Arne Speerforck

Geothermisch- und sorptionsgestützte Klimatisierung

The world faces a looming „cold crunch“ – Mit diesen Worten beginnt der im Mai 2018 erschienene Sonderbericht der Internationalen Energie Agentur (IEA) mit dem Titel „The Future of Cooling“ [1]. Die Klimatisierung von Gebäuden wird hier als ein „Blind Spot“ der Energiepolitik identifiziert. Eine Thematik, die von kritischer Bedeutung ist, aber derzeit verhältnismäßig wenig Aufmerksamkeit erfährt. Bereits heute werden 20 % des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden zur Klimatisierung aufgewendet. Bei keinerlei eingreifenden Maßnahmen sagt die IEA bis zum Jahre 2050 eine Verdreifachung dieses Energiebedarfs voraus. Die zusätzlich benötigte Elektrizitätsmenge entspräche dem heutigen kombinierten Elektrizitätsbedarf von Japan, der Europäischen Union und den Vereinigten Staaten von Amerika.

Der erwartete Anstieg wird in erster Linie durch den erwarteten Einkommenszuwachs in den wärmeren Regionen dieser Erde bedingt und von der ebenfalls vorhergesagten globalen Erwärmung zusätzlich verstärkt. Sobald Klimaanlagen für Menschen in wärmeren Regionen erschwinglich sind, finden diese in Regel schnell Verbreitung. *Abbildung 1* verdeutlicht diesen Prozess anhand der heutigen Marktabdeckung von Klimaanlagen in unterschiedlichen Ländern. Ein Anstieg wird allerdings auch für klimatisch gemäßigte Regionen prognostiziert. Für Europa wird vorhergesagt, dass der Markt für Klimaanlagen im Jahr 2025 um 55–60 % größer sein wird als im Jahr 2010 [2]. Moderne Gebäude mit Glasfassaden und einer hohen Anzahl an elektrischen Geräten müssen im Sommer oft gekühlt werden. Zur Reduzierung künftiger Treibhausgasemissionen sind demnach neue Konzepte zur Klimatisierung unumgänglich.

Das Ziel von Klimaanlagen ist dabei in der Regel das Sicherstellen eines für den Menschen als behaglich empfundenen Raumklimas. Die thermische Behaglichkeit wird dabei von mehreren unterschiedlichen Faktoren, wie z. B. der Bekleidung und dem Aktivitätsgrad, beeinflusst. Die dabei maß-

Kurzzusammenfassung:

Für die nächsten Jahrzehnte wird ein rapider Anstieg des weltweiten Klimatisierungsbedarfs vorhergesagt. Dieser resultiert vor allem aus Einkommenszuwächsen in warmen Regionen der Erde und wird zusätzlich durch die globale Erwärmung verstärkt. In Kombination mit dem hohen elektrischen Energiebedarf von Klimaanlagen ergibt sich daraus ein wichtiger Auftrag für die Wissenschaft: Das Erarbeiten von effizienten und umweltverträglicheren Alternativen zur Gebäudeklimatisierung.
Geothermisch- und sorptionsgestützte Klimaanlagen können dabei ein Teil der zu findenden Lösung sein. Anhand einer Versuchsanlage konnten hier elektrische Energieeinsparungen von mehr als 70 % ermittelt werden. Auch die Übertragbarkeit des Konzepts auf Standorte in den USA konnte nachgewiesen werden. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeit des Konzepts noch zu gering, um einen flächendeckenden Einsatz zu ermöglichen. Die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit im Ganzjahresbetrieb ist damit essentieller Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

geblich durch eine Klimaanlage zu beeinflussenden Größen sind Lufttemperatur und Feuchtigkeit. Im Sommer muss eine Klimaanlage die Außenluft demnach nicht nur abkühlen, sondern vor allem auch entfeuchten.

Konventionelle und sorptionsgestützte Klimaanlagen

In einem konventionellen Prozess wird die Luft daher zunächst unter die sogenannte Taupunkttemperatur abgekühlt. Das benötigte Temperaturniveau ist in der von der gewünschten Luftfeuchtigkeit der Zuluft abhängig und liegt in der Regel bei weniger als 11 °C. Das Prinzip ähnelt dabei einer kalten Außenscheibe, an der im Winter Wasser kondensiert. Die Luft kühlt sich an der Scheibe ab und kann demzufolge weniger Wasserdampf „speichern“ als zuvor. Der Wasserdampf kondensiert und läuft an der Scheibe herunter. In einer Klimaanlage geschieht das an der Oberfläche eines mit kaltem Wasser durchströmten Kühlers. Kühlung und Entfeuchtung sind hier demnach aneinander gekoppelt. Nach der Abkühlung ist die entfeuchtete Luft in der Regel zu kalt, um dem zu klimatisierenden Raum direkt zugeführt zu werden und wird daher in der Regel vorher erwärmt. Das Anlagenschema einer konventionellen Klimaanlage ist in *Abbildung 2* dargestellt.

„Vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung ist die Gebäudeklimatisierung ein essentielles Problem.“

Arne Speerforck

Der konventionelle Prozess weist dabei mehrere Nachteile auf. Das zur Entfeuchtung benötigte tiefe Temperaturniveau macht den Einsatz natürlicher Wärmessenken unmöglich. Es werden daher in der Regel elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen eingesetzt, die für den hohen Elektrizitätsbedarf von Klimatisierungsanwendungen verantwortlich sind. Dabei sind nicht nur die verursachten Treibhausgasemissionen problematisch; vor allem bei dem gleichzeitigen Auftreten von hohen Außenlufttemperaturen und Feuchten können Klimaanlagen zu erheblichen Spitzenlasten führen, die in einigen Regionen in der Vergangenheit Stromausfälle verursacht haben [3]. Außerdem sorgt die nötige Nacherwärmung für einen zusätzlichen Wärmebedarf, der meist elektrisch oder durch die Verbrennung fossiler Energieträger gedeckt wird.

