

In Ausgabe 12/2008 lüftete die cci das „Kühldecken-Geheimnis“ und nannte für 2007 eine in Deutschland installierte Fläche von 845.000 m² Kühldecken. Diese unterteilt sich in 475.000 m² aktive Kühldecken und 370.000 m² Betonkerntemperierung (BTA), die ausschließlich in Bürogebäuden eingebaut wurden. Auch der folgende Beitrag will Geheimnisse lüften. Dazu werden vier verschiedene Kühldeckensysteme analysiert und anschließend im Hinblick auf Energieverbrauch und Energiekosten verglichen, um dadurch künftig eine Basis für bessere Systementscheidungen zu liefern.

Energieverbrauch und Energiekosten von Kühldecken

Von **Dietrich Schröder**

Aktuelle Situation

Eine solche Untersuchung ist angebracht, weil sich in den vergangenen Jahren im Hinblick auf den Einsatz von Kühlflächen zwei entscheidende Voraussetzungen geändert haben, ohne dass die Fachwelt davon ausreichend Kenntnis genommen hat:

- Um 1990, als die Kühldecken in Deutschland auf den Markt kamen, waren die Energiepreise für Heizen und Kühlen etwa gleich hoch /1/. Heute ist der Energiepreis für das Heizen mehr als doppelt so hoch, wie für das Kühlen. (EnBW/Stuttgart aktualisiert 1.7.2009)

- Kühldecken schöpfen ihre wirtschaftlichen Vorteile aus der Möglichkeit, den Luftvolumenstrom (Außenluft) auf das hygienische



Dietrich Schröder, Kiefer Luft- und Klimatechnik, Stuttgart

Minimum zu reduzieren und den Großteil der thermischen Last über Flächensysteme abzuführen. Heute sind die Mindest-Außenluftvolumenströme normativ vorgeschrieben. Angemessen ist die Kategorie IDA 1 der DIN EN 13779 (72 m³/h je Person) bzw. die Kategorie 1 nach der VDI 3804 mit 7,2 m³/hm². Nur damit wird eine akzeptable Raumluftqualität erreicht. Zu prüfen ist,

ob wassergekühlte Decken bei gleichem Mindest-Volumenstrom energetische Vorteile erreichen.

Auch heute installiert man RLT-Systeme mit lediglich 4,5 bis 6 m³/hm² Außenluft. Die Luftqualität in den so versorgten Gebäuden bzw. Räumen ist dann aber eingeschränkt und führt oft zu Beanstandungen. Zudem sind diese Volumenströme vom Planer nicht beliebig wählbar, sondern müssen mit den Auftraggebern abgestimmt werden. Die Qualitätsstufen sind klar präzisiert. Jeder muss wissen, was er tut. Korrekt ist ein Vergleich des Energieverbrauchs nur bei gleicher Luftqualität, d.h. bei gleichem spezifischem Volumenstrom.

Der Aufwand für eine Kühldecke und das Wassernetz ist erheblich. Das betrifft sowohl die Investitions- als auch die zusätzlichen Betriebs- und Energiekosten. Diese Kosten müssen gerechtfertigt wer-

den. In /1/ wird zum Vergleich ein sechsfacher Luftwechsel bemüht. BTA-Wasser /3/ sieht sich in Relation zu Klimaanlage mit 6 bis 10-fachem Luftwechsel. Die Wirtschaftlichkeit wassergekühlter Decken scheint nicht besonders gut zu sein, wenn man zum Vergleich derartig hohe Luftwechsel benötigt. Größere Volumenströme als die Außenluftstraten sind in Bürogebäuden doch schon seit Jahrzehnten nicht mehr üblich.

Entwickelt wurde die Betonkernaktivierung (BTA-Wasser) von Robert Meierhans /2/ für das Bauvorhaben Dow Europa S.A. in CH-Horgen Anfang der 90er Jahre. In modifizierter Form wurde diese Konzeption in diversen weiteren Bauvorhaben eingesetzt. Meierhans verunglimpfte die „Power-Klimaanlage“ mit 6- bis 10-fachem Luftwechsel und forderte eine Umorientierung: „Luft nur zum Lüften“. So lässt sich die Wirtschaftlichkeit leicht nachweisen. Zu bezweifeln ist, ob im Jahr 1998 /3/ noch irgendjemand eine Klimaanlage für Bürogebäude mit derartig hohen Luftwechseln installiert hat.

Gerne werden bei Vergleichen luftgekühlte Decken und ihre wesentlich geringeren Kühlkosten übersehen. Der Verfasser hat klassische Vollklimaanlagen als Nur-Luft-Systeme bereits ab 1970 mit 2,5- bis 3-fachem Luftwechsel in vielen großen Bürogebäuden installiert (cci 1/1974). Mit aktualisierten Kühlkosten von ca. 1,00 €/m²a waren diese Anlagen wassergekühlten Systemen in den Energiekosten weit überlegen.

