

BETONKERNAKTIVIERUNG MIT LUFT IM VERGLEICH ZU ETABLIERTEN SYSTEMEN DER RAUMKÜHLUNG

Dipl.-Ing. C. Schwenk, Prof.-Dr. A. Maas
Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik
34109 Kassel

KURZFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wird die luftgestützte Betonkernaktivierung im Kontext etablierter, bestehender Systeme zur passiven Kühlung von Nichtwohngebäuden mit Hilfe von Simulationen untersucht. Grundlage der Studie stellen drei Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung, zwei Systeme mit wassergestützter Betonkernaktivierung und ein konventionelles System mit Umluftkühler dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Betonkernaktivierung mit Luft bei Standard-Klima ("Normal"-TRYs) angenehme sommerliche Raumlufttemperaturen ermöglicht. In überwarmen Sommern ("Sommer"-TRYs) stößt die luftgestützte Betonkernaktivierung an ihre Grenzen, die Anzahl der Übertemperaturgradstunden übersteigt deutlich die Anforderung der DIN 4108-2 (500 Kh/a – Grenze). Deutlich weniger Probleme mit Überwärmung zeigen dagegen die wassergestützten Systeme, im untersuchten Spektrum bleiben alle Varianten unterhalb von 500 Kh/a.

Hinsichtlich der erforderlichen Hilfsenergie für Lüftung, Heizung und Kühlung zeigt sich für die luftgestützten Systeme ein deutlicher Mehraufwand von bis zu 8 kWh/(m²a) gegenüber wassergestützter Betonkernaktivierung.

ABSTRACT

This paper presents the air-based thermal core activation in context of established existing systems for passive cooling in non residential buildings. The study includes three airbased thermal core activated systems, two waterbased systems and a conventional fancoil system.

The results of the simulation show, that air-based activation is well functioning concerning cooling in standard climate ("normal-TRY"). In summer climate ("Summer-TRY") the air-based activation is limited. The number of overtemperature degree hours exceeds the limit value of 500 Kh/a clearly. Less problems with superwarming show the systems with water-based activation. Here the systems keep within 500 Kh/a.

Concerning the required auxiliary energy demand for ventilation, heating and cooling the airbased systems shows a clearly additional expenses up to 8 kWh/(m²a) contrary to waterbased systems.

EINLEITUNG

Am Beispiel des EnOB-Projektes "Monitoring einer zentralen Energieversorgung aus erneuerbaren Energien für ein Verwaltungszentrum" wurde in [Schwenk, C.; Maas, A. 2014] die Systemsimulation eines Gebäudes mit luftgestützter Betonkernaktivierung bei gleichzeitiger Raumluftkonditionierung vorgestellt. Aufbauend auf diese Arbeit soll im vorliegenden Beitrag eine Gesamtbilanzierung der luftgestützten Betonkernaktivierung im Kontext etablierter, bestehender Systeme zur passiven Kühlung von Nichtwohngebäuden vorgenommen werden. Dies schließt insbesondere die Bilanzierung der benötigten Hilfsenergien für Lüftung, Raumheizung und Kühlung mit ein. Zusätzlich erfolgt die Bewertung des Komforts.

Für die Simulation wird das Programm TRNSYS [TRNSYS 2016] genutzt. Basis für die Simulation stellen die sog. Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 2011 dar. Es werden die Standard-Datensätze und die Datensätze für überwarme Sommer genutzt.

Folgende vier Standorte werden untersucht:

- **TRY 03:** Nordwestdeutsches Tiefland, Standort: Fuhlsbüttel (Hamburg): gemäßigt
- **TRY 04:** Nordostdeutsches Tiefland, Mecklenburg Vorpommern, Standort: Potsdam: Winter: kühl und trocken, Sommer: warm und trocken
- **TRY 07:** nördliche und westliche Mittelgebirge, Standort: Kassel: gemäßigt, in Höhenlagen kühl
- **TRY 12:** Oberrheingraben und unteres Neckartal: Standort: Mannheim: Winter gemäßigt, Sommer warm

GEBÄUDEMODELL

Zur allgemeinen Vergleichbarkeit wird ein typisches Referenzgebäude in Anlehnung an [Voss, K.; Pfafferott, J. 2007] generiert. Damit die Modellierung der zu aktivierenden Decke bzw. des Fußbodens und ihre Auswirkung auf den Raum so exakt wie möglich erfolgt, wird das sog. Typgebäude III um zwei zusätzliche Geschosse – ein Erd- und ein Dachgeschoss – erweitert. Das Modell verfügt damit über insgesamt neun Zonen, die sich auf drei Geschosse verteilen (s. a. Abbildung 1).

Bauphysikalische Parameter: Die bauphysikalischen Parameter werden in Anlehnung an die ENEC 2014 für den Neubau - Nichtwohnungsbau - gewählt.

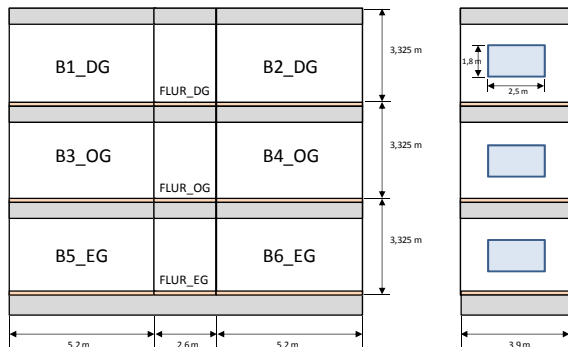


Abbildung 1: Gebäudemodell in Anlehnung an Typgebäude III

RANDBEDINGUNGEN SIMULATION

Verschattung und Sonnenschutz: Bis auf das nach Norden gelegene Büro verfügen alle Büros über eine außenliegende Verschattung. Die Verschattung wird aktiviert, sobald die direkte Einstrahlung auf die Fensterfläche größer als 200 W/m^2 ist.

