden oder Stellen gegen Eindringen von Baustellenstaub und Feuchtigkeit zu schützen.
h. Nach dem Einbau müssen alle luftführenden Komponenten mit vertretbarem technischem Aufwand zu inspizieren, zu reinigen und gegebenenfalls zu desinfizieren sein.
i. Durch Kennzeichnungen an der Anlage sind Fehlbedienungen zu minimieren.

Wartung von RLT-Anlagen

Gemäß § 4 Abs. 3 ArbStättV sind RLT-Anlagen nach den in Absatz 1 festgelegten Intervallen sachgerecht zu warten [12]. Die Wartungsintervalle sind so festzulegen, dass die

- technischen,
- hygienischen und
- raumlufttechnischen (z. B. Einstellung und Zustand der Luftdurchlässe)

Eigenschaften und der sichere Betrieb der Anlage während der gesamten Betriebszeit sichergestellt sind [24]. Bei der Festlegung der Wartungsintervalle sind die Herstellerangaben zu berücksichtigen [24]. Weitere Hinweise sind VDI 6022 und AMEV zu entnehmen.

Ein Wartungsvertrag ist abzuschließen, dass der sichere Betrieb der RLT-Anlage während der gesamten Betriebszeit sichergestellt ist. Wartung mit eigenem qualifizierten Personal ist auch möglich. Die Filterwechsel haben gemäß Herstellerangaben zu erfolgen und sind zu dokumentieren. Dabei ist neben dem Hygieneaspekt auch der Vorteil beim Druckverlust der Anlage zu berücksichtigen. Dies spart Betriebskosten. Eine Checkliste für Hygienekontrollen bei RLT-Anlagen ist Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Checkliste für Hygienekontrollen bei RLT-Anlagen nach VDI 6022 [24]

		Tätigkeit	Gegebenenfalls Maßnahme	1 Monat	3 Monate	6 Monate	12 Monate	24 Monate
0	**Hygieneinspektion** *) gegebenenfalls 36 Monate (ohne Befeuchtung)							× *)
1	**Außenluftdurchlässe**							
	1.1	Auf Verschmutzung, Beschädigung und Korrosion prüfen	Reinigen und Instandsetzen				×	
2	**Dezentrale RLT-Geräte/Endgeräte**							
	2.1	Geräte mit Außenluftfilter stichpunktartig auf Verschmutzung prüfen	Luftfilter austauschen, Gerät reinigen				×	
	2.2	Geräte mit Sekundärluftfilter stichpunktartig auf Verschmutzung prüfen	Luftfilter austauschen, Gerät reinigen				×	
	2.3	Wärmeübertrager bei Geräten ohne Sekundärluftfilter stichpunktartig auf Verschmutzung prüfen	Reinigen			×		
	2.4	Luftfilter wechseln, Intervalle siehe Punkt 8.3 und Punkt 8.4					×	×
	2.5	Erhitzer, sensible Kühler, gegebenenfalls Kondensatwanne stichpunktartig auf Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Dichtheit prüfen	Reinigen und Instandsetzen			×		
	2.6	Luftkühler mit Entfeuchtung, Kondensatwanne und Ablauf während des Entfeuchtungsbetriebs, gegebenenfalls Tropfenabscheider stichpunktartig auf Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Dichtheit prüfen	Reinigen und Instandsetzen		×			
	2.7	Alle anderen von Sekundärluft durchströmten Bauteile stichpunktartig prüfen	Reinigen und Instandsetzen				×	
4	**Kammerzentralen/Gerätegehäuse**							
	4.1	Auf luftseitige Verschmutzung, Beschädigung und Korrosion prüfen	Reinigen und Instandsetzen				×	
	4.2	Auf Wasserniederschlag prüfen	Reinigen			×		
	4.3	Leergehäuse auf Verschmutzung, Beschädigung und Korrosion prüfen	Reinigen und Instandsetzen				×	
7	**Luftdurchlässe**							
	7.1	Luftdurchlässe, eingebaute Lochbleche, Maschendraht oder Siebe auf Verschmutzung, Beschädigung und Korrosion prüfen (Stichprobe)	Reinigen oder austauschen				×	
	7.2	Filtervliese stichprobenartig prüfen	auswechseln				×	
	7.3	Luftdurchlässe mit Induktion der Raumluft und Ablufteinlässe stichpunktartig auf Feststoffablagerungen prüfen	Reinigen				×	

	7.4	Reinigung der durch Sekundärluft durchströmten Bauteile					×	
8	**Luftfilter**							
	8.1	Auf unzulässige Verschmutzung und Beschädigung (Leckagen) und Gerüche prüfen	Auswechseln der betroffenen Luftfilter		×			
	8.2	Differenzdruck prüfen	Filterstufe auswechseln			×		
	8.3	Spätester Filterwechsel 1. Stufe					×	
	8.4	Spätester Filterwechsel 2. Stufe						×
9	**Luftleitungen**							
	9.1	Zugängliche Luftleitungsabschnitte auf Beschädigung prüfen	Instandsetzen				×	
	9.2	Innere Luftleitungsfläche auf Verschmutzung, Korrosion und Wasserniederschlag an zwei bis drei repräsentativen Stellen prüfen	Kanalnetz an weiteren Stellen inspizieren, über Reinigungserfordernis (nicht nur der sichtbaren Teilbereiche!) entscheiden.				×	
11	**Schalldämpfer**							
	11.1	Schalldämpfer auf Verschmutzung, Beschädigung und Korrosion prüfen	Instandsetzen oder erneuern; gegebenenfalls Abklatschproben				×	
12	**Ventilator**							
	12.1	Auf Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion prüfen	Reinigen und Instandsetzen, Wasserablauf prüfen			×		
13	**Wärmeübertrager (inclusive WRG)**							
	13.1	Sichtprüfung von Luft-Luft Plattenwärmeübertrager auf Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion	Reinigen, Instandsetzen			×		
	13.2	Sichtprüfung von Luft-Luft Rotationswärmeübertrager auf Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Dichtheit	Dichtungen einstellen, Reinigen, Instandsetzen			×		
	13.3	Sichtprüfung von direkt befeuerte Wärmeübertrager auf Dichtheit	Dichtungen ersetzen, Reinigen, Instandsetzen				×	
	13.4	Erhitzer: Auf Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Dichtheit prüfen	Reinigen und Instandsetzen, erneuern			×		
	13.5	Kühler: Register, Tropfenabscheider und Kondensatwanne auf Verschmutzung, Korrosion, Beschädigung und Dichtheit prüfen	Reinigen und Instandsetzen		×			
	13.6	Ableitung und Siphon auf Funktion prüfen	Reinigen und Instandsetzen		×			

Abnahme von RLT-Anlagen

Die Funktionstüchtigkeit von installierten RLT-Anlagen ist bei der Übergabe an den Betreiber nachzuweisen. DIN EN 12599 legt Prüfungen, Prüfverfahren und Messgeräte zur Feststellung der Gebrauchstauglichkeit von installierten Anlagen bei der Übergabe fest [44].

Der Umfang der an der Anlage durchzuführenden Funktionsprüfungen und -messungen kann laut DIN EN 12599 variabel sein [44]. Der Aufwand und die Kosten für die Messungen müssen in einem angemessenen Verhältnis zu den an die Anlage gestellten Anforderungen stehen [44]. Der Umfang der Funktionsprüfungen ist in DIN EN 12599 in vier Klassen unterteilt. Die Klasse der Funktionsprüfungen ist im Installationsvertrag festzulegen [44]. Die Funktionsprüfungen der RLT-Anlagen in Schulgebäuden sind nach Klasse A gemäß DIN EN 12599 vorzunehmen.

Die Prüfverfahren sind gemäß DIN EN 12599 in folgender Reihenfolge durchzuführen: [44]

a) Vollständigkeitsprüfungen
   - Vergleich der gelieferten Anlage mit der Spezifikation, sowohl hinsichtlich des Umfangs und Materials als auch, sofern erforderlich, hinsichtlich der Eigenschaften und Ersatzteile;
   - Überprüfung der Einhaltung behördlicher Vorgaben und festgelegter technischer Regeln;
   - Überprüfung der Zugänglichkeit der Anlage, besonders im Hinblick auf Betrieb, Reinigung und Wartung entsprechend EN 12097;
   - Überprüfung der Sauberkeit der Anlage nach EN 15780, auch des Zentralgerätes und der Anlage falls gesondert vereinbart;
   - Überprüfung, ob sämtliche für das Betreiben der Anlage notwendigen Unterlagen vorhanden sind;
   - Überprüfung durch ein Messprotokoll, ob ein Abgleich der Anlage erfolgt ist;
   - Überprüfung, ob die Luftdichtheitsprüfung durchgeführt wurde.
   - Nachweis der Hygieneerstinspektion nach VDI 6022

Eine Auflistung sämtlicher relevanter Unterlagen ist im Anhang A in DIN EN 12599 zu finden.

b) Funktionsprüfungen

Zweck der Funktionsprüfung ist der Nachweis der Betriebsfähigkeit der Anlage bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen in Übereinstimmung mit einschlägigen technischen Regeln und der Spezifikation [44].

Mit der hier aufgelisteten Prüfung kann festgestellt werden, ob die einzelnen Elemente der Anlage wie Filter, Ventilatoren, Wärmetauscher, Jalousieklappen, Brand- und Rauchschutzklappen, Luftdurchlässe, Mischkammer, Luftleitungssystem, Regeleinrichtungen und Schaltschränke ordnungsgemäß eingebaut wurden [44].

Bei den Regeleinrichtungen ist eine stichprobenartige Prüfung der automatischen Regelfunktionen und Verriegelungen in verschiedenen Betriebszuständen bei unterschiedlichen Sollwerten durchzuführen [44]. Die Regelfunktionen sind zu prüfen bei:

- Raumtemperatur
- Anfahrschaltung;
- Frostschutzfunktionen;
- Volumenstrom;
- Wärmerückgewinnungssystemen;
- Schnittstellen mit Brandschutzsystemen;
- Brandschutzklappen (Auslösen und Meldung).

c) Funktionsmessungen

Mit den Funktionsmessungen wird nachgewiesen, dass die Anlage die vereinbarten Bedingungen erfüllt und die entsprechenden Sollwerte erbringt [44]. Eine vollumfängliche Prüfung durch Messungen, wie hier dargestellt ist sehr aufwändig und wird nur in Zweifelsfällen erforderlich sein. Durch eine sorgfältige Planung im Vorfeld und durch eine gewissenhafte Ausführung kann die ordnungsgemäße Funktion sichergestellt werden.

Folgende Funktionsmessungen können bei RLT-Anlagen erforderlich sein:

1. Messungen an der RLT-Anlage:

- Strom- und Leistungsaufnahme des Motors
- Volumenstrom (Zuluft und Abluft)

- Lufttemperatur (Zuluft und Abluft)
- Druckabfall im Filter

2. Messungen im Luftleitungssystem

- Prüfung der Dichtigkeit des Luftleitungssystems

3. Messungen im Raum

- Zuluftstrom
- Abluftstrom
- Zulufttemperatur
- Luftfeuchte
- A-bewerteter Schalldruckpegel im Raum
- Raumlufttemperatur im Aufenthaltsbereich (Messung mit thermischen Lasten gemäß Auslegung)
- Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich (Messung mit thermischen Lasten gemäß Auslegung)

Der Umfang der Messungen ist nach geforderter Klasse gemäß DIN EN 12599 durchzuführen [44].

d) Sondermessungen

Sondermessungen sind bei Bedarf gesondert zu vereinbaren.

e) Bericht

Bei der Übergabe der Anlage muss ein vollständiger Bericht dem Auftraggeber ausgehändigt werden. Der Übergabebericht ist wie folgt zu erstellen:

- allgemeiner Teil
- Inspektionsbericht zur Vollständigkeitsprüfung
- Inspektionsbericht zur Funktionsprüfung
- Bericht zu den Sondermessungen
- Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Weitere Informationen sind DIN EN 12599 zu entnehmen [44].

Hinweise für dezentrale RLT-Anlagen

Bei dezentralen RLT-Anlagen bzw. Geräten ist folgendes zu beachten [30]:

a. Der Zusatzaufwand für luftdichten Fugenabschluss ist zu berücksichtigen.
b. Es gelten dieselben Anforderungen an den Schalldruckpegel wie bei zentralen RLT-Anlagen, der Wert von 35 dB(A) ist einzuhalten
c. Wartungsdeckel in vandalismusgeschützter Ausführung
d. Sorgfalt bei gestalterischen Anforderungen an die Heizmittelzuleitungen, z. B. im Brüstungsbereich oder in Wandecken
e. Enge Abstimmung mit Architekt / Baufirmen nötig wegen Fassadeneinbindung (z.B. WDVS-Fassadenkonstruktion)
f. eine Aufschaltung der Datenpunkte auf die Gebäudeautomation, sodass eine zentrale Steuerung möglich ist.

4 Wirtschaftliche Betrachtung maschineller Lüftung

Eine ausführliche Beschreibung der wirtschaftlichen Betrachtung ist im Bericht zum Leitfaden zu finden. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse dargestellt. Die wirtschaftliche Betrachtung wurde am Beispiel einer Schule (SK-Berlin) mit 28 maschinell belüfteten Klassenräumen für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren durchgeführt. Die Berechnung der Kosten beruht auf dem dynamischen Verfahren gemäß VDI 2067.

Die Kosten sind unterteilt in:

- kapitalgebundene Kosten (Investitionskosten)
- verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten) und
- betriebsgebundene Kosten (Wartungs-/Instandhaltungskosten)

Für die Berechnung der Kosten wurden folgende Aufzinsungsfaktoren zugrunde gelegt, siehe Tabelle 9. Die Auswertung der Preise für Wärme und Strom der letzten 20 Jahre, hat eine Preissteigerung von ca. 3,8 %/a und 2,6 %/a ergeben. Der Kalkulationszinssatz wird mit 7 %/a und die Inflation mit 2 %/a angenommen.

