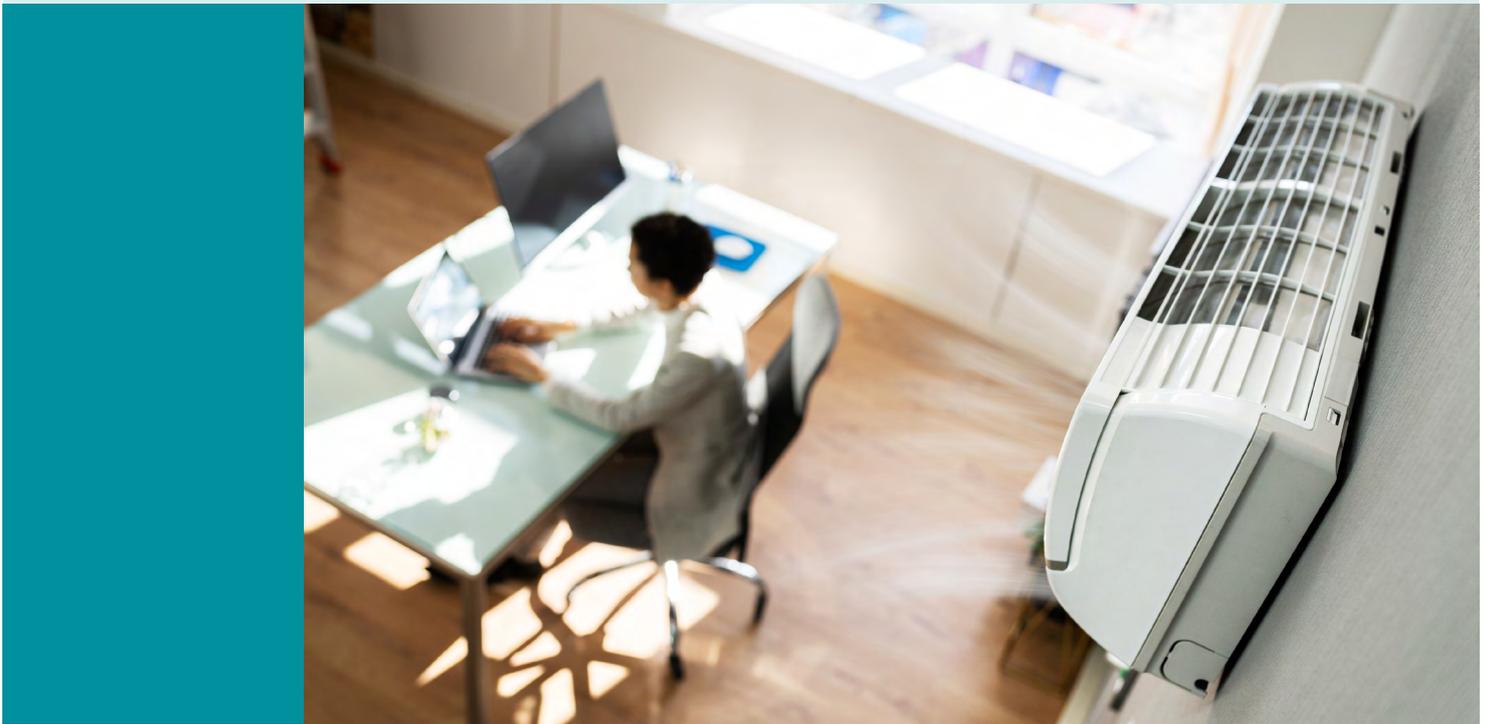




BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Sustainable Cooling – nachhaltige Kühlungsstrategien



Tobias Jetzke
Lia Meißner
Julia Czerniak-Wilmes
Sonja Kind
Christoph Bogenstahl

Mai 2023 | TAB-Kurzstudie Nr. 4



Sustainable Cooling – nachhaltige Kühlungsstrategien



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin
Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de

2023

Gestaltung: VDI/VDE-IT

Bildnachweise: AndreyPopov/iStock (Umschlagbild, S.72); Marc Bruxelle/iStock (S.17); Drbouz/iStock (S.27); bluecinema/iStock (S.41); Magove/iStock (S.47); baona/iStock (S.58); RossHelen/iStock (S.61); Alex Potemkin/iStock (S.84); fotografixx/iStock (S.89); gerenme/iStock (S.103)

ISSN-Internet: 2702-7260

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	15
2 Bedeutung von Kühlung und Klimatisierung	17
2.1 Steigender Bedarf an Kühlung und Klimatisierung	17
2.1.1 Klimawandel: steigende Temperaturen machen Hitzeanpassungen mehr und mehr erforderlich	17
2.1.2 Demografische Faktoren: Bevölkerungswachstum, Urbanisierung, Alterung und Krankheit	18
2.1.3 Einkommenszuwächse: eine wachsende globale Mittelschicht kann sich Kühlgeräte leisten	20
2.1.4 Weltweiter Kühlbedarf: steigender Absatz ineffizienter Geräte	20
2.2 Auswirkungen von Überhitzung bzw. unzureichendem Zugang zu Kühlung	22
2.2.1 Gesellschaftliche Auswirkungen	23
2.2.2 Infrastrukturelle Auswirkungen	26
2.2.3 Ökonomische Auswirkungen	29
2.3 Durchbrechen der Spirale negativer Wechselwirkungen	30
3 Kühlung: Nachhaltigkeit, Verfahren und Akteure	33
3.1 Definition nachhaltiger Kühlung	33
3.2 Standardverfahren für Kühlung und Klimatisierung	34
3.3 Kühlbedarfe und -geräte	37
3.4 Das deutsche Kälte- und Klimainnovationssystem	42
3.4.1 Die deutsche Kälte- und Klimabranche	42
3.4.2 (Forschungs-)Förderung von Kälte- und Klimatechnologien	45
3.4.3 Forschungslandschaft: Themengebiete, Disziplinen, Publikationsintensität	48
4 Innovationsbereiche	55
4.1 Urbane Kühllösungen	55
4.1.1 Konzept der klimaangepassten Stadt	56
4.1.2 Kühle Dächer, Gehwege und Wände	57
4.1.3 Bäume, Parks und Grünflächen	60



4.1.4	Kühlen mit Wind und Wasser	62
4.1.5	Öffentliche Kühlzentren	63
4.1.6	Quartierskälte	63
4.1.7	Bauliche Maßnahmen	65
4.2	Nichttechnische Innovationen	65
4.2.1	Kulturelle Anpassungen	67
4.2.2	Innovative Finanzierungsmodelle	68
4.2.3	Cooling as a Service	69
4.2.4	Erhöhung der Energieeffizienz in Entwicklungs- und Schwellenländern	70
4.3	Technologische Innovationen	70
5	Bedeutung nachhaltiger Kühlung in Deutschland	75
5.1	Steigender Bedarf an nachhaltigen Kühllösungen	75
5.1.1	Klimawandel in Deutschland	75
5.1.2	Demografische Entwicklungen und gesundheitliche Folgen zunehmender Hitze	77
5.2	Rahmenbedingen für die Entwicklung nachhaltiger Kühllösungen	80
5.2.1	Ökonomische Rahmenbedingungen	81
5.2.2	Regulatorische Rahmenbedingungen	86
5.2.3	Innovationspolitische Rahmenbedingungen	88
6	Handlungsfelder	91
6.1	Kühlbedarf durch vorbeugende Maßnahmen vermeiden	91
6.1.1	Kommunale Ebene	91
6.1.2	Übergeordnete Ebene	96
6.2	Kühlbedarf auf nachhaltige Weise decken	99
6.2.1	Abbau von Umsetzungsbarrieren	99
6.2.2	Effiziente Versorgung von Kühllasten	101
6.2.3	Optimierung von Kühllasten	103
7	Literatur	105
8	Anhang	123
8.1	Interviewpartner/innen	123
8.2	Abbildungen	123
8.3	Tabellen	124



Zusammenfassung

Ziele und Vorgehen

Im Kontext des voranschreitenden Klimawandels nimmt die Relevanz von Kühlung und Klimatisierung weltweit kontinuierlich zu. Deutlich wird, dass sich zwei Entwicklungen gegenseitig verstärken: Zum einen steigt der Bedarf an Kühlung infolge des Klimawandels weltweit an. Zum anderen führt der zunehmende Einsatz ineffizienter und klimaschädlicher Kühlgeräte zu steigenden Emissionen, die wiederum den Klimawandel verstärken. Vor diesem Hintergrund ist die Fokussierung auf nachhaltige Kühllösungen von besonderer Bedeutung. Dementsprechend gibt die vorliegende Studie einen Überblick über Ansätze zur Vermeidung des Kühlbedarfs, die insbesondere im Bereich der Stadtplanung und Architektur verortet sind. Weiterhin werden technologische und nichttechnische Innovationen dargestellt, die auf die Entwicklung effizienter und emissionsarmer Kühlungstechnologien und -konzepte und die Ermöglichung des Zugangs zu diesen Technologien für breite Bevölkerungsschichten fokussieren. Abschließend werden die zentralen politischen Handlungsfelder erörtert, in denen eine Umsetzung von Lösungen zur nachhaltigen Kühlung vorangetrieben werden kann bzw. muss.

Bedeutung von Kühlung und Klimatisierung

Steigender Bedarf an Kühlung und Klimatisierung

Die Weltbevölkerung wird Prognosen zufolge von aktuell 8,0 Mrd. auf 8,5 Mrd. im Jahr 2030 (10%), auf 9,7 Mrd. im Jahr 2050 (26%) und auf 10,9 Mrd. im Jahr 2100 (40%) anwachsen. Das Bevölkerungswachstum findet überwiegend in Ländern mit den heißesten und zum Teil auch feuchtesten klimatischen Bedingungen statt, was zu einem starken Anstieg des Kühlbedarfs beitragen wird (Kap. 2.1).

Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt heute in urbanen Gebieten. Dieser Anteil wird bis 2050 auf fast 70% steigen, was 2,5 Mrd. zusätzlichen Stadtbewohner/innen entspricht. Da u.a. Verdunstungskühlung durch die Verstädterung behindert wird, erhöhen sich die Temperaturen in Städten aufgrund des Hitzeinseleffekts. Als Wärme- bzw. Hitzeinseln werden städtische Gebiete bezeichnet, die wärmer sind als ihre Umgebung (Kap. 2.1).