Gebäudedichtheit und Infiltration: Für die Dichtheit des Gebäudes wird ein n_{50} -Wert von 1,5 l/h angenommen.

Personenbelegung und interne Lasten: Es wird von einer Bürobelegung mit zwei Personen zwischen 7:00 Uhr und 18:00 Uhr ausgegangen. Es ist kein Wochenrhythmus implementiert, d. h. auch am Wochenende wird das Büro genutzt. Die Leistungsabgabe der Personen erfolgt gemäß VDI 2078/ DIN 1946-2- Aktivitätsgrad I - II.

Es wird von einer mittleren, internen Last durch elektrische Geräte von 7 W/m^2 ausgegangen. Für das vorliegende Büro entspricht dies einer Leistung von 142 W.

Heizung: Die Büroräume werden bei Bedarf über konventionelle Raumheizkörper mit Thermostatventil beheizt. Die Simulation des Heizkörpers erfolgt mit TRNSYS-Type 362 ("dyn. Radiator Modell"), der Raumthermostat mit TRNSYS-Type 320 ("PID-Kontroller als Thermostatventil").

Geheizt wird nur zu den Büroarbeitszeiten ab 6:00 Uhr. Die Beheizung endet um 18:00 Uhr. Die Solltemperatur für das Büro beträgt $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Vorlauftemperatur wird als Funktion der Außentemperatur vorgegeben.

Raumkühlung: Die Raumkühlung erfolgt je nach System über eine aktivierte Decke (luft- oder wassergeführt) oder über einen Umluftkühler. Die gewünschte Raumtemperatur im Sommer beträgt $23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die aktivierten Decken werden mit TRNSYS-Type 360 ("Fußboden- und Hypocaustenheizung") abgebildet. Der Umluftkühler wird vereinfacht durch TRNSYS-Type 91 ("Wärmetauscher") dargestellt.

Es wird davon ausgegangen, dass für Kühlung und Vorkühlung eine regenerative Quelle wie Außenluft oder Grundwasser zur Verfügung steht.

In der vorliegenden Studie wird von einer Grundwasserkühlung ausgegangen. Im Jahresmittel beträgt die Brunnentemperatur $14,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lüftungsanlage: Je nach Ausrichtung (Nord/ Süd, bzw. West/Ost) ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Raumkonditionierung, deshalb sind je Etage zwei Lüftungsgeräte vorgesehen.

Die Lüftungsanlage ist nur zu den Büroarbeitszeiten in Betrieb. Sie startet um 7:00 Uhr und endet mit Büroschluss. Je Stunde und Büro werden 60 m^3 Luft über das Lüftungssystem zugeführt, das entspricht einem Luftwechsel von ungefähr 1,0 l/h.

Der Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage wird zu 75 % angenommen. Die Wärmerückgewinnung kann bei Bedarf durch einen Bypass umgangen werden. Die Lüftungsgeräte werden vereinfacht mit TRNSYS-Type 91 berechnet.

Zur Sicherstellung der Frostfreiheit ist ein idealer Nachheizer (TRNSYS-Type 6) implementiert, der bei Umgebungstemperaturen unterhalb von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ die zugeführte Frischluft auf $3 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt.

ANLAGENMODELLIERUNG

Insgesamt werden sieben Systeme für die Raumkühlung untersucht; davon sind drei Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung ausgestattet und zwei Systeme mit wassergestützter Betonkernaktivierung. Als "konventionelles" – aktives - Vergleichssystem dient ein System mit Umluftkühler und Kompressionskältemaschine. Zusätzlich wird ein Referenzsystem ohne Betonkernaktivierung und ohne aktives System zur Raumkühlung simuliert:

- **BTA-Luft:** System mit luftgestützter BTA ohne zusätzliche Kühlmöglichkeiten, Kühlung ausschließlich über Außenluft
- **BTA-Luft mit Erdkanal:** System mit luftgestützter BTA und Erdkanal
- **BTA-Luft (Vorkühlung):** System mit luftgestützter BTA und zentraler Vorkühlung durch Grundwasserbrunnen
- **BTA-Wasser (GWB):** System mit wassergestützter BTA und Kühlung durch Grundwasserbrunnen
- **BTA-Wasser (WL-WT):** System mit wassergestützter BTA und trockener Rückkühlung durch einen Wasser-Luft-Wärmeübertrager
- **Umluftkühler:** System mit Umluftkühler und Kompressionskältemaschine, zusätzliche Nachtlüftung möglich
- **Referenzsystem:** System ohne Betonkernaktivierung und ohne aktives System zur Raumkühlung, Nachtlüftung bei Bedarf möglich.

