



**Stromfresser:** Werden alle Räume einzeln mit Kühlanlagen an der Fassade klimatisiert wie in diesem Bürohaus, verbraucht die Temperierung des Gebäudes große Mengen elektrischer Energie.

# Das große Kühlen

Der Energiebedarf für Klimaanlage wird in Zukunft laut Prognosen erheblich steigen. **Alternative Kühlkonzepte** können den CO<sub>2</sub>-Ausstoß begrenzen, müssen sich aber gegenseitig ergänzen.

Von Frank Thomas Wenzel

**D**er Sommer hat dieses Jahr im April begonnen. Und Ende September wunderte sich in Frankfurt niemand mehr über 30 Grad im Schatten. Die Stadt im Südhessischen war einer der Hotspots der Republik. An den heißesten Tagen – Ende Juli und Anfang August – wollte das Thermometer auch mitten in der Nacht nicht mehr unter die 25-Grad-Marke sinken.

Um einigermaßen Schlaf zu finden, erinnerten sich Bewohner an Praktiken aus Großmutterns Zeiten. Feuchte Bettlaken wurden in Fenster gehängt, um die Zimmertemperaturen etwas zu drosseln. Auf Grillpartys wurde im Schweiß des Angesichts über die Anschaffung von Klimageräten diskutiert. Frankfurter Verhältnisse als Vorboten für das, was uns der Klima-

wandel in den nächsten Jahren bescheren wird?

Der örtliche Energieversorger Mainova jedenfalls hat sich längst darauf eingestellt, dass die Lastspitzen beim Strom nicht an kalten, dunklen Wintertagen auftreten, sondern wenn die Sonne senkrecht vom Himmel knallt. Das hat nicht nur mit den meteorologischen Verhältnissen zu tun und



damit, dass die Stadt besonders dicht bebaut ist. In den zahlreichen Bankentürmen aus Glas, Stahl und Beton ist in der warmen Jahreszeit ein Arbeiten ohne Klimaanlage undenkbar.

Hinzu kommt, dass Frankfurt auch noch die Bundeshauptstadt der Rechenzentren ist, die ebenfalls gehörig gekühlt werden müssen. Dieses Jahr sei die ohnehin schon hohe Stromnachfrage im Sommer weit überdurchschnittlich gestiegen, sagt ein Mainova-Sprecher. Details will er nicht nennen. Aber die Versorgungssicherheit sei jederzeit gegeben gewesen – schließlich habe man Erfahrungen mit solchen Bedarfsspitzen.

Experten der Internationalen Energieagentur (IEA) sind da nicht ganz so cool. Sie geben sich beinahe alarmistisch. „Die wachsende Nachfrage nach elektrischer Energie für Klimaanlagen ist einer der kritischsten blinden Flecken in der aktuellen Energiedebatte“, sagt IEA-Direktor Fatih Birol. In den USA und in Japan sorgen Klimaanlagen in 90 Prozent der Haushalte für angenehme Temperaturen. In den

wärmsten Ländern der Erde liegt die Verbreitung laut IEA im Durchschnitt noch bei nur acht Prozent. Aber beispielsweise in Indien sorgen Klimaanlagen in Spitzenlastzeiten schon für zehn Prozent des Strombedarfs. Um es kühl zu haben, wird weltweit bereits ein Fünftel des Stromverbrauchs in Wohnungen und Büros durch Klimageräte und Ventilatoren verursacht.

Die IEA geht in einer aktuellen Studie davon aus, dass bis 2050 aufgrund zweier Faktoren diese Zahlen vor allem in Schwellenländern „raketenartig“ (Birol) in die Höhe schießen werden. Zum Klimawandel mit weltweit steigenden Temperaturen kommt der wachsende Wohlstand in riesigen Staaten wie China oder Indien, wo es schon jetzt viel heißer ist als in Frankfurt. Wenn Menschen in Zukunft Geld für einen höheren Lebensstandard übrig haben, werden sie sich nach Ansicht der IEA-Experten als eine der ersten Anschaffungen ein Klimagerät zulegen. Die Bilder aus Südeuropa oder Japan, wo an Häuserfassaden über jedem zweiten Fenster ein weißer Kasten klebt, könnten dann zu einem globalen Erkennungszeichen für ökonomischen Fortschritt werden.