Tabelle 9: Aufzinsungsfaktoren für wirtschaftliche Betrachtung

Betrachtungszeitraum	20 Jahre
Kalkulationszinssatz	7 %
Inflationsrate kapitalgebundene Zahlungen	2 %
Inflationsrate verbrauchsgebundene Zahlungen (Wärme)	3,8 %
Inflationsrate verbrauchsgebundene Zahlungen (Strom)	2,6 %
Inflationsrate betriebsgebundene Zahlungen	2 %
Inflationsrate Zahlungen für Instandhaltung	2 %

Die finanzielle Betrachtung beinhaltet folgende Lüftungskonzepte:

- Variante 1: Fensterlüftung mit einem ausreichenden Lüftungsverhalten 30 m³/ (h Pers)
- Variante 2: Fensterlüftung, die ein nicht ausreichendes Lüftungs-verhalten aus der Realität repräsentiert

- Variante 3: Lüftungskonzept mit einer zentralen RLT – Anlage 30 m³/(h Pers)
- Variante 4: Lüftungskonzept mit dezentralen Lüftungsgeräten 30 m³/(h Pers)

In Abhängigkeit vom Lüftungskonzept und baulichen Gegebenheiten liegen die Investitionen für Lüftungsanlagen in Schulgebäuden in der folgenden Bandbreite [28,30]:

- Dezentrale Anlagen: 5.400 – 8.200 € pro Klassenraum
- Zentrale Anlagen: 5.600 – 8.750 € pro Klassenraum

Jährliche Kapitalgebundene Kosten für zentrale und dezentrale Lüftungskonzepte für die Beispielschule (SK Berlin) sind in Abbildung 5 dargestellt. Es sind keine großen Unterschiede zwischen zentraler und dezentraler Raumlufttechnik bei den Investitionskosten festzustellen.

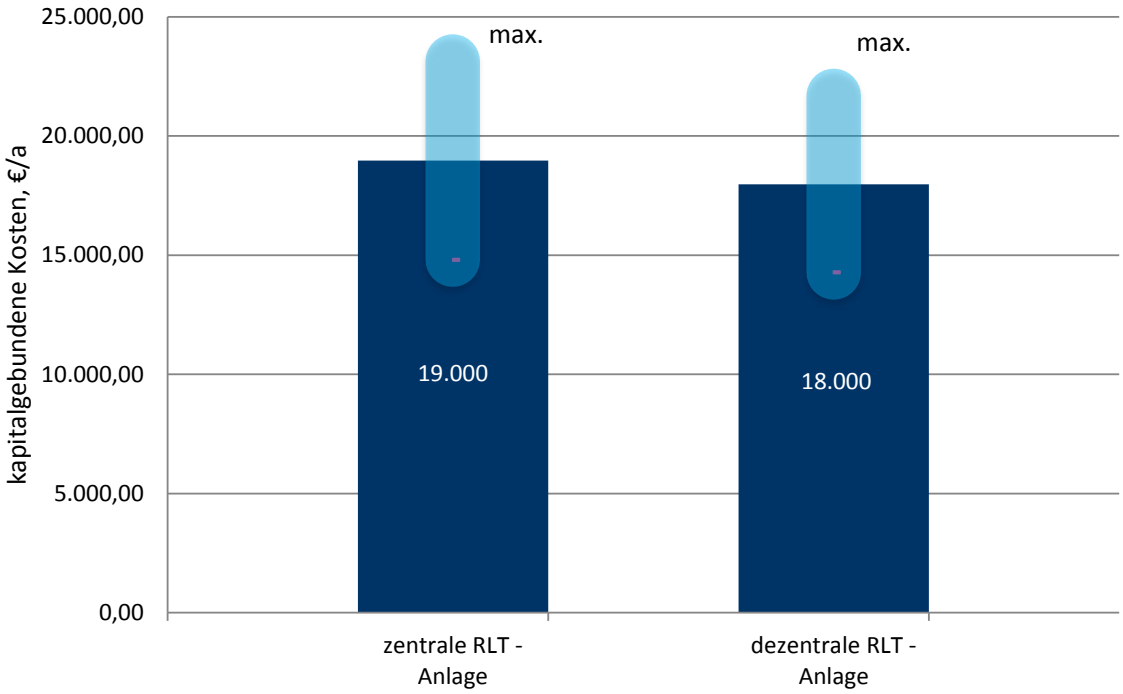

Abbildung 5: Jährliche kapitalgebundene Kosten (Bsp. SK-Schule Berlin)

Bei 19 allgemeinen Unterrichtsräumen ergeben sich bei 25 Schülern je Klassenraum insgesamt 475 Schüler. Demnach liegen die Kosten pro Schüler und Jahr zwischen 28 € und 51 €, siehe Abbildung 6.

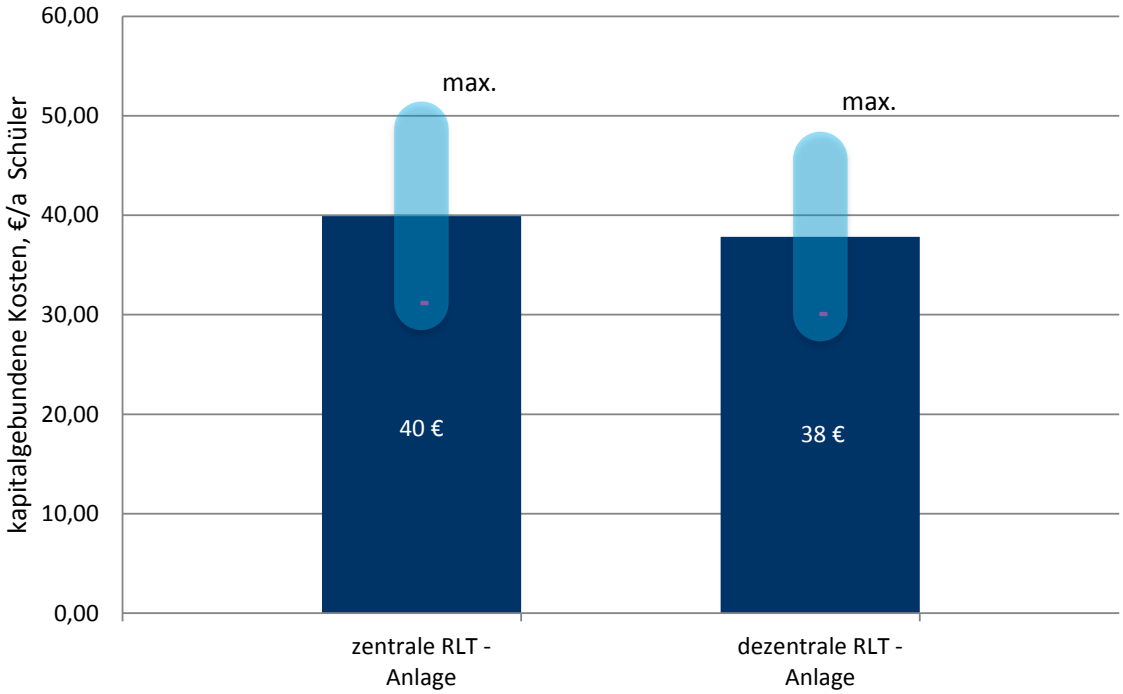

Abbildung 6: Kapitalgebundene Kosten pro Schüler und Jahr (Bsp. SK-Schule Berlin)

Den größten Teil an den Gesamtkosten raumlufttechnischer Anlagen haben die Betriebskosten. Mit Hilfe effizienter Ventilatoren und Wärmerückgewinnung lassen sich RLT-Anlagen zwar energetisch optimal betreiben und dadurch Energiekosten im Vergleich zur Fensterlüftung mit demselben Luftwechsel einsparen, siehe Abbildung 7, doch die anfallenden Wartungskosten neutralisieren den Kostenvorteil. Der große Vorteil gegenüber der freien Lüftung besteht darin, dass mit Hilfe maschineller Lüftung auch Behaglichkeitsanforderungen beim erforderlichen Luftvolumenstrom (30 m³/(h Pers)) sichergestellt werden. Mit freier Lüftung ist es nicht möglich bei niedrigen Außentemperaturen einen ausreichenden Luftwechsel unter behaglichkeitsgerechten Bedingungen sicherzustellen.

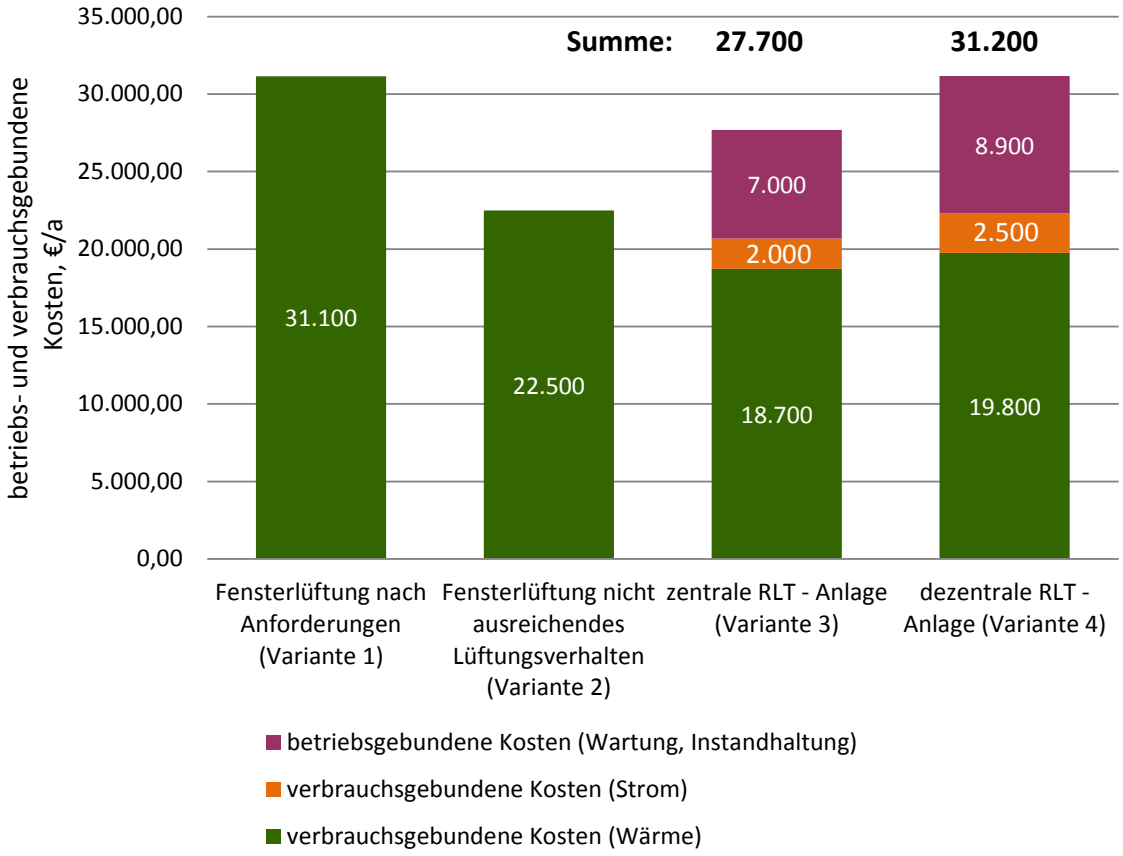

Abbildung 7: Jährliche Betriebs- und Verbrauchsgebundene Kosten (Bsp. SK Schule Berlin)

In Abbildung 7 sind Betriebs- und Verbrauchsgebundenen Kosten maschineller und freier Lüftung dargestellt. Verbrauchsgebundene Kosten wurden mit Hilfe einer Simulation ermittelt. Es ist zu erkennen, dass der Energieaufwand (Energieverluste) der Fensterlüftung mit einem für eine gute Raumluftqualität, (CO_2 ≤ 1000 ppm) notwendigen Luftwechsel (Variante 1) in der gleichen Größenordnung ist, wie der Energieaufwand zum Betrieb einer RLT-Anlage. Der Betrieb einer RLT-Anlage hat aber den Vorteil, dass nicht nur die gewünschte Luftqualität (CO_2-Gehalt ≤ 1000 ppm) sichergestellt wird, sondern auch die Behaglichkeitsanforderungen eingehalten werden. In der Variante 2 ist ein der Realität nachgeahmtes Lüftungsverhalten mit Fenstern abgebildet. Bei diesem Lüftungsverhalten ist die CO_2-Konzentration in Innenräumen hygienisch inakzeptabel (> 2000 ppm). Bei den maschinellen Lüftungssystemen ist zu beachten, dass der Wärme- und Strombedarf stark variieren kann. Der Wärmebedarf hängt im Wesentlichen vom Wärmerückgewinnungssystem ab.

Der Strombedarf wird von der gewählten Antriebstechnik und von dem Druckverlust im Kanalnetz bestimmt. Zentrale Lüftungssysteme haben ein verzweigtes Luftverteilsystem, dadurch ergeben sich hohe Druckverluste. Große Ventilatoren lassen sich aber effizienter betreiben als viele kleinere zusammen. Dezentrale Lüftungsgeräte, da sie in den meisten Fällen direkt in die Klassenräume eingebaut werden, benötigen kein komplexes Luftkanalnetz. Häufig sind aber mehrere Lüftungsgeräte pro Klassenraum notwendig. So hat jedes System Vor- und Nachteile. Anhand der Energiekosten für den Betrieb von RLT-Anlagen lässt sich keine generelle Aussage treffen, ob ein zentrales oder dezentrales RLT-System vorteilhafter ist.

Betriebs- und Verbrauchsgebundene Kosten pro Schüler und Jahr sind in Abbildung 8 zu sehen.