Vor weiteren Vergleichen sollten noch die hier wesentlichen Begriffe präzisiert werden. Energieverbrauch ist kWh/m²a wie er zur Aufrechterhaltung oder zum Erreichen eines bestimmten Zustands erforderlich ist. Energiekosten sind Energieverbrauch multipliziert mit dem Energiepreis. Kältekosten sind wie Heiz- und Förderkosten der jeweilige Anteil an den Energiekosten, ohne jede Zurechnung von

Abschreibung, Verzinsung, Bedienung und Wartung. Die Werte ergeben sich aus den jeweiligen Veröffentlichungen. Neue Differenzierungen wie Primärenergie, Nutzenergie, Aufwand für die Übergabe, Verteilung und Bereitstellung der Energie sind in den genannten Veröffentlichungen nicht enthalten und wurden deshalb nicht berücksichtigt.

Quellluft

Bei allen nachfolgend untersuchten Kühldecken-Varianten wurde die Kombination mit einem Quellluftsystem angenommen. Quellluft hat den systembedingten Vorteil, dass auf Grund der besseren Lüftungseffektivität im Raum die Wärme besser abgeführt wird. Deshalb ist die Lufttemperatur im Aufenthaltsbereich unter gleichen Voraussetzungen um 1 bis 2 °C niedriger als bei einer Mischlüftung, siehe VDI 3804. Die Konzeption Quellluft ist weniger innovativ als pragmatisch. Die häufige Verwendung dieses Systems liegt nicht nur an der angenommenen besseren Luftverteilung im Raum und der höheren Lüftungseffektivität. Quellluft wählt man, weil ein zentraler Nachwärmer wesentlich kostengünstiger ist als die Nachwärmer für jeden einzelnen Raum mit Vor- und Rücklauf. Auch die Regelung der Nachwärmer und hochinduktive Auslässe bedingen Mehrkosten.

Die typische Leistung einer aktiven Kühldecke von 80 W/m² reicht für ein Bürogebäude meist gut aus. Eine höhere Kühlleistung ist selten erforderlich. Deshalb lassen sich höhere Kosten für ein besseres lufttechnisches System oft nicht vertreten. Die besseren und etwas teureren Systeme können wegen des höheren Anteils luftseitiger freier Kühlung wirtschaftlicher sein.

Wassergekühlte Decken mit Quellluft sind nicht energieeffizient. Quellluft – „Luft nur zum Lüften“

benötigt Energie, um die Zuluft auf 20 bis 21 °C zu erwärmen. Wer Effizienz sucht oder eine höhere Leistung benötigt, wird die Kühlung mit Luft plus Wasser wählen. Eine Zulufttemperatur von 12 °C erlaubt dann unter Berücksichtigung des Feuchtegewinns durch Personen, Wassertemperaturen von 14/16 °C. Damit kann die Leistungsfähigkeit der Kühldecken voll genutzt werden. Eine Zulufttemperatur von 12 °C wird durch hochinduktive Luftdurchlässe mit diffuser Luftverteilung auch unter Einhaltung der Behaglichkeitskriterien im Raum sicher beherrscht. Mit 7,2 m³/hm² Zuluftvolumenstrom steht dem Raum eine zusätzliche Kühlleistung von 24 bis 33 W/m² zur Verfügung. Der Energieverbrauch dieser leistungsfähigeren Variante liegt deutlich unter dem der Kühldecken mit Quellluft. Durch den höheren Anteil luftseitiger freier Kühlung sind gegenüber Kühldecken mit Quellluft Einsparungen von bis zu 50% zu realisieren. Eine preiswertere Variante als eine vollflächige aktive Decke, mit energetisch ebenfalls sehr günstigen Kenndaten, ist das Kühldeckenpaneel Inducool.

Energetisch ist ein Quellluftsystem nur dann sinnvoll, wenn die Nacherwärmung der Zuluft mit kostenloser Umweltenergie erfolgt, z. B. aus dem Wärmegewinn im Gebäude. Bei der BTA-Luft nach dem System Concretcool wird die Wärme der Decke entzogen. Dies erfolgt direkt im Raum mit doppeltem Effekt – Kühlen und Nachwärmen. Die Luft kühlt die Decke. Die Decke erwärmt die Luft. So wird auch mit Quellluft höchste Energieeffizienz erreicht (mehr bei Variante 4).

Direkte freie Kühlung mit einer mechanischen Lüftungsanlage ist die ökologisch und ökonomisch bessere Variante. Das von Kiefer angebotene System BTA-Luft Concretcool bereichert nicht nur die planerischen Möglichkeiten. In den meisten Fällen verbraucht das System auch weniger Energie als was-

sergekühlte Decken.