Im Gegensatz zu den konventionellen Systemen nutzen sorptionsgestützte Klimaanlagen die hygroskopischen Eigenschaften bestimmter Stoffe, wie z. B. Silicagel oder Lithiumchlorid, um die Luft zu entfeuchten. Ähnlich wie bei einem Salzstreuer im Restaurant, in dem sich aufgrund von Feuchtigkeit Klumpen bilden, lagert sich das in der Luft enthaltene Wasser an diesen Stoffen an. *Abbildung 3* zeigt das Schema

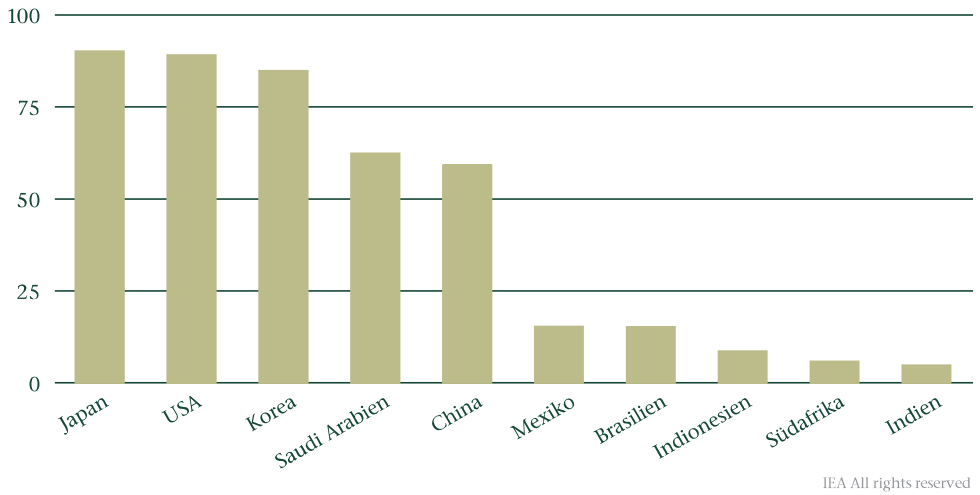

Abbildung 1:
Prozentualer Anteil von Haushalten mit Klimaanlagen in ausgewählten Ländern [https://www.iea.org/futureofcooling/]

eines sorptionsgestützten Lüftungsgeräts. Die Außenluft durchströmt zunächst das Sorptionsrad (1 → 2). Durch Anlagerung des enthaltenen Wasserdampfes an der hygroskopischen Beschichtung des Rotors wird die Außenluft entfeuchtet. Die frei werdende Sorptionsenthalpie führt dabei zu einem starken Temperaturanstieg. Die entfeuchtete aber stark erwärmte Außenluft wird im Anschluss in einem Wärmerückgewinner mit Hilfe der kühlen Raumluft vorgekühlt (2 → 3). Anschließend wird im Nachkühler die gewünschte Temperatur (z. B. 22 °C) der Zuluft eingestellt (3 → 4). In einem sorptionsgestützten Lüftungsgerät kommt auch der Abluft eine entscheidende Bedeutung zu, da das Sorptionsmittel nicht ununterbrochen Wasser aufnehmen kann und demnach kontinuierlich getrocknet werden muss. Die Abluft aus dem Referenzraum wird dazu zunächst im Wärmerückgewinnungsrad (5 → 6) vorgewärmt und anschließend im Regenerationslufterhitzer (6 → 7) auf die zur Regeneration des Sorptionsmittels erforderliche Temperatur gebracht und schließlich zur Entfeuchtung des Sorptionsrades (7 → 8) genutzt, so dass ein kontinuierlicher Prozess realisiert wird.

Entfeuchtung und Kühlung sind nicht mehr gekoppelt und der notwendige Kältebedarf sinkt erheblich. Da nicht mehr die Entfeuch-

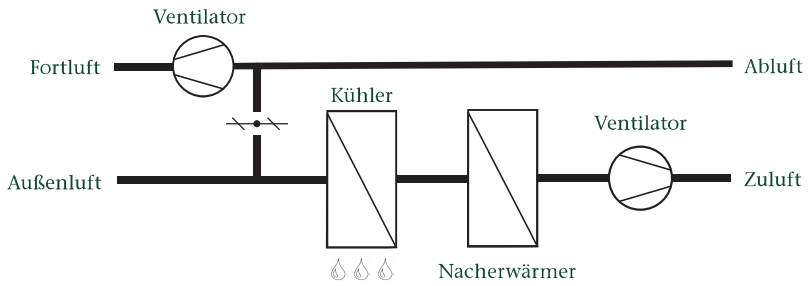

Abbildung 2:
Konventionelle Klimaanlage

tung das notwendige Temperaturniveau der Kältebereitstellung bestimmt, sondern das Zulufttemperaturniveau (11 °C vs. 22 °C), können höher temperierte Wärmesenken verwendet werden. Dies begünstigt den effizienten Einsatz von geothermischer Kühlung mit Hilfe des oberflächennahen Erdreichs. Bei sorptionsgestützten Anlagen entsteht allerdings ein zusätzlicher Wärmebedarf zur Regeneration des Sorptionsmittels. Aufgrund des geringen benötigten Temperaturniveaus (< 65 °C) kann diese Energie jedoch sehr effizient durch z. B. Solarthermie bereitgestellt werden. Der Vorteil der sorptionsgestützten Trocknung liegt also weniger in der Komponente selbst als viel mehr in den sich im Gesamtsystem ergebenden Vorteilen. In diesem Zusammenhang spielen auch Flächenwärmeübertrager, wie z. B. Kühldecken oder einer Fußbodenheizung, eine wichtige Rolle. Diese werden benötigt, um trotz des verhältnismäßig hohen Temperaturniveaus der Zuluft eine ausreichende Kühlung des klimatisierten Raumes bereitzustellen.

