

Potenzialabklärung für natürliche Lüftung unter Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts

Beat Frei, David Burkhardt

Aicher, De Martin, Zweng AG

Energie- und Gebäudetechnik-Ingenieure, Würzenbachstrasse 56, CH-6006 Luzern

++41 (0) 41 375 00 75, beat.frei@adz.ch, david.burkhardt@adz.ch, <http://www.adz.ch>

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

Bisher wurden nach dem Wissensstand der Autoren infolge fehlender Erfahrungen wenige Bauten mit natürlicher Lüftung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts geplant und ausgeführt. In einem Pilotprojekt haben die Autoren das Anwendungspotenzial für natürliche Lüftung in Schweizer Klimaregionen untersucht. Eingesetzt wurde eine public-domain Software des National Institute of Standards and Technology (NIST). Die Resultate zeigen, dass an den untersuchten Standorten ein bedeutendes Einsatzpotenzial für natürliche Lüftung unter Einhaltung der adaptiven thermischen Komfortgrenzen und der minimalen Luftwechselraten vorhanden ist. Bereits mittlere interne Lasten von 20 W/m^2 und minimale Luftwechselraten von $3 \text{ (m}^3/\text{h)/m}^2$ führen bei festen und adaptiven Komfortgrenzen dazu, dass natürliche Lüftung im Schweizerischen Mittelland im Jahresverlauf dauerhaft eingesetzt werden kann. Die Nachtkühlung des Gebäudes erfolgt während 75 bis 100 % der erforderlichen Nächte über natürliche Lüftung. Zudem wurde untersucht, wie sich der prognostizierte Klimawandel gemäss einem mittleren Szenario auf das Anwendungspotenzial der natürlichen Lüftung auswirkt. Der Bedarf an Nächten zur Kühlung nimmt hierbei zu, währenddessen gleichzeitig das Potenzial zur Nachtkühlung abnimmt.

To date, only a few buildings have been designed and built with natural ventilation controlled to achieve *adaptive* thermal comfort mainly because of lacking experience according to the authors' knowledge. In a pilot study the authors have assessed the application potential for natural ventilation with an adaptive model in Swiss climatic regions. They used the public-domain software *Climate Suitability Tool* developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) to model the ventilation system. The results show a great potential for efficient application of natural ventilation with adaptive thermal comfort targets and minimal air change rates for the investigated locations. Already at moderate cooling loads of 20 W/m^2 and minimal air change rates of $3 \text{ (m}^3/\text{h)/m}^2$, natural ventilation with constant or adaptive comfort levels can be employed successfully throughout the year in the Swiss Central Plateau. Night cooling of the building is possible on 75 % to 100 % of all suitable nights just by natural ventilation. In addition, the effect of a mean-scenario predicted climate change on the application potential of natural ventilation has been studied. The need for cool nights will increase in the future and at the same time, the potential for night cooling diminishes, as nights tend to get warmer.

1. Ausgangslage

Von Bauherren und Betreibern wird das Konzept der natürlichen Lüftung auch in der Schweiz vermehrt bei Planern nachgefragt. Die Benutzer von Wohn- und Bürobauten bewerten natürliche Lüftung signifikant positiver als mechanische Lüftung. Eng verknüpft mit der natürlichen Lüftung ist das Konzept des adaptiven thermischen Komforts. Hierbei können die Benutzer ihre Bekleidung und Aktivität dem Raumklima anpassen und haben zudem die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen. Dies führt zu einer grösseren Akzeptanz des thermischen Komforts selbst bei höheren operativen Raumtemperaturen. Ein hoher thermischer Komfort ist eine Grundvoraussetzung für die Nutzerzufriedenheit respektive die Produktivität in Wohn- und Bürobauten.