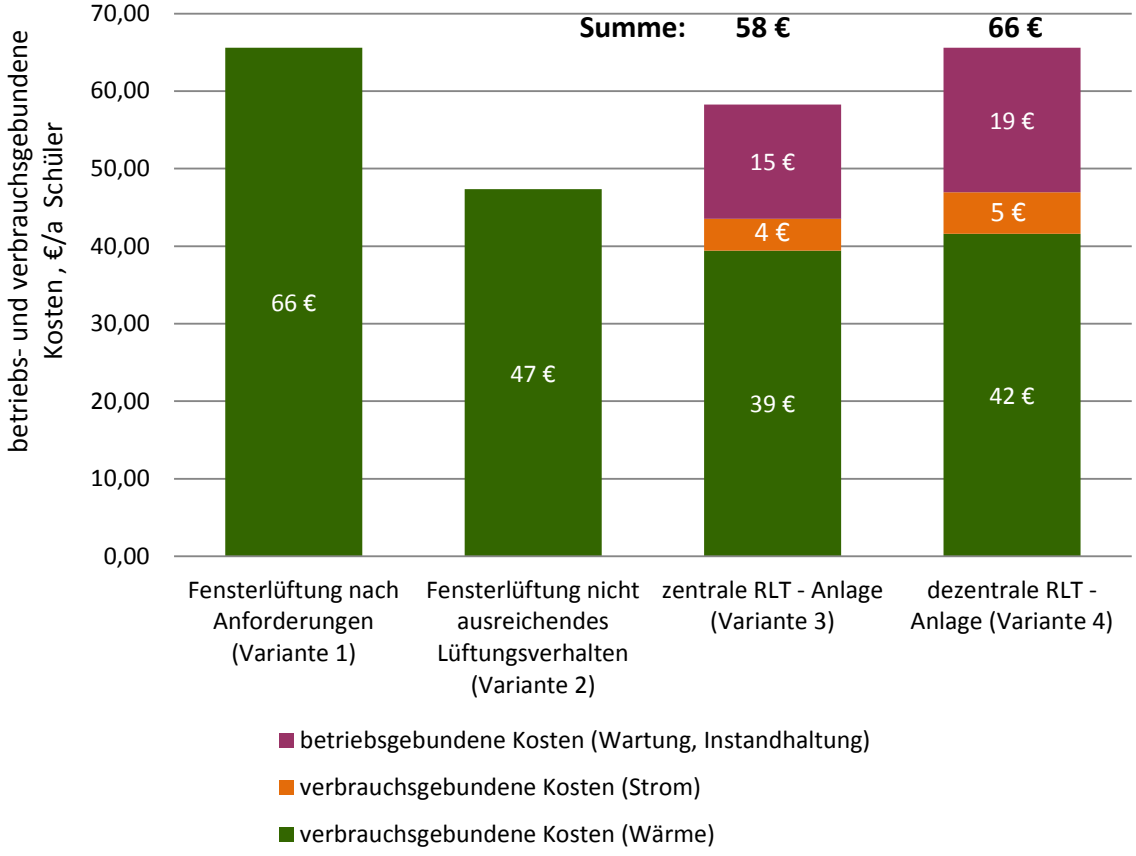

Abbildung 8: Betriebs- und Verbrauchsgebundene Kosten pro Schüler und Jahr (Bsp. SK Schule Berlin)

Kostenunterschiede zwischen zentralen und dezentralen Lüftungssystemen ergeben sich hauptsächlich bei den Wartungskosten (betriebsgebundene Kosten), siehe Abbildung 9. Viele kleine Lüftungsgeräte benötigen jeweils dieselbe Wartung wie eine große Lüftungsanlage, aufgrund eines höheren Zeit- und Materialaufwandes (Filter) kommen höhere Betriebskosten zustande. Für den Neubau von Schulgebäuden ist es daher immer vorteilhafter, eine zentrale Lüftungsanlage zu planen und schon von Anfang an den nötigen Platzbedarf vorzusehen. Beim Bestandsbau muss im Vorfeld geprüft werden, welche Art der Anlage installiert werden kann.

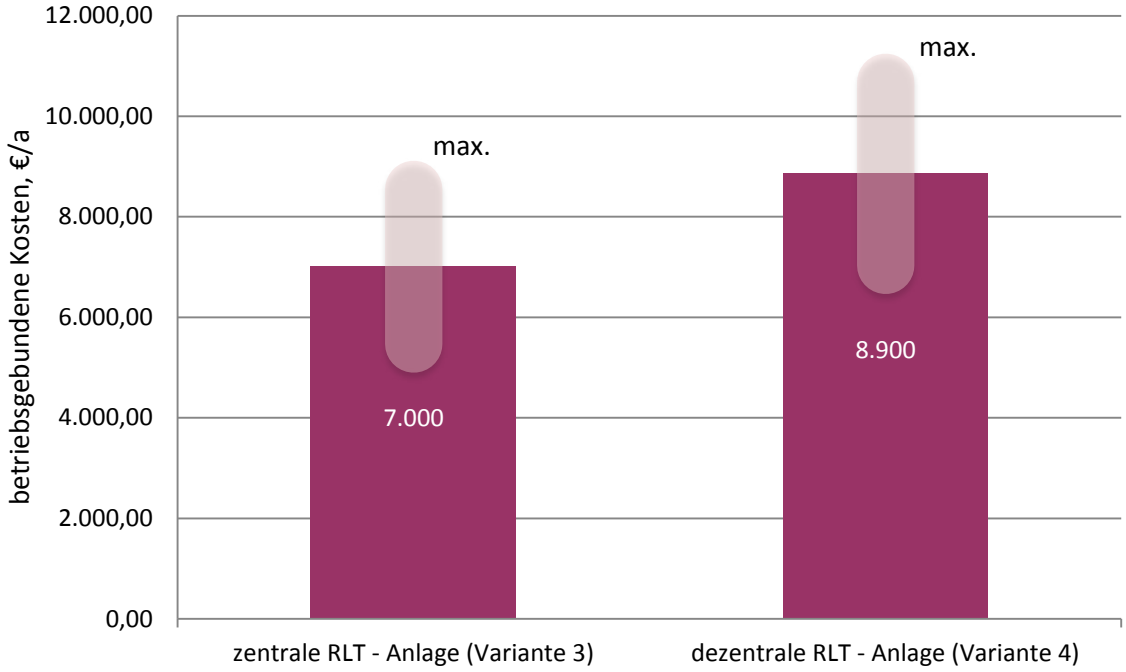

Abbildung 9: Jährliche betriebsgebundene Kosten (Wartung, Instandhaltung) (Bsp. SK Schule Berlin)

Umgerechnet pro Schüler (475 Schüler) liegen betriebsgebundene Kosten für maschinelle Lüftung in einer Bandbreite von 11 € bis 23 €, siehe Abbildung 10.

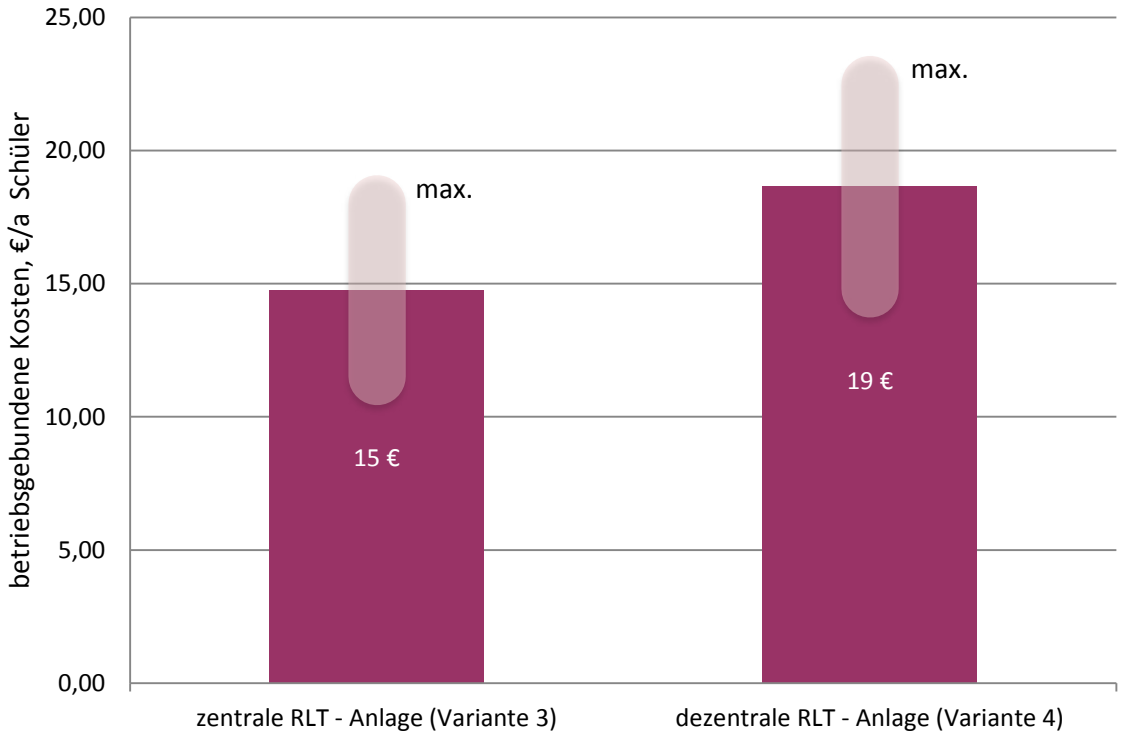

Abbildung 10: Betriebsgebundene Kosten pro Schüler und Jahr (Wartung, Instandhaltung) (Bsp. SK Schule Berlin)

Eine maschinelle Lüftungsanlage kann keinesfalls nur aus Sicht der Kosten betrachtet werden. Entscheidend ist in erster Linie der Nutzen einer RLT-Anlage, denn gute Raumluftqualität und Sicherstellung thermischer Behaglichkeit steigern die Leistungsfähigkeit der Lehrer und Schüler. In den Wintermonaten ist es nur mit Hilfe maschineller Lüftung möglich, erforderliche lerngerechte und behagliche Bedingungen in Klassenräumen zu schaffen. Die Raumlufttechnik ist genauso notwendig wie die Beheizung des Gebäudes. Diese dient zur Herstellung lerngerechter und behaglicher Raumlufttemperaturen und wird eingebaut, weil sie notwendig ist. Genauso ist auch die Luftqualität zu bewerten, die vor allem in Schulgebäuden sichergestellt werden muss, weil die Anforderungen an Lehrer und Schüler hoch sind.

Die Leistungsfähigkeit von Personen wird wesentlich von der Luftqualität beeinflusst. Zahlreiche Studien bestätigen, dass die Erhöhung der Außenluftzufuhr zu einer deutlichen Verbesserung der Leistungsfähigkeit führt. Ausführliche Informationen sind im Bericht zum Leitfaden im Kapitel

„Wirtschaftliche Betrachtung maschineller Lüftung" zu finden, im Folgenden ist das Wesentliche zusammengefasst.

In [31,32,33] ergab die Verdoppelung des Außenluftvolumenstroms eine Leistungssteigerung der Schüler zwischen 8 % - 14 %. Bei einer Absenkung der Raumlufttemperatur im Sommer um 1°C im Bereich von 25 °C bis 20 °C kann eine durchschnittliche Leistungssteigerung der Schüler von 2 % - 4 % erreicht werden [32,33].

In [47] wurde der Einfluss der CO_2-Konzentration auf die gesundheitlichen Beeinträchtigungen sowie die Leistungsfähigkeit der Schüler untersucht. Bereits ab 1000 ppm nimmt die Leistungsfähigkeit der Schüler kontinuierlich mit steigender CO_2-Konzentration ab, gesundheitliche Beschwerden wie Rachenreizungen, Reizung der Nase, Schnupfen, Hustenanfälle und tränende Augen treten häufiger auf [47].

In einer weiteren Studie [48] wurde der Zusammenhang zwischen Luftqualität (Lüftungsraten) und Leistungsfähigkeit der Schüler bei Mathematik-Tests und Lese-Tests untersucht. Insgesamt wurden Daten aus 50 Klassenräumen ausgewertet. Die Ergebnisse der Mathematik-Tests und Lese-Tests sind bei Luftwechselraten $n = 4{,}5\ h^{-1}$ deutlich besser als bei Luftwechselraten $n \leq 2{,}5\ h^{-1}$ [48]. Der durchschnittliche Luftwechsel in Klassenräumen mit freier Lüftung (Fensterlüftung) liegt in der Heizperiode zwischen 0,5 und 1,0 (siehe Kap. 5 „Simulation" und Messergebnisse im Untersuchungsbericht). Mittels Fensterlüftung kann in der Heizperiode unter Einhaltung von Behaglichkeitsanforderungen nicht einmal ein 2,5 facher Luftwechsel, der auch nicht ausreichend ist, sichergestellt werden.

In einer anderen Studie [49,50] wurde nachgewiesen, dass hohe CO_2-Konzentrationen Ermüdungserscheinungen hervorrufen, die sich in Wahrnehmungsstörungen, Störungen der Auge-Hand-Koordination, Aufmerksamkeitsstörungen, Konzentrationsabbau, Denkstörungen, Antriebsstörungen und Veränderungen des sozialen Verhaltens äußern. Bei der akzeptablen Obergrenze des CO_2-Gehalts der Atemluft bei intellektueller Arbeit wird in [49] auf die Pettenkofer-Zahl von 1000 ppm verwiesen.

Die Ergebnisse der Studien zeigen eindeutig, dass schlechte Luftqualität einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Schüler hat.

Ab 1000 ppm CO_2-Konzentration in der Atemluft vermindert sich die Leistungsfähigkeit, es treten Ermüdungserscheinungen und gesundheitliche Beeinträchtigungen auf. Mit weiter steigender CO_2-Konzentration verstärken sich die Symptome.

Schlechte Luftqualität vermindert auch die Leistungsfähigkeit der Lehrerinnen und Lehrer. Studien zur Leistungsfähigkeit der Lehrer bei schlechter Luftqualität wurden noch nicht durchgeführt, doch es gibt Studien, in denen die Leistungsfähigkeit der Beschäftigten bei der Bürotätigkeit untersucht wurde.