„Auch aus einer neuartigen Systemintegration bereits bekannter Komponenten kann eine Innovation entstehen.“
Arne Speerforck

Versuchsanlage an der Technischen Universität Hamburg

Zur Erprobung geothermisch- und sorptionsgestützter Klimaanlagen wurde an der Technischen Universität Hamburg eine Versuchsanlage errichtet. Die Anlage befindet sich direkt auf dem Campus der Universität und besteht aus der benötigten Anlagen- und Messtechnik der Klimaanlage sowie aus einem 54 m² großen Referenzraum, der als Büro- und Besprechungsraum genutzt wird. Der Referenzraum ist zu- und abluftseitig mit der RLT-Anlage verbunden und ist zusätzlich mit Kühldecken zur direkten Abfuhr sensibler Warmelasten ausgestattet. Die Anlagentechnik der Versuchsanlage ist schematisch in *Abbildung 4* dargestellt. Grundsätzlich lässt sich das Anlagenschema in drei Teilsysteme in Form des Lüftungsgeräts, des Warm- und Kaltwasserkreislaufs und des Referenzraumes unterteilen. Das

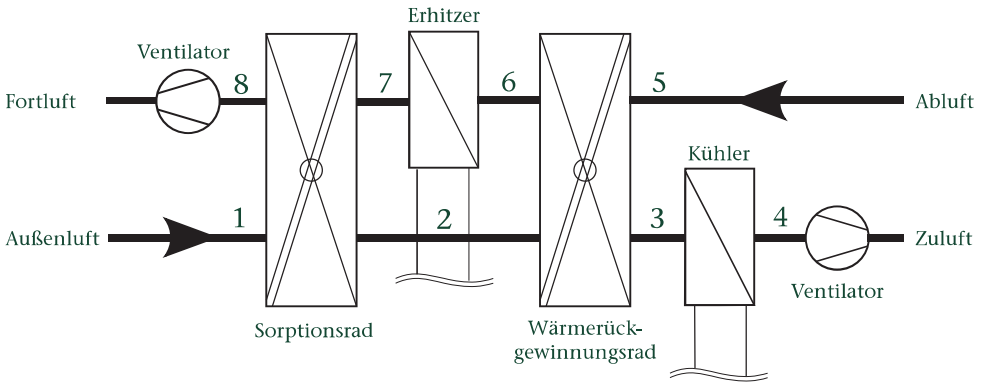

Abbildung 3: *Sorptionsgestütztes Lüftungsgerät*

Herz bildet dabei das bereits oben erörterte sorptionsgestützte Lüftungsgerät. Ein zu- und abluftseitiger Bypass ermöglicht die prozesstechnische Umgehung des Sorptionsrades und/oder des Wärmerückgewinnungsrades in Abhängigkeit des Außen- und Raumluftzustandes. Auf diese Weise wird ein möglichst effizienter Betrieb des Gesamtsystems gewährleistet.

Das geothermische System der Versuchsanlage umfasst drei 80 m tiefe Erdreichwärmeübertrager, die zur Versorgung des Nachkühlers sowie der Kühldecken mit dem Kaltwasserkreislauf der Anlage verbunden sind. Auf die hydraulische Einbindung eines Kaltwasserspeichers wurde aufgrund der großen Speicherkapazität des Erdreichs verzichtet. Die zur Regeneration des Sorptionsrades erforderliche thermische Energie wird durch eine solarthermische Anlage mit Flachkollektoren (Fläche: 20 m²) und ein mit Gas betriebenes BHKW (Nennleistungen: 5 kWel) bereitgestellt. Der eingebundene Pufferspeicher ermöglicht dabei eine Entkopplung von Wärmebedarf und Bereitstellung. In den hydraulischen Kreisen des Warm- und Kaltwasserkreislaufs wird ein Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträgermedium verwendet.

Systembewertung

Bevor die energetische Effizienz des vorgestellten Konzepts beurteilt werden kann, muss zunächst der Beweis erbracht werden, dass das vorgeschlagene System überhaupt in der Lage ist, ein für den Menschen behagliches Raumluftklima bereitzustellen. Dazu sind in *Abbildung 5* gemessene Zustände der Raum- und Außenluft in einem sogenannten Mollier-Diagramm dargestellt. Außerdem zeigt das Diagramm entsprechende Behaglichkeitsbereiche der Kategorien I und II; für herkömmliche Klimaanwendungen ist das definierte Ziel Raumlufttemperatur und Feuchte in den durch den Bereich II vorgegebenen Grenzen zu halten. Alle dargestellten Werte wurden in den Sommerperioden 2015 und 2016 gemessen. Um die Grenzen des Systems zu untersuchen, wurde nur ein