Auch der zunehmende Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung lässt den Kühlbedarf wachsen. Ältere Menschen sind allgemein weniger hitzeverträglich als junge und steigende Temperaturen können insbesondere bei Hitzewellen die Hospitalisierungsraten für ältere Menschen ohne Zugang zu Kühlung stark erhöhen (Kap. 2.1).



Die vermehrte Nachfrage nach Kühlung wird zudem durch das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum in den ärmsten Regionen der Welt angetrieben. Kühlung wird durch die Einkommenszuwächse in der Mittelschicht für mehr und mehr Menschen erschwinglich. In den expandierenden Märkten kaufen die Menschen überwiegend Klimageräte, deren Energieeffizienz etwa um die Hälfte niedriger ist als bei den effizientesten verfügbaren Geräten (Kap. 2.1).

Abgesehen von einem kurzen Einbruch nach der Finanzkrise 2008 stieg der weltweite Absatz von Klimaanlage zwischen 1990 und 2016 stetig an. Der jährliche Absatz hat sich im genannten Zeitraum auf 135 Mio Stück fast vervierfacht. 2022 waren schätzungsweise weltweit etwa 2,2 Mrd. Klimageräte im Einsatz. Bis 2030 könnte sich die Zahl auf rund 2,8 Mrd. Einheiten erhöhen und bis 2050 auf rund 3,5 Mrd. oder gar 5,2 Mrd. Einheiten. Das Weltwirtschaftsforum prognostiziert, dass allein der Energiebedarf für Raumkühlung bis 2050 sich verdreifachen und 37 % des globalen Wachstums der Stromnachfrage ausmachen wird.

Auswirkungen von Überhitzung bzw. unzureichendem Zugang zu Kühlung

Wenn die Umgebungstemperaturen für Menschen schwerer erträglich werden, kommt es zur Beeinträchtigung der physischen und geistigen Gesundheit, was zugleich auch ökonomische Folgen haben kann, etwa für die Leistungsfähigkeit von unter hohen Temperaturen arbeitenden Menschen. Unabhängig vom Einkommensniveau und der geografischen Region sind vor allem Menschen, die älter als 65 Jahre sind und/oder an Herz-Lungen-Erkrankungen oder chronischen Krankheiten leiden, sowie Kleinkinder von den Hitzeauswirkungen betroffen. Zu den physischen Folgen gehören kardiovaskuläre Erkrankungen, Atemwegserkrankungen und Allergien, Dehydrierung, Unterernährung sowie eine Zunahme von Infektionskrankheiten, die durch Vektoren wie Zecken oder die Asiatische Tigermücke übertragen werden oder aufgrund verminderter Wasserqualität und Lebensmittelsicherheit (Kap. 2.2.1).

Zudem bestehen indirekte Auswirkungen auf Menschen insofern, als sich landwirtschaftliche Erträge reduzieren können oder die Energieversorgung Schaden nimmt. Steigende Temperaturen können die Verkehrsinfrastruktur beschädigen und den Personen- und Güterverkehr stören, Asphaltstraßen können durch extreme Hitze aufweichen und schmelzen. Stromnetze können beeinträchtigt werden, wenn sich Stromleitungen durch hohe Temperaturen und Nachfrage aufheizen und die Leistung einschränken. Im Bereich der Landwirtschaft wird der Anbau von Nutzpflanzen durch die ansteigende Erwärmung beeinträchtigt. Für Weizen, dem weltweit am dritthäufigsten angebauten Getreide, ist nachgewiesen, dass hohe Temperaturen, Wassermangel und Hitzeschocks negative Folgen für das Pflanzenwachstum und den Ernteertrag haben (Kap. 2.2.2).



Die Internationale Arbeitsorganisation (ILO) geht davon aus, dass über 1 Mrd. Arbeitnehmer/innen extremen Hitzeperioden ausgesetzt sind. Steigende Temperaturen und Hitzeextreme haben negative Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität (Kap. 2.2.3).

Durchbrechen der Spirale negativer Wechselwirkungen

Es besteht die Gefahr, dass durch die genannten Auswirkungen von Überhitzung und den sich erhöhenden Bedarfen an Kühlung ein Teufelskreis entsteht: Kühlung verschärft die Erderwärmung, indem die notwendige Elektrizität im Wesentlichen immer noch aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird, was zusätzliche CO₂-Emissionen verursacht (indirekte Emissionen). Zudem entweichen Kältemittel wie fluorierte Treibhausgase (F-Gase) aus Kühl- und Klimageräten (direkte Emissionen). Die Auswirkungen der steigenden Temperaturen stehen nicht nebeneinander, sondern häufig miteinander in Beziehung und bedingen sich gegenseitig. Sie treten nicht überall gleichermaßen auf, sondern sind häufig abhängig von regionalen und lokalen Gegebenheiten. Eine Verringerung der Kühllast durch passive Kühlstrategien, energieeffiziente und klimaverträgliche Technologien sowie eine Optimierung und Kontrolle der Kühllast während des Betriebes sind drei Ansatzpunkte, die gemeinsam zur nachhaltigen Kühlung beitragen können (Kap. 2.3).

Definition nachhaltiger Kühlung

Nachhaltige Kühlung soll einen angemessenen thermischen Komfort für Menschen in ihrer Umgebung erzeugen und bezeichnet daher sowohl Ansätze, die einen Kühlbedarf gar nicht erst entstehen lassen, als auch Prozesse, bei denen die Reduktion des Kühlbedarfs, die Klimatisierung und die (Tief-)Kühlung keine bzw. geringe Umweltbelastungen verursachen und gleichzeitig finanziell leistbar sowie für unterschiedliche soziale Bevölkerungsschichten gleichermaßen zugänglich sind (Kap. 3.1).

Standardverfahren für Kühlung und Klimatisierung

Im Fokus der weiteren Analyse stehen Verfahren, die thermischen Komfort für den Menschen in seiner Umgebung ermöglichen. Hier lassen sich *aktive und passive Kühlverfahren* unterscheiden. Während bei aktiven Kühlverfahren zur Kühlung bzw. Klimatisierung technische Arbeit bzw. thermische Energie hinzugefügt wird, kommen passive Kühlverfahren ohne Energiezufuhr oder Kältemittelkreislauf aus (Kap. 3.2).

Kühlverfahren, die auf einer *aktiven Kühlung* basieren, sind die Kompressionskältemaschine, die Sorptionskältemaschine, die adiabate Kühlung und die Eiskühlung. *Passive Kühlverfahren* umfassen u. a. die Verwendung von Schatten und



Verdunklungen, Verdunstungskälte, Luft, Wasser oder die Ausrichtung und Begrünung von Gebäuden (Kap. 3.2).

Kühlbedarfe und -geräte

Je nach Verwendungszweck, ob in privaten Haushalten oder unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen (z.B. Fleisch- oder Backhandwerk, Supermärkte, Hotel- und Gaststättengewerbe, Nahrungsmittel- und Chemieindustrie), existieren unterschiedliche Kältetechniken (Kap. 3.3).

- Die kleinste Form von Kühltechnologien zur Klimatisierung sind mobile Klimaanlage (Mobile Air Conditioners – MACs) zur Klimatisierung von Kraftfahrzeugen.
- Bei Klimaanlage unterscheidet man zwischen kompakten Klimageräten unterschiedlicher Bauweise, beispielsweise zur Klimatisierung von Privathaushalten oder Hotelzimmern, und zentralen Klimaanlage zur Aufrechterhaltung des Raumklimas von größeren Gebäuden wie Bürokomplexen oder Einkaufszentren.
- Zur einfachen Konservierung bzw. Kühlung von Lebensmitteln und Getränken im privaten Bereich werden Kühlschränke und Gefriertruhen bzw. Kombigeräte oder Klimaschränke eingesetzt.

Herausforderungen bei der Wahl des Kältemittels

Kältemittel spielen in den etablierten Technologien eine zentrale Rolle. Zugleich stellt die Wahl eines passenden Kältemittels eine Herausforderung für nachhaltige Kühlung dar, denn sie hängt von verschiedenen Faktoren wie der Effizienz des Kältemittels, der Auswirkung auf das Klima und der Sicherheit, z.B. hinsichtlich Entflammbarkeit und Giftigkeit, ab. Natürliche Kältemittel bzw. auch synthetische Hydrofluoroolefinkältemittel verfügen zwar über ein sehr geringes Treibhausgaspotenzial, lassen sich aufgrund der anderen Kriterien jedoch nicht flächendeckend für jeden Anwendungsfall verwenden. Angesichts der Vielfalt der Kältemittel und der teils erheblichen Risiken und Umweltauswirkungen, die mit ihrem Einsatz einhergehen, kommt der Ausbildung von Fachpersonal, das die Maschinen sicher installiert, wartet und am Ende ihres Lebenszyklus ordnungsgemäß entsorgt, eine besondere Rolle zu (Kap. 3.3).

Das deutsche Kälte- und Klimainnovationssystem

Die deutsche Kälte- und Klimabranche

Die Kälte- und Klimatechnikbranche umfasst die Sektoren Kälte, Klima, Lüftung sowie Wärmepumpen, entlang deren Wertschöpfungskette Akteure aus den Be-



reichen Handwerk und Industrie sowie Handel, Wissenschaft und Bildungsinstitutionen genauso wie Betreiber der Anlagen aktiv sind. 2020 waren in Deutschland ca. 3.000 Kälte-Klima-Fachbetriebe (Gewerk Kälteanlagenbau) mit etwa 38.500 Mitarbeitenden tätig. Die durchschnittliche Betriebsgröße liegt bei 16 Mitarbeiter/innen pro Betrieb. Die Kälte-Klima-Fachbetriebe erwirtschafteten im Bereich Klimageräte 2018 rund 1 Mrd. Euro Umsatz. Wie andere Branchen auch ist die Kälte-Klima-Branche vom Fachkräftemangel betroffen. Seit einigen Jahren setzen die Unternehmen daher verstärkt auf Ausbildung (Kap. 3.4.1).