In [3] sind Ergebnisse der Studie (Pollution source control and ventilation improve health, comfort and productivity) beschrieben. Es wurde festgestellt, dass durch die Beseitigung einer Verunreinigungsquelle oder Vergrößerung der Luftwechselrate die Wirkung verschiedener Symptome des Sick Building Syndroms (SBS) vermindert und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Beschäftigten erhöht wurde [3]. Die Leistung bei typischer Bürotätigkeit (Schreiben von Texten, Rechnen und Korrekturlesen) verbesserte sich im gleichen Verhältnis, wie die Zahl der mit der Luftqualität unzufriedenen Personen reduziert wurde [3]. Die Verminderung der Zahl unzufriedener Personen um 10% hatte eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit von etwa einem Prozent zur Folge [3]. Der Verlust an Produktivität bei mäßiger Luftqualität, wie sie häufig in der Praxis vorzufinden ist, liegt im Vergleich zu sehr guter Luftqualität bei etwa 5% [3].

Aus Sicht der Produktivität bzw. Leistungsfähigkeit können die Beschäftigten in Büros mit den Lehrern in Schulen verglichen werden. Schlechte Luftqualität hat nicht nur bei Schülern sondern auch bei Lehrern eine Leistungsminderung zur Folge.

Die finanziellen Ausgaben pro Schülerin und Schüler im Jahr 2011 liegen im Bundesdurchschnitt bei 6000 €, dabei beträgt der Anteil für Lehrpersonal 4.800 € [51]. Für den Sachaufwand wurden 700 € und für die Investitionen 500 € ausgegeben [51]. Bei der Annahme, dass die Lehrerinnen und Lehrer aufgrund der schlechten Luftqualität eine Leistungsminderung von 5 % haben, entspricht dies bei 4.800 € einem Anteil von 240 € der jedes Jahr pro Schüler verloren geht, krankheitsbedingte Fehlzeiten des Lehrpersonals, die auch Folge einer schlechten Luftqualität sein können, sind hier nicht berücksichtigt. Die

Kostenanalyse einer maschinellen Lüftung am Beispiel einer realen Schule s.o, hat als Ergebnis bei einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren ca. 19.000 € (Abbildung 5) kapitalgebundene Kosten pro Jahr. Bei insgesamt 475 Schüler ergibt sich ein Anteil der kapitalgebundenen Kosten von ca. 40 € (Abbildung 6) pro Schüler und Jahr.

$$19.000€/\ 475\ Schüler\ = 40\ €/(a\ Schüer) \quad (1)$$

Die Energie- und Wartungskosten können vernachlässigt werden, weil die Energieverluste einer Fensterlüftung mit einem für eine gute Raumluftqualität (CO_2-Gehalt $\leq$ 1000 ppm) notwendigen Luftwechsel, sich auf dem gleichen Niveau befinden wie die Summe der verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten maschineller RLT-Anlagen, siehe Abbildung 7 und 8. Im Vergleich zum finanziellen Schaden der aufgrund der Leistungsminderung des Lehrpersonals infolge schlechter Luftqualität entsteht (240 €/a pro Schüler), sind die Kosten für eine Lüftungsanlage sechsmal niedriger (40 €/a pro Schüler). Die Kosten sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Kostenvergleich

Finanzieller Schaden durch Leistungsminderung des Lehrpersonals infolge schlechter Luftqualität		**Investition in maschinelle Lüftung**
Finanzielle Ausgaben für Lehrpersonal pro Schüler/in:	4800 €/a	----------
Leistungsminderung aufgrund schlechter Luftqualität:	5%	
	Finanzieller Schaden	**Investitionskosten**
	240 €/a (Schüler)	40 €/a (Schüler)
Gesamtkosten bei 475 Schülern:	114.000 €/a	19.000 €/a

Der finanzielle Mehraufwand beträgt bei insgesamt 475 Schülern ca. 114.000 €/a. Allein diese Summe, die einen Verlust an Produktivität des Lehrpersonals darstellt macht eine Lüftungsanlage mit ca. 19.000 €/a wirtschaftlich. Für die Beispielschule (SK Berlin) liegt die Investition für maschinelle Lüftung im Mittel bei 200.900 € für zentrale und 190.400 € für dezentrale RLT.

$7.150\ €/\text{Klassenraum} * 28\ \text{Klassenräume} = 200.900\ €$ (zentrale RLT) (2)

$6800\ €/\text{Klassenraum} * 28\ \text{Klassenräume} = 190.400\ €$ (dezentrale RLT) (3)

Bezogen auf den finanziellen Schaden durch schlechte Luftqualität von 114.000 €/a, ergibt sich sowohl für zentrale RLT als auch dezentrale RLT eine Amortisationsdauer von ca. eineinhalb Jahren (Tabelle 11).

$(200.900\ € + 20.700€/\text{a} + 7.000€/\text{a})/(114.000€/a + 31.100€/a) = 1{,}6\ Jahre$ (4)

$(190.400\ € + 22.300€/\text{a} + 8.900€/\text{a})/114.000€/a + 31.100€/a) = 1{,}5\ Jahre$ (5)

Tabelle 11: Amortisationsdauer

	Freie Lüftung (Fensterlüftung)	RLT-Anlage (zentral)	RLT-Anlage (dezentral)
Investition (Mittelwert)	--------	200.900 [€]	190.400 [€]
Energiekosten	31.100 [€/a]	20.700 [€/a]	22.300 [€/a]
Wartungskosten	--------	7.000 [€/a]	8.900 [€/a]
Finanzieller Schaden durch Leistungsminderung des Lehrpersonals infolge schlechter Luftqualität	114.000	--------	--------
Amortisationsdauer	--------	1,6 Jahre	1,5 Jahre

Aspekte wie Leistungssteigerung der Schüler, weniger Krankenstände des Lehrpersonals und der Schüler und gesteigertes allgemeines Wohlbefinden sind hier noch nicht berücksichtigt.

5 Simulation

Ausführliche Ergebnisse der Simulationsuntersuchung sind im Simulationsbericht beschrieben, im Folgenden ist nur ein Teil der Ergebnisse vorgestellt.
Auf Grundlage erstellter Simulationsmodelle wurden Wechselwirkungen der inneren und äußeren Einflüsse auf ein Schulgebäude mit Hilfe von Gebäudesimulationsprogrammen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu genutzt werden, Schulgebäude energetisch und ökonomisch zu optimieren, die Luftqualität in Klassenräumen zu verbessern und ein behagliches Raumklima zu schaffen.
In zahlreichen Studien, zusammengefasst im Bericht zum Leitfaden und in [2] wurde vor allem in den Wintermonaten eine schlechte Luftqualität in den Klassenräumen festgestellt. Aufgrund niedriger Außentemperaturen werden die Fenster bei kalten Außentemperaturen gar nicht oder nur kurzzeitig geöffnet. Die Folge davon ist eine hohe CO_2-Konzentration in der Raumluft. Der Einfluss der Außentemperatur auf die Häufigkeit des Lüftens mit Fenstern ist in Abbildung 11 dargestellt. Es handelt sich um ein Simulationsmodell, welches das reale Nutzerverhalten bei der Fensterlüftung abbildet.

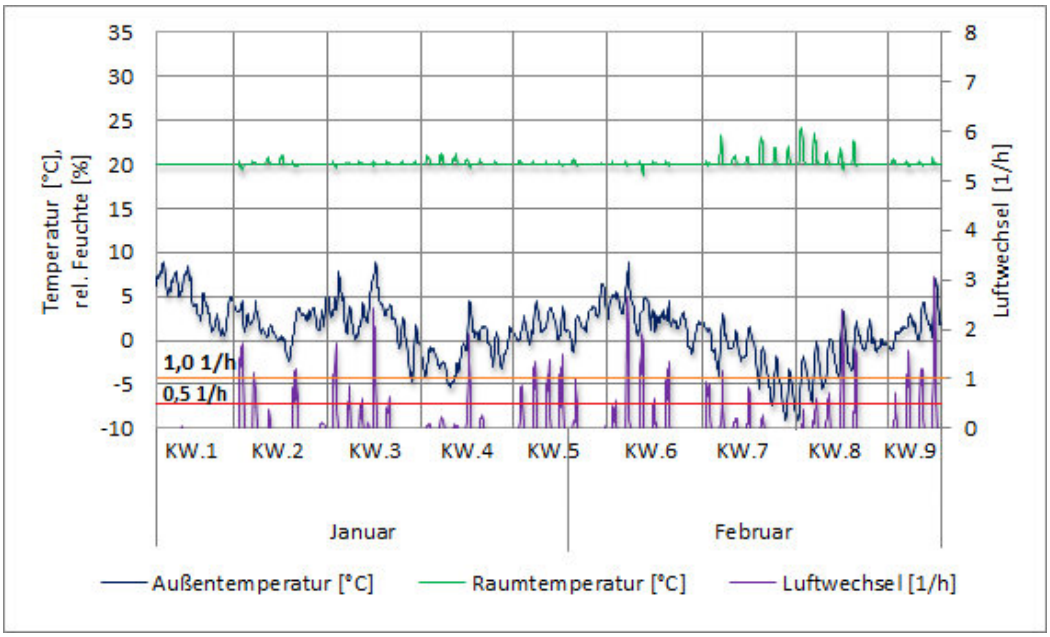

Abbildung 11: Luftwechsel bei freier Lüftung in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Simulation)

Es ist in Abbildung 11 zu sehen, dass je niedriger die Außentemperatur ist, desto weniger wird mit Fenstern gelüftet. In der Heizperiode liegt der Luftwechsel bei Fensterlüftung überwiegend im Bereich zwischen 0,5 und 1,0. Um eine gute Raumluftqualität sicherzustellen sind deutlich höhere Luftwechsel notwendig. Im Durchschnitt ist ein 4,5 facher Luftwechsel bzw. 30 m³/(h Pers) erforderlich, um die CO_2-Konzentration in Klassenräumen unter 1000 ppm zu halten. Der geringe 0,5 bis 1,0 fache Luftwechsel führt zu deutlich erhöhten CO_2-Konzentrationen. Abbildung 12 zeigt den CO_2-Verlauf in einem Klassenraum mit 25 Schülern und einem Lehrer bei einem konstanten Luftwechsel von 0,5 und 1,0 an. Der CO_2-Ausstoß liegt bei 20 l/(h Person), dies entspricht (0,02 m³/(h Person)). Die grau hinterlegten Bereiche zeigen die Unterrichtsstunden. In den Pausen ist ein kleiner Rückgang der CO_2-Konzentration im Klasseraum, da sich nicht alle Schüler während der Pause im Klassenraum aufhalten, festzustellen.

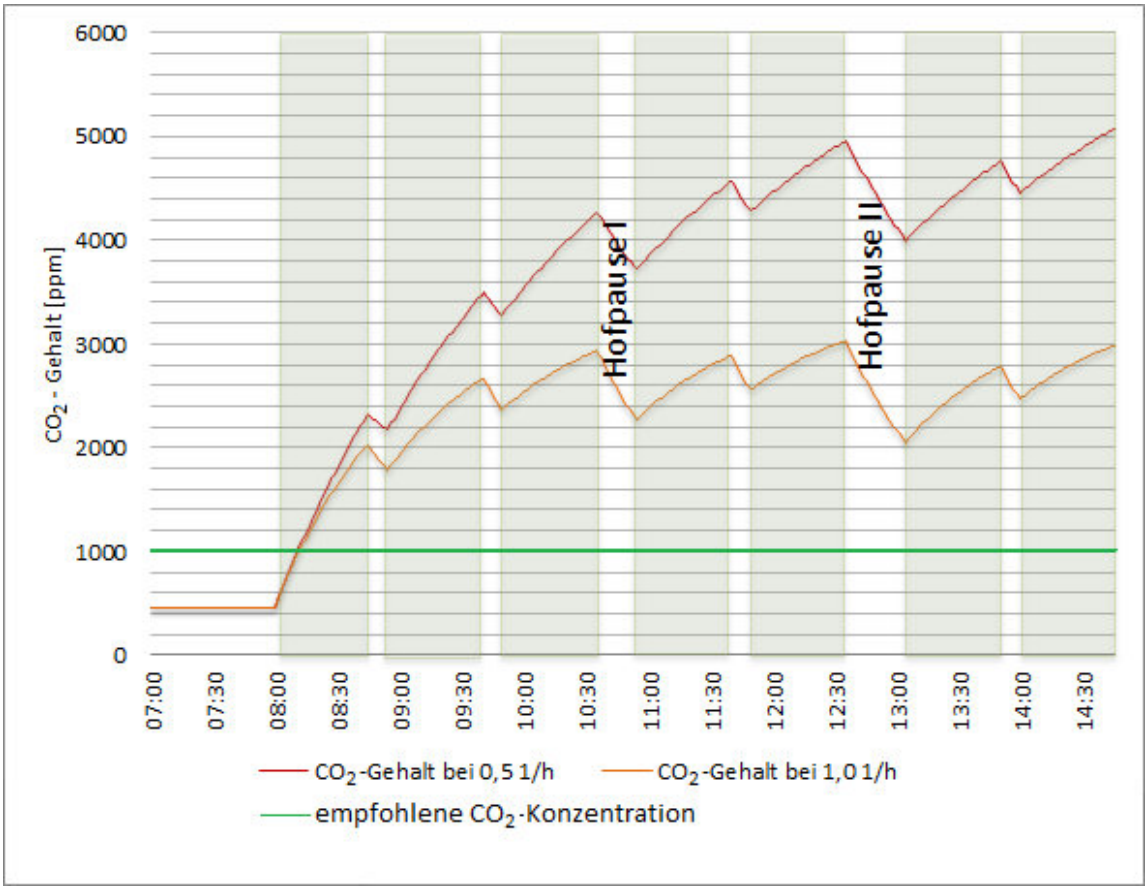

Abbildung 12: Simulation des CO_2 – Verlaufs bei manueller Fensterlüftung in der Heizperiode

Die CO_2-Konzentration befindet sich über weite Teile des Unterrichts im Bereich hygienisch auffälliger (1000 bis 2000 ppm) und hygienisch inakzeptabler Werte über 2000 ppm. Teilweise werden Konzentrationen von ca. 5000 ppm erreicht. Um den erforderlichen Luftwechsel in der kalten Jahreszeit dennoch sicherzustellen, ist der Einsatz maschineller Lüftungssysteme erforderlich. Im nächsten Kapitel sind Ergebnisse einer energetischen Untersuchung einer Modellschule mit verschiedenen Lüftungskonzepten beschrieben.