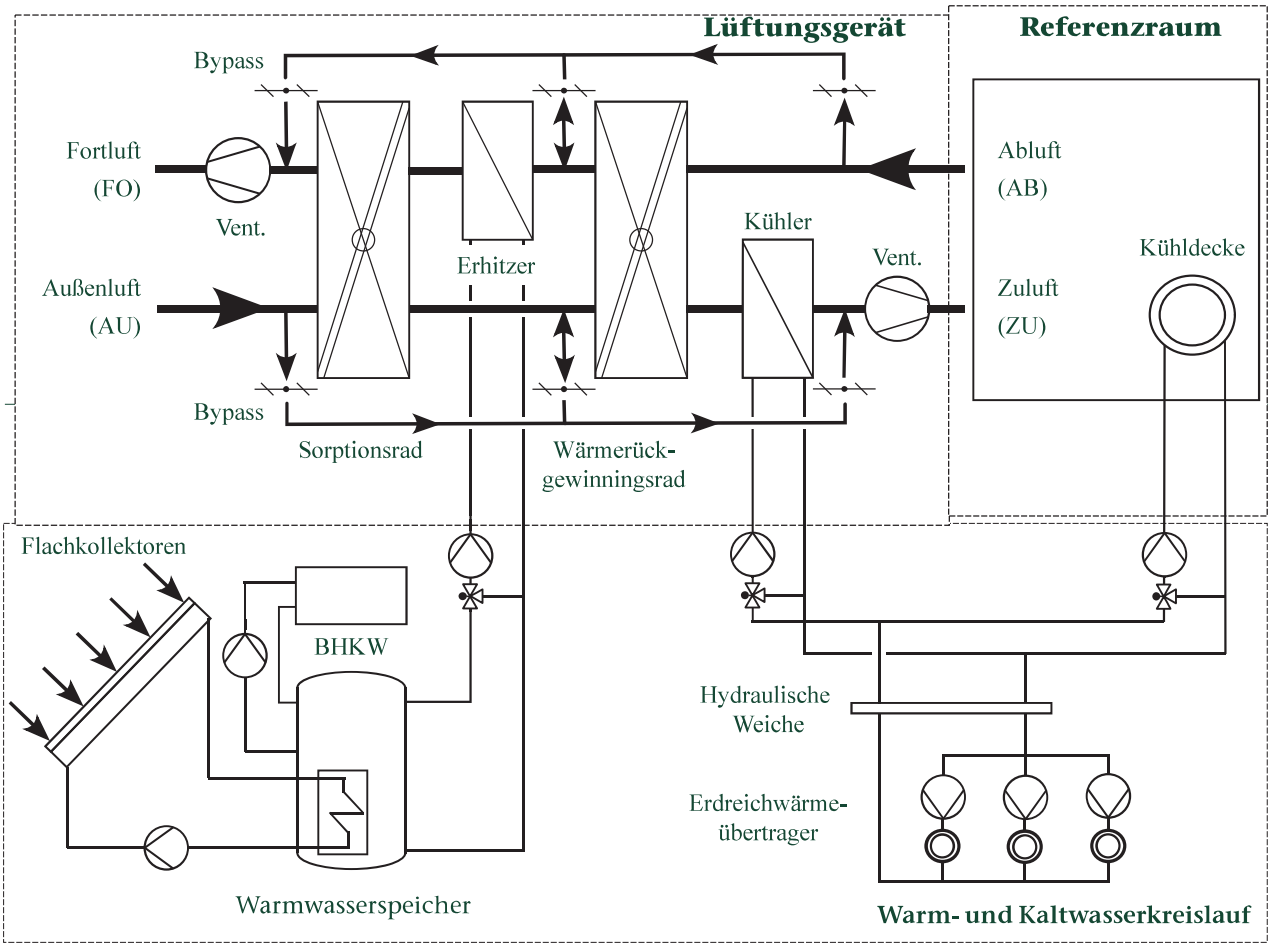

Abbildung 4:
Anlagenschema der Versuchsanlage an der Technischen Universität Hamburg

Erdreichwärmeübertrager zur Kühlung eingesetzt. Es ist sichtbar, dass das Komfortkriterium der Kategorie II in weniger als 3,5 % der Betriebszeit verletzt wurde. Die Gründe liegen hier ausschließlich in der zu hohen Raumlufttemperatur. In längeren wärmeren Wetterperioden kann ein einzelner Erdreichwärmeübertrager nicht dauerhaft die geforderte Raumlufttemperatur bereitstellen. Bei einem Vergleich zwischen den Außenlufttemperaturen und den Raumlufttemperaturen wird allerdings deutlich, dass die Anlage auch bei sehr hohen Außentemperaturen noch einen signifikanten Unterschied zwischen Raum und Umgebungstemperatur einstellen kann. Nach

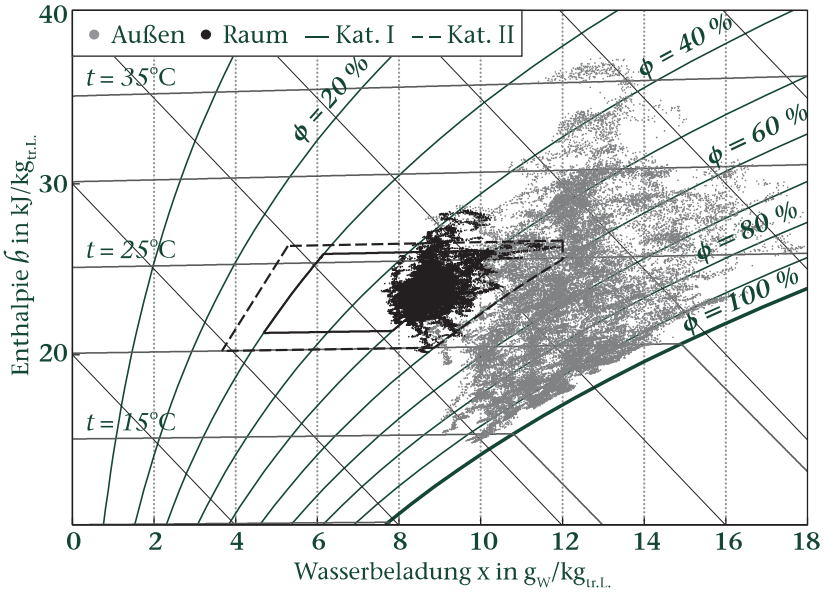

Abbildung 5: *Außen- und Raumluftzustände während des Anlagenbetriebs im Sommer*

herkömmlichen Auslegungskriterien sind 3,5 % unbehagliche Raumluftzustände allerdings durchaus akzeptabel. Der hinnehmbare Anteil von unbehaglichen Raumluftzuständen ist bei dem hier vorgestellten Konzept eine sehr wichtige Auslegungsgröße, da sie die notwendigen Abmessungen des geothermischen Systems und damit die Investitionskosten maßgeblich bestimmt.