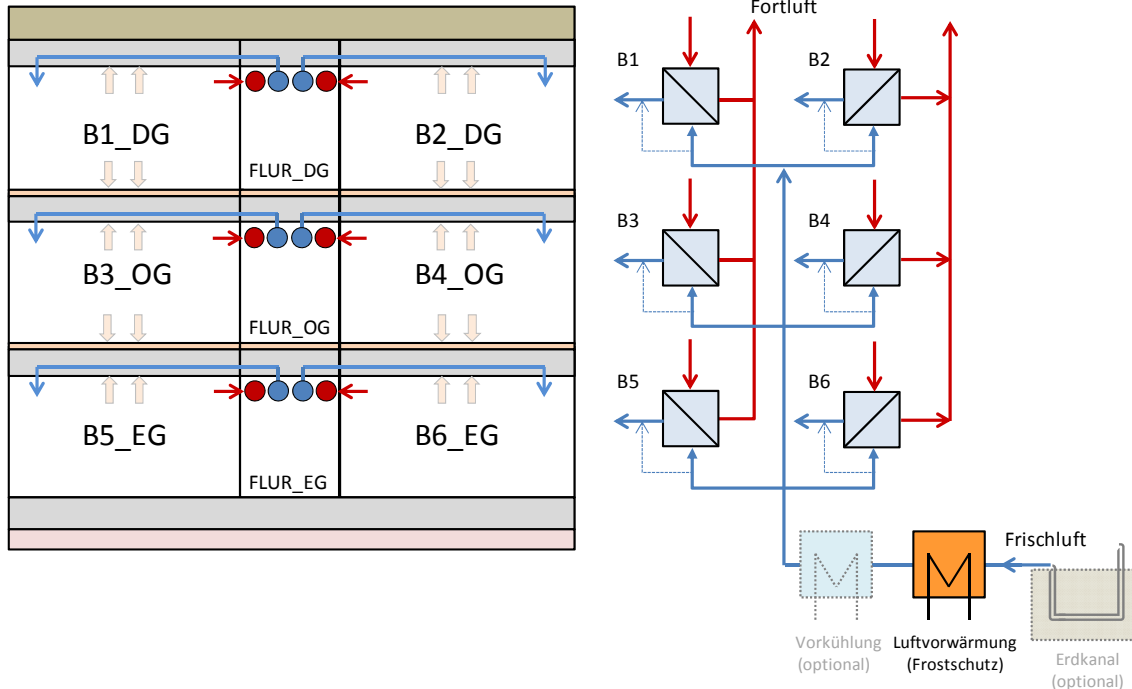


Abbildung 2: System mit luftgestützter Betonkernaktivierung

Systeme mit luftgeführter Betonkernaktivierung

Basissmodell: Das Modell der luftgestützten Betonkernaktivierung ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Für die luftgestützte BTA sind innenberippte Rohre in der Betondecke vergossen. Jedes Büro wird über einen separaten, 8 m langen Zuluftstrang belüftet, für eine detaillierte Beschreibung siehe zum Beispiel [Kiefer 2016]. Die Raumkühlung erfolgt im Basissystem ausschließlich über kalte Nachtluft. Zur Aktivierung der Nachtlüftung müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Umgebungstemperatur muss niedriger sein als der Ist-Wert der Raumtemperatur;
- Der Ist-Wert der Raumtemperatur muss um mindestens 1 K über der gewünschten Raumtemperatur liegen.

Die **Betonkernaktivierung mit Erdkanal** entspricht grundsätzlich dem oben vorgestellten System. Unterschied ist, dass hier die Frischluft zunächst durch einen Erdkanal geführt wird. Die Berechnung des Erdkanals erfolgt mit den TRNSYS-Type 460. Für den Erdkanal gelten folgende Randbedingungen:

- Länge Erdkanal: 15 m, davon 10 m überbaut
- Tiefe Erdkanal: 1,5 m
- Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs: 2,1 W/(mK)

Das **System der luftgeführten Betonkernaktivierung mit zentraler Vorkühlung** entspricht ebenfalls grundsätzlich dem oben beschriebenen Basissystem. Zusätzlich wird jedoch bei Bedarf der zugeführte Frischluftstrom zentral vorgekühlt; s. a. Abbildung 2. Die Vorkühlung erfolgt, sobald die gewünschte Raumtemperatur um 1 K überschritten wird und die

angesaugte Frischluft wärmer ist als die Temperatur der zu Verfügung stehenden Wärmesenke (z. B. ein Grundwasserbrunnen). Die Kühlung ist damit nicht auf die Nachtstunden beschränkt, sondern kann ganzjährig erfolgen.

Systeme mit wassergeführter Betonkernaktivierung

Der Kreislauf der wassergestützten Betonkernaktivierung wird über einen zentralen Verteiler versorgt. Für die Rückkühlung sorgen wahlweise

- ein Grundwasserbrunnen oder
- ein Wasser-Luft-Wärmeübertrager (“trockene Rückkühlung“)

Die Betonkernaktivierung ist auf den nächtlichen Betrieb außerhalb der Bürozeiten beschränkt. Sobald die Raumtemperatur 23 °C überschreitet, wird der Kühlkreislauf aktiviert.

Eine Rückkühlung ist hier nur dann möglich, wenn die Temperatur der Wärmesenke unterhalb der Raumtemperatur bzw. der Rücklaufemperatur der Betonkernaktivierung liegt.

Das Gebäude verfügt über eine konventionelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung, die die Frischluft frei in den Raum einbläst. Die Lüftungsanlage ist ausschließlich zu Bürozeiten in Betrieb, eine Vorkühlung der Luft ist nicht vorgesehen.

System mit Umluftkühler

Als “konventionelles“ – aktives - System wurde ein System mit Umluftkühler (auch Gebläsekonvektor oder Fan Coil genannt) simuliert. Bei diesem System wird im Bedarfsfall über einen Ventilator Luft aus dem zu kühlenden Raum angesaugt, über einen

Wärmeübertrager gekühlt und wieder in den Raum zurückgeblasen. Der Wärmeübertrager zur Kühlung muss über einen Kühlkreislauf versorgt werden.

Die Versorgung mit Kälte erfolgt zentral. Die Kälte selbst wird in vorliegender Simulationsstudie *nicht* regenerativ zur Verfügung gestellt. Zur Erzeugung wird eine Kompressionskältemaschine angenommen.

Referenzsystem

Als Referenzsystem dient ein System ohne zusätzliche Vorrichtung zur Raumkühlung. Ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung ist vorgesehen, es besteht die Möglichkeit der Nachluftspülung.

PARAMETER DER AUSWERTUNG

Komfortparameter

Die Bewertung des Komforts erfolgt anhand der Übertemperaturgradstunden gemäß DIN 4108-2. Für Nichtwohngebäude liegt damit der Anforderungswert bei maximal 500 Kh/a.

In der vorliegenden Studie wird für eine bessere Vergleichbarkeit der Bezugswert der Innentemperatur für alle Regionen mit 26 °C gleich gewählt.

Energetische Bewertung

Es wird der Primärenergiebedarf für Heizen, Kühlen und Lüften ermittelt. Einen besonderen Schwerpunkt stellt dabei die Berechnung des erforderlichen Hilfsenergiebedarfs dar, da hier die größten Unterschiede beim Vergleich der Systeme erwartet werden.