Die Energieagentur jedenfalls rechnet hoch, dass sich der Energiehunger zur Erzeugung von Kälte für Wohn- und Bürogebäude in den nächsten 32 Jahren mehr als verdreifachen kann. Klimaanlagen sind Stromfresser: Der prognostizierte Zusatzbedarf an elektrischer Energie müsste rechnerisch mit den gesamten Erzeugungskapazitäten abgedeckt werden, über die heute die USA, die EU und Japan zusammen verfügen, so die Kalkulation der IEA. Das zugrundeliegende Szenario geht davon aus, dass die Zahl der Geräte weltweit von derzeit 1,6 auf 5,6 Milliarden steigen wird. Der Weltklimarat wagt eine noch hochgestochene Prognose: Im Jahr 2100 werde die Menschheit 30-mal so viel Energie für Kühlung aufwenden wie im Jahr 2000. Eine Vorahnung von dem, was droht, konnte man jüngst in Kalifornien besichtigen, wo der Sommer ebenfalls ungewöhnlich heiß war. Teile des Stromnetzes in dem US-Bundestaat brachen zeitweise zusammen.

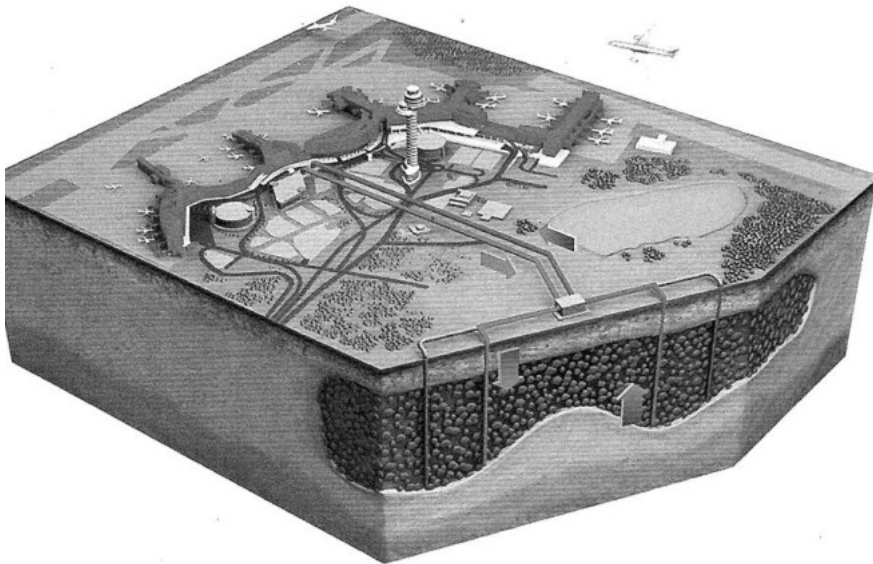
Wird also auch Deutschland früher oder später einen Kälteschock der besonderen

Art erleiden? „Ja und nein“, heißt die zunächst etwas irritierende Antwort von Veit Bürger vom Öko-Institut. Auch für ihn besteht kein Zweifel daran, dass der Klimawandel den Bedarf nach Kühlung hierzulande steigen lassen wird. Doch es werde sich zugleich ein gegenläufiger Effekt einstellen. Erderwärmung bedeute für Deutschland zugleich, dass weniger geheizt werden müsse. Das Öko-Institut hält es für möglich, dass der Wärmebedarf um bis zu 15 Prozent zurückgeht. Unter dem Strich werde die Gesamtnachfrage nach Energie zur Temperierung von Gebäuden keinesfalls steigen, sondern eher sinken, so Bürger. Das ziehe außerdem eine Verlagerung bei der Nutzung der Energiequellen nach sich: Weg von Öl und Gas, hin zu Strom.

Damit es frischer wird, muss bei einer konventionellen Klimaanlage ein flüssiges Kühlmittel, das in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird, mittels eines Ventils verdampft werden. So kann es die Wärme der Umgebung aufnehmen. Um das Verdampfen zu ermöglichen, ist es nötig, das Kühlmittel zunächst unter Hochdruck zu einem heißen Gas zu verdichten, das in einem zweiten Schritt mittels Kondensation verflüssigt wird. Für diesen Prozess braucht es einen Kompressor, der jede Menge Energie benötigt, die heute in der Regel elektrisch ist.