Um die energetische Effizienz einer Klimaanlage zu beurteilen, ist ein Vergleich mit Referenzsystemen zweckmäßig. *Abbildung 6* zeigt einen Vergleich zwischen dem hier vorgestellten Systemkonzept (S-GEO), einer konventionellen Klimaanlage (TP-KKM) und einer Klimaanlage mit sorptiver Entfeuchtung, aber konventioneller Kühlung mit einer Kältemaschine (S-KKM). Die aufgetragenen Energiemengen entsprechen den im Tagesmittel benötigten thermischen und elektrischen Energiebedarfen der drei Systeme im Entfeuchtungsbetrieb. Es ist sichtbar, dass das hier vorgestellte System (S-GEO) erhebliche Elektrizitätseinsparungen gegenüber einem konventionellen System (TP-KKM) von knapp 71 % ermöglicht. Auch gegenüber dem sorptionsgestützten Referenzsystem werden erhebliche Einsparungen von 54 % erzielt. Der Unterschied resultiert dabei aus der Eliminierung der Kältemaschine (KKM), die für drei Viertel des elektrischen Energiebedarfs des konventionellen Systems und die Hälfte des Energiebedarfs des sorptionsge-

„Geothermische Klimaanlagen bedeuten nicht nur Umweltverträglichkeit sondern auch Komfort.“

Arne Speerforck

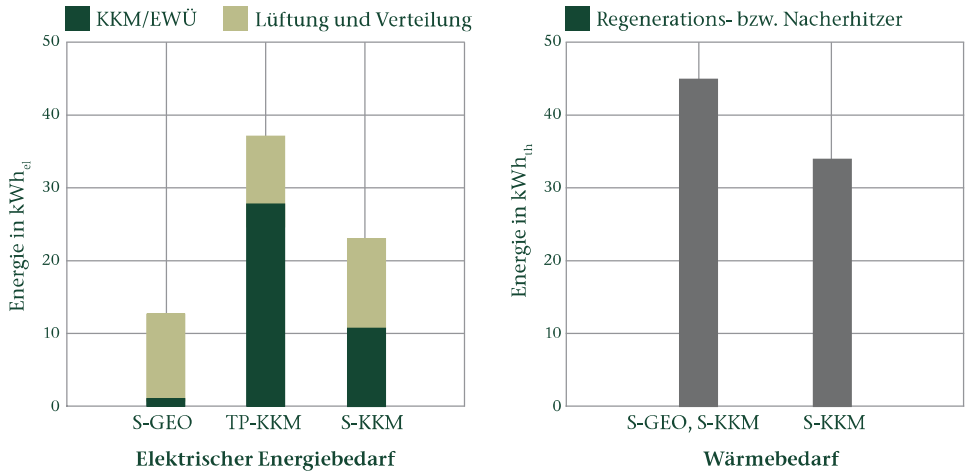

Abbildung 6:
Tagesmittlere Energiebedarfe des untersuchten Konzepts (S-GEO), eines konventionellen Referenzsystems (TP-KKM) und eines Referenzsystems basierend auf sorptiver Entfeuchtung und Kühlung mit einer Kompressionskältemaschine (S-KKM)

stützten Vergleichsprozesses verantwortlich ist. Allerdings ist auch die geothermische Kühlung nicht „umsonst"; die zur Durchströmung der Erdreichwärmeübertrager benötigten Pumpen verursachen jedoch nur 2 % des Energiebedarfs des Gesamtsystems. Der entsprechende Anteil ist in *Abbildung 6* kaum sichtbar und sogar geringer als der Standby Bedarf des Systems. Ein anderes Bild zeigt sich beim Betrachten des thermischen Energiebedarfs der unterschiedlichen Systeme. Die in *Abbildung 6* aufgrund des gleichen Bedarfs zusammengefassten sorptionsgestützten Systeme weisen einen um den Faktor 2,5 höheren Wärmebedarf als das konventionelle System auf.

Den Einsparungen an elektrischer Energie steht also ein erhöhter thermischer Energiebedarf gegenüber. Betrachtet man den Gesamtenergiebedarf beider Systeme, so wird insgesamt nicht notwendigerweise Energie eingespart. Es wird aber eine sehr hochwertige Energieform (Elektrizität) durch eine minderwertigere Energieform (Wärme bei 65 °C) ersetzt. Thermodynamisch beschrieben enthält der Wärmestrom deutlich weniger „Exergie", also Arbeitsfähigkeit. Wärme bei 65 °C kann hervorragend solarthermisch bereitgestellt werden, wobei man sich die Korrelation zwischen solarer Einstrahlung und Klimatisierungsbedarf zu Nutze macht. Der elektrische Energiebedarf einer solchen Klimaanlage ist auf das zum Betrieb der Pumpen und Ventilatoren notwendige Minimum reduziert. Dadurch lässt sich nicht nur der absolute elektrische Energiebedarf deutlich reduzieren, es lassen sich auch die oben bereits beschriebenen Lastspitzen und damit verbundenen Gefahren von Stromausfällen vermeiden.