(Forschungs-)Förderung von Kälte- und Klimatechnologien

Die Förderung im Bereich Kälte- und Klimatechnologien auf Bundesebene erfolgt im Wesentlichen durch Zuschüsse für die Investition in Kälte- und Klimaanlagen, Förderung von Forschungsvorhaben sowie Unterstützung von Netzwerken und Organisationen, wie das Innovationsnetzwerk Kälteanlagen & Speichertechnik (INKaS). Auf europäischer Ebene wurde die Forschung und Entwicklung im Bereich Wärme- und Kälteerzeugung bereits im 7. Rahmenprogramm (FP7) unterstützt und ist auch im Nachfolgeprogramm Horizon 2020 ein wichtiger Schwerpunkt mit verschiedenen Strategien und Maßnahmen (Kap. 3.4.2).

Forschungslandschaft: Themengebiete, Disziplinen, Publikationsintensität

Deutschland liegt bei den Publikationen zu Kühlanlagen bzw. Kühlsystemen im weltweiten Vergleich an fünfter Stelle. Publiziert wird hierzulande häufig in den Ingenieurwissenschaften, die für die Entwicklung von Kühlsystemen besonders relevant sein dürften. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und das Forschungszentrum Jülich sind als außeruniversitäre Forschungseinrichtungen unter den zehn publikationsstärksten Akteuren in Deutschland vertreten (Kap. 3.4.3).

Innovationsbereiche

Urbane Kühlösungen

Urbane Kühlungslösungen können sowohl die Innenraum- als auch die Außentemperaturen in Städten senken, indem der Wärmeeintrag reduziert wird. Da sich Städte hinsichtlich ihrer Geografie, ihrer Größe und räumlichen Anordnung, der Gebäudetypen und Bauweisen sowie der klimatischen und meteorologischen Gegebenheiten voneinander unterscheiden, sind Strategien zum Umgang mit zunehmender Hitze erforderlich, bei denen die verschiedenen verfügbaren Lösungen – angepasst an die lokalen Gegebenheiten – miteinander kombiniert werden. Zu diesen Lösungen gehören das Konzept der klimaangepassten Stadt,



kühle Dächer, Gehwege und Wände, die grüne Infrastruktur (Parks, Bäume und Grünflächen), das Kühlen mit Wind und Wasser, die Einrichtung von Quartiers- und Fernkältenetzen sowie bauliche Maßnahmen an einzelnen Gebäuden und die Einrichtung öffentlicher Kühlzentren (Kap. 4.1).

Nichttechnische Innovationen

Zu den nichttechnischen Innovationen zählen insbesondere Geschäftsmodell-, Dienstleistungs- und Prozessinnovationen, die einen gewinnorientierten, marktwirtschaftlichen Bezug aufweisen. In einem erweiterten Innovationsverständnis gehören auch soziale Innovationen, die in erster Linie gemeinwohlorientiert sind, zu den nichttechnischen Innovationen. Im Bereich nachhaltiger Kühlung zählen dazu kulturelle Anpassungen, innovative Finanzierungsmodelle, Cooling as a Service sowie eine Erhöhung der Energieeffizienz in Entwicklungs- und Schwellenländern (Kap. 4.2).

Technologische Innovationen

Grundlegende Hebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit solcher Methoden sind die Verminderung der CO₂-Emissionen durch die Reduzierung der zugeführten Energie, die Verbesserung der Anlagen- und Systemeffizienz, die Verwendung eines natürlichen Kältemittels, das Recycling von Kältemitteln oder die Entwicklung einer gänzlich neuen nachhaltigen Technologie. Auch die intensivere Nutzung bereits vorhandener, jedoch bisher wenig bekannter bzw. genutzter Kühltechnologien kann einen Beitrag zur Reduzierung des Stromverbrauchs bei der Energiezufuhr zukünftiger Kühllösungen leisten. Dazu zählen beispielsweise die Kombination von Kompressions- und Absorptionskältemaschinen, die aktive bzw. passive Kühlung anhand von Wärmepumpen, die adiabate Kühlung, die Verwendung natürlicher Kältemittel, die Wiederaufbereitung bereits im Markt befindlicher Kältemittel und die Nutzung von Abwärme als Energiezufuhr für Sorptionskältemaschinen (Kap. 4.3).

Weitere technologische Innovationen im Bereich der nachhaltigen Kühlung sind insbesondere Festkörperkühlsysteme (Solid-state-Cooling-Systeme), bei denen zur Wärmeübertragung die Materialeigenschaften von Festkörpern genutzt werden anstatt von flüssigen Kältemitteln (Kap. 4.3).

Neben der Entwicklung gänzlich neuer Technologien existieren technologische Innovationen, die sich geologische Phänomene und Gegebenheiten zu Nutzen machen, wie die geothermische Kühlung, die Brunnen- und Flusswasserkühlung oder die radiative Kühlung (Kap. 4.3).



Bedeutung nachhaltiger Kühlung in Deutschland

Auch hierzulande ist mit einem steigenden Bedarf an nachhaltigen Kühllösungen zu rechnen. Getrieben wird dieser Bedarf sowohl durch die klimatischen Veränderungen im Zuge des Klimawandels als auch durch demografische Entwicklungen, die letztlich in einer großen Gruppe möglicher betroffener und vulnerabler Personen resultieren.

Steigender Bedarf an nachhaltigen Kühllösungen

Die Temperaturen in Deutschland steigen seit etwa 1970 kontinuierlich an. Seit Beginn der Klimaaufzeichnungen 1881 hat sich die mittlere Lufttemperatur hierzulande bis 2021 um 1,6 °C erhöht. Der weitere Anstieg der mittleren Temperaturen in den kommenden Jahren wird zu mehr und intensiveren Wetterextremen in Deutschland führen. Studien zeigen, dass die Bevölkerung von gemäßigten Klimazonen besonders nachteilig von zunehmenden Temperaturen betroffen ist, da sie traditionell nicht auf extrem heiße Tage und Hitzewellen vorbereitet und das Risikobewusstsein für Hitze in der Bevölkerung noch nicht in der Breite ausgeprägt ist (Kap. 5.1.1).

Hauptbetroffene von Hitze sind in Deutschland, wie auch weltweit, vor allem (alleinstehende) ältere Menschen, chronisch Kranke, Menschen mit Behinderungen, Schwangere und Kleinkinder – eine Gruppe, die rund 9 Mio Menschen umfasst. Zukünftig werden sich die Anteile der Bevölkerungsgruppen weiter verändern. Aufgrund des demografischen Wandels nimmt der Anteil älterer gegenüber dem Anteil junger Menschen und insbesondere dem der Kleinkinder zu. Zusammengekommen könnten 2030 also fast 30 % der deutschen Bevölkerung zur vulnerablen Gruppe gehören (Kap. 5.1.2).

In Deutschland sind Hitzewellen infolge des Klimawandels etwa seit der Jahrtausendwende ungewöhnlich häufig und führen seitdem regelmäßig zu einer erhöhten Sterblichkeit, insbesondere bei den älteren Altersgruppen. In den Jahren 2018, 2019 und 2020 trat erstmals eine signifikante Anzahl hitzebedingter Sterbefälle in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren auf (Kap. 5.1.2).

Es zeigt sich, dass die zu erwartenden Auswirkungen von Hitze Anpassungen des Verhaltens, aber auch der Gesundheitsinfrastruktur erfordern. So ist beispielsweise der Gebäudebestand im Gesundheitssektor, also Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen, selbst noch nicht an die zu erwartenden Temperaturanstiege angepasst (Kap. 5.1.2).



Rahmenbedingen für die Entwicklung nachhaltiger Kühllösungen

Die Realisierung nachhaltiger Kühllösungen ist abhängig von wirtschaftlichen, regulatorischen und innovationspolitischen Rahmenbedingungen. Bei den ökonomischen Rahmenbedingungen ist festzustellen, dass nachhaltige Kühllösungen zwar wirtschaftliche Potenziale bieten, diese jedoch aufgrund fehlender Nachfrage und des Fachkräftemangels nur schwer realisiert werden können. Auf der regulatorischen Ebene werden vor allem die Verwendung klimaschädlicher Kältemittel und die Nutzung energieeffizienter Geräte reguliert. Die Gestaltung des innovationspolitischen Rahmens schließlich kann dazu beitragen, dem Fachkräftemangel vorzubeugen sowie die Umsetzung städtebaulicher Maßnahmen zu fördern (Kap. 5.1.2).

Der zukünftige Bedarf an Kältetechnik ist bei der Nachfrageentwicklung nach Geräten und beim Energiebedarf nur schwer einzuschätzen. Das liegt an der eingeschränkten und heterogenen Daten- bzw. Studienlage. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass – einhergehend mit den klimatischen und demografischen Veränderungen – der Bedarf an Kältetechnik in Deutschland ansteigen wird (Kap. 5.2.1).

Die Umstellung der Klima- und Kältetechnikbranche auf nachhaltige Kühllösungen erfordert den Einsatz effizienterer Geräte und nachhaltiger Kältemittel. Den Fachkräften und Betreibern von Kühlanlagen mangelt es heute oftmals an Know-how bezüglich der Einsatzmöglichkeiten und Nachhaltigkeit bereits bestehender Kühltechnologien, sodass existierende energieeffiziente Verfahren, wie Sorptionskältemaschinen, adiabate Kühlung oder hybride Systeme, z.B. mit Nutzung von Wärmepumpen, bisher eher wenig Verwendung finden. Vor allem die künftig wichtiger werdende Verwendung natürlicher Kältemittel erfordert zusätzliche Schulungsmaßnahmen. Zwar ist in Deutschland das Weiterbildungsangebot bereits entsprechend umgestellt, allerdings besteht im Umschulungsbereich noch Nachholbedarf (Kap. 5.1.2).

Regulatorische Rahmenbedingungen, die den Einsatz nachhaltiger Kühllösungen in Deutschland befördern können, sind auf verschiedenen Ebenen verortet. Globale, nationale und regionale Richtlinien stellen einen Rahmen dar, der darauf abzielt, die negativen Umweltwirkungen von Kühllösungen zu reduzieren. Dies soll zum einen durch die Vermeidung klimaschädlicher Kühlmittel und zum anderen durch den Einsatz energieeffizienter Geräte erreicht werden (Kap. 5.2.2).