Der Hilfsenergiebedarf wird anhand der Pumplaufzeiten für Heizung und Kühlung bzw. anhand der Ventilatorlaufzeiten der Lüftungsgeräte bestimmt. Die Laufzeiten werden für jede Zone in der Simulation ermittelt und gemäß DIN V 18599 ausgewertet.

Der Primärenergiefaktor für Strom wird zu 2,0 angenommen.

Energiebedarf Raumheizung und Raumkühlung

Im Simulationsergebnis wird der aufgewendete Nutzwärmebedarf für jede Zone separat ausgewiesen. Verteilverluste werden nicht explizit berechnet, sondern pauschal mit 25 % des Nutzenergiebedarfs angenommen. Ebenso wird der Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers pauschal zu 91 % angenommen.

Bis auf das System mit Umluftkühler werden die Systeme über regenerative Kühlquellen versorgt (Grundwasserbrunnen, Außenluft). Der aufzuwendende Nutzenergiebedarf ist damit für die Bilanzierung nicht erheblich, da davon ausgegangen wird, dass die regenerativen Kältequellen unbegrenzt zur Verfügung stehen.

Es ist im vorliegenden Kontext damit ausschließlich der Energiebedarf für Kühlung beim System mit Umluftkühler und KKM zu ermitteln. Die Jahreskälteleistungszahl SEER der KKM wird gemäß der DIN 18599-7 bestimmt. Die Verteilverluste des Kühlkreises werden pauschal mit 25 % der aufgewendeten Nutzenergie für Kälte berechnet.

Hilfsenergiebedarf Raumheizung und -kühlung

Der Hilfsenergiebedarf für die Raumheizung und Raumkühlung enthält ausschließlich den erforderlichen Strombedarf für die Pumpen. Der Hilfsenergiebedarf für Regelung, Steuerung, etc. wird nicht berücksichtigt.

Grundlage für die Berechnung stellt die simulierte Pumpenlaufzeit dar, sowie der Druckverlust im Heiz- oder Kühlkreislauf und die davon abhängige hydraulische Leistung (s. a. Tabelle 1).

Tabelle 1: elektr. Leistungsaufnahme der verwendeten Pumpen und Ventilatoren

Geltungsbereich	Ventilator/ Pumpe	PeI,hilf [W]
6 Büros in Reihe	Ventilator BTA-Luft (innenberipptes Rohr)	113,6
6 Büros in Reihe	Ventilator "Standard"(ohne BTA-Luft)	49,6
6 Büros in Reihe	Ventilator Umluftkühler	60
gesamtes Gebäude	Ventilator Wasser-Luft Rückkühler	450
gesamtes Gebäude	Pumpe BTA-Wasser Kühlkreislauf	177
gesamtes Gebäude	Pumpe Kühlkreislauf Umluftkühler	228
gesamtes Gebäude	Heizungspumpe	156
gesamtes Gebäude	Pumpe Rückkühler Grundwasser (BTA-Luft)	55
gesamtes Gebäude	Pumpe Rückkühler Grundwasser (BTA-Wasser)	262

Hilfsenergiebedarf Raumlüftung

Für den Betrieb der Raumlüftung ist ausschließlich Hilfsenergie erforderlich. Grundlage für die Ermittlung des Hilfsenergiebedarfs stellt auch hier der Druckverlust im Rohrnetz der Lüftungsanlage dar.

Für die elektrische Leistung P_{el} des Lüftungsgerätes gilt in Abhängigkeit des Druckverlustes Δp und des Volumenstroms V :

$$P_{el} = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}}{\eta_{sys}}$$

Der mittlere Systemwirkungsgrad η_{sys} der Ventilatoren wird zu 12,5% angenommen, dieser Wert entspricht im Mittel den Werten guter, marktgängiger Geräte im Segment bis maximal 600 m³/h.

Druckverlust Lüftungssystem

Der Druckverlust in einem einfachen Rohr mit Kreisquerschnitt kann ohne Schwierigkeit bestimmt werden. Angaben zum Druckverlust in innenberippten Rohren zur luftgestützten BTA sind beim Hersteller des sog. Kiefersystems [Kiefer 2016] erhältlich.

Tabelle 2: Druckverluste im Vergleich

Volumenstrom [m³/h]	innenberipptes Rohr DN 80 [Pa/m]	Wickelfalzrohr DN 80 [Pa/m]	Wickelfalzrohr DN 100 [Pa/m]	Wickelfalzrohr DN 150 [Pa/m]	Wickelfalzrohr DN 200 [Pa/m]
60	10,08	2,2	0,8		
70	13,39	2,9	1,0		
80	16,71	3,7	1,3		
90	20,03	4,5	1,6		
100		5,5	1,9	0,3	0,1
150			3,8	0,6	0,1
200			6,4	0,9	0,2

In Tabelle 2 sind die Druckverluste vergleichend gegenübergestellt. Bei DN 80, sind die Druckverluste des innenberippten Rohrs pro Meter Rohrlänge um ca. das 4-fache größer als bei herkömmlichen Wickelfalzrohren.

Die unterschiedlichen Druckverluste von innenberipptem Rohr und normalem Wickelfalzrohr spiegeln

sich auch in der Druckverlustberechnung für das Lüftungsnetz und der Berechnung für die erforderliche Leistungsaufnahme des Ventilators wieder. In Tabelle 3 sind die beiden Systeme gegenübergestellt. Die Berechnung wird für sechs nebeneinander liegende Büros mit gemeinsamen Lüftungsgerät durchgeführt. Die Systeme unterscheiden sich nur im Zuluftstrang, die Abluft ist identisch.