Die hervorragende Eignung des oberflächennahen Erdreichs zum Kühlen verdeutlicht *Abbildung 7*. Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf entlang eines in dem dargestellten Zeitraum nicht genutzten Erdreichwärmeübertragers, also den des unberührten Erdreichs, in der Nähe des genutzten Erdreichwärmeübertragers unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Gemessen wurde dieser Temperaturverlauf an den in der Abbildung rechts dargestellten Tiefen. Nur in den ersten 15 m unterhalb der GOK ist ein deutlich sichtbarer saisonaler Einfluss auf den Temperaturverlauf zu erkennen, darunter bleibt die Temperatur im Jahresverlauf weitgehend konstant. Eine Mittelung über alle Messstellen in diesem Bereich ergibt eine Temperatur von 9,6 °C, was sehr nah an der Jahresmitteltemperatur von 9,7 °C des Standorts in Hamburg liegt. Dieses konstante Temperaturniveau lässt sich effizient zum Kühlen nutzen. Die Effizienz der Kältebereitstellung kann dabei durch eine saisonale Arbeitszahl beschrieben werden; diese beschreibt das Verhältnis der dem gekühlten Medium entzogenen Energiemenge und der dafür notwendigen elektrischen Energie. Die Erdreichwärmeübertrager erreichen dabei saisonale Arbeitszahlen von über 150, während eine herkömmliche Kältemaschine einen Wert von weniger als fünf aufweist. Die Effizienz der geothermischen Kühlung und damit auch des Gesamtkonzepts ist stark standortabhängig. Die Temperatur des ungestörten Erdreichs und damit auch die Jahresdurchschnittstemperatur (abhängig von vorhandenen geothermischen Aktivitäten) spielen in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle.

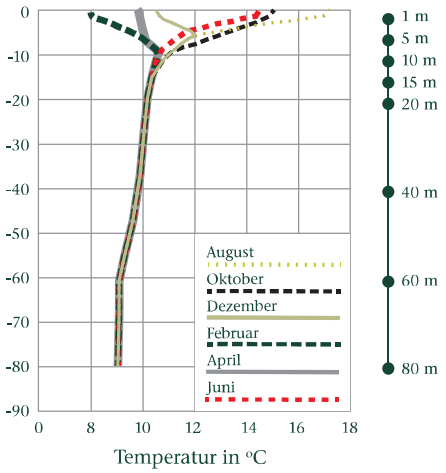

Abbildung 7:
Temperatur des unberührten Erdreichs im Jahresverlauf

Übertragbarkeit des Konzepts

Um eine breite Anwendung des Konzepts zu ermöglichen, muss die Funktion demnach auch an weiteren Standorten nachgewiesen werden. Dazu wurde ein Systemmodell des untersuchten Konzepts erstellt. Mit Hilfe dieses Modells kann die Anwendbarkeit an nahezu allen in Frage kommenden Standorten untersucht werden. Exemplarisch wird im Folgenden die Anwendbarkeit an fünf Standorten in den USA untersucht: Chicago, New York, Washington, D. C., San Diego und San Francisco. Die USA eignen sich aufgrund der hohen Verbreitung von Klimaanlagen hervorragend für eine solche Fallstudie. Dazu wird das System aus *Abbildung 4* ohne Blockheizkraftwerk an

„Solar- und geothermisch betriebene Klimaanlagen sind gut für das Klima – drinnen und draußen.“

Arne Speerforck

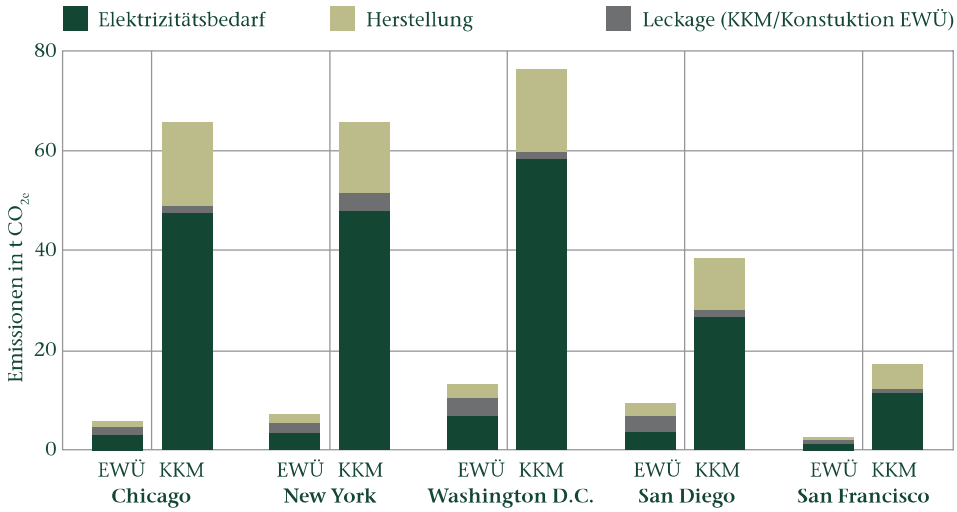

Abbildung 8:
Life Cycle Climate Performance von Erdreichwärmeübertragern (EWÜ) und Kompressionskältemaschinen (KKM)

jedem der untersuchten Standorte zunächst so dimensioniert, dass weniger als fünf Prozente der Raumluftzustände während einer gesamten Kühlperiode vom Menschen als unbehaglich empfunden werden. Die untersuchten Klimaanlagen basieren demnach nahezu komplett auf erneuerbaren Energien, lediglich zum Betrieb der Pumpen und Ventilatoren wird Elektrizität benötigt.