Fensterlüftung

Egal, welche Form der Zuluftbringung und der Luftverteilung gewählt wird: Wichtig ist die kontrollierte ausreichende Außenluftzufuhr in das Gebäude bzw. in die Räume. Eine Kühldecke, die ohne mechanische Lüftung nur mit Fensterlüftung arbeitet, ist eine Fehlinvestition. Gerade dann, wenn Kühlung an heißen Tagen am dringendsten benötigt wird, fällt sie wegen Kondensationsgefahr aus oder bringt nicht die benötigte Leistung. Dies betrifft nicht nur wenige Stunden im Jahr, wie oft leichtfertig behauptet wird. In Hitzeperioden handelt es sich dabei um Tage und Wochen /4/.

Freie Kühlung kontra Wasserkühlung

Es gibt zum Thema Kühldecken ca. 180 Veröffentlichungen. Überwiegend handelt es sich dabei um Sekundärliteratur. Kernpunkt ist die stereotype Aussage: „...dass die Kühlung mit Wasser wegen der vielfach höheren Transportkapazität wirtschaftlich überlegen ist.“ Sehr wenige Arbeiten befassen sich mit einer detaillierten und nachvollziehbaren Ermittlung des Energieverbrauchs. Es wird einfach vorausgesetzt und behauptet, dass die wassergekühlte Decke die wirtschaftlichste Lösung sei. Es ist schon erstaunlich, wie große Teile der Branche über 20 Jahre einem Postulat naheifern, das einer ernsthaften Überprüfung kaum stand hält. Dieser Glaube basiert gleich auf zwei verbreiteten Denkfehlern:

- „Luft nur zum Lüften“ lebt noch von der Illusion der kostenlosen Kühlung über die Decke und unterstellt, dass Kühlen nur mit Wasser Energiekosten spart. Trifft das zu? Mit den vorgegebenen Außenluft-raten nach VDI 3804 von 5 bis 7,2

m³/hm² sind Energieverbrauch und Kühlkosten um so niedriger, je höher der Anteil der luftseitigen Kühlung ist.

- Es wird immer wieder versucht, bei der Luftabkühlung zu sparen. Man kühlt die Zuluft häufig nur auf 16 bis 18 °C. Das ist nur vordergründig richtig und eindimensional gedacht. Die geringere Abkühlung der Luft erfordert einen höheren Anteil wasserseitiger Kühlung der Decken mit erheblich höheren Kältekosten. Jedes Watt, das bei der Luftkühlung gespart wird, führt zu einem um 3 bis 4 Watt höheren Verbrauch bei der Deckenkühlung. Durch den höheren Anteil an freier Kühlung erfordert die Abkühlung der Luft auf 12°C in der Summe weniger Kältekosten. Die Zuluft nur auf 16 bis 18 °C abzukühlen, verschwendet natürliche Ressourcen.

Der Energieverbrauch mit freier Kühlung lässt sich anhand der VDI 2067 /3/ für 13 repräsentative Standorte in Deutschland leicht ermitteln oder überprüfen. Die Standard-Abkühlung der Außenluft erfolgt auf 33 kJ/kg (ca. 12 °C). Genutzt werden die natürlichen Ressourcen mit einem Potenzial der freien Kühlung von 6.000 h/a unter 12 °C. Unter Berücksichtigung des Wärmerückgewinns ergeben sich für Abkühlung und Entfeuchtung des Mindest-Außenluftvolumenstroms Kältekosten von nur 0,6 bis 0,7 €/m²a. Die Kältekosten für eine wasserseitige Kühlung der Decken sind um den Faktor 3 bis 4 höher, wie aus den Beispielen 1, 2, 3 zu entnehmen ist. Die meteorologischen Daten haben sich etwas verändert. Heute gilt die DIN 4710 (2003). Für den Vergleich sind aber die alten Daten zutreffend, da alle Beispiele auf dieser Basis beruhen.

Die Varianten

Für die Untersuchung wurden vier typische Varianten von Kühldecken

ausgewählt. Auswahlkriterium war, dass für jede der Varianten eine detaillierte Ermittlung von Energieverbrauch oder Energiekosten vorlag. Die prinzipiellen Systeme setzen wir als bekannt voraus. Details können in den Original-Veröffentlichungen eingesehen werden. Nachfolgend stellen wir die Varianten kurz vor.

Variante 1: Fläkt-Zent-Frenger

Diese Firma hat als erste wassergekühlte aktive Kühldecken in Deutschland vorgestellt. Seit 1989 wurde die Systeme in mehreren Großveranstaltungen propagiert. Diese Konzeption wurde trendbestimmend und Auslöser des Kühldecken-Booms. Die erste Kühldecken-Marktübersicht in der cci 4/1991 nennt bereits 11 Anbieter mit 29 Systemen. In der cci 8/9/1996 finden sich bereits 34 Anbieter mit 53 Systemen zuzüglich 20 Anbieter mit 35 Konvektions-Systemen bzw. Kühlbalken. Das war ein Boom!!!