Tabelle 3: Druckverlust und Leistungsaufnahme im Vergleich für Systeme mit innenberippten Rohr und Systeme mit Wickelfalzrohr

	Δp Zuluft	Δp Abluft	Pel Zuluft	Pel Abluft
	[Pa]	[Pa]	[W]	[W]
BTA-Luft (Innenrippen) 360 m³/h	111	31	89	25
Lüftung - Wickelrohr: 360 m³/h	31	31	25	25
BTA-Luft (Innenrippen) 540 m³/h	235	72	282	86
Lüftung - Wickelrohr: 540 m³/h	72	72	86	86

ERGEBNISSE SYSTEMSIMULATION

Übertemperaturgradstunden

In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind exemplarisch für die Ausrichtung nach Westen und nach Osten die Übertemperaturgradstunden für die untersuchten Systeme dargestellt. Das (hier nicht dargestellte) Südbüro weist vergleichbare Werte zum Ostbüro auf (ca. 100 Kh/a niedriger), ebenso das nach Norden gelegene Büro, das keine Verschattungseinrichtung aufweist.

Dargestellt ist jeweils der maximale Wert der jeweiligen Ausrichtung. Die Übertemperaturgradstunden entfallen ausschließlich auf die Monate Juni, Juli und August, es werden nur die Übertemperaturgradstunden innerhalb der Büroarbeitszeit dargestellt.

Standard-TRY: Grundsätzlich ist festzustellen, dass alle Systeme – auch das Referenzsystem – bei Zugrundelegung des Standard-Testreferenzjahres das Anforderungskriterium von maximal 500 Kh/a einhalten, bzw. nur knapp überschreiten.

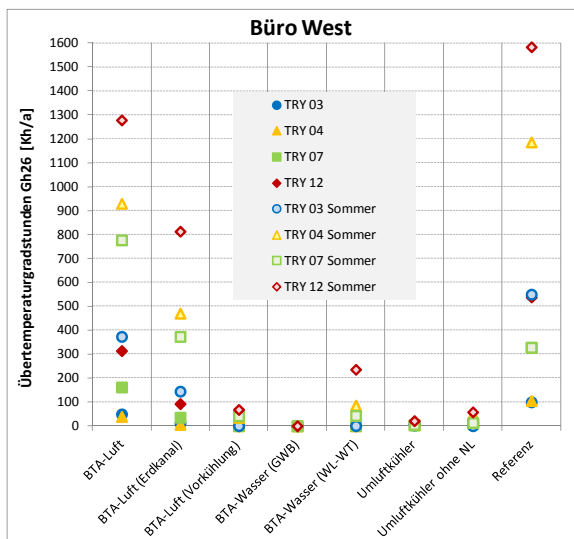


Abbildung 3: Übertemperaturgradstunden West-Büro

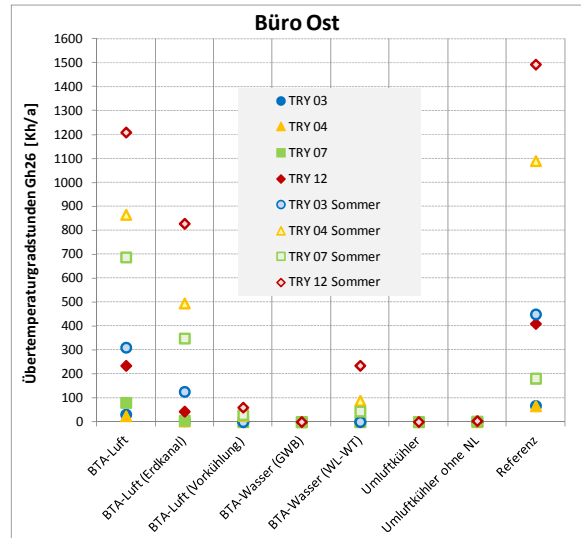


Abbildung 4: Übertemperaturgradstunden Ost-Büro

Sommer-TRY: Bei Berechnung mit den Sommer-Testreferenzjahren kann das Kriterium nur noch eingeschränkt eingehalten werden. Deutliche Überschreitungen des Anforderungskriteriums zeigen das Referenzsystem und zwei der Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung (BTA-Luft und BTA-Luft mit Erdkanal) bei den Standorten 04 (Hamburg), 12 (Mannheim) und teilweise auch 07 (Kassel).

Die meisten Übertemperaturgradstunden weist das Referenzsystem mit bis zu 1600 Kh/a am Standort 12 auf. Für den Standort 04 (Potsdam) liegt der Wert bei 1200 Kh/a, für den Standort 07 (Kassel) bei maximal 1000 Kh/a. Ausschließlich am Standort 03 (Hamburg) wird das Anforderungskriterium mit maximal 550 Kh/a nur knapp überschritten.

Das System mit luftgestützter BTA liegt mit 1300 Kh/a ebenfalls deutlich über dem Anforderungskriterium von 500 Kh/a. Gegenüber dem Referenzsystem weist das System mit luftgestützter BTA – unabhängig vom Standort und der Ausrichtung – rund 200 bis 300 Kh/a weniger aus.

Eine weitere Reduzierung - um bis zu 500 Kh/a - ergibt sich für die luftgestützte Betonkernaktivierung mit Erdkanal. Hier wird die zulässige Anzahl von Übertemperaturgradstunden nur noch am Standort 12 (Mannheim) deutlich überschritten.

Demgegenüber halten das System mit luftgestützter Betonkernaktivierung und zentraler Vorkühlung durch einen Grundwasserbrunnen, die Systeme mit wassergeführter BTA und die Systeme mit Umluftkühler das 500 Kh/a - Kriterium deutlich ein. Hier liegt allein das wassergestützte System mit einem Wasser-Luft-Rückkühler für den warmen Standort 12 (Mannheim) bei rund 250 Kh/a, da aufgrund der erhöhten nächtlichen Außentemperaturen die Rückkühlung weniger gut als beim Grundwasserbrunnen ist. Alle anderen Konfigurationen liegen unterhalb von 100 Kh/a.

Die Untersuchung zeigt, dass die Anzahl der Übertemperaturstunden pro Jahr stark von Standort und

System abhängen, grundsätzlich weisen die wasser-gestützten Systeme zur Raumkühlung deutlich weniger Übertemperaturgradstunden aus als die luft-gestützten Systeme. Systeme, die zur Rückkühlung ausschließlich kalte Nachluft nutzen, schneiden deutlich schlechter ab als Systeme, die auf einen Grundwasserbrunnen als Wärmesenke zurückgreifen können.