5.1 Primärenergiebedarf maschineller und freier Lüftung

Die unterschiedlichen Arten der Lüftung haben verschiedene Kosten und Energieverbräuche zur Folge. Um vergleichen zu können, werden am Beispiel einer Modellschule mit unterschiedlichen Lüftungskonzepten für jeweils gleiche Außenluftvolumenströme der Energiebedarf und die Kosten gegenübergestellt. Der Energiebedarf setzt sich dabei nur aus dem Energiebedarf für die Beheizung und Belüftung der Modellschule zusammen. Sonstiger Energiebedarf für Beleuchtung, elektrische Geräte etc. ist nicht berücksichtigt, da dieser für den energetischen Vergleich von Lüftungskonzepten nicht relevant ist.
Folgende Lüftungskonzepte werden unterschieden:
Variante A: manuelle Fensterlüftung
Variante B: zentrale Raumlufttechnische Anlage
Variante C: dezentrale Raumlufttechnische Anlage (Warmwasser Erhitzer)
Variante D: dezentrale Raumlufttechnische Anlage (elektrischer Erhitzer)
Bei Fensterlüftung wird der Primärenergieverbrauch nach zwei verschiedenen Luftwechselraten unterteilt. In Variante A1 mit der Bezeichnung „Fensterlüftung" ist der tatsächliche Luftwechsel, der in der Untersuchung ermittelt wurde, zugrunde gelegt. Bei Variante A2 wurde die Annahme getroffen, dass mit der Fensterlüftung eine unbedenkliche Raumluftqualität erreicht wird. Der Außenluftvolumenstrom beträgt in diesem Fall 30 m³/(h Pers). Die Behaglichkeitsanforderungen sind aufgrund der Zugerscheinungen in Folge niedriger Lufttemperatur und des hohen

Luftwechsels nicht erfüllt. Für die Simulation wurden gemäß EnEV 2014 folgende Primärenergiefaktoren zugrunde gelegt, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12: Primärenergiefaktoren EnEV 2014

Energieträger	Primärenergiefaktor
Strom	2,4
Nah-/und Fernwärme aus KWK	0,7

Die Simulationsergebnisse dienen einem energetischen Vergleich und einem Kostenvergleich mit maschinellen RLT-Systemen, die ebenfalls auf diesen Luftvolumenstrom ausgelegt sind. Dies entspricht in etwa einem 4,5 fachen Luftwechsel.

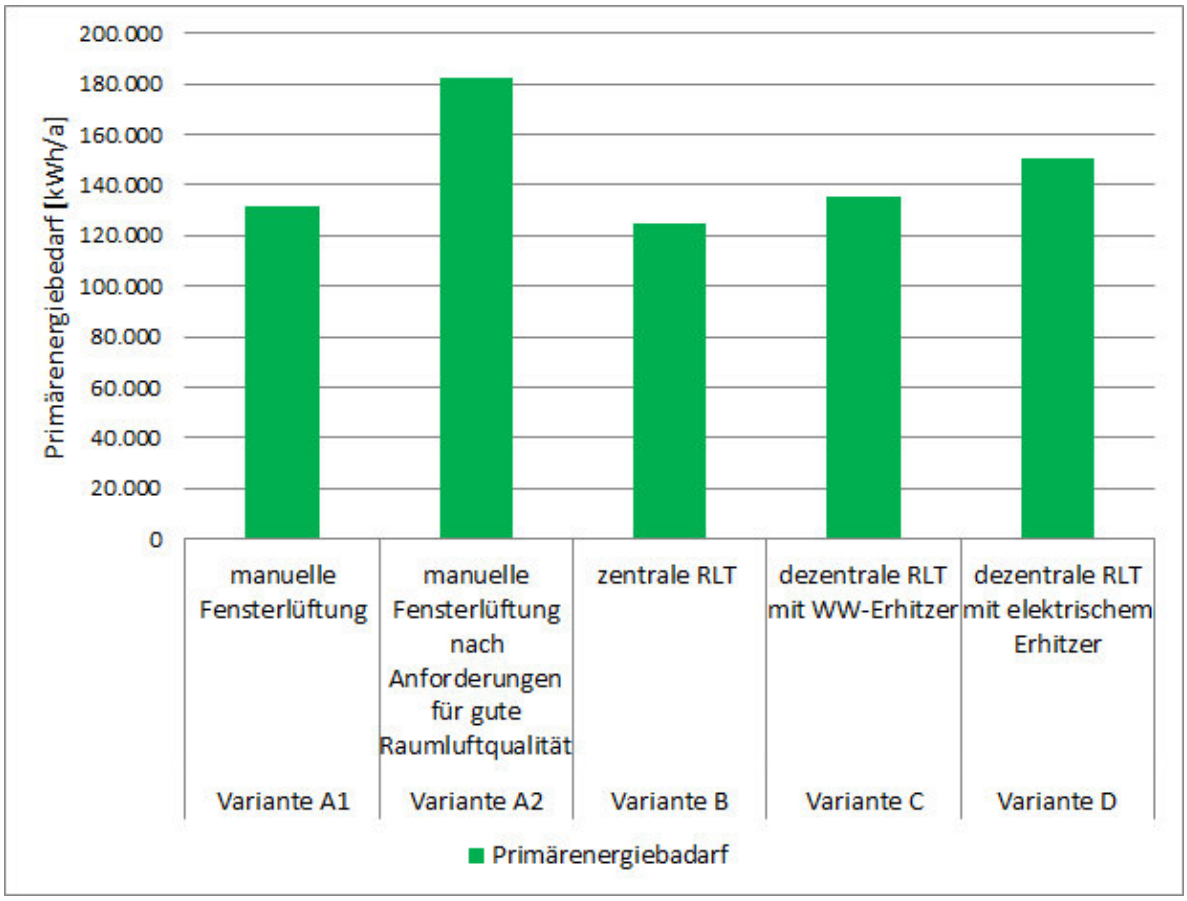

Abbildung 13: Primärenergiebedarf einer Modellschule mit unterschiedlichen Lüftungskonzepten

Die dargestellten Ergebnisse in Abbildung 13 zeigen, dass sich der Primärenergiebedarf einer Modellschule bei den verschiedenen Varianten der

maschinellen Lüftung in etwa in der gleichen Größenordnung befindet. Wesentlich größer ist der Primärenergiebedarf bei der Fensterlüftung mit einem Luftvolumenstrom von 30 m³/h und Person (Variante A2). Hierbei handelt es sich um Energieverluste, die entstehen, da bei der Fensterlüftung keine Wärmerückgewinnung möglich ist. Der Primärenergiebedarf ist deutlich höher als bei den verglichenen RLT-Systemen. Der tatsächliche nicht ausreichende Luftwechsel über Fenster (Variante A1) weist denselben Primärenergiebedarf auf, wie eine RLT-Anlage mit einem 4,5 fachen Luftwechsel.

5.2 Effektivität von Sonnenschutzsystemen

Entscheidend für ein behagliches Raumklima ist u.a. die Innenraum-temperatur. Durch die Sonneneinstrahlung können sich Klassenräume in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Fenster unterschiedlich stark aufheizen. Sonnenschutzsysteme sind notwendig, um die Wärmeeinträge durch die Sonne zu reduzieren und so eine Aufheizung der Klassenräume zu minimieren. Zusätzlich ist für Klassenräume, insbesondere beim Einsatz von interaktiven Whiteboards ein Blendschutz erforderlich. Um den Einfluss von Sonnenschutzsystemen auf die Raumtemperatur zu ermitteln wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. Für die Simulation wurden die in Tabelle 13 aufgeführten Randbedingungen zugrunde gelegt.

Tabelle 13: Randbedingungen zur Simulation von Sonnenschutzsystemen gemäß DIN 4108-2 [43]

Nr.:	Bedingung	Beschreibung
1.	Nutzungszeiten des Sonnenschutzes:	Mo. – Fr., jeweils in der Zeit von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr;
2.	Klimadaten:	Testreferenzjahr Berlin;
3.	Auswertung:	Berechnung erfolgt für ein komplettes Jahr; Für die Ermittlung des Übertemperaturgradstundenwertes sind keine Feiertage und Ferienzeiten zu berücksichtigen;
4.	Luftwechsel:	Während der Nutzungszeit (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr), $n = 1{,}3\ h^{-1}$;
		Außerhalb der Nutzungszeit (18:00 Uhr bis 7:00 Uhr), $n = 0{,}24\ h^{-1}$;

5.	Aktivierung des Sonnenschutz:	Grenzbestrahlungsstärke: 150 W/m²;

In der Simulation werden folgende Verschattungsvorrichtungen untersucht:

- Innenliegende Jalousien
- Jalousien zwischen den Fensterscheiben
- Außenliegende Jalousien

Für die Untersuchung ist eine Süd-Ausrichtung der Fassade zugrunde gelegt. In Abbildung 14 ist der Temperaturverlauf am Beispiel eines Klassenraumes in der Zeitperiode von 01.05. bis 30.09. dargestellt.

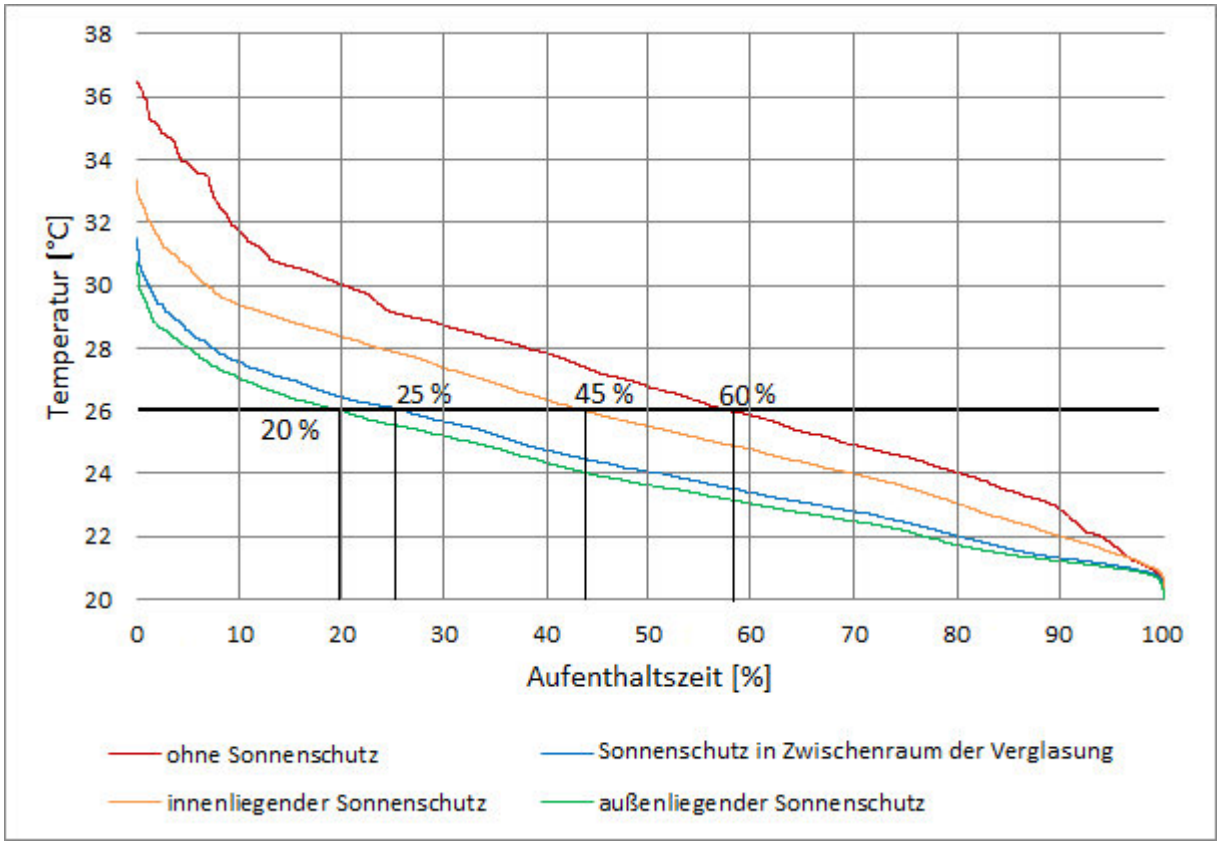

Abbildung 14: Simulation unterschiedlicher Sonnenschutzsysteme vom 01.05 bis 30.09 (Kühlperiode)

In ASR A3.5 ist eine obere Grenztemperatur von 26 °C angegeben. Im Modellklassenraum ohne Sonnenschutzmaßnahmen ist an 60 % der Nutzungszeit diese Temperaturgrenze überschritten. Der Übertemperatur-gradstundenwert liegt in dem Fall bei 475,6 Kh/a. Mit Verschattungs-vorrichtungen kann die Erhöhung der Raumlufttemperatur reduziert werden.

Den effektivsten Sonnenschutz bieten außenliegende und im Zwischenraum der Verglasung eingebaute Sonnenschutzsysteme. Damit findet eine Erhöhung der Raumlufttemperatur über 26 °C in 20 % bzw. 25 % der Nutzungszeit statt. Das bedeutet, dass in einem Viertel der Unterrichtszeit die Temperaturgrenzwerte deutlich übersachritten sind. Dies führt zu Einschränkungen der Konzentrationsfähigkeit und der Produktivität bzw. des Lernerfolges. Dies kann nur durch eine gezielte Kühlung in der Sommerzeit vermieden werden.