Doch es geht auch anders. Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird an Lösungen geforscht, die eine bislang stark vernachlässigte natürliche Ressource nutzen: die wasserführenden Schichten im Untergrund. Kälteerzeugung mittels so genannter Aquifere wurde schon vor rund 60 Jahren in China zu Beginn der dortigen Industrialisierung aus der Not heraus entwickelt, weil man für Fabriken dringend Kühlung benötigte. Das Prinzip ist simpel, es macht sich zunutze, dass in Aquiferen das Wasser kaum oder überhaupt nicht fließt. Es handelt sich im Grunde um gigantische Badewannen, gefüllt mit Sand, Kies und Wasser. Das umgebende Gestein wirkt wie eine isolierende Schicht.

Diese Grundwasserreservoirs werden angebohrt. Das kühle Wasser wird aus dem Brunnen beispielsweise zu einem Flughafengebäude oder einem Wohngebiet ge-



**Natürlicher Kühlkreislauf:** Der Stockholmer Flughafen Arlanda wird mit Hilfe eines nahegelegenen Aquifers klimatisiert. Dazu leiten Rohre im Sommer kaltes Wasser aus dem Grundwasserreservoir zum Kühlen in das Gebäude. Das erwärmte Wasser wird anschließend wieder in den Boden gepumpt. Da es seine Temperatur in den isolierenden Untergrundschichten lange Zeit halten kann, lässt es sich im Winter zurückholen und zum Heizen nutzen.

pumpt. Über Wärmetauscher und Leitungssysteme gelangt die Kälte in Anflughallen oder Wohnungen. Bei diesem Prozess erwärmt sich das Grundwasser, das über einen zweiten Brunnen wieder zurück in den Untergrund geleitet wird. So entstehen dort verschiedene Zonen mit relativ konstanten, aber unterschiedlich hohen Temperaturen, begünstigt durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der wasserführenden Schichten.

Das macht einen positiven „Nebeneffekt“ möglich: Warmes Wasser lässt sich über Monate speichern. Im Winter kann so die Fließrichtung der Anlage umgekehrt und das Grundwasser zum Heizen eingesetzt werden. Bislang gibt es hierzulande nur vier Standorte mit Energiespeicherung im Grundwasser. Prominentestes Beispiel ist das Reichstagsgebäude in Berlin.

KIT-Forscher studieren die Funktionsweise der Aquiferspeicher im Bonner Bogen nahe dem Rhein. „Die Kälteversorgung für ein Hotel und zwei Bürokomplexe kann komplett über diesen Speicher gewährleistet werden“, erläutert KIT-Wissenschaftler Paul Fleuchaus, der über die unterirdischen Speicher seine Doktorarbeit schreibt. Es handele sich um Gebäude mit einer Fläche von insgesamt 60 000 Quadratmetern.

Gegenüber einer konventionellen Geothermie-Anlage würden jährlich rund 1700 Megawattstunden Energie sowie 400 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart. Weltweit gibt es etwa 3000 solcher Anlagen, davon 90 Prozent in den Niederlanden. Es handelt sich um ein Verfahren, das nur in großtechnischen Dimensionen wirtschaftlich funktioniert – etwa für Museen, Bürogebäude, Einkaufszentren und Krankenhäuser. Das verlangt einiges an Aufwand. Aber der lohnt sich nach den Berechnungen der KIT-Wissenschaftler: Die Investitionen machten sich nach zwei bis maximal zehn Jahren bezahlt.

Allerdings braucht es dafür nicht nur Geld, sondern auch die passenden geologischen Verhältnisse. Doch Fleuchaus geht davon aus, dass dies in „allen Industrieländern und natürlich auch in China“ möglich sei. Hierzulande bestehe großes Potenzial für Aquiferspeicher, das bislang kaum genutzt werde.