An jedem der untersuchten Standorte ist die Klimaanlage einsetzbar, das heißt sie ist in der Lage, ein ausreichend behagliches Raumklima über eine gesamte Kühlperiode einzustellen. Die erzielten Einsparungen an elektrischer Energie rangieren standortabhängig zwischen 72 % und 54 %. Ein weiterer Vorteil des Konzepts wird beim Betrachten der vermiedenen CO_2 äquivalenten Emissionen sichtbar – der komplette Verzicht auf klimaschädliche Kältemittel. *Abbildung 8* zeigt einen Vergleich der aus der Kühlung mit Erdreichwärmeübertragern und herkömmlichen Kältemaschinen resultierenden Emissionen; dabei wird die Life Cycle Climate Performance [4] der Komponenten ausgewertet. Es werden also die über den gesamten Lebenszyklus der Komponenten auftretenden Emissionen betrachtet. Die Emissionen werden dabei zum einen durch den Elektrizitätsbedarf der Komponenten während ihres Lebenszyklus verursacht, zum anderen durch die Herstellung der benötigten Materialien und schließlich durch die Einbringung und Konstruktion der Erdreichwärmeübertrager sowie durch Leckage des verwendeten Kältemittels bei Kompressionskältemaschinen.

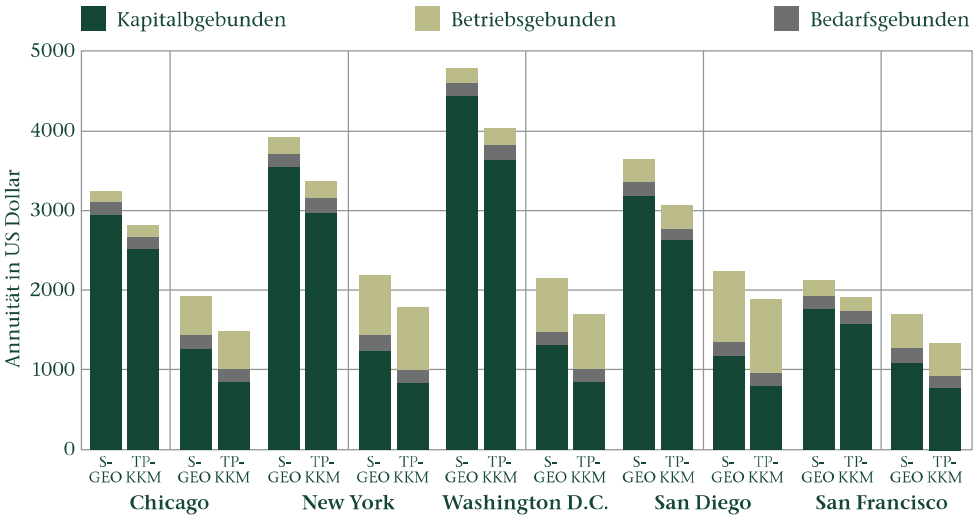

Abbildung 9: *Maximale und minimale Annuitäten des untersuchten Systems und des konventionellen Vergleichssystems*

An allen untersuchten Standorten lassen sich durch den Einsatz von Erdreichwärmeübertragern erhebliche Emissionseinsparungen erzielen, diese bewegen sich zwischen 91 % für Chicago und 72 % in San Diego. Die aus Kältemittelleckage allein resultierenden Emissionen sind für alle Standorte höher als die gesamten aus dem Betrieb der Erdreichwärmeübertrager resultierenden CO_2-Äquivalente. Der weitaus größere Anteil der Emissionen von Kompressionskältemaschinen resultiert aber aus deren hohem Elektrizitätsbedarf. Auch wenn die zum Betrieb der Pumpen der Erdreichwärmeübertrager benötigte Elektrizität relativ klein ist, sind diese trotzdem für 53 % der verursachten CO_2-Äquivalente über den gesamten Lebenszyklus hinweg verantwortlich.

Bisher wurden lediglich Vorteile geothermisch- und sorptionsgestützter Klimaanlagen genannt – es stellt sich also die berechtigte Frage, warum diese noch nicht flächendeckend eingesetzt werden. Die Anwendung scheitert dabei in erster Linie an der Wirtschaftlichkeit. *Abbildung 9* zeigt die Kosten des untersuchten Systems (S-GEO) und einer konventionellen Klimaanlage (TP-KKM), ermittelt nach der Annuitäten-Methode gemäß VDI 2067 [5].

Die Kosten sind dabei in kapitalgebundene, betriebsgebundene und bedarfsgebundene Kosten unterteilt. Um den in Literaturdaten auftretenden Schwankungen bezüglich der auftretenden Kosten Rechnung zu tragen, sind pro Standort und System jeweils zwei Annuitäten aufgetragen – eine minimale