Im Juni 2022 nahm die EU-Kommission einen Vorschlag für eine Verordnung an, der Verbesserungen der Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht und zur Umsetzung des Montrealer Protokolls enthält. Vorschläge betreffen u. a. die Verein-



fachung von Kontrollmaßnahmen sowie die Steigerung der Koordination unterschiedlicher nationaler Zollvorschriften.

Die Forschung an alternativen, natürlichen Kältemitteln stellt einen Innovationspfad dar, der einen verbindlichen zeitlichen Rahmen aufweist, vorgegeben durch den schrittweisen Ausstieg aus der Verwendung klimaschädlicher Kältemittel. Es bestehen allerdings auch andere innovationspolitische Rahmenbedingungen, mit denen insbesondere der verstärkte Einsatz passiver Kühllösungen gefördert werden kann. Zum einen betrifft dies Vorgaben für bauliche Maßnahmen, zum anderen die Förderung von Maßnahmen zur Klimaanpassung in Städten (Kap. 5.2.3).

Handlungsfelder

Kühlbedarf durch vorbeugende Maßnahmen vermeiden

Mit urbanen Kühllösungen wurden Innovationen geschildert, die vor allem dazu beitragen, den Hitzeinseleffekt in Städten zu minimieren und thermischen Komfort für Menschen in Innenräumen zu erzeugen. Es sind größtenteils passive Lösungen, mit Ausnahme der Kühlzentren und Quartierskälte, bei denen Kühlgeräte zum Einsatz kommen. Auch kulturelle bzw. Verhaltensanpassungen können vorbeugenden Charakter haben. Die Umsetzung urbaner Kühllösungen, die dazu beitragen sollen, Kühlbedarf gar nicht erst entstehen zu lassen, ist daher hauptsächlich auf der kommunalen Ebene angesiedelt. Es gibt jedoch auch eine Ebene der übergeordneten Handlungsfelder, die Querschnittscharakter haben. Da davon auszugehen ist, dass künftig vermehrt heiße Tage und länger andauernde Hitzewellen auftreten werden, spielt die Vorbeugung bzw. Vorbereitung eine wichtige Rolle.

Auf kommunaler Ebene bestehen vor allem Handlungsoptionen zur Stärkung passiver Kühllösungen. Eine Förderung des kommunalen Klimaschutzes kann dazu beitragen, Kühlbedarf zu vermeiden. Des Weiteren besteht die Option, Bestandsbauten durch bauliche Maßnahmen an zunehmende Hitze anzupassen und so eine Kühlung der Innenräume zu ermöglichen. Eine rechtzeitige Warnung vor sich abzeichnenden Hitzewellen ist notwendig und hilfreich, um (proaktiv) vorbeugende Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu ergreifen. Dem Ausbau von Hitzewarndiensten kommt daher eine große Bedeutung zu. Auch die Formulierung konkreter Maßnahmen in Hitzeaktionsplänen wäre zielführend und vorbeugend (Kap. 6.1.1).

Die Umsetzung vorbeugender Maßnahmen zur Steigerung nachhaltiger Kühlung ist nicht nur auf die kommunale Ebene beschränkt. Vielmehr bestehen Wechselwirkungen bzw. wechselseitige Abhängigkeiten zwischen kommunaler, Landes-



und Bundesebene. Daher können auch Handlungsoptionen identifiziert werden, die einen Querschnittscharakter aufweisen (Kap. 6.1.2).

Wenn nachhaltige Kühlung als Querschnittsaufgabe betrachtet wird, bei der passive mit aktiven Kühllösungen integriert und je nach lokalen Erfordernissen angepasst werden, dann bedarf es sowohl der interdisziplinären, ressortübergreifenden Zusammenarbeit als auch einer zentralen Koordinierung. Dies erscheint vor dem Hintergrund der föderal verteilten Zuständigkeiten und der in unterschiedlichen Behörden verankerten Verantwortlichkeiten unumgänglich (Kap. 6.1.2).

Auf kommunaler Ebene ist eine zentrale Verankerung in der Stadtverwaltung sinnvoll, bei der die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen ressortübergreifend vorangetrieben wird. Dabei können ein ressortübergreifender Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer sowie die Ermöglichung von Lernprozessen unterstützen (Kap. 6.1.2).

Um die Querschnittsaufgabe Sustainable Cooling angehen zu können, sind zunächst eine Sensibilisierung und Beteiligung relevanter Akteure erforderlich. Die drei großen Akteursgruppen – Politik, Gesellschaft und Unternehmen/Verbände – umfassen jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure, die von den Auswirkungen eines steigenden Kühlbedarfs betroffen sind und daher an der Umsetzung nachhaltiger Lösungen beteiligt sein müssen (Kap. 6.1.2).

Ein wichtiger Hebel, nachhaltige Kühllösungen umzusetzen, können öffentliche Investitionen und Beschaffung sein. Infrage kommt dafür zum einen die erstmalige Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen in öffentlichen Gebäuden. Zum anderen können auch die bislang genutzten Kühltechnologien in öffentlichen Gebäuden unter Berücksichtigung von technischen Kriterien und Lebenszyklusanalysen auf ihre Nachhaltigkeit hin überprüft werden. Dies umfasst die Energieeffizienz der genutzten Anlagen ebenso wie die eingesetzten Kältemittel (Kap. 6.1.2).

Kühlbedarf auf nachhaltige Weise decken

Wenn Kühlbedarf schon besteht, sollte er auf nachhaltige Weise gedeckt werden. Die dazu eingesetzten Technologien sollten effizient und emissionsarm gestaltet sein. Das setzt voraus, dass der Einsatz solcher Technologien nicht an Barrieren scheitert. Weiterhin kann die Kühllast im Betrieb optimiert und Kühlkreisläufe geschlossen werden.

Umsetzungsbarrieren sind beispielsweise eingeschränkter Zugang zu Fördergeldern und Fremdkapital oder ein fehlendes geteiltes Problembewusstsein zwischen verschiedenen Akteursgruppen (Kap. 6.2.1).



Um diese Barrieren abzubauen, müssen sie zunächst identifiziert werden. Sodann können geeignete Anreizstrukturen geschaffen werden. Die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen sollte den gesamten Lebenszyklus technischer Anlagen berücksichtigen. Dazu gehören auch eine Betrachtung der Entsorgungsphase und eine kontinuierliche Überprüfung der Effektivität der genutzten Maßnahmen.

Bei der Realisierung technischer Lösungen können wirtschaftliche Anreize unterstützend wirken. Zum einen kann dies über Rabatte auf nachhaltige Technologien erreicht werden. Zum anderen können Steuern, beispielsweise auf Grundlage von CO₂-Äquivalenten, dazu genutzt werden, Kältemittel mit höherem Potenzial zur Erderwärmung (Global Warming Potential – GWP) auch höher zu besteuern. Ebenso kann die Besteuerung auch die Entsorgungsphase berücksichtigen, also das Recycling oder die Vernichtung der eingesetzten Kältemittel, sodass eine nachhaltige Entsorgung mit steuerlichen Vorteilen verbunden ist.

Für die Entscheidungssituationen, wie beispielsweise der öffentlichen Beschaffung, zwischen unterschiedlichen nachhaltigen Kühllösungen sind Lebenszyklusanalysen (Life-Cycle-Climate-Performance-Studien) wichtige Instrumente, um insbesondere direkte und indirekte Emissionen zu ermitteln sowie unterschiedliche Lösungen, die verschiedene Kältemittel und unterschiedliche Energieeffizienzen aufweisen, miteinander vergleichen zu können.

Im Betrieb von Kühlanlagen ist die Erhöhung der Energieeffizienz ein Hebel auf dem Weg zu nachhaltiger Kühlung. Dies ist vor allem bei technischen Lösungen möglich, mit denen aktiv Kühlbedarf gedeckt wird. Auch eine Regulierung von Kältemitteln kann dazu beitragen, auf Kältemittel umzusteigen, deren Verwendung eine Hebung von Effizienzpotenzialen ermöglicht. Thematisiert wurde bereits, dass weniger effiziente Geräte häufig kostengünstiger sind und öfter angeschafft werden und so die Realisierung nachhaltiger Lösungen verzögern können. Als wirksam erweist sich eine nachvollziehbare Kennzeichnung bzw. Energieetikettierung, die Verbraucher/innen in ihrer Entscheidungsfindung beim Kauf von Kühl- und Klimageräten unterstützen kann (Kap. 6.2.2).

Bislang existieren in Deutschland auf Bundesebene verschiedene Maßnahmen, um energieeffiziente Kälte- und Klimaanlage zu fördern. Bezuschusst werden im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) der Einsatz energieeffizienter Kälte- und Klimaanlage, die mit nicht-halogenierten Kältemitteln arbeiten. Zudem wurde im Rahmen der genannten Initiative von 2009 bis 2018 insgesamt 6-mal der Deutsche Kältepreis für innovative Lösungen im Bereich Klima- und Kältetechnik vergeben. Innovationsnetzwerke, wie beispielsweise das INKaS, können ebenfalls dazu beitragen, den Einsatz energieeffizienter Geräte zu fördern (Kap. 6.2.2).



Die internationalen und nationalen Regulierungen zum Umgang mit Kältemitteln bieten wichtige Handlungsoptionen für die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen, da sie die Verwendung klimaschädlicher Kältemittel einschränken und den Einsatz klimaneutraler Kältemittel befördern können. Im Wesentlichen können entweder Verbote oder Quoten genutzt werden, um klimaschädliche Kältemittel zu regulieren (Kap. 6.2.2).