Primärenergiebedarf Heizung

Für das Referenzsystem liegt der Primärenergiebedarf für die Heizung je nach Standort und Ausrichtung zwischen 23 kWh/(m²a) (Standort 12) und 39 kWh/(m²a) (Standort 04).

In Abbildung 5 sind exemplarisch für die Standorte 04 und 12 die absoluten Differenzen zwischen den jeweils untersuchten Systemen und dem Referenzsystem dargestellt. Die Ergebnisse der Standorte 03 (Hamburg) und 07 (Kassel) sind vergleichbar mit dem Standort 04.

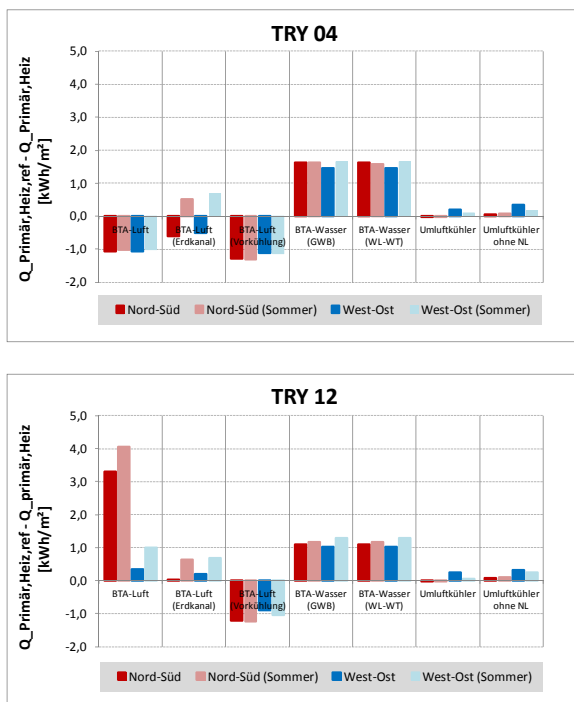


Abbildung 5: Primärenergiebedarfs Heizung: abs. Differenz zwischen Referenzsystem und untersuchter Variante

Grundsätzlich fällt auf, dass - bis auf den Standort 12 (Mannheim) - die Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung einen um rund 1 kWh/(m²a) höheren Primärenergiebedarf aufweisen als das Referenzsystem. Grund dafür ist, dass vor allem in der Übergangszeit solare Gewinne durch die luftgestützte Betonkernaktivierung abgeführt werden:

An strahlungsreichen Wintertagen oder in der Übergangszeit steigt in gut gedämmten Gebäuden die Raumtemperatur über die gewünschte Temperatur an. Der Raum wird allein über die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes ausreichend beheizt.

Gleichzeitig werden die solaren Einträge in der Decke des Raums gespeichert. Die in der Decke gespeicherte Wärme wird nun mit der zugeführten – vergleichsweise kälteren Luft – aufgenommen und anschließend über das Lüftungsgerät an die Umgebung abgeführt. Dieser Vorgang entspricht damit dem sommerlichen Kühlfall. Er ist im Winter und in der Übergangszeit nicht erwünscht, da dadurch die solaren Gewinne geschmälert und damit der Heizenergiebedarf erhöht wird.

Der gegenteilige Effekt tritt beim sommerwarmen Standort 12 (Mannheim) auf. Hier ist die zugeführte Frischluft in der Übergangszeit bereits so stark aufgewärmt, dass der Kühleffekt, der an den anderen Standorten auftritt, ausbleibt.

Primärenergiebedarf Kühlung

Bei den Systemen mit luftgestützter BTA wird der zur nächtlichen Kühlung erforderliche Hilfsenergiebedarf des Lüftungsgerätes dem Primärenergiebedarf der Kühlung zugerechnet. So kann der Primärenergiebedarf der Systeme direkt miteinander verglichen werden.

In Abbildung 6 ist der zur Kühlung erforderliche Primärenergiebedarf für die untersuchten Varianten getrennt nach Standorten dargestellt. Zusätzlich dargestellt sind die Übertemperaturgradstunden der Systeme.

Die wassergeführte Betonkernaktivierung mit Brunnenkühlung weist je nach Standort mit 0,6 - 0,9 kWh/(m²a) den niedrigsten Primärenergiebedarf aus bei gleichzeitiger Einhaltung des geforderten Komforts.

Der Primärenergiebedarf für die Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung liegt je nach System und Standort zwischen 1,8 bis 2,8 kWh/(m²a). Grundsätzlich benötigen die Systeme mit Erdkanal bzw. mit Brunnenkühlung rund 0,5 kWh/(m²a) weniger Primärenergie, da sie im Vergleich zum System ohne zusätzliche Unterstützung kürzere nächtliche Lüftungslaufzeiten aufweisen. In der gleichen Größenordnung liegt die Variante "wassergestützte Betonkernaktivierung mit trockener Rückkühlung".

Hinsichtlich des Primärenergiebedarfs für die Kühlung liegt das Referenzsystem zwischen den Systemen mit wasser- bzw. luftgestützter Betonkernaktivierung, kühlt aber deutlich schlechter.

Deutlich erhöht ist der Primärenergiebedarf zur Kühlung bei dem System mit Umluftkühler. Der Primärenergiebedarf liegt hier je nach Standort und Ausrichtung um bis zu das 2,5-fache über dem Referenzsystem bzw. den Systemen mit luftgestützter Betonkernaktivierung. Der Anteil der Aufwendungen für die Nachluftspülung liegt hier im Mittel bei 50 % für die überwarmen Testreferenzjahre.