Natürlich gab es auch Vorläufer wie Farex/KaRo u.a., die aber nicht die wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben.

Für das Zent-Frenger-System liegt auch eine Berechnung der Energiekosten durch Hönnmann und Nüßle /1/ vor. Soweit dem Verfasser bekannt, war dies der erste Versuch, die Energiekosten von Kühldecken zu ermitteln. Der Wärmeverbrauch der statischen Heizung fehlt in der Veröffentlichung und wurde zum Vergleich mit sehr moderaten 30 kW/m²a ergänzt. Die Behauptung, mit diesem System die niedrigsten Energiekosten aller Klimasysteme zu erreichen, war sehr optimistisch – wie der spätere Vergleich der vier Systeme zeigen wird.

Variante 2: Krantz-TKT

O. Diehl stellte auf der DKV-Tagung 1995 erstmals den Energieverbrauch für eine wassergekühlte aktive Decke über eine TRNSYS-Si-

mulation dar. Es wurden zwei Quellluftvarianten berechnet. Für den Vergleich wurde die mit den niedrigsten Energiekosten gewählt.

Interessant ist, dass diese Variante die Kombination einer Kühldecke mit freier Kühlung über einen Kühlturm untersucht. Diese Variante wird sehr häufig als die zweckmäßige Form der freien Kühlung dargestellt. Das Ergebnis ist eher enttäuschend. Kühlturm und Umwälzpumpen müssen bei Bürobetrieb fast ganzjährig betrieben werden, zusätzlich fallen Wasserkosten an. Eine indirekte freie Kühlung in dieser Form hat einen vierfachen Wärmeübergang Raum – Decke – Wasser – Kühlwasser - Luft und eine entsprechende Grädigkeit. Dies führt zu einer längeren Laufdauer und mindert die Effizienz des Systems.

Der Wärmeverbrauch für die statische Heizung fällt in der Untersuchung mit $43 \text{ kW/m}^2\text{a}$ recht hoch aus. Dies liegt an dem hohen Fassadenanteil und der 1995 noch nicht so guten Isolierung des Gebäudes. Heute könnte der Verbrauch etwas abgesenkt werden. Auch $8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ Außenluft waren für den Zeitpunkt der Veröffentlichung ein üblicher Wert. Heute würde man diesen etwas reduzieren. Wenn man die Werte zum Vergleich auf $30 \text{ kW/m}^2\text{a}$ und $7,5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ umrechnet, nähern sich die Energiekosten der Variante 1 an. Die Rangfolge der Varianten ändert sich aber nicht.

Hervorzuheben ist noch, dass Diehl nicht der allgemeinen Kühldecken-Quellluft-Euphorie verfällt. Es ist eine der wenigen Veröffentlichungen, die sich kritisch mit Quellluft auseinandersetzt und deutlich auf die energetischen Nachteile hinweist.

Variante 3: BTA-Wasser

Die Variante BTA-Wasser in Kombination mit Quellluft und statischer Heizung ist energiesparender als

die klassische aktive Kühldecke. Dies liegt im Wesentlichen an der Nutzung der hohen Speicherkapazität der Betondecke.

Nach Wissen des Verfassers hat Meierhans /2/ die ersten Bauvorhaben mit BTA-Wasser geplant. Beabsichtigt war, nach Möglichkeit ohne Einsatz von Kältemaschinen annehmbare Raumtemperaturen zu erreichen. In /4/ beschreibt Meierhans: „... dass mit der Kühlwirkung des Grundwassers nicht zuverlässig gerechnet werden kann“. „Auch kann eine Kühlung mit Kältemaschinen wirtschaftlicher sein als ein mehrstündiger Betrieb der Rückkühler“. Aus der Erfahrung mehrerer Projekte sieht Meierhans in den meisten Fällen eine Kältemaschine als die wirtschaftlichste Lösung an. Eine bemerkenswerte realistische, nach diversen Objekten gereifte Einsicht, die sich deutlich von den Zielvorstellungen in /2/ unterscheidet. Diese Einsicht ist aber noch nicht weit verbreitet. Der Heizung über Raumdecken steht der Verfasser kritisch gegenüber. Er erwartet wegen der Speicherfähigkeit von Boden und Decke und der im Tagesverlauf wechselnden Raumlasten einen höheren Energieverbrauch für Heizung und Kühlung. Untersucht wurde die energetisch günstigere Variante BTA- Wasser mit statischer Heizung.

Die Installation von BTA-Wasser-Systemen erfolgt in unterschiedlichen Formen. Vielfach belegt man eine komplette Ebene über die Raumgrenzen hinaus mit einem Rohrsystem. Eine individuelle Regelung für einzelne Räume oder Zonen ist dann nicht möglich. Eine wasserseitige Verlegung und Regelung pro Raumachse ist wesentlich aufwändiger, erlaubt aber eine bessere Anpassung an die Nutzung.