1 Einleitung

Im Horizon-Scanning des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag wurde 2020 das Thema „Sustainable Cooling“ als ein relevantes Zukunftsthema identifiziert, im Rahmen eines Themenkurzprofils erarbeitet und dieses der Berichterstattergruppe TA präsentiert (TAB 2021). 2020 beschloss der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung auf Vorschlag der Berichterstattergruppe TA zur tieferen Bearbeitung des Themas die Durchführung einer gleichnamigen TA-Kurzstudie durch die VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

In dieser Kurzstudie wird ein Überblick über Ansätze zur Vermeidung des entstehenden Kühlbedarfs gegeben, die im Wesentlichen im Bereich der Stadtplanung und Architektur verortet sind. Weiterhin werden technologische und nichttechnische Innovationen dargestellt, die auf die Entwicklung effizienter und emissionsarmer Kühlungstechnologien und -konzepte und die Ermöglichung des Zugangs zu diesen Technologien für breite Bevölkerungsschichten fokussieren. Aus Gründen der Komplexitätsreduktion wird dabei auf eine Darstellung solcher Effekte verzichtet, die entstehen, wenn Kühlung mit Wärmeerzeugung gekoppelt wird. Zwar bestehen hier vielfältige Wechselwirkungen, etwa bei der Nutzung von Abwärme, jedoch kann eine Darstellung dieser Wechselwirkungen in der erforderlichen Breite und Tiefe nicht im Rahmen der Kurzstudie erfolgen.

Zunächst wird die zunehmende Bedeutung von Kühlung und Klimatisierung in Anbetracht des Klimawandels und seiner Auswirkungen beleuchtet (Kap. 2). Ausgehend von dem daraus resultierenden Teufelskreis wird eine Arbeitsdefinition für nachhaltige Kühlung vorgestellt (Kap. 3.1). Um die wesentlichen Innovationsbereiche beschreiben zu können, werden die Standardverfahren für Kühlung und Klimatisierung dargestellt (Kap. 3.2), Kühlbedarfe und -geräte kategorisiert (Kap. 3.2) und die Akteurslandschaft der deutschen Klima- und Kältetechnik beschrieben (Kap. 3.4).

Sodann werden die drei wesentlichen Innovationsbereiche vorgestellt: urbane Kühllösungen (Kap. 4.1), nichttechnische (Kap. 4.2) und technologische, anlagenbezogene Innovationen (Kap. 4.3). Eine darüber hinausgehende systemische Betrachtung, die etwa auch die Art der Stromerzeugung, die Integration von Energiespeichertechnologien oder die Kombination mit weiteren Systemen mitberücksichtigt, ist im Rahmen dieser Kurzstudie nicht möglich.

Kapitel 5 führt die Betrachtung zusammen und gibt einen Überblick über Einflussfaktoren, die einen Bedarf an nachhaltiger Kühlung in Deutschland steigern können (Kap. 5.1), die Treiber und Hemmnisse, die einen Ausbau nachhaltiger



Kühlung beeinflussen sowie regulatorische Ansätze, um nachhaltige Kühlung zu gewährleisten (Kap. 5.2).

Abschließend werden die zentralen politischen Handlungsfelder erörtert, in denen eine Umsetzung von Lösungen zur nachhaltigen Kühlung vorangetrieben werden kann bzw. muss (Kap. 6).

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine iterative Vorgehensweise gewählt. Ausgehend von einer Literaturrecherche und -analyse wurden mit ausgewählten Expert/innen explorative Interviews geführt. Aus diesen ersten Erkenntnissen wurden Hypothesen abgeleitet, die als Ausgangspunkt für die Charakterisierung von Handlungsfeldern dienen. Um diese Handlungsfelder zu validieren bzw. ggf. zu modifizieren, wurde ein Expertenworkshop durchgeführt. Darin wurden die Hypothesen und die vorläufigen Handlungsfelder zur Diskussion gestellt. Im Ergebnis konnten die bisherigen Erkenntnisse größtenteils validiert und der Zuschnitt der Handlungsfelder festgelegt werden. Ergänzt um Ergebnisse der Literaturrecherche bilden die gewonnenen Erkenntnisse aus Interviews und Workshop die inhaltliche Basis für die Kurzstudie.

Danksagung

Wir bedanken uns sehr herzlich bei den Expert/innen, die mit ihrer Expertise für Interviews und Diskussionen zur Verfügung standen.

Ein ebenso herzlicher Dank geht an Dr. Christoph Revermann und Dr. Arnold Sauter für die Durchsicht der Berichtsentwürfe und hilfreiche Verbesserungsvorschläge. Ebenso an Jost Lüddecke und Brigitta-Ulrike Goelsdorf für das abschließende Lektorat. Zudem ist Anne-Sophie Piehl für die Aufbereitung von Grafiken und Erstellung des Layouts zu danken.



2 Bedeutung von Kühlung und Klimatisierung

Die Bedeutung von Kühlung und Klimatisierung nimmt weltweit zu. Die im Folgenden zunächst eingenommene globale Perspektive legt den Rahmen für die Auseinandersetzung mit nachhaltigen Kühllösungen fest. Es wird ersichtlich, dass sich zwei Entwicklungen gegenseitig verstärken: Zum einen steigt der Bedarf an Kühlung infolge des Klimawandels weltweit an. Zum anderen führt der zunehmende Einsatz ineffizienter und klimaschädlicher Kühlgeräte zu steigenden Emissionen, die wiederum den Klimawandel verstärken.

2.1 Steigender Bedarf an Kühlung und Klimatisierung

Der voranschreitende Klimawandel, die wachsende, globale Mittelschicht und die demografische Entwicklung treiben den Bedarf an Kühlung weltweit an (EIU 2019; IEA 2017).

2.1.1 Klimawandel: steigende Temperaturen machen Hitzeanpassungen mehr und mehr erforderlich

Ein wesentlicher Treiber für den steigenden Kühlbedarf ist der von Menschen verursachte, voranschreitende Klimawandel, der zu einer Zunahme heißer Tage und einer steigenden Durchschnittstemperatur führt. Dabei unterscheidet sich die Verwundbarkeit von Ökosystemen und Menschen gegenüber den negativen Folgen häufigerer und intensiverer Extremwetterereignisse erheblich je nach und innerhalb von Regionen (IPCC 2023). Seit dem vorindustriellen Zeitalter hat sich die Erde bereits um 1,1 °C erwärmt (Tagesschau 2021a). In Europa sind die Tem-





peraturen im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt doppelt so schnell gestiegen (WMO 2022) und auch in Deutschland liegt der Anstieg mit 1,6 °C über dem weltweiten Mittel (Kap. 5.1.1). Im sechsten Sachstandsbericht kommt der Weltklimarat (IPCC 2023, S. 12) in fast allen Szenarien zu dem Schluss, dass mit einer hohen Wahrscheinlichkeit im Zeitraum zwischen 2030 und 2035 eine Erderwärmung um 1,5 °C erreicht sein wird, was 10 Jahre früher ist als noch 2018 prognostiziert (Tagesschau 2021b).

2.1.2 Demografische Faktoren: Bevölkerungswachstum, Urbanisierung, Alterung und Krankheit

Globales Bevölkerungswachstum: Die Weltbevölkerung wird Prognosen zufolge von 7,7 Mrd. im Jahr 2019 auf 8,5 Mrd. 2030 (Zunahme um 10%), auf 9,7 Mrd. 2050 (26%) und auf 10,9 Mrd. im Jahr 2100 (42%) ansteigen (UN DESA 2019a). Dabei wird das größte Wachstum konzentriert in wenigen Ländern stattfinden. Es wird prognostiziert, dass sich die Bevölkerung in afrikanischen Ländern südlich der Sahara bis Mitte des Jahrhunderts fast verdoppelt (99%). In den anderen Weltregionen variieren die erwarteten Wachstumsraten (zwischen 2019 und 2050) erheblich: 56% für Ozeanien ohne Australien/Neuseeland, 46% für Nordafrika und Westasien, 28% für Australien/Neuseeland, 25% für Zentral- und Südasien, 18% für Lateinamerika und die Karibik, 3% für Ost- und Südostasien sowie 2% für Europa und Nordamerika (UN DESA 2019a, S. 6). Gleichzeitig wird die Weltbevölkerung immer älter, da die weltweite Lebenserwartung weiterhin zunimmt und die Fruchtbarkeitsrate sinkt (UN DESA 2019a, S. 16 ff.).

Eine wachsende und zunehmend ältere Weltbevölkerung lebt künftig in Weltregionen, in denen der Bedarf an Kühlung und Klimatisierung steigt.

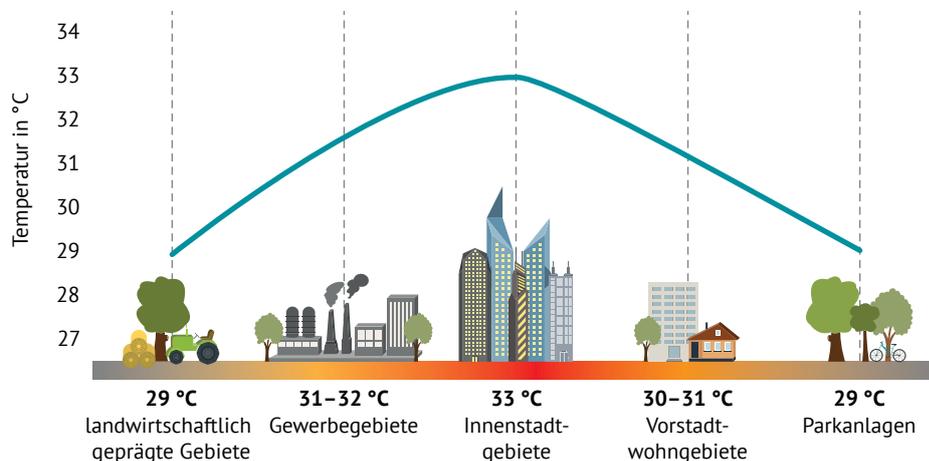
Das Bevölkerungswachstum findet überwiegend in Ländern mit den heißesten und zum Teil auch feuchtesten klimatischen Bedingungen statt, was zu einem starken Anstieg des Kühlbedarfs beitragen wird (IEA 2018). Der Zugang zu Energie, der in vielen dieser Länder auch heute noch begrenzt ist, z.B. in Subsahara-Afrika, verbessert sich weiter, was mehr und mehr Haushalten die Nutzung von Klimageräten ermöglichen wird (IEA 2018).