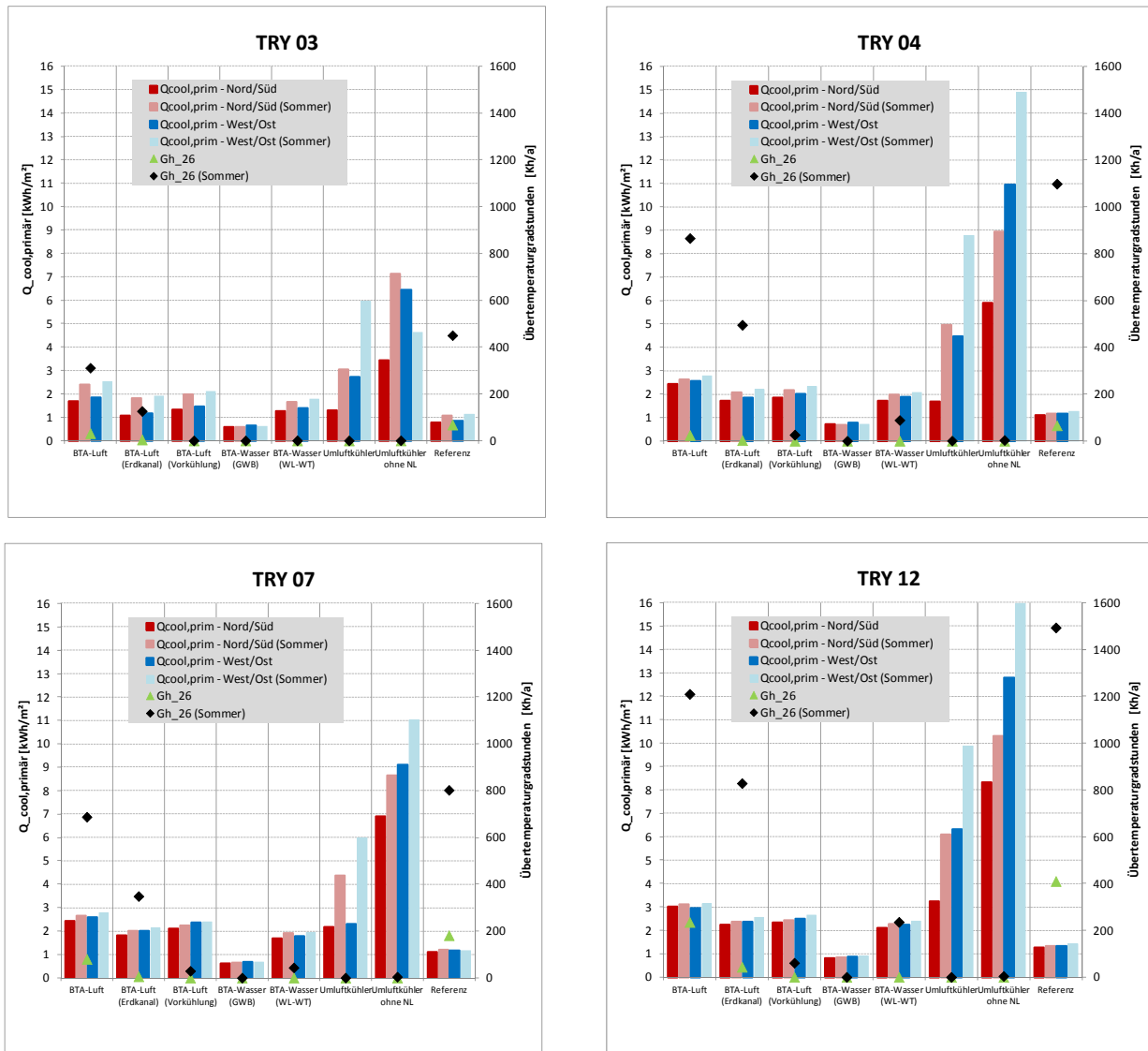


Abbildung 6: Primärenergiebedarf Kühlung der untersuchten Standorte 03 (Hamburg), 04 (Potsdam), 07 (Kassel), 12 (Mannheim)

PRIMÄRENERGIEBEDARF LÜFTUNG

Der Primärenergiebedarf für die Lüftung ist unabhängig vom Standort. Da die Lüftungszeiten für alle Systeme gleich sind, hängt der Bedarf ausschließlich von der Art der Lüftungsverrohrung ab - d. h., ob es sich um ein System mit luftgestützter Betonkernaktivierung und innenberippten Rohr handelt oder ob ein System mit normalem Wickelfalzrohr ohne Innenrippen installiert ist.

Für Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung liegt der Primärenergiebedarf für die Lüftung bei 6,8 kWh/(m²a), für die Systeme mit herkömmlicher Lüftung bei 3,0 kWh/(m²a).

ENERGIEKOSTEN

Abschließend sind in Abbildung 7 exemplarisch für den sommerwarmen Standort 04 (Potsdam) die Energiekosten für Heizung, Lüftung und Kühlung dargestellt. Die Stromkosten werden zu 0,25 €/kWh angenommen, die Kosten für Gas mit 0,06 €/kWh

(brutto). Dargestellt sind die Kosten für das Gebäude in West/Ost-Ausrichtung für überwarme Sommer.

Die Kosten für die Heizung belaufen sich im Mittel über alle untersuchten Systeme, Standorte und Ausrichtungen auf knapp 1,8 €/m²a, mit maximalen Kosten von 2,1 €/m²a für kalte Standorte und minimalen Kosten von 1,2 €/m²a für Standorte mit milden Wintern. Der prozentuale Anteil der Heizkosten an den gesamten Energiekosten liegt im Mittel bei 60 %, am winterwarmen Standort 12 (Mannheim) sind es sogar nur 35 %.

Zwischen 12 % und 30 % der Energiekosten entfallen auf die Lüftung. Die Kosten für die Lüftung sind ausschließlich von der Art der Verrohrung abhängig und damit unabhängig von Standort und Ausrichtung. Sie betragen 0,85 €/m²a für die Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung und 0,37 €/m²a für alle übrigen Systeme mit Wickelfalzrohr und Aufputz-Montage.