Variante 4: BTA-Luft

Die Variante BTA-Luft „Concret-cool“ wurde von Kiefer entwickelt

und vom HLK/IKE /6, 7/ in Stuttgart gemessen und untersucht. Inzwischen wurde dieses System im Umfang von 260.000 m^2 in 46 Gebäuden installiert.

Die BTA-Luft in Kombination mit einer statischen Heizung weist, wie der spätere Ergebnisvergleich zeigt, von allen Varianten den mit Abstand geringsten Energieverbrauch auf. Dies liegt wesentlich an der „direkten freien Kühlung“ mit Luft.

Für Bürogebäude wird eine Nutzungsdauer von $250 \text{ d/a} \times 10 \text{ h/d} = 2.500 \text{ h/a}$ angenommen. Bei Luftkühlung betragen die Volllast-Betriebsstunden der Kältemaschine nur 400 bis 500 h/a, d.h. 20 % der Nutzungsdauer. Eine Wasserkühlung der Decken benötigt dagegen Volllast-Betriebsstunden der Kältemaschine von ca. 80 %, d.h. an 2.000 h/a. Die Daten wurden aus der thermischen Simulation ermittelt /7/.

Im Gegensatz zur indirekten Kühlung mit Wasser verwendet Concret-cool so häufig wie möglich die direkte freie Kühlung mit Außenluft. Das System hat einen nur zweifachen Wärmeübergang Raum – Decke – Luft mit einer günstigen Grädigkeit. Direkte freie Kühlung braucht auch keine zusätzliche Energie für Pumpen oder einen Kühlturm. Allein der hygienisch erforderliche Mindest-Luftwechsel von etwa $7,2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ erreicht eine hoch effektive Kühlung mit Leistungen bis etwa 60 W/m^2 .

Der Wärmeübertragungsgrad des innenberippten und in der Betondecke vergossenen Kühlrohrs beträgt 90 % /6/. Mit einem primären zentralen Wärmerückgewinn von 80 % ergibt sich für das Concret-cool-System ein Gesamt-Wärmerückgewinn von 96 bis 98 %. Der Energieverbrauch für Heizung und Luftherwärmung ist deshalb mit $14 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ extrem günstig /7/. Das entspricht Passivhaus-Standard, ohne dass aufwendig isoliert wird. Der Druckverlust des Systems entspricht dem einer typischen RLT-

Anlage. Dazu addiert sich der Widerstand im Kühlrohr. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt ca. 3 m/s. Der Druckverlust wird, je nach Anforderung, auf 50 bis 150 Pa dimensioniert. Für eine hocheffiziente Wärmerückgewinnung ist ein erweiterter SFP nach DIN EN 13779 von 300 W/m³/s vorgesehen. Mit einem Gesamt-Wirkungsgrad von 60 % ergibt sich ein zulässiger Druckverlust von 180 Pa. Der Widerstand ist damit unkritisch. Genutzt wird der Druckverlust um den Volumenstrom gleichmäßiger auf alle Anschlüsse zu verteilen. Ohne Widerstand gibt es keine gleichmäßige Verteilung. Andere Systeme benötigen Drosselklappen, Festdrosseln oder Volumenstromregler, ohne dass dafür ein Bonus nach DIN EN 13779 vorgesehen ist.

BTA-Luft wird auch als Basissystem für eine kostengünstige Grundlastkühlung eingesetzt. Die individuelle Nachkonditionierung der Räume erfolgt über ein Wassersystem. Der Skyline-Tower München, ein Hochhausprojekt vom Architekt Helmut Jahn und der Bayerischen Hausbau mit einer Fläche von 44.000 m², wird mit dieser Technik ausgestattet. Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) hat das Bauvorhaben inzwischen mit Gold vorzertifiziert.

Systemvergleiche

Alle vier zuvor erläuterten Beispiele sind genau genommen nicht direkt vergleichbar. Zwei Varianten sind klassische wassergekühlte aktive Kühldecken, zwei weitere Systeme sind eine BTA-Wasser und eine BTA-Luft. Der Vergleich ist keine Gegenüberstellung von mehreren Varianten an einem Objekt. Alle Beispiele gehen von verschiedenen Gebäuden und Standorten und einer etwas anderen Betriebsweise aus. Bedingt dadurch sind auch die Lasten unterschiedlich. Die Ergebnisse kann man also nicht 1:1 auf jedes andere Bauvorhaben übertragen.

Die Lastprofile von Bürogebäuden sind aber sehr ähnlich, so dass die Ergebnisse der Berechnung vergleichbare informative Hinweise liefern.