Zunahme von Hitzeinseln durch Urbanisierung: Bereits 2015 zeigte eine Vulnerabilitätsanalyse, dass einer von sechs Schwerpunkten, an denen die Folgen des Klimawandels spürbar werden, urbane Gebiete, deren Infrastrukturen und die dort lebenden Personen sind (Buth et al. 2015, S. 666). Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt heute in urbanen Gebieten (EIU 2019). Dieser Anteil wird bis 2050 auf fast 70% ansteigen, was 2,5 Mrd. zusätzlichen Stadtbewohner/innen entspricht (EIU 2019). Dieser Bevölkerungszuwachs soll insbesondere in afrikanischen und asiatischen Ländern stattfinden (UN DESA 2019b, S. 1). Da u. a. Verdunstungskühlung durch die Verstädterung behindert wird, erhöhen sich die Temperaturen in Städten aufgrund des Hitzeinseleffekts.



Als Wärme- bzw. Hitzeinseln (Abb. 1) werden städtische Gebiete bezeichnet, die wärmer sind als ihre Umgebung (UBA 2019b, S.152). Sie entstehen vor allem dort, wo die Gebäudegeometrie, die thermischen Eigenschaften der eingesetzten Baumaterialien, die Strahlungseigenschaften der Oberflächen und die durch Menschen verursachte Wärmeentwicklung, etwa durch Verkehr oder industrielle Produktionsprozesse, die Energie speichern und Wärme in die Umgebungsluft abgeben (DWD 2022b). Auch der Betrieb von Klimageräten, insbesondere Kompressionskältemaschinen, kann durch die Abgabe von Abwärme die Umgebungstemperatur erhöhen bzw. dazu beitragen, dass nachts die Abkühlung erschwert wird (Cox 2016; ESMAP 2020a, S. 13).

Abb. 1 Der Hitzeinseleffekt



Eigene Darstellung nach SEforALL 2018, S.30

Es entsteht ein Mikroklima in urbanen Räumen. So ist die jährliche mittlere Lufttemperatur in einer Stadt mit über 1 Mio Einwohner/innen etwa 1 bis 3 °C wärmer als das Umland (EIU 2019). Vor allem Städte in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen leiden besonders stark darunter. Studien zeigen, dass der Hitzeinseleffekt beispielsweise in Delhi die Temperaturen um bis zu 6 °C erhöht hat (Yadav/Sharma 2018).

Alterung und Krankheit: Ein weiterer Faktor, der den Kühlbedarf ansteigen lässt, ist der zunehmende Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung. Ältere Menschen vertragen Hitze allgemein weniger gut als junge. Steigende Temperaturen können insbesondere bei Hitzewellen die Hospitalisierungsraten für ältere Menschen ohne Zugang zu Kühlung stark erhöhen (IEA 2018, S.42). Bereits 2019 waren fast 10 % der Weltbevölkerung älter als 65 Jahre. Bis 2050 wird prognostiziert, dass dieser Anteil in allen Regionen der Welt ansteigen wird, auf insgesamt

Die zunehmende Urbanisierung verstärkt die Effekte des Klimawandels in Städten, so dass künftig vermehrt mit der Entstehung von Hitzeinseln zu rechnen ist.



rund 16 % bzw. 1,5 Mrd. Menschen (UN DESA 2019a, S. 16 ff.). Darüber hinaus sind kranke Menschen eine besonders vulnerable Gruppe, für die ein adäquater Zugang zu Raumkühlung eine große Bedeutung hat (Kap. 2.2.1).

2.1.3 Einkommenszuwächse: eine wachsende globale Mittelschicht kann sich Kühlgeräte leisten

Die steigende Nachfrage nach Kühlung wird durch das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum in den ärmsten Regionen der Welt angetrieben (IEA 2018). Das globale Wachstum verlagert sich nach Süden in Länder mit hohen Temperaturen und auch steigenden Einkommensniveaus (IEA 2018). Zwischen 2009 und 2017 wuchs dort die globale Mittelschicht von 1,8 Mrd. auf 3,5 Mrd. Menschen. Es wird erwartet, dass sie weiter anwächst und 2030 5,5 Mrd. Menschen umfasst. Etwa 88 % der zusätzlichen entstehenden Mittelschicht werden in Asien leben (EK 2018).

Klima- und Kühlgeräte gehören zu den Anschaffungen, die mit bestimmten Einkommensniveaus häufig erworben werden.

Kühlung wird durch die Einkommenszuwächse in der Mittelschicht somit für mehr und mehr Menschen erschwinglich. Kühlgeräte wie Kühlschränke und Klimaanlageanlagen gehören zu den Dingen, die Menschen als erstes kaufen, sobald ihr Einkommen eine gewisse Schwelle überschreitet und sie es sich leisten können, langfristiger zu planen und zu investieren (EIU 2019). So soll ein Großteil des bis 2050 prognostizierten Energieverbrauchs durch Raumkühlung in Schwellenländern, vor allem Indien, China und Indonesien, entstehen (IEA 2018). In den wachsenden Märkten kaufen die Menschen überwiegend Klimageräte, deren Energieeffizienz etwa um die Hälfte niedriger ist als bei den effizientesten Geräte auf dem Markt (IEA 2018; SEforALL 2021, S.4). Grund dafür sind die niedrigeren Anschaffungspreise im Vergleich zu Geräten mit höherer Energieeffizienz.

2.1.4 Weltweiter Kühlbedarf: steigender Absatz ineffizienter Geräte

Der weltweite Markt für Klimaanlageanlagen boomt. Abgesehen von einem kurzen Einbruch nach der Finanzkrise 2008 stieg der weltweite Absatz von Klimaanlageanlagen zwischen 1990 und 2016 stetig an. Der jährliche Absatz hat sich im genannten Zeitraum auf 135 Mio Stück fast vervierfacht (IEA 2018) Es wurde geschätzt, dass 2022 weltweit etwa 2,2 Mrd. Klimageräte im Einsatz waren (IEA 2022). Bis 2030 könnte sich die Zahl auf rund 2,8 Mrd. Einheiten erhöhen (IEA 2021) und bis 2050 auf rund 3,5 Mrd. oder gar 5,2 Mrd. Einheiten (Diettrich/Siebert 2019; Wessel 2021). Kompakt- und Splitklimageräte¹ für Wohnhäuser und kleinere Gewerbegebäude stellen dabei den Großteil der verkauften Geräte dar (IEA 2018, S.20).

¹ Splitklimageräte bestehen aus zwei Modulen, von denen eines, der Wärmetauscher, im Innenraum angebracht wird und das andere, der Kompressor, im Außenbereich; verbunden sind beide durch Strom- und Kältemittelleitungen (UBA 2020a).



In den letzten 6 Jahren stieg der Energiebedarf weiter an. Die Auswirkungen der Covid-19-Pandemie können noch nicht vollumfänglich berücksichtigt werden. Es zeigte sich aber, dass während der Zeit, in der Menschen aufgrund regionaler Lockdowns größtenteils in der häuslichen Umgebung lebten und arbeiteten, auch der Absatz an Klimaanlage stieg und damit einhergehend auch der Energiebedarf für den Betrieb der eingesetzten Anlagen (IEA 2021). 2016 belief sich der weltweite Gesamtstromverbrauch für Kühlung auf 2.000 TWh, was fast 10% des weltweiten Stromverbrauchs von 21.000 TWh entsprach (IEA 2018, S.23f.). Der Stromverbrauch für Raumkühlung lag bei rund 400 Mio t Öläquivalenten Primärenergie, also betrug ca. 3% des weltweiten Gesamtprimärenergieverbrauchs (IEA 2018). Das Weltwirtschaftsforum prognostiziert, dass sich allein der Energiebedarf für Raumkühlung bis 2050 verdreifacht und 37% des globalen Wachstums der Stromnachfrage ausmachen wird (Lalit 2020).

Aufgrund der geringeren Kosten werden häufig ineffiziente Kühl- und Klimageräte angeschafft. Dadurch verstärken sich die negativen Effekte von Kühl- und Klimageräten auf den Klimawandel.

Die Auswirkungen dieser Entwicklung sind problematisch. Konventionelle Kühlgeräte, wie Kühlschränke, Raumklimageräte oder Kältemaschinen für die Industrie, verursachten bereits vor der Covid-19-Pandemie ca. 10% der weltweiten Treibhausgasemissionen. Das entsprach damals bereits mehr als dem Doppelten der Emissionen aus dem gesamten Luft- und Seeverkehr (UNEP 2019). Emissionen können direkter oder indirekter Natur sein: *Direkte Emissionen* werden durch Kühltechnologien bewirkt, wenn Kältemittel in die Umwelt gelangen, beispielsweise aufgrund von Lecks in den Leitungen während des normalen Betriebs oder bei der Wartung oder Demontage der Geräte. Obwohl die Menge der freigesetzten Kältemittel oft sehr gering ist, sind direkte Emissionen aufgrund des enorm hohen GWP der Kältemittel für ein Drittel der Treibhausgasemissionen des Kühl- und Kältesektors verantwortlich. Direkte Emissionen können durch die Verwendung von natürlichen Kältemitteln, wie Kohlenwasserstoffe (KWs), Kohlendioxid (CO₂), Ammoniak (NH₃), Wasser (H₂O) und Luft, verringert werden (RefNat4Life 2021b). *Indirekte Emissionen* stehen im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch der Kühlgeräte, d.h. mit der verwendeten Stromquelle und der Menge an CO₂, die bei der Stromerzeugung ausgestoßen wird (Gloël et al. 2015).

Infolge der Erderwärmung und der mit ihr einhergehenden Extremwetterereignisse, wie Hitzewellen, in Verbindung mit der Zunahme der Weltbevölkerung, fortschreitender Urbanisierung und dem Wachstum der globalen Mittelschicht wird davon ausgegangen, dass die Emissionen aus Kühlung sich bis 2030 verdoppeln und bis 2100 verdreifachen werden, wenn weiterhin auf konventionelle Weise gekühlt wird (UNEP 2019).