Demgegenüber weisen die Kosten für die Kühlung eine vergleichsweise große Schwankungsbreite abhängig vom System, Standort und der Ausrichtung auf. An sommerwarmen Standorten schwanken die Kosten zwischen 0,08 €/m²a) und 2,00 €/m²a), s. a. Abbildung 7.

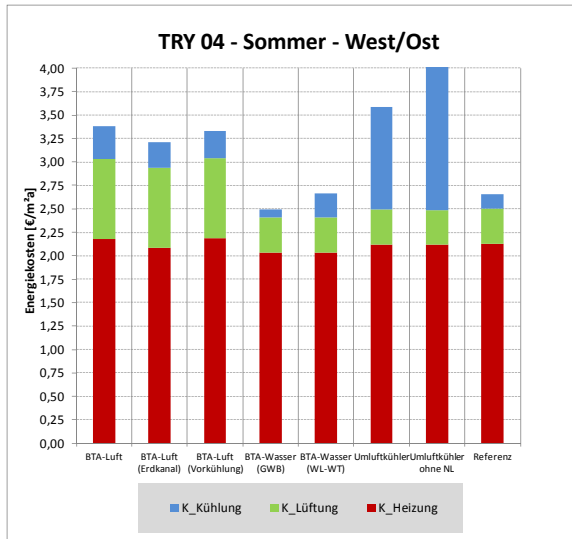


Abbildung 7: Energiekosten, exemplarisch dargestellt für Sommer-TRY für Standort 04

Grundsätzlich weist mit Abstand die niedrigsten Kühlkosten das System mit wassergeführter Betonkernaktivierung und Rückkühlung durch einen Grundwasserbrunnen auf. Hier liegen Kosten nahezu unabhängig vom Standort zwischen 0,07 und 0,10 €/m²a). Rund das Dreifache betragen die Kosten bei wassergeführter Betonkernaktivierung mit trockener Rückkühlung.

Die Kühlkosten für die luftgestützte Betonkernaktivierung liegen je nach System und Standort zwischen 0,13 und 0,40 €/m²a). Bei Vorkühlung durch einen Erdkanal oder Grundwasserbrunnen können 0,08 €/m²a) eingespart werden gegenüber dem luftgestützten System ohne zusätzliche Kühlung.

Mit Abstand am höchsten sind die Kühlkosten für das System mit Umluftkühler. An sommerwarmen Standorten können hier die Kosten bis zu 2,00 €/m²a) betragen.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wird die luftgestützte Betonkernaktivierung im Kontext etablierter, bestehender Systeme zur passiven Kühlung von Nichtwohngebäuden untersucht. Grundlage der Studie stellen drei Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung, zwei Systeme mit wassergestützter Betonkernaktivierung und ein System mit Umluftkühler dar.

Das Gebäude und die dazugehörige technische Gebäudeausrüstung wird mit dem Simulationswerkzeug TRNSYS abgebildet. Es werden zwei gemäßigte Standorte und zwei sommerwarme Standort untersucht. Die Wetterdatenbasis stellen die sog. Testreferenzjahre von 2011 des DWD dar.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Betonkernaktivierung mit Luft bei Standard-Klima ("Normal"-TRYs) größtenteils angenehme sommerliche Raumlufttemperaturen ermöglicht, nur an sommerwarmen Standorten wird das gemäß DIN 4108 Teil 2 formulierte Anforderungskriterium von maximal 500 Kh/a knapp überschritten.

In überwarmen Sommern ("Sommer"-TRYs) stößt die luftgestützte Betonkernaktivierung allerdings an ihre Grenzen, die Anzahl der Übertemperaturgradstunden übersteigt deutlich die 500 Kh/a – Grenze. Kaum Probleme mit Überwärmung zeigen dagegen die wassergestützten Systeme und der konventionelle Umluftkühler, im untersuchten Spektrum bleiben alle Varianten deutlich unterhalb von 500 Kh/a.

Die Systeme unterscheiden sich hinsichtlich des Primärenergieaufwands für die Heizung mit im Mittel $\pm 1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nur wenig voneinander. Bei der Lüftung ist der mit der luftgestützten Betonkernaktivierung verbundene Mehraufwand an Primärenergie gegenüber "normaler" Verrohrung mit Wickelfalz mit 3,8 kWh/m²a) bzw. 230 % deutlich größer.

Deutliche Unterschiede treten auch beim erforderlichen Hilfsenergiebedarf für die Kühlung auf. Hier zeigt sich für die luftgestützten Systeme ein Mehraufwand von 1 - 2 kWh/m²a) gegenüber wassergestützter Betonkernaktivierung, die mit 0,5 bis 0,9 kWh/m²a) die geringsten Aufwendungen aufweist. Mit bis zu 16 kWh/m²a) ist der Primärenergieaufwand für den "konventionellen" Umluftkühler am größten.

Die Untersuchung zeigt, dass Systeme mit luftgestützter Betonkernaktivierung unter den derzeitigen Standard-Wetterbedingungen hinsichtlich des Komforts gut mit den etablierten Systemen der wassergestützten Betonkernaktivierung mithalten können. Bei zukünftig gehäuft zu erwartenden, überwarmen Sommern schaffen es die Systeme der luftgestützten Betonkernaktivierung allerdings nur noch eingeschränkt, die Anforderungen zu erfüllen.

LITERATUR

- Kiefer 2016. Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH, Luft- und Klimatechnik, Stuttgart.
- Schwenk, C.; Maas, A. 2014. Betonkernaktivierung mit Luft am Beispiel eines ENOB-Projektes - Vergleichende Systemsimulation in: Fifth German Austrian IBPSA Conference RWTH Aachen 2014, S. 358–365.
- TRNSYS 2016. Transient System Simulation Tool, Entwicklung und Vertrieb in Deutschland: Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart.
- Voss, K.; Pfafferoth, J. 2007. Energieeinsparung contra Behaglichkeit?, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, 2007.