Bisher wurden nach dem Wissensstand der Autoren infolge fehlender Erfahrungen wenige Bauten mit natürlicher Lüftung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts geplant und ausgeführt. Häufig wird das PMV/PPD-Standardmodell von Fanger auch bei natürlicher Lüftung eingesetzt. Nach heutigem Wissensstand führt dieses Standardmodell zu falschen Aussagen über das vorausgesagte mittlere Votum (PMV) und den Prozentsatz Unzufriedener (PPD). Mit der neuen Norm SIA 180:2014 [1] wurde das Konzept des adaptiven thermischen Komforts bei natürlicher Lüftung im Schweizerischen Normenwesen nun besser verankert. Es fehlt aber weiterhin an Planungsgrundlagen, welche die Konzepte der natürlichen Lüftung und des adaptiven thermischen Komforts verknüpfen. Für Schweizer Verhältnisse müssten zudem die Einsatzmöglichkeiten der hybriden Lüftung, die natürliche und mechanische Lüftung nach Bedarf einsetzt, geprüft werden.

Im Journal *Energy and Buildings* erschien 2011 ein Artikel, der die Anwendung einer Berechnungsmethode zur Anwendbarkeit der natürlichen Lüftung in den USA unter Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts aufzeigt [2].

Das Konzept des adaptiven thermischen Komforts wurde 1997 im Forschungsprojekt RP-884 [3] der amerikanischen ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) entwickelt und basiert auf einer grossen Anzahl von Feldstudien. Die Erkenntnisse sind 2004 erstmalig in den ASHRAE Standard 55 [4] eingeflossen.

2. Vorgehen

In einem internen Pilotprojekt untersuchten Ingenieure der Aicher, De Martin, Zweng AG das Anwendungspotenzial der natürlichen Lüftung in Schweizerischen Klimaregionen unter Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts. Hierbei wurde die von Emmerich et al. in [1] beschriebene Berechnungsmethode eingesetzt, welche das Anwendungspotenzial der natürlichen Lüftung in der Schweiz unter Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts basierend auf dem ASHRAE Standard 55-2013 aufzeigt.

Neben dem amerikanischen ASHRAE Standard 55 verwendet die europäische Norm (SN) EN 15251 [5] seit 2007 ein schweizweit anwendbares adaptives Komfortmodell. Anlässlich der Revision der schweizerischen Norm SIA 180 wurde 2014 ein adaptives thermisches Komfortmodell in dieselbe implementiert.

Alle Konzepte des adaptiven thermischen Komforts unterliegen folgenden Randbedingungen:

- Die Benutzer haben die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen
- Keine mechanische Lüftung zur Kühlung und Beheizung des Gebäudes
- Die Benutzer üben leichte sitzende Tätigkeit aus (1.0 - 1.3 met)
- Die Benutzer haben die Möglichkeit, ihre Bekleidung der Umgebung anzupassen

Die adaptiven Komfortmodelle der Normen SIA 180:2014, SN EN 15251:2007 und ASHRAE 55-2013 unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der Definition der massgebenden Aussenlufttemperatur. Neuere Studien bestätigen, dass bei der Bewertung des thermischen Komforts die Aussenlufttemperatur eine untergeordnete Rolle spielt. Wichtiger ist die Art der Raumkühlung und der Belüftung [6].

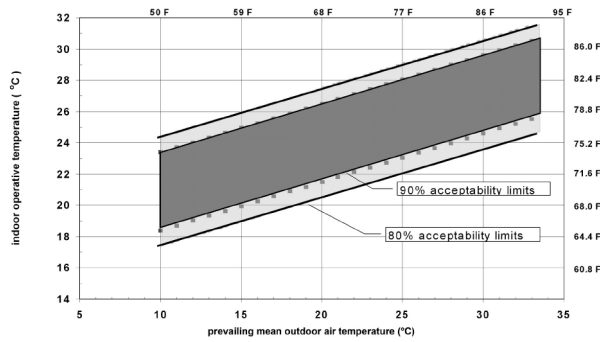
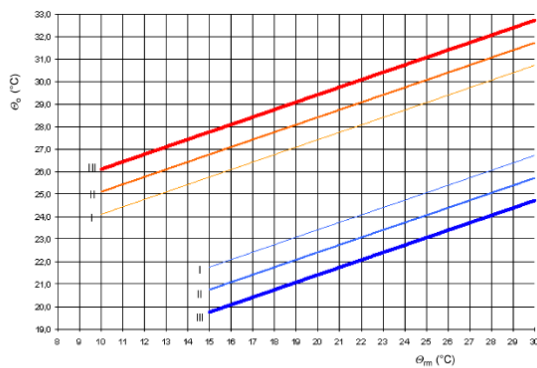


Abbildung 1: Akzeptable Bereiche der operativen Temperatur in natürlich belüfteten Gebäuden (© ASHRAE Standard 55-2013).