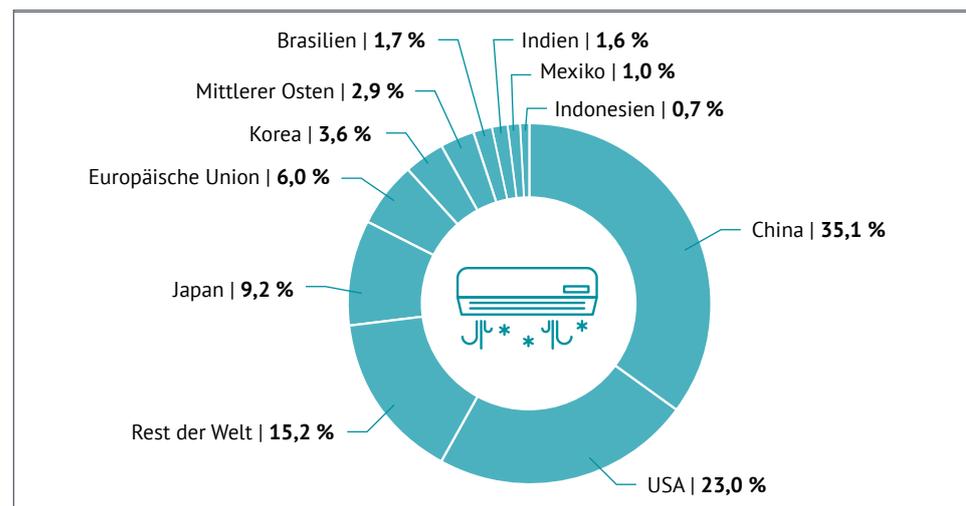
Es gibt große Unterschiede zwischen Ländern in Bezug auf den *Bestand* und Verkauf von Klimageräten (IEA 2018). Diese sind auf Unterschiede in klimatischen Bedingungen vor Ort, in der Bevölkerungszusammensetzung und dem Wohlstandsniveau zurückzuführen. Der Bestand von Klimaanlage ist auf wenige Län-



der konzentriert. 2016 befanden sich zwei Drittel aller verwendeten Systeme in nur drei Ländern, nämlich China, den USA und Japan (IEA 2018).

Weltweit betrachtet befanden sich 2016 40 % aller installierten Klimageräte in den USA, davon etwa die Hälfte im privaten Sektor. Mit der Bedeutungszunahme von Klimatisierung in anderen Regionen, vor allem in China, Indien, Indonesien und dem Nahen Osten, wird dieser Anteil über die Zeit kleiner. Trotz der bereits hohen Marktdurchdringung bleiben die Verkäufe in den USA weiterhin hoch. Nach China und den USA sind Japan und die Europäische Union die nächstgrößten Märkte für den *Verkauf* privater Klimageräte (Abb. 2). Die Verkäufe in asiatischen Ländern steigen stark an. Dabei spielen private Wohngebäude eine entscheidende Rolle, da sich hier nahezu 70 % aller Klimageräte weltweit befinden.

Abb. 2 Bestand an Klimaanlage nach Land bzw. Region 2016



Eigene Darstellung nach IEA 2018, S.21

Im internationalen Vergleich gibt es in Deutschland nur eine geringe Zahl an Klima- und Kühlgeräten. Der Anteil dürfte angesichts der künftig steigenden Bedarfe jedoch zunehmen.

Insgesamt variiert der Anteil der Haushalte, die ein Klimagerät besitzen, regional sehr stark: In Deutschland lag diese Zahl 2020 schätzungsweise zwischen 2 und 3%, stieg aber zuletzt merklich an (UBA 2020a; Wessel 2021). In Indien waren es 2016 etwa 4%, in Europa weniger als 10%, in China fast 60%, in den USA und Japan über 90% und in den Ländern des Nahen Ostens fast 100% (IEA 2018).

2.2 Auswirkungen von Überhitzung bzw. unzureichendem Zugang zu Kühlung

Überhitzung bzw. ein unzureichender Zugang zu Kühlung hat vielfältige und zahlreiche Auswirkungen zur Folge. Wenn die Umgebungstemperaturen für Menschen schwerer erträglich werden, kommt es zur Beeinträchtigung der phy-



sischen und geistigen Gesundheit, was zugleich auch ökonomischen Folgen, etwa für die Produktivität von Mitarbeiter/innen im Freien, haben kann. Zudem bestehen indirekte Auswirkungen auf Menschen insofern, als sich landwirtschaftliche Erträge reduzieren können oder die Verkehrsinfrastruktur und die Energieversorgung Schaden nehmen. Hinzu kommen ökologische Auswirkungen, etwa auf die Luft- und Wasserqualität sowie gesellschaftliche Auswirkungen, etwa die Sicherheit oder soziale Gleichheit betreffend.

2.2.1 Gesellschaftliche Auswirkungen

Wer ist betroffen?

Unabhängig vom Einkommensniveau und geografischer Region sind vor allem Menschen, die älter als 65 Jahre sind, Personen, die an Herz-Lungen-Erkrankungen oder chronischen Krankheiten leiden, sowie Kleinkinder von den Hitzeauswirkungen betroffen (Ebi et al. 2021). Eine Feuchtkugeltemperatur² zwischen 31 und 35 °C gilt als physiologische Obergrenze für die Überlebensfähigkeit von Menschen (Im et al. 2017; Sherwood/Huber 2010; Vecellio et al. 2022). Vor allem in tropischen Regionen kann die Erderwärmung dazu führen, dass die körperlichen Grenzen der Hitzetoleranz für die dort lebende Bevölkerung zukünftig häufiger und regelmäßiger erreicht werden und deren Überleben gefährdet ist (Ebi et al. 2021).

Auf Grundlage einer Reihe von Simulationen prognostizieren beispielsweise Im et al. (2017), dass die Extremtemperaturen sich in Südasien diesem kritischen Schwellenwert nähern und in einigen Fällen bis Ende des 21. Jahrhunderts sogar überschreiten. Dies betrifft insbesondere dichtbesiedelte ländliche Regionen in Südasien, wie etwa die Regionen um die Flüsse Ganges und Indus, wo etwa ein Fünftel der Weltbevölkerung lebt (Im et al. 2017).

Je nach Temperaturanstieg nimmt die Anzahl der betroffenen Menschen künftig weiter zu (Byers et al. 2018). Xu et al. (2020) kommen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass – abhängig von tatsächlicher Erderwärmung und dem Bevölkerungswachstum – zwischen 1 Mrd. und 3 Mrd. Menschen in Gebieten mit einer mittleren Jahrestemperatur von über 29 °C leben müssten. Im Augenblick trifft dieses Temperaturniveau nur auf 0,8% der Erdoberfläche zu, im Wesentlichen auf die Sahara. 2070 könnten 19% der Erdoberfläche in Afrika, Australien, Latein-

Die körperlichen Grenzen der Hitzetoleranz können künftig häufiger und regelmäßiger erreicht werden, sodass immer mehr Menschen von Hitze betroffen sein werden.

2 Als Feuchtkugeltemperatur wird die tiefste Temperatur bezeichnet, die sich durch Verdunstungskühlung erreichen lässt. Mit der Feuchtkugeltemperatur werden Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit vereint. Für die menschliche Fähigkeit, den eigenen Körper zu kühlen, ist es ausschlaggebend, dass bei heißen Temperaturen die Luftfeuchtigkeit nicht zu hoch ist. Andernfalls ist der menschliche Körper nicht mehr in der Lage, sich ausreichend zu kühlen (Zimmermann 2022).



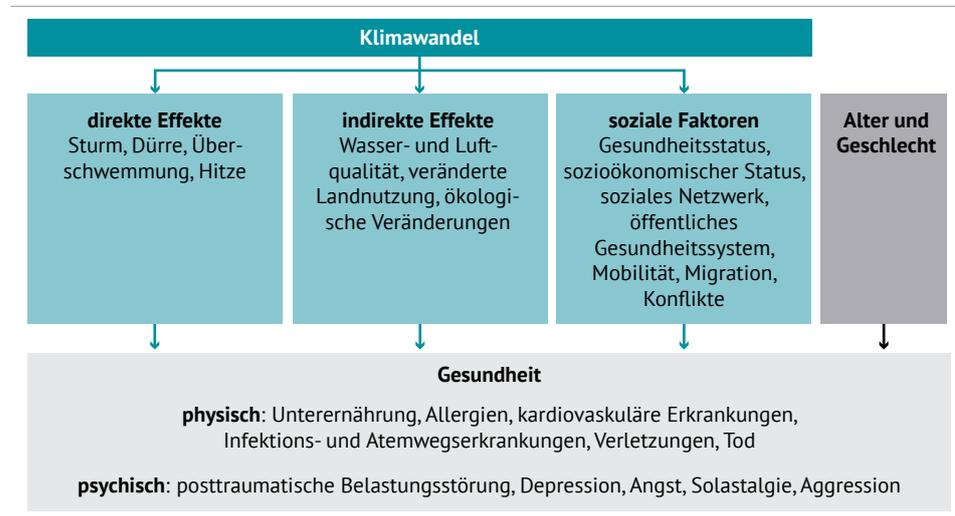
amerika, Indien und Südostasien betroffen sein, darunter die ärmsten Regionen der Welt mit entsprechend geringen Ressourcen für Anpassungsstrategien.

In Schwellen- und Entwicklungsländern, in denen der Zugang zu Kühlung häufig erschwert ist, stehen die Menschen überdies schon heute vor dem Problem, dass sie fast die Hälfte ihrer geernteten Lebensmittel aufgrund von fehlenden oder unterbrochenen Kühlketten verlieren. Unterbrochene Kühlketten sind nach Angaben der WHO darüber hinaus die Ursache für den jährlichen Verlust von 25% der verfügbaren Flüssigimpfstoffe (University of Birmingham 2018, S. 8).

Körperliches Wohlbefinden, Gesundheit und psychische Folgen

Mit voranschreitendem Klimawandel werden extreme Hitzeereignisse weltweit zu zahlreichen negativen Gesundheitsfolgen führen (Abb. 3). Zu den physischen Folgen gehören kardiovaskuläre Erkrankungen und Dehydrierung (insbesondere bei älteren Menschen), Atemwegserkrankungen und Allergien, Unterernährung sowie eine Zunahme von Infektionskrankheiten – durch Vektoren wie Zecken oder die Asiatische Tigermücke übertragen sowie aufgrund verminderter Wasserqualität und Lebensmittelsicherheit (Bunz/Mücke 2017). Hitzestress kann zudem Schwangerschaftsverläufe negativ beeinflussen (Ebi et al. 2021; Rylander et al. 2013). Darüber hinaus kann es zu psychischen Folgen wie hitzeinduzier-

Abb. 3 Effekte des Klimawandels und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit



Eigene Darstellung nach Bunz/Mücke 2017, S.633

tem Schlafmangel, posttraumatischen Belastungsstörungen, Hilflosigkeit, Angst, Depressionen sowie erhöhten Suizidraten kommen (Berry et al. 2010; Bunz/Mücke 2017; Burke et al. 2018). Ein weiteres Phänomen, das im Zusammenhang mit



starken Umweltveränderungen infolge des Klimawandels auftreten kann, ist die Solastalgie (Bunz/Mücke 2017). Sie bezeichnet das schmerzhafteste Verlustgefühl angesichts der Zerstörung der eigenen Heimat, wodurch das eigene Identitäts-, Kontroll- und Zugehörigkeitsgefühl beeinträchtigt wird.