Ein innenliegender Sonnenschutz ist weniger effektiv. Eine Temperatur-erhöhung im Innenraum über 26 °C findet in 45 % der Nutzungszeit statt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu beachten, dass für die Berechnungen das Testreferenzjahr zu Grunde gelegt ist. Die Wetterdaten dieses synthetischen Jahres spiegeln einen Durchschnittlichen Verlauf der Wetterbedingungen wider. In den letzten Jahren war es häufig wärmer, so dass die hier angegebenen Überschreitungshäufigkeiten und die hier angegebenen Maximalwerte nochmals größer ausfallen würden. In Abbildung 15 ist der Temperaturverlauf am Beispiel eines Unterrichtstages am 15.05 dargestellt. Mit Hilfe der außenliegenden Verschattungsvorrichtungen findet die Erwärmung des Klassenraumes deutlich langsamer als in einem Raum ohne Sonnenschutz statt. Die Grenztemperatur von 26 °C wird erst um 14 Uhr überschritten. Die Raumlufttemperatur des Klassenraumes ohne Verschattungsvorrichtungen steigt steiler an und der Grenzwert von 26 °C wird schon um 11:30 Uhr überschritten.

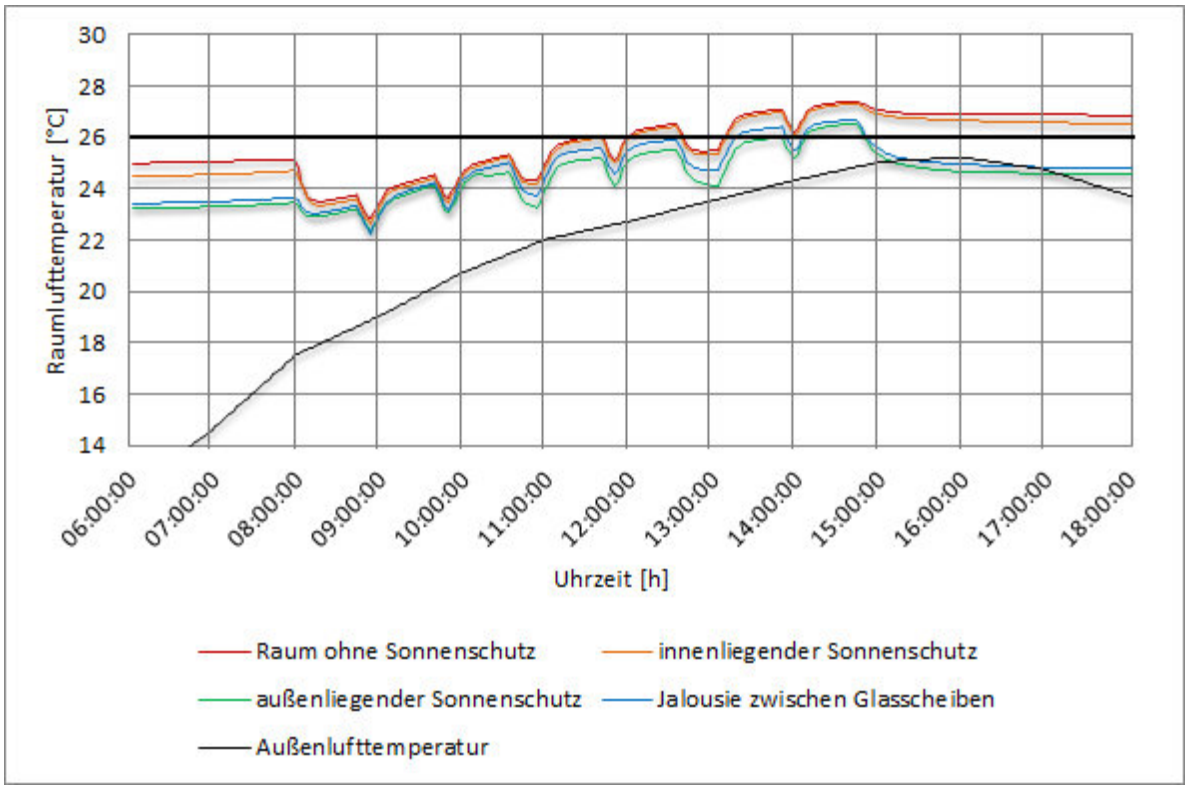

Abbildung 15: Verlauf der Raumlufttemperatur bei unterschiedlichen Sonnenschutzsystemen am 15.05. (Simulation)

Innenliegender Sonnenschutz schützt nicht vor Wärmeentwicklung im Klassenraum. Aufgrund des verstärkten Einsatzes von Whiteboards kann es erforderlich sein, den innenliegenden Sonnenschutz als Blendschutz zu verwenden.

5.3 Effektivität der Nachtauskühlung

Die Simulationsrechnungen zur Nachtlauskühlung haben gezeigt, dass durch Nachtauskühlung in der Sommerzeit die Raumlufttemperatur oftmals bis in den Behaglichkeitsbereich abgesenkt werden kann. An sehr warmen Tagen > 30 °C ist es mit der Nachtauskühlung nicht mehr möglich die Kühllast in ausreichendem Maße abzuführen. Die Grenztemperatur von 26 °C wird im Laufe des Tages überschritten. Im Durchschnitt liegt die Raumlufttemperatur durch die Nachtauskühlung ca. 3 K niedriger als in den Räumen ohne Nacht-auskühlung.

Zusätzlich zur Effektivität der Nachtauskühlung wurde auch der erforderliche Mehraufwand für die elektrische Energie mitbetrachtet. Der für die Nachtauskühlung untersuchte Zeitraum reicht vom 01.05 bis 30.09. und schließt auch die Übergangszeit mit ein. In der Übergangszeit besteht die Gefahr, dass Gebäude aufgrund kühler Außentemperaturen unterkühlt werden. Um dies zu verhindern ist eine Regelung notwendig. An warmen Sommertagen und - Nächten ist eine Regelung nicht erforderlich, da keine Gefahr der Unterkühlung der Innenräume besteht. Für die praktische Umsetzung der Nachtauskühlung ist ein Abschalten des Wärmerückgewinnungssystems oder ein Bypass erforderlich. Die im Folgenden dargestellten Grafiken sind die wesentlichen Untersuchungsergebnisse am Beispiel eines Modellklassenraumes. Die zugrunde gelegten Wetterdaten sind Jahresdatensätze des regionalen Testreferenzjahres. In Abbildung 16 ist Nachtauskühlung mit und ohne Regelungsfunktion in der Übergangszeit dargestellt. Der Luftvolumenstrom beträgt 30 m³/h und Person.

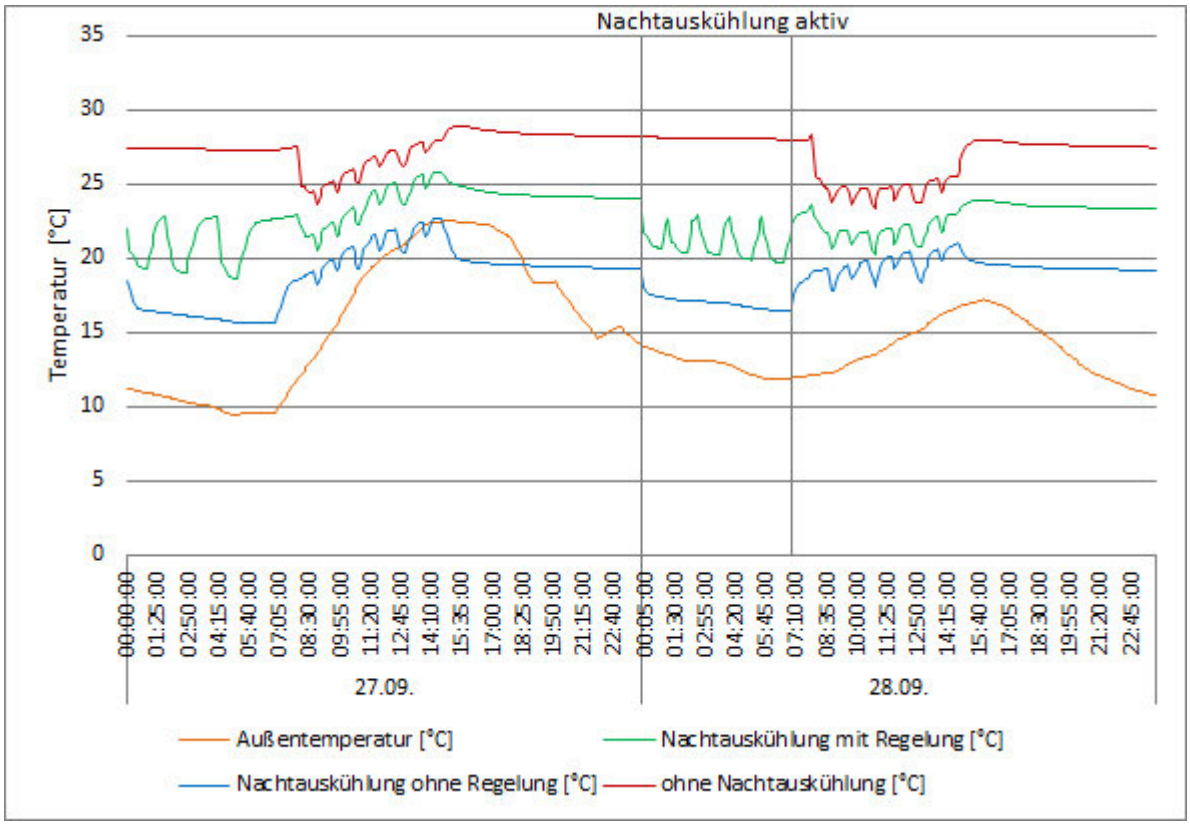

Abbildung 16: Simulation der Raumlufttemperatur in der Übergangszeit mit und ohne Nachtlauskühlung

In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass mit der Nachtauskühlung die Temperatur im Innenraum in der Nacht abgesenkt werden kann. Nachtauskühlung ohne Regelung über die Temperatur kann bei kühlen Außentemperaturen in der Übergangszeit zur Unterkühlung des Innenraumes führen. Um dies zu vermeiden ist eine Temperaturregelung erforderlich. So können wie in Abbildung 16 (grüne Linie) zu sehen ist, behagliche 22 °C im Innenraum sichergestellt werden. Ohne Nachtauskühlung liegt die Raumtemperatur zwischen 24 °C und 25 °C. In Abbildung 17 ist der Einfluss des thermischen Speichervermögens des Gebäudes auf die Raumlufttemperatur dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei schwerer Bauweise die Raumlufttemperatur höher ist, als beim Gebäude mit einer geringeren Speichermasse (leichte Bauweise). Kriterien zur Bauweise gemäß DIN 4108-2 [43].

Abbildung 17: Simulation der Raumlufttemperatur mit und ohne Nacht-auskühlung am Beispiel eines Gebäudes mit unterschiedlicher Bauweise

Bei einer Nachtauskühlung mit Temperaturregelung lassen sich unabhängig von der Bauweise behagliche Temperaturen in Innenräumen sicherstellen (grüne und rote Linie in Abbildung 17). Die Temperaturregelung hat einen zyklischen Verlauf. In Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur wird eine entsprechende Anzahl an Zyklen ausgeführt. Im Vergleich zur Übergangszeit ist in Abbildung 18 der Raumtemperaturverlauf an zwei warmen Sommertagen mit und ohne Nachtauskühlung zu sehen.

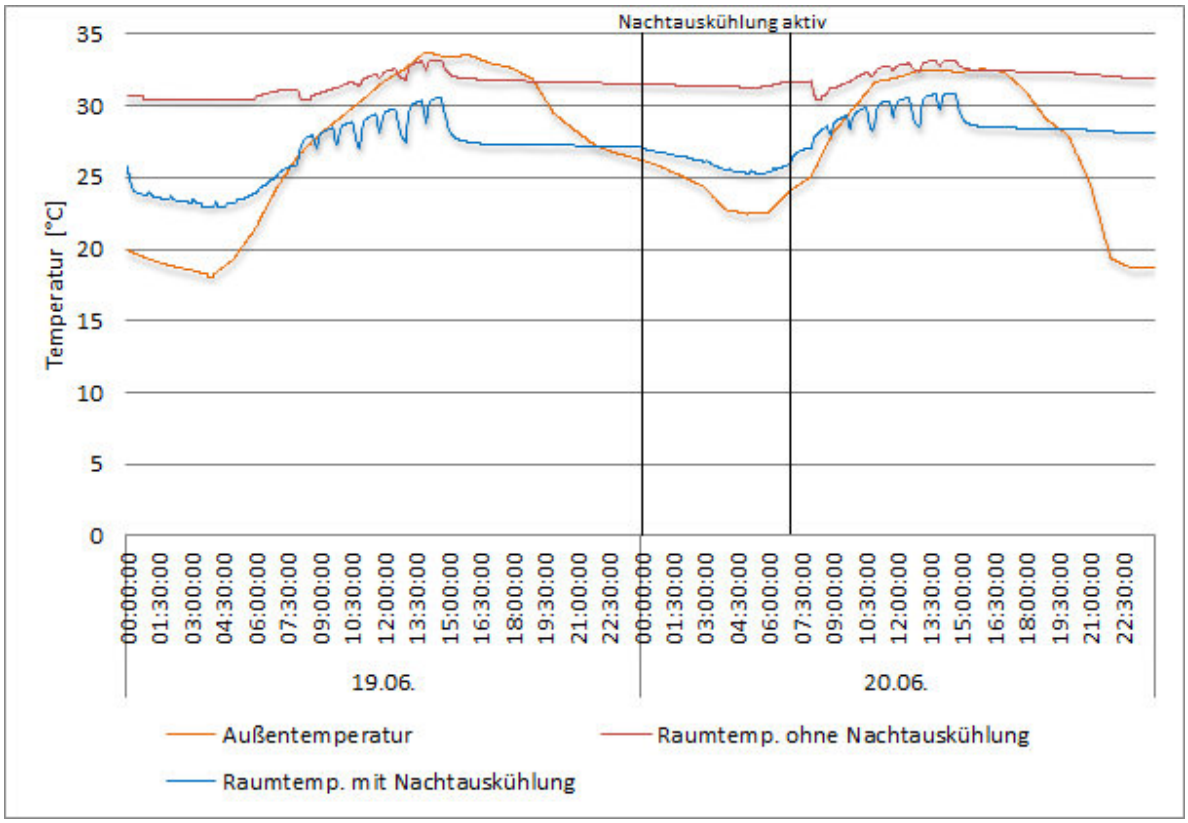

Abbildung 18: Simulation der Raumlufttemperatur an warmen Sommertagen mit und ohne Nachtauskühlung

Auch bei hohen Außentemperaturen kann mit Nachtauskühlung die Raumlufttemperatur abgesenkt werden. Im Durchschnitt ist eine Absenkung bis zu 3 K möglich. Abbildung 18 zeigt, dass der Höchstwert der Raumtemperatur im Tagesverlauf für eine kurze Zeit bei ca. 29 °C, im Mittel aber zwischen 26 - 28 °C liegt. Im Vergleich zur Innenraumlufttemperatur, die sich ohne Nachtauskühlung bei ca. 32 °C einstellt und auf dem Niveau den ganzen Tag verbleibt, können allein durch die Nachtauskühlung fast behagliche Raumtemperaturen sichergestellt werden.