Legende
 θ_{m} gleitender Mittelwert der Außentemperatur, in °C
 θ_o operative Temperatur, in °C

Abbildung 2: Akzeptable Bereiche der operativen Temperatur in natürlich belüfteten Gebäuden und mechanischer Lüftung im Leerlaufbetrieb (© SN EN 15251:2007).

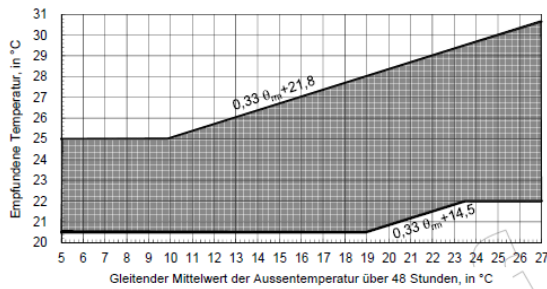


Abbildung 3: Akzeptabler Bereich der operativen Temperatur in natürlich belüfteten Gebäuden und mechanischer Lüftung im Leerlaufbetrieb (© SIA180:2014 [im Druck]).

Das Pilotprojekt untersuchte die Einsatzmöglichkeiten von Tages- und Nachtlüftung unter Berücksichtigung gesamter Wärmeeinträge, minimaler Luftwechselraten, Heiz- und Kühleiswerte sowie Feuchtegrenzwerte für einige ausgewählte Klimaregionen der Schweiz. Das National Institute of Standards and Technology (NIST) hat ein Berechnungswerkzeug namens *Climate Suitability Tool* [7] entwickelt, welches die Machbarkeit der natürlichen Lüftung unter Einhaltung der Komfortgrenzen nach ASHRAE Standard 55-2013 prüft. Im Jahresverlauf kann im Stundensschritt für frei definierbare Messstationen ausgewiesen werden, ob die natürliche Lüftung im Tages- und Nachtbetrieb unter Einhaltung fester oder adaptiver Komfortgrenzen eingesetzt werden kann. Das steady-state Berechnungsmodell idealisiert ein Gebäude als Kontrollvolumen mit einer gleichförmigen Temperaturverteilung. Die Gleichgewichtstemperaturen für Heizen und Kühlen werden im Berechnungsmodell unter Berücksichtigung der gesamten internen Last (Wärmeeinträge z.B. durch Personen, Geräte, Beleuchtung und Sonne) und der Aussenlufttemperatur berechnet. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierung findet sich in Emmerich et al. [1].

Unter Berücksichtigung der Merkblätter SIA 2024 [8] und SIA 2028 [9] wurden Messstationen und Randbedingungen festgelegt und als Energy Plus-Files (epw) generiert. Folgende Stationen wurden untersucht:

- Basel-Binningen
- Bern-Liebefeld
- Disentis
- Genève-Cointrin
- Lugano
- Luzern
- Samedan
- Sion
- Zürich-SMA

Für jede Messstation wurden in Meteonorm 7.1 [10] zwei Jahresdatensätze ausgewertet:

- Design Reference Year Merkblatt SIA 2028 [SIA-normal]
- Test Reference Year IPCC Klimamodell A1B [IPCC A1B 2050]

Folgende Randbedingungen wurden für die Berechnungen mit dem *Climate Suitability Tool* festgelegt:

- Gesamte Wärmeeinträge [W/m^2]: 10 / 20 / 40 / 60
- Minimale Luftwechselrate [$(m^3/h)/m^2$]: 3
- Limitierende Taupunkttemperatur [$^{\circ}C$]: 17
- Raumhöhe [m]: 3
- Obere Raumlufthtemperatur [$^{\circ}C$]: 26.5
- Untere Raumlufthtemperatur [$^{\circ}C$]: 20.5
- Beginn Nachtlüftung: 18⁰⁰ Uhr
- Ende Nachtlüftung: 7⁰⁰ Uhr

The screenshot shows the NIST Multizone Modeling Website interface. The top navigation bar includes Home, Software, Case Studies, Publications, Applications, Links, Site Map, and Feedback. The main content area is titled 'Climate Suitability Tool' and contains a sidebar with 'Introduction', 'Application', and 'Application Help'. The central panel displays input parameters for two weather files: 'Basel-Binningen_sia_normal-hour.epw' and 'Basel-Binningen-hour.epw'. For each file, it shows Direct Cooling and Night Cooling data, including Ventilation Rate, Cooling Potential, Days Needed, and % Effective for Manual Setpoints, Adaptive 80%, and Adaptive 90%.

File	Category	Manual Setpoints	Adaptive 80%	Adaptive 90%
Basel-Binningen_sia_normal-hour.epw	Ventilation Rate	1.442	1.353	1.483
	(ACH) ±	1.052	0.9448	1.099
	% Effective	44.4	57.5	51.1
	% Too Cold	52.1	39.3	44.7
Basel-Binningen-hour.epw	Ventilation Rate	1.427	1.329	1.452
	(ACH) ±	1.046	0.9162	1.049
	% Effective	43.4	55.7	49.4
	% Too Cold	45.8	34	39.4

Abbildung 4: Ein- und Ausgabedaten des *Climate Suitability Tool* [7].

Für das PMV/PPD-Standardmodell und das adaptive Komfortmodell nach ASHRAE 55-2013 werden Prozentsätze von Jahresstunden angegeben, an denen es zu kalt, zu heiss, zu feucht oder ideal für natürliche Lüftung ist. Erforderliche Luftwechselraten werden für die natürliche Lüftung und die

Nachtkühlung ausgegeben. Das Kühlpotenzial, die notwendigen Tage für die Nachtkühlung und ihre Effektivität werden ebenfalls aufgeführt.

3. Resultate

Die Resultate des Pilotprojekts zeigen, dass in der Schweiz an den untersuchten Standorten ein bedeutendes Einsatzzpotenzial für natürliche Lüftung unter Einhaltung der adaptiven Komfortgrenzen und der minimalen Luftwechselraten vorhanden ist. Bereits mittlere Wärmeeinträge von 20 W/m² und minimale Luftwechselraten von 3 (m³/h)/m² führen bei festen und adaptiven Komfortgrenzen dazu, dass natürliche Lüftung im Schweizerischen Mittelland im Jahresverlauf dauerhaft eingesetzt werden kann. Die Nachtkühlung des Gebäudes kann während 75 bis 100 % der erforderlichen Nächte über natürliche Lüftung erfolgen.

Station	Bern-Liebefeld			
	PMV/PPD-Standardmodell PPD=10%			SIA-normal
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.41±1.06	1.77±1.72	3.18±3.32	4.77±4.98
nutzbar [%]	40.2	84.2	96.6	97.3
zu kalt [%]	57.1	13.1	0	0
zu heiss [%]	2.2	2.2	2.96	2.21
zu feucht [%]	0.55	0.55	0.55	0.55
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	9.13±2.24			
Erforderliche Nächte	41			
davon nutzbar [%]	100			PPD (Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener)

Station	Bern-Liebefeld			
	Adaptiver Komfort PD=10%			SIA-normal
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.44±1.10	1.91±1.84	3.61±3.61	5.41±5.41
nutzbar [%]	47.1	89.5	96.6	96.6
zu kalt [%]	49.5	7.0	0	0
zu heiss [%]	2.96	2.96	2.96	2.96
zu feucht [%]	0.55	0.55	0.55	0.55
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	8.81±2.16			
Erforderliche Nächte	50			
davon nutzbar [%]	100			PD (Prozentsatz Unzufriedener)