Das gilt auch für den Süden der Republik, was für die Energiewende wichtig ist. Denn im Süden ist es nicht nur wärmer als an Nord- und Ostsee, dort liegen auch zahlreiche Großstädte – nebst industriellen Zentren, die viel Strom brauchen. Doch ein Gros des Ökostroms wird auch künftig im Norden und Nordosten der Republik hergestellt. Aquifer-Anlagen könnten also Stromtransporte verringern.

Fleuchaus räumt ein, dass das Anzapfen der unterirdischen Speicher nicht das Allheilmittel sein kann, um den „Cold Crunch“ zu vermeiden, das böse Erwachen bei der Kühlenergie, vor dem die IEA warnt. „Wir können nur einen Beitrag leisten.“ In Dubai etwa oder in anderen sehr heißen Gegenden sei Grundwasser erstens zu warm und zweitens zu rar, um damit Kühl-Konzepte in großem Stil umzusetzen.

Es braucht also ein Zusammenspiel verschiedener Lösungen. Wobei Öko-Institut-Experte Bürger darauf aufmerksam macht, dass eine günstige Korrelation die Sache vereinfacht: Die Sonne, die die Sommerhitze erzeugt, kann auch eingesetzt werden, um den Menschen Kühlung zu verschaffen.

Solarthermische Anlagen sind dafür bestens geeignet, obwohl sie eigentlich für das Erzeugen von warmem Wasser entwickelt wurden und obwohl Kühlen mittels Hitze auf den ersten Blick paradox wirkt. Doch längst sind Verfahren serienreif, bei denen der Kompressor ersetzt wird: Das Kühlmittel wird zunächst von einer zweiten Substanz (Wasser oder Salz) absorbiert, um es dann mit der Wärme aus einer solarthermischen Anlage in heißes Gas umzuwandeln, das in den gängigen Kühlkreislauf eingespeist werden kann.

Solch eine Anlage schützt beispielsweise Patienten im United Nations Hospital vor der Gluthitze in Khartoum (Sudan). Dabei braucht sie relativ wenig Energie: Bis zu 90 Prozent können durch den Einsatz von Solarthermie eingespart werden. Dennoch ist diese Technologie bislang in einer winzigen Nische versteckt. Denn die Anlagen kosten über den Daumen das Vier- bis Fünffache im Vergleich zu konventionellen. Ein weiteres Problem sei, so Bürger, dass die Sonnenkollektoren relativ viel Platz benötigen. Der ist gerade in Metropolen in Schwellenländern rar.

Kein Wunder also, dass Wissenschaftler in aller Welt daran arbeiten, die Effizienz der Solarthermie zu erhöhen. Kurioserweise geht es dabei vor allem darum, die Temperaturen der Flüssigkeiten in den Kollektoren deutlich zu erhöhen. Zugleich wird an Hybridanlagen geforscht, mit dem Ziel, den Strombedarf der Kompressoren zu ver-

ringern, etwa indem Sonnenwärme das Kühlmittel vorheizt. Laut dem Fachmagazin Spektrum der Wissenschaft könne damit der Energiebedarf immerhin um ein Drittel sinken, höhere Anschaffungskosten könnten innerhalb von zwei Jahren wieder reingeholt werden. Zudem hoffen die Anhänger der Solarthermie auf Skaleneffekte, also darauf, dass mit einer wachsenden Zahl von Anlagen die Kosten für die Komponenten deutlich zurückgehen.

Gleiches gilt natürlich auch für die Photovoltaik. Große Hoffnungen ruhen dabei auf organischen Solarzellen. „Der geringe Materialverbrauch und die Anwendung effizienter Produktionstechnologien eröffnen ein hohes Potenzial für eine kostengünstige Herstellung“, so das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Weitere Vorteile seien „die mechanische Flexibilität und das geringe Gewicht“. Organisch bedeutet, dass anstelle von Silizium Kohlenstoffverbindungen zur Umwandlung von Licht in Strom genutzt werden. Die Zellen können so dünn wie eine Folie sein, entsprechend groß sind die potenziellen Einsatzgebiete. Der Nachteil ist allerdings bislang der geringere Wirkungsgrad von bestenfalls 14 Prozent.