Der für die Nachtauskühlung erforderliche Primärenergiebedarf ist in Abbildung 19 anhand eines Säulendiagramms am Beispiel eines Modellklassenraumes abgebildet.

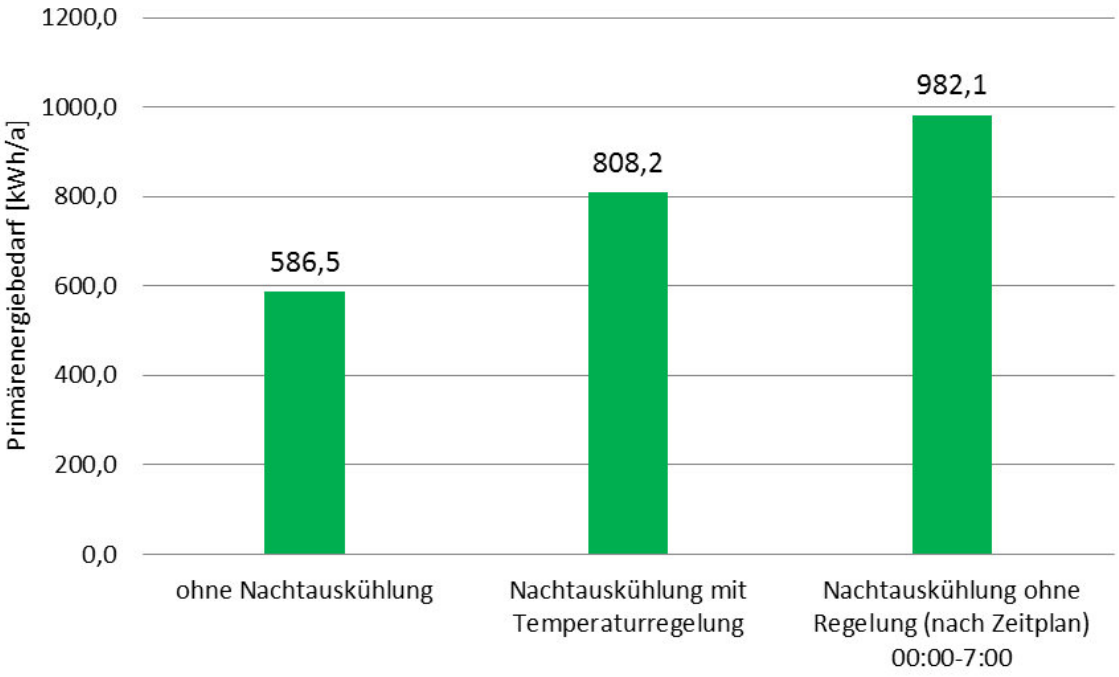

Abbildung 19: Jährlicher Primärenergiebedarf maschineller Lüftung mit und ohne Nachtauskühlung am Beispiel eines Modellklassenraumes

Die linke Säule zeigt den Primärenergiebedarf einer maschinellen RLT-Anlage in der Heizperiode. Die Säule in der Mitte und rechts in Abbildung 19 zeigen jeweils den gesamten Primärenergiebedarf (Heizperiode und Nachtauskühlung in der Kühlperiode) mit und ohne Regelung. Eine temperaturgeregelte Nachtauskühlung hat einen um ca. 20 % geringeren Primärenergiebedarf gegenüber einer Steuerung nach Zeitplan. Eine temperaturgeregelte Nachtauskühlung ist deswegen einer Steuerung nach Zeitplan vorzuziehen. Im Vergleich zum Primärenergiebedarf einer RLT-Anlage in der Heizperiode, entsteht bei einer temperaturgeregelten Nachtauskühlung in der Übergangs- und Sommerzeit ein zusätzlicher Primärenergiebedarf in Höhe von ca. 40 %. Zusammenfassend gilt für die maschinelle Nachtauskühlung, dass eine Absenkung der Raumtemperatur möglich ist, es müssen aber zusätzliche Energiekosten in Kauf genommen werden.

6 Zusammenfassung

Bei Neubau und Sanierung ist es notwendig maschinelle Lüftung einzusetzen, da die für die geistige Leistungsfähigkeit und aus gesundheitlich-hygienischen Anforderungen erforderliche Luftqualität ($CO_2 \leq 1000$ ppm) vor allem in der Heizperiode mit Fensterlüftung nicht sichergestellt werden kann.

Die Forderung nach guter Luftqualität in Innenräumen ist in der Arbeitsstättenverordnung verankert. Einschlägige Normen, Richtlinien und Vorschriften geben Empfehlungen zur Planung und praktischer Umsetzung maschineller und freier Lüftung. Dieser Leitfaden stellt eine Zusammenfassung gesetzlicher Vorgaben und normativer Empfehlungen dar. Es sind Anforderungen an thermische Behaglichkeit und Luftqualität beschrieben, die unabhängig vom Lüftungskonzept (frei oder maschinell) einzuhalten sind.

Weiterhin sind funktionale Kriterien definiert, die im Vorfeld für jeden Schulbautyp zu prüfen sind. Anhand der Ergebnisse können geeignete Lüftungskonzepte ausgewählt werden. Dabei handelt es sich um freie, maschinelle oder hybride Lüftung. Für jedes Lüftungskonzept gibt der Leitfaden Empfehlungen, die einen einwandfreien Betrieb sicherstellen sollen.

Ferner sind Simulationsergebnisse und ein Beispiel wirtschaftlicher Analyse maschineller und freier Lüftung beschrieben.

Trotz zusätzlicher investiver Kosten für maschinelle Lüftung zeigen die Berechnungen, dass allein aufgrund der möglichen Wärmerückgewinnung im Winter eine Amortisation gegeben ist. Nur mit einer RLT-Anlage ist es möglich, gute Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Wird die eingeschränkte Leistungsfähigkeit von Lehrern und Schülern in Gebäuden ohne RLT-Anlage berücksichtigt, zeigt sich, dass allein die Leistungsminderung des Lehrpersonals aufgrund schlechter Luftqualität zu einem finanziellen Schaden führt, der sechsmal höher ist als die Investition in maschinelle Lüftung.

Unter Einbeziehung des höheren Lehrerfolges amortisiert sich eine maschinelle Lüftungsanlage innerhalb weniger Jahre. Aspekte wie Leistungssteigerung der Schüler, weniger Krankenstände des Lehrpersonals und der Schüler und gesteigertes allgemeines Wohlbefinden sind zusätzliche positive Effekte.

7 Literaturverzeichnis

[1] D. ULLRICH: *Gesundheit und Umwelthygiene - Flüchtige organische Verbindungen (VOC)*. URL http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/stoffe/voc.htm#1. – Aktualisierungsdatum: 2009-06-26 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[2] BUNDESGESUNDHEITSBL - GESUNDHEITSFORSCH - GESUNDHEITSSCHUTZ 11 · 2008: *kohlendioxid_2008.pdf*. URL http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2008-12-16 – Überprüfungsdatum 2014-01-23

[3] SCHRAMEK, Ernst-Rudolf (Hrsg.); RECKNAGEL, Hermann (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 09/10 : Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*. 74. Aufl. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2009

[4] *DIN EN ISO 7730:2006-05, Norm - Beuth.de; Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-7730/89417255 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[5] *DIN EN 13779:2007-09, Norm - Beuth.de; Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-13779/94054008 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[6] *DIN EN 15251:2012-12, Norm - Beuth.de; Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-15251/155677389 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[7] ERARBEITET VON DER INNENRAUMLUFTHYGIENE-: *Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, Ausgabe 2008 - 3689.pdf*. URL http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3689.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2009-02-27 – Überprüfungsdatum 2014-01-23

[8] *Hermann-Rietschel-Institut: Grundlagen zur Luftqualitätsbestimmung*. URL http://www.hri.tu-berlin.de/menue/forschung_alt/luftqualitaet/grundlagen_zur_luftqualitaetsbestimmung/. – Aktualisierungsdatum: 2010-03-12 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[9] PETTENKOFER, Max von: *Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen*. München : Cotta, 1858 (Abhandlungen der Naturwissenschaftlich-Technischen Commission bei der Königl. Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München 2,3)

[10] LAHRZ T. (2013). BEITRAG ZUM LEITFADEN, LANDES LABOR BERLIN-BRANDENBURG, AD-HOC AG IRK/AOLG: Kriterien der Luftqualität in Innenräumen.

[11] AUSSCHUSS FÜR ARBEITSSTÄTTEN ; BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN: *Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.6 Lüftung; Ausgabe: Januar 2012*. URL http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?__blob=publicationFile&v=4. – Aktualisierungsdatum: 2013-03-18 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[12] BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES: *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV)*. URL http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbst_ttv_2004/gesamt.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2014-02-27 – Überprüfungsdatum 2014-04-02

[13] *BAuA - Informationen zur Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) / Arbeitsstättenrecht / Arbeitsstätten / Themen von A-Z / Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*. URL http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/Informationen.html. – Aktualisierungsdatum: 2014-04-25 – Überprüfungsdatum 2014-04-25

[14] INFORMATIONSPORTAL NACHHALTIGES BAUEN DES BMVBS: *Informationsportal Nachhaltiges Bauen: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB)*. URL

http://www.nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem-nachhaltiges-bauen-fuer-bundesgebaeude-bnb.html – Überprüfungsdatum 2013-08-26

[15] H.-J. MORISKE ; W. HEGER: *Gesundheit und Umwelthygiene - Richtwerte für die Innenraumluft*. URL http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm. – Aktualisierungsdatum: 2013-06-01 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[16] *ASR A3.5 "Raumtemperatur" - ASR_A3_05_Raumtemperatur.pdf*. URL http://www.ims-koch.de/lexikon/ASR_neu/ASR_A3_05_Raumtemperatur.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-01-06 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[17] *DIN EN 15239:2007-08, Norm - Beuth.de; Lüftung von Gebäuden - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Leitlinien für die Inspektion von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 15239:2007*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-15239/94054154 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[18] *1999_01_01-Typenschulbauten-in-den-neuen-Laendern-komplett.pdf*. URL http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1999/1999_01_01-Typenschulbauten-in-den-neuen-Laendern-komplett.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2011-01-14 – Überprüfungsdatum 2013-07-25

[19] WILDEBOER, Jürgen: *Thermische Behaglichkeit und Lüftungseffektivität bei freier Lüftung*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2007 (Fortschritt-Berichte VDI / 19 Nr. 157)

[20] ZEIDLER, Olaf Alexander: *Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2001 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 19, Wärmetechnik/Kältetechnik 134)

[21] MAAS, Anton: *Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung*. [S.l : s.n.], 1995

[22] *VDI 2078:2012-03 Berechnung der Kühllast und Raumtemperaturen von Räumen und Gebäuden (VDI-Kühllastregeln)*. URL http://www.beuth.de/de/technische-regel-entwurf/vdi-2078/143031933 – Überprüfungsdatum 2013-09-04

[23] *Typenschulbauten in den neuen Bundesländern* : *Modernisierungsleitfaden*. Berlin : Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 1999

[24] *VDI 6022 Blatt 1: Raumlufttechnik, Raumluftqualität-- Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln)*. Juli 2011. Berlin : Beuth, 2011 (VDI-Richtlinien 6022)

[25] *VDI 6026 Blatt 1:2008-05, Dokumentation in der Technischen Gebäudeausrüstung - Inhalte und Beschaffenheit von Planungs-, Ausführungs- und Revisionsunterlagen*. URL http://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-6026-blatt-1/107497912 – Überprüfungsdatum 2013-09-19

[26] *VDI 2081 Blatt 1:2001-07, Geräuscherzeugung und Lärmminderung in Raumlufttechnischen Anlagen*. URL http://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2081-blatt-1/42170481 – Überprüfungsdatum 2013-10-08

[27] PETER HÄUPL, MARTIN HOMANN, CHRISTIAN KÖLZOW, OLAF RIESE, ANTON MAAS, GERRIT HÖFKER, NOCKER CHRISTIAN: *Lehrbuch Der Bauphysik* : *Schall - Warme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. 7. Auflage : Vieweg + Teubner Verlag, 2012

[28] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: A. GREML, E. BLÜMEL, A.GÖSSLER, R, KAPFERER, W. LEITZINGER, J. SUSCHEK-BERGER, P. TAPPLER: *Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens*. URL http://www.nachhaltigwirtschaften.at/hdz_pdf/endbericht_0814_klassenzimmerlueftung.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-03-26 – Überprüfungsdatum 2013-12-11

[29] *VDI 2067 Blatt 1:2012-09, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. URL http://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2067-blatt-1/151420393 – Überprüfungsdatum 2013-12-11

[30] FGK-TAGUNG: Fachkongress "Lüftung in Schulen" : Leipzig, 17. September 2013; Erfahrungen mit Lüftungsanlagen in Schulen.