Station	Genève-Cointrin			
	PMV/PPD-Standardmodell PPD=10%			SIA-normal
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.48±1.14	1.95±1.95	3.58±3.8	5.37±5.70
nutzbar [%]	46.7	85.3	95.3	95.3
zu kalt [%]	48.6	10	0	0
zu heiss [%]	4.2	4.2	4.2	4.2
zu feucht [%]	0.51	0.51	0.51	0.51
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	7.35			
Erforderliche Nächte	61			
davon nutzbar [%]	100			

Station	Genève-Cointrin			
	Adaptiver Komfort PD=10%			SIA-normal
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.51±1.17	2.10±2.03	4.01±4.01	6.02±6.02
nutzbar [%]	51.7	89.5	94.9	94.9
zu kalt [%]	43.3	5.42	0	0
zu heiss [%]	4.6	4.58	4.58	4.58
zu feucht [%]	0.51	0.51	0.51	0.51
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	7.65±2.77			
Erforderliche Nächte	68			
davon nutzbar [%]	100			

Gemäss den Swiss Climate Change Szenarios CH2011 [11] ist das massgebende Klima in der Schweiz einem Wandel unterworfen. Um die zukünftigen Randbedingungen für die natürliche Lüftung unter Berücksichtigung des adaptiven thermischen Komforts zu untersuchen, wurden mit *Meteonorm* [10] die Wetterdaten des IPCC Klimamodells A1B für das Jahr 2050 berechnet und mit dem *Climate Suitability Tool* ausgewertet. Hierbei zeigt sich, dass die tendenziell höheren Aussenluft-temperaturen für alle untersuchten Meteostationen positive Auswirkungen auf die Nutzbarkeit der natürlichen Lüftung haben. Zu beachten ist aber, dass das Potenzial für Nacht-

kühlung bei steigenden Aussenlufttemperaturen abnimmt. In Stadtlagen ist zudem zu beachten, dass Wärmeinseln das Potenzial der Nachtkühlung durch natürliche Lüftung beeinflussen können.

Station	Basel-Binningen	Adaptiver Komfort PD=10%			SIA-normal
		10	20	40	
Gesamter Wärmeeintrag [W/m²]	10				
Luftwechselrate [1/h]	1.48±1.10	2.02±1.91	3.90±3.78	5.84±5.68	
nutzbar [%]	51.1	91.4	95.8	95.8	
zu kalt [%]	44.7	4.37	0	0	
zu heiss [%]	3.31	3.31	3.31	3.31	
zu feucht [%]	1.21	1.21	1.21	1.21	
Nachtkühlung					
Potenzial [W/(m ² LW)]	7.77±2.44				
Erforderliche Nächte	50				
davon nutzbar [%]	100				

Station	Basel-Binningen	Adaptiver Komfort PD=10%			IPCC A1B 2050
		10	20	40	
Gesamter Wärmeeintrag [W/m²]	10				
Luftwechselrate [1/h]	1.45±1.05	2.03±1.86	3.91±3.68	5.87±5.52	
nutzbar [%]	49.4	84.7	88.8	88.8	
zu kalt [%]	39.4	4.06	0	0	
zu heiss [%]	4.91	4.91	4.91	4.91	
zu feucht [%]	8.92	8.92	8.92	8.92	
Nachtkühlung					
Potenzial [W/(m ² LW)]	6.98				
Erforderliche Nächte	80				
davon nutzbar [%]	81.3				

Station	Lugano	Adaptiver Komfort PD=10%			SIA-normal
		10	20	40	
Gesamter Wärmeeintrag [W/m²]	10				
Luftwechselrate [1/h]	1.45±1.03	2.09±1.85	4.14±3.71	6.22±5.56	
nutzbar [%]	54.9	89.9	90.2	90.2	
zu kalt [%]	35.3	0.31	0	0	
zu heiss [%]	3.38	3.38	3.38	3.38	
zu feucht [%]	8.39	8.39	8.39	8.39	
Nachtkühlung					
Potenzial [W/(m ² LW)]	5.56				
Erforderliche Nächte	71				
davon nutzbar [%]	84.5				