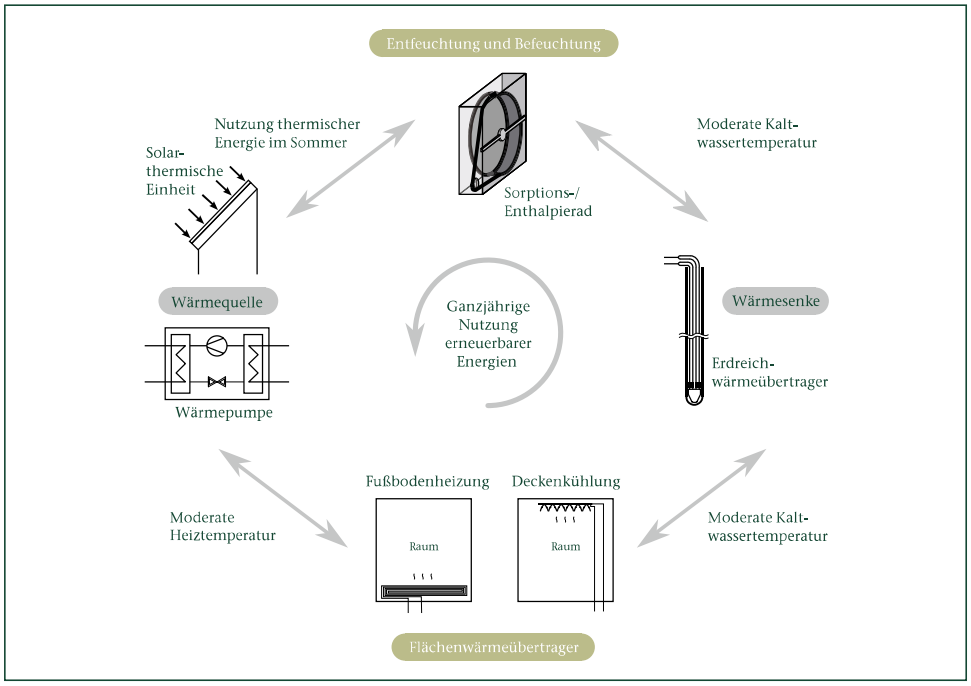

Abbildung 10: *Zusammenwirken der einzelnen Komponenten für eine energieeffiziente Gebäudeklimatisierung*

und eine maximale. Es ist deutlich sichtbar, dass ein System mit sorptiver Trocknung und geothermischer Kühlung an keinem der betrachteten Standorte konkurrenzfähig ist. Die Annuitäten für das konventionelle System sind zwischen 58 % und 22 % geringer. Der Unterschied resultiert dabei aus den kapitalgebundenen Kosten. Die Investitionskosten für die Erdreichwärmeübertrager, die Solaranlage sowie die Kühldecken sind hier entscheidend. Durch die Energieeinsparungen ist das untersuchte System bei den bedarfsgebundenen Kosten zwar bis zu 73 % günstiger, diese Einsparungen reichen allerdings nicht aus, um die höheren Investitionskosten über die gesamte Lebensdauer auszugleichen. Hier spielt auch der in den USA sehr niedrige Strompreis von z. B. 9,4 $ ct./kWh in Chicago eine Rolle; Elektrizitätseinsparungen rentieren sich demnach deutlich schwerer als unter Anderem in Deutschland. Durch *Abbildung 9* wird auf der anderen Seite auch sichtbar, dass die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des untersuchten Systems stark standortabhängig ist. Hier spielt vor allem die Jahresdurchschnittstemperatur eine wichtige Rolle, die die Temperatur des ungestörten Erdreichs und damit die notwendigen Investitionskosten für das geothermische System maßgeblich beeinflusst. Vorteilhaft für das System sind dabei gerade diejenigen

Standorte mit kalten Wintern und heißen Sommern. Ein solcher Standort ist z. B. Chicago, während in einem Standort wie Washington, D. C. die Jahresdurchschnittstemperatur zu hoch ist und damit ein zu großes geothermisches System notwendig wird.

Wirtschaftlichkeit erhöhen

Die Aufgabe zukünftiger Untersuchungen auf diesem Gebiet muss demnach sein, die notwendigen Investitionskosten geothermisch und sorptionsgestützter Klimaanlagen zu senken. Wie oben bereits erwähnt, ist das Konzept dort am wirtschaftlichsten, wo das Klima saisonal sehr unterschiedlich ist. In diesen Regionen kann im Winter mit Hilfe einer geothermischen Wärmepumpe geheizt werden, die in den Übergangsphasen hervorragend solar unterstützt werden kann. In Kombination mit einem Flächenwärmeübertrager ist ein sehr effizienter Betrieb dieses Systems zu erwarten. Auch das im Sommer zur Entfeuchtung genutzte Sorptionsrad kann im Winter zur Rückbefeuchtung verwendet werden, um zu trockene Luftzustände in der konditionierten Räumlichkeit zu vermeiden. Der Großteil der Komponenten des untersuchten Systems kann also auch in der kalten Jahreszeit effizient verwendet werden. *Abbildung 10* verdeutlicht das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten. Bei einer gezielten Optimierung des Gesamtsystems für den Ganzjahresbetrieb scheint durchaus ein wirtschaftlicher Betrieb an einigen Standorten möglich. Dies muss aber mit weiteren Untersuchungen belegt werden. Das vorgestellte System zur Klimatisierung wird also nicht alle in der Einleitung geschilderten Probleme lösen können. Gerade in sehr heißen Regionen sind Alternativen notwendig. Es ist demnach dringend erforderlich, sich weiterhin mit Fragestellungen der energieeffizienten Gebäudeklimatisierung zu beschäftigen, um diesen „Blind Spot“ der Energiepolitik zu beleuchten und dringend notwendige Lösungen zu erarbeiten.

> *„Es ist wichtig das gesamte System über das gesamte Jahr zu betrachten.“*
>
> *Arne Speerforck*

Literaturverzeichnis

[1] International Energy Agency (2018): The Future of Cooling: Opportunities for energyefficient air conditioning. Special Report.

[2] Hitchin, R. et al. (2013): „Assessing the market for air conditioning systems in European buildings“. In: Energy and Buildings, volume 58, pages 355–362.

[3] Spiegel, D. (2011): Massiver Stromausfall trifft Millionen Amerikaner.

[4] Beshr, M. et al. (2015): „A comparative study on the environmental impact of supermarket refrigeration systems using low GWP refrigerants“. In: International Journal of Refrigeration, volume 56, pages 154–164.

[5] VDI 2067 (2012): Wirtschaftlichkeit Gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Berlin: Beuth.