Auch die Frage, ob ein Vergleich der wassergekühlten aktiven Decke mit BTA-Luft legitim ist, kann man unterschiedlich beurteilen. Wovor der Entscheidung steht, eine erheblich teurere aktive Decke anstelle einer preiswerteren BTA-Luft einzusetzen, wird die Frage nach den Vor- und Nachteilen stellen. Um objektiv vorzugehen, wurde der Energieverbrauch soweit möglich nicht vom Verfasser ermittelt. Veröffentlichungen und Autoren sind für die einzelnen Systeme jeweils genannt. Der Verfasser hat

für den Systemvergleich lediglich die Energiepreise aktualisiert.

Die Energiepreise gelten für den Standort Stuttgart. Es handelt sich um Stromkosten, wie sie derzeit die EnBW Firmenkunden berechnet bzw. als Fernwärmekosten nennt. Die Energiepreise können örtlich etwas unterschiedlich sein. Ein Systemvergleich ist nur sinnvoll, wenn die Energiepreise einheitlich sind.

Kern der Ausarbeitung sind die Tabellen. Erst durch den Vergleich der Varianten auf Basis gleicher Energiepreise werden verschiedene Schlussfolgerungen möglich. Die Ergebnisse stehen in den Tabellen 1 bis 4. Interessant ist die Gegenüberstellung der Systeme in Tabelle 5.

Tabelle 1	Veröffentlicht	Energiepreise alt	Energieverbrauch	Energiepreise aktuell	Energiekosten
	DM/m ² a	DM/kWh	kWh/m ² a	€/kWh	€/m ² a
Kühldecke	5,20	0,07	74,30	0,035	2,60
Luftkühlung	1,20	0,07	17,14	0,035	0,60
Lufterwärmung	4,80	0,07	68,60	0,0886	6,08
Stat. Heizung	./.	ergänzt ¹⁾	30,00	0,0886	2,66
Pumpen Kälte	2,20	0,23	9,57	0,14	1,34
Pumpen Heizung	./.	ergänzt ¹⁾	2,65	0,14	0,37
Lufttransport	4,00	0,23	17,39	0,14	2,43

Tab. 1:
System Kühldecke mit Quelläftung (7,5 m³ /h je m²) aus der Veröffentlichung Dr. Hönnmann/Nüßle /1/ bzw. aus der Homepage von Zent-Frenger. Kälteversorgung: Kältemaschine oder Fernkälte aus Kraft-Wärme-Kopplung. /1/ Die statische Heizung wurde zum Vergleich mit moderaten 30 kWh/m²a ergänzt, da im Original nicht enthalten.

Tabelle 2	Veröffentlicht	Energieverbrauch	Energiepreise aktuell	Energiekosten
	MWh/a	kWh/m ² a	€/kWh	€/m ² a
Kältemaschine	100	19,52	0,14	2,73
Kühlturm	18	3,51	0,14	0,49
Lufterwärmung	418	81,58	0,0886	7,23
Stat. Heizung	220	42,90	0,0886	3,80
Pumpen	77,8	15,18	./.	
Pumpen Kälte		11,84	0,14	1,66
Pumpen Heizung		3,34	0,14	0,47
Lufttransport	92	17,96	0,14	2,51
Wasserbedarf	1920 m ³ /a	0,37 m ³ /m ² a	3,75 €/m ³	1,39

Tab. 2:
System Kühldecke mit Quelläftung (8,0 m³ /h je m²) und Wärmerückgewinnung aus der Veröffentlichung von Diehl (DKV 1995). Simulation mit TRNSYS /Flächen 5.124 m², Kälteversorgung: Kältemaschine mit Kühlturm

Tabelle 3		Energieverbrauch	Energiepreise	Energiekosten
		kWh/m ² a	€/kWh	€/m ² a
Kühldecken	WFL	57,10	0,035	2,00
Luftkühlung	WWRGK	17,96	0,035	0,63
Lufterwärmung	7,5 x (21-12) x 2500h/a	56,25	0,0886	4,98
Stat. Heizung	W Heiz	14,30 ¹⁾	0,0886	1,27
Pumpen Kälte	Abschätzung ²⁾	7,86	0,14	1,10
Pumpen Heizung	Abschätzung ³⁾	1,89	0,14	0,26
Lufttransport	Ø der Variante 1+2	17,68	0,14	2,48

Tab. 3:
System BTA -Wasser mit Quellluft und statischer Heizung. In Anlehnung an Variante V7 aus der thermischen Simulation des IKE /7/ mit 7,5 m³ /hm² Zuluft, Lasten: innere 30 W/m², äußere 30 W/m², Beleuchtung 10 W/m². Kälteversorgung: Kältemaschine oder Fernkälte aus Kraft-Wärme-Kopplung.