In der Fachzeitschrift „Science“ stellten Wissenschaftler aber jüngst neue organische Solarzellen mit einem Rekordwirkungsgrad von 17,3 Prozent vor. Forscher von der Nankai-Universität im chinesischen Tianjin haben es geschafft, in einem Prototyp lichtaktive Substanzen in insgesamt neun extrem dünnen Lagen zu stapeln. Das Ziel der Forscher: den Wirkungsgrad auf bis zu 25 Prozent zu steigern. Damit würden sie sogar die derzeit kommerziell hergestellten Siliziumzellen abhängen. Plausibel wäre, solche Zellen auf Außen-Jalousien oder Fassaden anzubringen. Noch einen Schritt weiter gehen die Wissenschaftler der South China University of Technology, die Folien mit organischen Zellen auf Fensterscheiben kleben wollen, womit nicht nur Strom erzeugt, sondern zugleich ein Teil des UV-Lichts reflektiert werden soll. Letzteres wirkt allein schon kühlend.

Ob Jalousie oder Fenster – in jedem Fall können mit dem organischen Sonnenstrom Kompressoren von Klimaanlagen betrieben



**Umweltschonend angelegt:** Ein Aquifer-Speicher versorgt zwei Bürogebäude und ein Hotel im Bonner Bogen im Sommer mit Kälte und im Winter mit Wärme.

werden, und zwar immer dann mit einer Höchstleistung, wenn die Hitze heftig vom Himmel knallt. Ergänzend dürften früher oder später Batteriespeicher hinzukommen, für die ebenfalls massive Preissenkungen zu erwarten sind. So könnte elektrische Energie zum Kühlen auch zu nachtschlafender Zeit abrufbar sein.

Das alles zeigt: Technologische Ansätze, um mehr Kälte in die Welt zu bringen, gibt es viele. Doch die Zeit drängt. Wie lassen sich Entwicklungen forcieren? Die IEA macht in ihrer Studie darauf aufmerksam, dass die in Europa und Japan derzeit eingesetzten Klimaanlagen im Schnitt um rund 25 Prozent weniger Strom verbrauchen als Geräte, die in den USA und in China zum Einsatz kommen. Das deutet auf riesige Effizienzpotenziale hin. Um diese zu heben, schlagen Birol und seine Kollegen vor, dass Regierungen Performance-Standards für Klimageräte vorschreiben. Auch Kennzeichnungspflichten bringt die IEA ins Gespräch. Das erinnert an die Abgas-Politik der EU, die mit der Setzung von Grenzwerten für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß erreicht hat, dass die Effizienz von Verbrennungsmotoren in den vergangenen Jahren merklich gesteigert wurde – wenngleich da noch deutlich mehr möglich wäre.

Strenge Standards können jedenfalls in der Industrie Anstrengungen zur Entwick-

lung sparsamer und klimafreundlicher Lösungen initiieren. Die IEA ist davon überzeugt, dass die durchschnittliche Energieeffizienz von Klimageräten bis 2050 mehr als verdoppelt werden könne, was die Notwendigkeit zum Ausbau der Energieinfrastruktur massiv reduziere.

Doch es gibt jenseits technologischer Lösungen noch andere Wege, um Innenräume kühler zu machen. So sieht Veit Bürger auch Architekten und Stadtplaner in der Pflicht. In Bebauungsplänen etwa könnten Gebäude so ausgerichtet werden, dass das Kühlen leichter falle. Zu den ganz simplen Vorkehrungen gehörten große Dachüberstände, die viel Schatten spenden.

Und auch in bestehenden Gebäuden ist Einiges drin. Das Öko-Institut hat schon 2016 in einer Studie für das Umweltbundesamt darauf hingewiesen, dass „durch die geregelte Öffnung von Fenstern in der Fassade und Öffnungen im Dach mittels Elektromotoren“ Luftzirkulation und Luftaustausch angeregt werden, ganz ohne Ventilatoren. Kommen Wärmeschutzglas, Jalousien, Rollläden und Markisen hinzu, könne durch die automatisierte natürliche Lüftung die benötigte Kühlenergie im Vergleich zur konventionellen Klimaanlage um bis zu 60 Prozent reduziert werden. Es müssen also nicht unbedingt nasse Bettlaken an Fenstern sein. ◀