[31] PAWEL WARGOCKI: *Improving indoor air quality improves the performance of office work and schoolwork*. URL http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/90792/ESL-IC-08-10-15.pdf?sequence=1. – Aktualisierungsdatum: 2010-06-04 – Überprüfungsdatum 2013-12-12

[32] PAWEL WARGOCKI, Ph.D. ; AND DAVID P. WYON, PH.D., MEMBER ASHRAE: *Research Report: Effects of HVAC on Student Performance*. URL http://awilkinson.us/sustain/2D_4_Effects_HVAC_onStudentPerformance.pdf – Überprüfungsdatum 2014-04-29

[33] TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK: *THE EFFECTS OF OUTDOOR AIR SUPPLY RATE AND TEMPERATURE IN CLASSROOMS ON THE PERFORMANCE OF SCHOOLWORK BY CHILDREN*. URL www.dtu.dk/english/Resultat?fr=1&mr=100&qt=GoogleQuery&sw=schoolwork#tabs – Überprüfungsdatum 2013-12-12

[34] *Thermal and air quality effects on the performance of schoolwork by children | Swegon Air Academy*. URL http://www.swegonairacademy.com/wp-content/uploads/2012/04/Wyon-Manchester-2009.pdf – Überprüfungsdatum 2013-12-12

[35] *DIN EN 12831:2003-08, Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast; Deutsche Fassung EN 12831:2003*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-12831/49076901 – Überprüfungsdatum 2013-12-13

[36] M. ENG. SIMONE STEIGER, DIPL.-ING. FLORIAN NÖSKE: *Untersuchungen zur Belüftung von Schulen.doc : Steiger, S.; Nöske, F.; Kersken, M.; Hellwig, R.T.: Untersuchungen zur Belüftung von Schulen. Tagungsband Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2008, Ulm, 19. bis 21. November 2008, Beitrag IV.7.* – Überprüfungsdatum 2014-04-08

[37] PETER MATTHES: *Hybride Lüftungssysteme für Schulen Ergebnisse eines Feldversuchs : 27.03.2012, FGK-Tagung Lüftung in Schulen, Berlin, Peter Matthes, EBC | Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik* – Überprüfungsdatum 2014-04-08

[38] FRAUENHOFER IBP: *Innovative Lüftungstechnik für Schulen automatisierte Fensterlüftung : Heizenergieeinsparung, thermische Behaglichkeit und gute Luftqualität in Schulgebäuden durch hybride Lüftungstechnik*. URL http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2010/Projektinfo_15-2010/01_steiger_fensterlueftung.pdf – Überprüfungsdatum 2014-04-08

[39] BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN: *Klima am Arbeitsplatz: Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse - Bedarfsanalyse für weitere Forschungen - Gd45.pdf*. URL http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd45.pdf?__blob=publicationFile&v=7. – Aktualisierungsdatum: 2014-04-08 – Überprüfungsdatum 2014-04-10

[40] *DIN 4109/A1:2001-01 Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise; Änderung A1*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-4109-a1/35080411 – Überprüfungsdatum 2014-04-10

[41] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG E.V.: *GUV-V S1 Unfallverhütungsvorschrift Schulen*. URL http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/v-s1.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2005-11-14 – Überprüfungsdatum 2014-04-11

[42] ARBEITSKREIS MASCHINEN- UND ELEKTROTECHNIK STAATLICHER UND KOMMUNALER VERWALTUNGEN AMEV: *RLT-Anlagenbau 2011 Hinweise zur Planung und Ausführung von Raumlufttechnischen Anlagen für öffentliche Gebäude__blob=publicationFile.pdf*. URL http://www.amev-online.de/AMEV/DE/PlanenundBauen/MaschinenbauundVersorgungstechnik/Download/rlt_2011__blob=publicationFile.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-06-27 – Überprüfungsdatum 2014-04-14

[43] *DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-4108-2/167922321. – Aktualisierungsdatum: 2014-04-15 – Überprüfungsdatum 2014-04-15

[44] *DIN EN 12599:2013-01- Lüftung von Gebäuden Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumlufttechnischer Anlagen*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-12599/152363673 – Überprüfungsdatum 2014-04-16

[45] INFORMATIONSPORTAL NACHHALTIGES BAUEN DES BMVBS: *Informationsportal Nachhaltiges Bauen: Leitfäden und Arbeitshilfen / Veröffentlichungen - Leitfaden Nachhaltiges Bauen 2013*. URL http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-2013.html – Überprüfungsdatum 2014-04-17

[46] UMWELTBUNDESAMT: *Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen*. URL http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4218.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-05-06 – Überprüfungsdatum 2014-04-25

[47] *Indoor Air '96* : *Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Tokyo, Japan : Indoor Air '96, 1996

[48] SHAUGHNESSY, R. J. ; HAVERINEN-SHAUGHNESSY, U. ; NEVALAINEN, A. ; MOSCHANDREAS, D.: *A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance*. In: *Indoor Air* 16 (2006), Nr. 6, S. 465–468. URL http://wgusso.educationalimpact.com/resources/ieq/pdf/2D_3_PrelimVentRatesTestScores.pdf

[49] DR. GERHART TIESLER: *Frische Luft für frisches Denken*. URL http://www.isf-bremen.de/publikationen/brosch%C3%BCren/ – Überprüfungsdatum 2014-04-30

[50] DR. GERHART TIESLER, PROF.DR. HANS-GEORG SCHÖNWÄLDER, DIPL.ING. FRAUKE STRÖVER: *Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Umfeld*. URL http://www.gew-berlin.de/public/media/Plakate_Tiesler.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-11-28 – Überprüfungsdatum 2014-05-05

[51] STATISTISCHES BUNDESAMT, Wiesbaden ; SILVIA VOGEL, HARALD EICHSTÄDT, MARC BECKER: *Publikation - Bildung, Forschung, Kultur - Statistisches Bundesamt (Destatis) - Bildungsausgaben - Statistisches Bundesamt (Destatis)*. URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/BildungForschungKultur/BildungKulturFinanzen/AusgabenSchueler5217109117004.pdf;jsessionid=E62A2909604E53E9B437504913A89C96.cae3?__blob=publicationFile. – Aktualisierungsdatum: 2014-03-13 – Überprüfungsdatum 2014-05-06

[52] HOCHSCHULE AUGSBURG ; PROF. DR.-ING. RUNA T. HELLWIG: *Forschungsbericht 2013; Messtechnische Untersuchung eines Schachtlüftungssystems in einer Grundschule*. URL https://www.hs-augsburg.de/medium/download/oeffentlichkeitsarbeit/publikationen/forschungsbericht_2013.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-10-07 – Überprüfungsdatum 2014-05-13

[53] DIPL. -ING. CLAUS TWERDY ; DIPL. -ING. HELMUT MEYER: *Deutsche Bundesstiftung Umwelt - Beispielhaftes Lüftungskonzept | Bereich: Projekte; Abschlussbericht Jörg-Lederer Schule*. URL http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-15438.pdf – Überprüfungsdatum 2014-05-13

[54] *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) (EnEV 2014)*

[55] *DIN EN 13053:2012-02, Lüftung von Gebäuden - Zentrale raumlufttechnische Geräte - Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten*. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-13053/143293044. – Aktualisierungsdatum: 2014-06-06 – Überprüfungsdatum 2014-06-06

[56] *VDI 4302 Blatt 1:2012-05, Geruchsprüfung von Innenraumluft und Emissionen aus Innenraummaterialien - Grundlagen*. URL http://www.beuth.de/de/technische-regel-entwurf/vdi-4302-blatt-1/150087849 – Überprüfungsdatum 2014-06-24

8 Anhang

8.1 Checkliste

Die Checkliste zum Leitfaden Raumluftkonditionierung in Schulen fasst wesentliche Forderungen des Leitfadens zusammen und soll sowohl bei der Planung von Lüftungskonzepten als auch zur Prüfung von Bauplanungsunterlagen verwendet werden.

In der Checkliste sind Forderungen für die Leistungsphasen Vorplanung, Entwurfs- und Ausführungsplanung und Abnahme definiert. Diese sind bei jedem Neubauprojekt und jeder Sanierungsmaßnahme bei der Planung zu berücksichtigen und durch die zuständigen Ämter bei der Prüfung von Bauplanungsunterlagen zu kontrollieren. Dazu ist die Checkliste zu verwenden. Die weißen Felder sind wie folgt auszufüllen:

✔ Forderung eingehalten

– Forderung nicht eingehalten

/ nicht zutreffend

Das Einhalten von Forderungen soll eine hygienisch unbedenkliche Luftqualität (CO_2 < 1000 ppm), thermische Behaglichkeit und eine einwandfreie Funktion maschineller und freier Lüftungskonzepte in Schulen sicherstellen.

Checkliste zum Leitfaden Raumluftkonditionierung in Schulen

		Vorplanung	Entwurfs- und Ausführungsplanung	Abnahme
Objekt-bezeichnnung:				
Adresse:				
Maßnahme:				

Art des Vorhabens	
Neubau	
Bestandsbau	
Bestandsbau (Denkmalschutz)	

Ausgewähltes Lüftungssystem	
a) Zentrale RLT-Anlage	
b) Dezentrale RLT-Anlage	
Brüstungs- u. Zargengeräte	
Wandgeräte	
Deckengeräte	
Standgeräte	
c) Hybrid-Lüftung	
d) Fensterlüftung	
e) Schachtlüftung	

Vorplanung

Anforderungen an Raumluftqualität in Aufenthaltsräumen		
a) CO_2-Leitwert: ≤ 1000 ppm		
b) TVOC-Leitwert: ≤ 1 mg TVOC/m^3		
Anforderungen an Raumlufttemperatur		
a) Auslegungstemperatur: Ti = 20°C		
b) Behaglichkeitsbereich (Heizperiode): Ti = 22 ± 2°C		
c) Behaglichkeitsbereich (Kühlperiode): Ti = 24 ± 2°C		
Anforderungen an lokale Luftgeschwindigkeiten		
a) Behaglichkeitsbereich (Heizperiode) 0,16 m/s		
b) Behaglichkeitsbereich (Kühlperiode) 0,19 m/s		
Sonnen- und Blendschutz		
a) außen liegend		
b) innen liegend		
d) im Zwischenraum der Verglasung		

Entwurfs- und Ausführungsplanung

Maschinelle Lüftung		
a) Platzbedarf (Technikzentrale, Lüftungskanäle)		
b) Statische Eigenschften (Dach, Decken, Außenwände)		
c) Deckenhöhe		
d) bedarfsgerechte Regelung		
e) Koordination mit Brandschutz		
f) Nachtauskühlung in der Kühlperiode		
g) Luftkanalnetz gemäß DIN EN 13779		

h) Monitoring von RLT-Anlagen:			
Sollwert der Zulufttemperatur			
Istwert der Zulufttemperatur			
Sollwert der Raumtemperatur			
Istwert der Raumlufttemperatur			
Zu- und Abluftvolumenstrom je Klassenraum			
Ablufttemperatur und rel. Feuchte je Klassenraum			
Sollwert der CO_2-Konzentration je Klassenraum			
Istwert der CO_2-Konzentration je Klassenraum			
Energieverbrauch der RLT-Anlage/n			
Betriebszeiten der RLT-Anlage/n			
Zustandsmeldung der Anwesenheitssensoren			
Fensterstellung (offen/geschlossen)			
f) Wärmerückgewinnungssystem:			
kein (Rotationswärmetauscher) bei zen. RLT-Anlagen			
Wärmerückgewinnungsgrad gemäß EnEV			
Wärmerückgewinnungsgrad > 80 % (AMEV)			
tatsächlicher Wärmerückgewinnungsgrad			
g) Energieeffizienz:			
Energieeffizienz (SFP) gemäß EnEV			
tatsächlicher SFP-Wert			
h) Anforderungen an den Lärmpegel der RLT-Anlagen:			
Berücksichtigung hoher Anforderungen (35 dB/A)			
j) Schriftdokumente/Einweisung:			
Anlagenbeschreibung mit Funktionsbeschreibung			
Betriebs-, Wartungs- und Bedienungsanleitungen			
Erläuterung des Lüftungskonzeptes für die Nutzer			
zusätzliche Anleitung für den Hausmeister			
Freie Lüftung (Fensterlüftung)			
a) erforderliche offenbare Fensterfläche zur Sicherung des Mindestluftwechsels gemäß ASR A3.6			
b) Maßnahmen zum Ausschluss jeglicher Gefährdung gemäß GUV-V S1			
Hybrid-Lüftung			
a) Regelgrößen:			
Raumluftqualität			
Raumtemperatur			
b) Überwachung von Störgrößen:			
Windgeschwindigkeit			
Windrichtung			
Außentemperatur			
Niederschlag			
c)Regelung der Heizung			
Wirtschaftlichkeit			
Variantenvergleich der Lüftungsysteme- und -konzepte			
Kostenermittlung nach VDI 2067			

Abnahme

Maschinelle Lüftung		
a)Funktionsprüfung nach Klasse A gemäß DIN EN 12599		

a) Vollständigkeitsprüfungen		
b) Funktionsprüfungen		
c) Funktionsmessungen		
d) Sondermessungen (bei Bedarf gesondert zu vereinbaren)		
e) Bericht		
b)Installationsvertrag mit Angabe der Prüfklasse		

Legende:

✔ Forderung eingehalten

─ Forderung nicht eingehalten

/ nicht zutreffend