Tabelle 4		Energieverbrauch	Energiepreise	Energiekosten
		kWh/m ² a	€/kWh	€/m ² a
Kühldecken	in Luftkühlung			
Luftkühlung	WWRG K	19,90	0,035	0,70
Lufterwärmung	WWRG H	1,10	0,0886	0,10
Stat. Heizung	W Heiz	14,30 ¹⁾	0,0886	1,27
Pumpen Kälte	Abschätzung ²⁾	2,08	0,14	0,29
Pumpen Heizung	Abschätzung ³⁾	0,41	0,14	0,06
Lufttransport		19,58	0,14	2,74

Tab. 4:
System BTA-Luft Concretcool mit Quellluft und statischer Heizung. Variante V7 aus der thermischen Simulation des IKE /7/ mit 7,5 m³ /hm² Zuluft, Lasten: innere 30 W/m², äußere 30 W/m², Beleuchtung 10 W/m². Kälteversorgung: Kältemaschine oder Fernkälte aus Kraft-Wärme-Kopplung.

/1/ dieser Wert dürfte sich bei Eckräumen nicht einhalten lassen
/2/ in Relation zum Kältebedarf. Der Energieverbrauch aus der analogen Berechnung ist viel zu hoch, weil kein weit verzweigtes Rohrnetz mit hohem dp zur berücksichtigen ist. Wir haben trotzdem den hohen Wert übernommen. Bei Verwendung eines Direkt-Verdampfers kann der Wert auch ganz entfallen und die Kosten können weiter reduziert werden.
/3/ in relation zum Heizbedarf

Varianten		aktive Kühldecke Dr. Hönnmann / Nüssle	aktive Kühldecke Dipl.-Ing Diehl	BTA - Wasser IKE / Schröder	BTA - Luft CONCRET-COOL HLK / IKE
Verfasser					
Rechenverfahren		LTG	TRNSYS	TRNSYS	TRNSYS
Kühldecke / Kältemaschine		2,60	2,73	2,00	
Luftkühlung		0,60		0,63	0,70
Kühlturm			0,49		
Lufterwärmung		6,08	7,23	4,98	0,10
Stat. Heizung		2,66	3,80	1,27	1,27
Pumpen Kälte		1,34	1,66	1,10	0,29
Pumpen Heizung		0,37	0,47	0,26	0,06
Lufttransport		2,43	2,51	2,48	2,74
Wasser			1,39		
Summen		16,08	20,28	12,72	5,16
Relation Energiekosten	Gesamt	3,26	3,93	2,47	1
Relation Kälte		4,59	6,33	3,77	1

Tab. 5:
Gegenüberstellung der Energiekosten der vier verschiedenen Systemvarianten. Dafür gelten folgende Energiepreise: Strom 0,14 €/kWh, Kälte 0,035 €/kWh, Fernwärme 0,0886 €/kWh (Energiepreise EnBW für Strom vom 1.7.2009)

Anders als dies im Allgemeinen erwartet wird, sind Energieverbrauch und Energiekosten der vier Varianten sehr unterschiedlich. Erstaunlich sind die Kältekosten. Sie variieren bei den Varianten im Verhältnis von 1:6. Die vereinfachte Annahme, dass bei gleichen Lasten auch gleich viel Energie für die Kühlung gebraucht wird, trifft nicht zu. Dies ergibt sich aus der unterschiedlichen thermodynamischen Qualität der Kühlverfahren. Die spezifischen Förderkosten aller Varianten sind hingegen vergleichbar.

Die Ergebnisse der Berechnung sind eindeutig. Alle wassergekühlten Varianten weisen erheblich höhere Energiekosten auf. Die stereotype Behauptung, dass Wasser allein auf Grund der höheren Wärmetransportkapazität zwangsweise die günstigste Lösung sei, trifft nicht zu. Speziell für Betondecken gibt es wirtschaftlichere Lösungen.

Wie die Beispiele zeigen, lässt sich mit BTA-Luft eine hohe Energieeffizienz erreichen. Priorität hat der Komfort. Dazu gehört auch eine angemessene Außenluftströmung von etwa 7,2 m³/hm², die ausreichend abgekühlt und entfeuchtet wird. Mit BTA-Luft wird dies erreicht.

Energieeinsparung wird oft falsch interpretiert. Man wählt einen Außenluftstrom von nur 4,5 m³/hm²,

der einem etwa 1,5-fachen Luftwechsel entspricht. Um zu sparen, wird auch dieser geringe Volumenstrom oft nicht ausreichend abgekühlt und entfeuchtet. Selbst mit dieser geringen Außenluftfrate sind – wie den Rechenbeispielen entnommen werden kann – die Energiekosten der wassergekühlten Varianten aber immer noch höher als bei einer BTA-Luft mit einer hygienisch angemessenen Außenluftfrate von 7,2 m³/hm² und einer ausreichenden Entfeuchtung.

Auch wenn man eine Fensterlüftung wählt, um Förderkosten für die Zuluft zu sparen, sind die Energiekosten der wassergekühlten Kühldecken höher als bei BTA-Luft. Dabei sind die thermischen Verluste durch das Öffnen der Fenster noch nicht berücksichtigt.