Station	Lugano	Adaptiver Komfort PD=10%			IPCC A1B 2050
		10	20	40	
Gesamter Wärmeeintrag [W/m²]	10				
Luftwechselrate [1/h]	1.49±1.14	2.16±2.05	4.29±4.10	6.43±6.16	
nutzbar [%]	52.6	83.4	84.1	84.1	
zu kalt [%]	31.5	0.74	0	0	
zu heiss [%]	6.87	6.87	6.87	6.87	
zu feucht [%]	12.2	12.2	12.2	12.2	
Nachtkühlung					
Potenzial [W/(m ² LW)]	6.18±3.26				
Erforderliche Nächte	105				
davon nutzbar [%]	76.2			PD (Prozentsatz Unzufriedener)	

Die Stationen Basel-Binningen und Lugano weisen ab einem gesamten Wärmeeintrag von 20 W/m² eine grosse Jahresstundenzahl aus, an denen die natürliche Lüftung unter Einhaltung der Komfortgrenzen mit 10 % Unzufriedenen realisiert werden kann. Die Zahl erforderlicher Nächte für Nachtkühlung steigt unter Berücksichtigung des IPCC Klimaszenarios um 60 % resp. 47 %, währenddessen die effektive Nutzbarkeit absolut um 19 % resp. 8 % abnimmt.

Station	Disentis	Adaptiver Komfort PD=10%			SIA-normal
		10	20	40	
Gesamter Wärmeeintrag [W/m²]	10				
Luftwechselrate [1/h]	1.37±0.96	1.73±1.54	3.15±3.00	4.73±4.48	
nutzbar [%]	39.7	86.7	98.9	98.9	
zu kalt [%]	59.2	12.2	0	0	
zu heiss [%]	1.1	1.1	1.1	1.1	
zu feucht [%]	0	0	0	0	
Nachtkühlung					
Potenzial [W/(m ² LW)]	9.41±1.99				
Erforderliche Nächte	26				
davon nutzbar [%]	100				

Station	Disentis	Adaptiver Komfort PD=10%		IPCC A1B 2050
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.31±0.77	1.74±1.34	3.22±2.63	4.83±3.94
nutzbar [%]	43.6	88.5	98.7	98.7
zu kalt [%]	55.1	10.2	0	0
zu heiss [%]	0.75	0.75	0.75	0.75
zu feucht [%]	0.66	0.66	0.66	0.66
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	6.83			
Erforderliche Nächte	18			
davon nutzbar [%]	100			

Station	Sion	Adaptiver Komfort PD=10%		SIA-normal
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.56±1.25	2.09±2.12	3.93±4.16	5.90±6.25
nutzbar [%]	47.6	87	94.4	94.4
zu kalt [%]	46.8	7.41	0	0
zu heiss [%]	4.85	4.85	4.85	4.85
zu feucht [%]	0.87	0.87	0.87	0.87
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	8.46±2.52			
Erforderliche Nächte	82			
davon nutzbar [%]	100			

Station	Sion	Adaptiver Komfort PD=10%		IPCC A1B 2050
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.60±1.26	2.19±2.20	4.14±4.33	6.21±6.49
nutzbar [%]	48.1	84.3	90.4	90.4
zu kalt [%]	42.3	6.1	0	0
zu heiss [%]	4.98	4.98	4.98	4.98
zu feucht [%]	5.92	5.92	5.92	5.92
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	7.00±3.02			
Erforderliche Nächte	77			
davon nutzbar [%]	83.1			

Station	Zürich-SMA	Adaptiver Komfort PD=10%		SIA-normal
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.43±0.97	1.91±1.68	3.60±3.30	5.40±4.96
nutzbar [%]	46.8	90	97.2	97.2
zu kalt [%]	50.4	7.23	0	0
zu heiss [%]	2.1	2.1	2.1	2.1
zu feucht [%]	0.80	0.80	0.80	0.80
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	7.42±1.98			
Erforderliche Nächte	37			
davon nutzbar [%]	100			

Station	Zürich-SMA	Adaptiver Komfort PD=10%		IPCC A1B 2050
Gesamter Wärmeeintrag [W/m ²]	10	20	40	60
Luftwechselrate [1/h]	1.39±0.97	1.90±1.69	3.61±3.32	5.41±4.99
nutzbar [%]	47	85.3	91.7	91.7
zu kalt [%]	44.7	6.38	0	0
zu heiss [%]	2.9	2.9	2.9	2.9
zu feucht [%]	6.99	6.99	6.99	6.99
Nachtkühlung				
Potenzial [W/(m ² LW)]	5.63±3.16			
Erforderliche Nächte	56			
davon nutzbar [%]	83.9		PD (Prozentsatz Unzufriedener)	

Bei gesamten Wärmeeinträgen von 20 bis 40 W/m² sind Luftwechselraten von 2 bis 4 pro h zur Einhaltung der adaptiven Komfortgrenzen bei 10 % Unzufriedenen erforderlich.

4. Diskussion

Die im Beitrag vorgestellte Berechnungsmethode erlaubt eine gute Abschätzung des Potenzials für natürliche Lüftung und Nachtkühlung. Verlässliche lokale Wetterdaten sind für die Dimensionierung natürlicher Lüftungen und Nachtkühlung wichtig. Anhand der Winddaten können Windrosen erstellt werden, welche die Häufigkeit der Windrichtungen angeben. Damit können Winddruckprofile erstellt

und Druckkoeffizienten berechnet werden, die bei Gebäuden mit mehreren Stockwerken unerlässlich sind [12]. Limitierende Faktoren für die natürliche Lüftung können die Lärmbelastung und die Qualität der Aussenluft darstellen. Diese Faktoren sind gemäss SIA 382/1:2014 zu ermitteln und die Einsatzmöglichkeit der natürlichen Lüftung ist entsprechend nachzuweisen.

5. Ausblick

Die natürliche Lüftung hängt stark mit der Lage und der Ausrichtung des Gebäudes zusammen. In einer frühen Phase ist die Machbarkeit zu prüfen. Die vorgestellte Methode erlaubt durch ihre einfache Handhabbarkeit eine rasche Potenzialabschätzung. Die Dimensionierung der erforderlichen Fenster-Öffnungsflächen in der Gebäudehülle und deren Betätigung in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen stellen eine Herausforderung für die Architektur und die Gebäudetechnik dar. Zahlreiche realisierte Gebäude zeigen, dass diese Herausforderungen im In- und Ausland angenommen und gemeistert werden.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Geschäftsleitung der Aicher, De Martin, Zweng AG in Luzern für die vorausschauende Unterstützung des Pilotprojekts und die Förderung dieser Publikation.

Anhang Literatur/Referenzen

- [1] Norm SIA 180:2014, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [2] S.J. Emmerich et al, *Impact of adaptive thermal comfort on climatic suitability of natural ventilation in office buildings*, Energy and Buildings 43 (2011), 2101-2107, Elsevier Verlag, Amsterdam.
- [3] ASHRAE Research Project 884, 1997, *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [4] ASHRAE Standard 55-2013, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA
- [5] Norm SN EN 15251:2007, *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, European Committee for Standardization, Brüssel.
- [6] D. Kalz et al., *Thermischer Raumkomfort in Nichtwohngebäuden*, HLH Bd. 65 (2014) Nr. 5 - Mai, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [7] Climate Suitability Tool, Version 1.0, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [8] Merkblatt SIA 2024:2006, *Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [9] Merkblatt SIA 2028:2010, *Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [10] Meteonorm, Version 7.1, Meteotest, Bern.
- [11] CH2011 (2011), *Swiss Climate Change Scenarios*, C2SM, MeteoSwiss, NCCR and OoCC, ETH Zürich.
- [12] R. Ramponi, *Energy saving potential of night ventilation: Sensivity to pressure coefficients for different European climates*, Applied Energy 123 (2014) 185-195, Elsevier Verlag, Amsterdam.