Die Untersuchung geht, wie die zu Grunde liegenden Veröffentlichungen, von der Erzeugung der Kälte durch Kältemaschinen aus. Vielfach wird für die Kühlung der Decken aber „kostenlose“ Umweltenergie genutzt. Die Verfahren sind dabei so vielfältig, dass ein Vergleich schwer fällt. Anhand des genannten Energieverbrauchs der Standard-Varianten (Tabellen 1 bis 4) ist es möglich, in jedem Einzelfall den Verbrauch differenziert abzuschätzen.

Selbst wenn man über eine kostenlose Quelle (im ursprünglichen Sinn) mit ausreichender Schüttung und einer Idealtemperatur von 8 bis 10 °C verfügt, wird damit kaum eine wirtschaftliche Lösung erreicht. Wie der Vergleich der Varianten 1 bis 3 mit der Variante 4 zeigt, kostet allein die Förderung des Kühlwassers bei den wassergekühlten Decken mehr als die Kühlkosten der Variante BTA-Luft. Damit sind alle Varianten der „ökologischen“ Kühlung von der Wirtschaftlichkeit her fraglich.

Geothermie

Richtig schön teuer kann es werden, wenn man das Geld vergräbt

und Erdsonden oder „Energiepfähle“ in den Boden treibt, um eine vermeintliche „kostenlose“ Kühlung zu erreichen. Die Förderkosten für die Pumpen können sich gegenüber den Varianten 1 bis 3 nochmals verdoppeln. In vielen Fällen ist die Kühlung mit Kältemaschinen wirtschaftlicher als die vermeintliche ökologische Variante.

Und nun die Crux: Je höher die Energiekosten der wassergekühlten Decken sind, umso leichter lässt sich auch der zusätzliche Aufwand für derartige Varianten rechtfertigen.

Geothermie rechnet sich nur, wenn sie zur Heizung und zur Kühlung genutzt wird. Auch dabei ist die Variante BTA-Luft die mit Abstand günstigere Lösung.

Resümee

Bei der Vielzahl von Anforderungen und Systemen ist nicht auszuschließen, dass in einzelnen Fällen auch die Wasserkühlung der Decken sinnvoll ist. Das Postulat der wirtschaftlichen Überlegenheit der wassergekühlten Decken sollte man aber schnell vergessen. Jede Planung gehört hinterfragt und gerechnet. Die fertige Konzeption aus der „Schublade“ wird den heutigen Anforderungen an Effizienz und Kosten nicht gerecht.

Die Beispielrechnungen und der Vergleich der Varianten zeigt:

- Wassergekühlte Decken sind nicht generell die hochstilisierte „sanfte“, energiesparende Technik. Wassergekühlte Decken werden in zu vielen Fällen auch genutzt, um bequem und „nachhaltig“ Energie zu „entsorgen“.
- BTA-Wasser in der Variante „Luft nur zum Lüften“ (d.h. Quellluft) „Heizen und Kühlen mit einbetonierten Rohren“ ist aus energetischer Sicht eine bedauerliche Fehlentwicklung.
- Die einfache und preiswerte Konzeption Kühldecken mit Quellluft ist bei den heutigen Energieprei-

sen nur geeignet, wenn die Erwärmung auf 20 bis 21 °C aus dem Wärmerückgewinn im Gebäude erfolgt. Mit BTA-Luft Concretcool ist dies gegeben.

- „Direkte freie Kühlung“ mit Luft in der Variante BTA-Luft Concretcool, d.h. unter Nutzung der Speichermassen ist bei einer mittleren Außenlufttemperatur von 8 bis 10 °C die ökologisch und ökonomisch bessere Variante. Alle wassergestützten Systeme haben Probleme, ähnlich günstige Energiekosten zu erreichen.

/1/ W. Hönnmann und F. Nüßle. Vortrag beim FGK-Symposium „Kühldecken und Raumlüftung“, Stuttgart, September 1990

/2/ Fort, K. und R. Meierhans. Neuartige Kühlung von Bürogebäuden. Schweizer Ingenieur und Architekt, 49/1991

/3/ Meierhans, R. Heizen und Kühlen mit einbetonierten Rohren. 20. Internationaler Velta-Kongress, St. Christoph 1998

/4/ Meierhans, R. und B. Olesen. Betonkernaktivierung. Velta, Norderstedt 1999

/5/ Schröder, D. Fensterlüftung zwingt Kühldecken in die Knie. cci 12/2007

/6/ Bach, H. und Beck, C. Untersuchung der Bauteiltemperierung mit innenberippten Aluminiumrohren. HLK Forschungsgesellschaft Heizung Lüftung Klima Stuttgart, Prüfstelle Flächenheizung/Flächenkühlung

/7/ Schmidt, M. und M. Treiber. Betonkernkühlung mit Kühlrohren der Fa. Kiefer. Gebäude- und Anlagensimulation mit Jahresbetrachtung (instationäre thermische Simulation TRNSYS)