Es wird prognostiziert, dass die hitzebedingte Morbidität und Mortalität in den kommenden Jahrzehnten mit dem Fortschreiten des Klimawandels weiter zunehmen (Ebi et al. 2021). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO 2014) hat errechnet, dass die Zahl der hitzebedingten Todesfälle pro Jahr von rund 100.000 im Jahr 2030 auf rund 250.000 im Jahr 2050 ansteigen wird. Dabei sind besonders Regionen in Subsahara-Afrika, Lateinamerika sowie Süd- und Südostasien betroffen (WHO 2014). Für Europa geht die European Environment Agency (europäische Umweltagentur) davon aus, dass Hitzewellen bald jährlich für 130.000 frühzeitige Todesfälle verantwortlich sein werden (Ganzleben/Ian 2019).

Die Zahl hitzebedingter Sterbefälle soll künftig weiter ansteigen, wobei in Europa von jährlich 130.000 Todesfällen ausgegangen wird.

Konflikte, Gewalttaten und Kriminalität

Der Zusammenhang zwischen extremer Hitze und Aggression begegnet uns umgangssprachlich in Ausdrücken wie „Hitzkopf“ oder „kochen vor Wut“. In Studien konnte gezeigt werden, dass mit steigenden Temperaturen zwischenmenschliche Gewalt, Gruppengewalt sowie Gewaltkriminalität zunehmen (Burke et al. 2015; Cooper 2019; ESMAP 2020a). Hitzewellen werden mit vermehrten polizeilichen Anzeigen und Anrufen bei der Telefonseelsorge sowie einer Zunahme von Gewalt in Paarbeziehungen, häuslicher Gewalt gegen Frauen und Kinder und Femiziden in Verbindung gebracht (Cooper 2019; Sanz-Barbero et al. 2018). Ein Anstieg der Jahrestemperatur um 1 °C geht mit einem durchschnittlichen Anstieg der Tötungsdelikte um 6% einher (Mares/Moffett 2016).

Soziale Gleichheit und Gerechtigkeit

Die negativen Auswirkungen ansteigender Hitze betreffen vor allem Menschen mit geringem sozioökonomischem Status. In jenen – insbesondere urbanen oder ländlichen – Regionen, die heute schon in tropischen Klimazonen liegen und wirtschaftlich verarmt sind, sind aktuell bereits rund 1,09 Mrd. Menschen betroffen. Ihnen fehlt der Zugang zu Elektrizität, ihre Einkommen liegen unterhalb der Armutsgrenze, die bewohnten Gebäude verfügen nicht über ausreichende Belüftungsmöglichkeiten, während es zugleich in der landwirtschaftlichen Produktion an Kühlmöglichkeiten für Lebensmittel fehlt (SEforALL 2021, S. 4 f.).

Menschen, die in urbanen Räumen leben, die durch geringe Begrünung und ein niedriges Einkommensniveau gekennzeichnet sind, sterben mit einer 5% höheren Wahrscheinlichkeit an den Effekten von Hitze als diejenigen, die in anderen Gebieten einer Stadt leben. Das Wachstum von Städten geht insbesondere im



globalen Süden mit der Ausbreitung von Slums einher. Neben dem niedrigen Einkommensniveau und der geringen Begrünung sind Slums auch dadurch gekennzeichnet, dass Bauvorschriften nicht eingehalten werden, Aus- und Umbauten ungeplant erfolgen und ein Zugang zu sanitären Einrichtungen sowie zu Kühlung nur eingeschränkt gegeben ist. Solche Gebiete können bis zu 11 % wärmer sein als andere Teile einer Stadt (ESMAP 2020a).

2.2.2 Infrastrukturelle Auswirkungen

Verkehrsinfrastruktur

Steigende Temperaturen können die Verkehrsinfrastruktur beschädigen und den Personen- und Güterverkehr stören. Asphaltstraßen können durch extreme Hitze aufweichen und schmelzen, was zu gefährlichen Fahrbedingungen führen kann (ESMAP 2020a). Bisher wird bei der Auswahl von Materialien für den Straßenbau meist von konstanten Temperaturen ausgegangen. Underwood et al. (2017) zeigen in ihrer Studie für die USA, dass eine falsche Materialauswahl bei steigenden Temperaturen zum Versagen der Infrastruktur und zu höheren Instandhaltungskosten führt. Wird die Praxis der Materialauswahl nicht angepasst, errechnen sie bis 2040 und 2100 Schäden in Höhe von 10 Mrd. und 21,8 Mrd. US-Dollar. Es ist daher erforderlich, die technischen Standards an den Klimawandel anzupassen, um die Straßeninfrastruktur künftig zu erhalten. Darüber hinaus kann Hitze auch Schienen verbiegen und Oberleitungen verformen, was den öffentlichen Nah- und Fernverkehr sowie den Gütertransport massiv behindern kann (ESMAP 2020a). Auch die Binnenschifffahrt ist negativ von Hitze beeinflusst, denn durch Niedrigwasser werden Transportwege nur eingeschränkt nutzbar (Kahlenborn et al. 2021, S. 76; Mühr et al. 2018, S. 11).

Neben der Verkehrsinfrastruktur sind auch die Verkehrsteilnehmer/innen durch extreme Hitze gefährdet. So kommt es an Tagen mit Hitzewellen zu einem Anstieg tödlicher Verkehrsunfälle von 3,4 % gegenüber weniger heißen Tagen (Wu et al. 2018).

Landwirtschaftliche Erträge und landbasierte Lebensgrundlagen

Zunehmende Hitze bzw. längere Perioden mit heißen Tagen sowie Trockenheit sind für die Wasser-, Land- und Forstwirtschaft mit erheblichen Konsequenzen verbunden (Bundesregierung 2020). Im Bereich der Landwirtschaft werden der Anbau von Nutzpflanzen und die Binnenfischerei durch die ansteigende Erwärmung beeinträchtigt. Für Weizen, dem weltweit am dritthäufigsten angebauten Getreide, konnte gezeigt werden, dass hohe Temperaturen und Hitzeschocks negative Folgen für das Pflanzenwachstum und den Ernteertrag haben (Barlow et al. 2015). Auch für Mais, Reis und Sojabohnen sind vergleichbare Effekte nach-



weisbar (Gourdji et al. 2013). Während auch andere mit dem Klimawandel einhergehende Veränderungen, wie etwa ausbleibende oder extreme Niederschläge, negative Effekte auf die landwirtschaftliche Produktion haben, kann extreme Hitze zu einem völligen Ernteausfall führen (Gourdji et al. 2013, S.9). Auf die Fischerei, insbesondere die maritime Binnenfischerei, haben steigende Temperaturen unterschiedliche Effekte. Während einige Fischarten unter steigenden Temperaturen leiden (Bestandsrückgang), können andere Fischarten ihre Habitate ausdehnen (Bestandszunahme). Dies betrifft sowohl die maritime als auch die Binnenfischerei sowie die Fischzucht in Aquakulturen. Die Binnenfischerei ist darüber hinaus auch von den Wassermengen in Fließ- und Stehgewässern abhängig (Kahlenborn et al. 2021, S.56 ff.).

Auch die Beeinträchtigung durch Schädlinge kann bei steigenden Temperaturen zunehmen. Während Pilz- und Schimmelfall bei Trockenheit zurückgehen können, kann die Zahl potenziell schädlicher Insekten zunehmen (Kahlenborn et al. 2021, S.49). Auch die Tierhaltung ist von den Auswirkungen der Erwärmung betroffen. Tierwohl und Tiergesundheit sind gekennzeichnet von optimalen Temperaturbereichen, in denen Tiere besonders leistungsfähig sind (Kahlenborn et al. 2021, S.48). Hitzestress kann beispielsweise die Milch- und Eiproduktion negativ beeinflussen (Kahlenborn et al. 2021, S.48f.).

Die Effekte von Hitze auf landwirtschaftliche Erträge haben nicht nur Konsequenzen für die Nahrungsmittelsicherheit, sondern auch ökonomische Folgen. So mussten beispielsweise in Deutschland im Jahr 2018 als Folge der Hitzewelle rund 8.000 Landwirt/innen staatliche Nothilfen in Höhe von ca. 1 Mrd. Euro beantragen, um die Verluste in der landwirtschaftlichen Produktion teilweise ausgleichen zu können. Die durch Ernteaufälle entstandenen Schäden wurden auf ca. 3 Mrd. Euro geschätzt (Eckstein et al. 2019, S.7).

Zunehmende Hitze gefährdet landwirtschaftliche Produktion sowohl beim Anbau von Getreide und anderen Nutzpflanzen als auch bei der Fleischherzeugung. Faktoren sind Trockenheit, Schädlingsbefall sowie Extremwetterereignisse.





Global betrachtet hat zunehmende Hitze auch im ersten Halbjahr 2022 bereits zu erheblichen Konsequenzen für die Getreideproduktion geführt. Hitzewellen in Indien, überdurchschnittlich trockene Monate in den europäischen Ländern Frankreich, Spanien, Ungarn und Rumänien und ausbleibende Regenfälle in nordafrikanischen Ländern hatten beispielsweise negative Effekte auf die globale Weizenproduktion zur Folge (USDA 2022).

Energienachfrage, Versorgungssicherheit und Energiesystemresilienz

Zunehmende Temperaturen und damit steigende Kühlbedarfe haben zudem Auswirkungen auf das Energiesystem, da die meisten Kühlbedarfe aktuell durch strombetriebene Anlagen gedeckt werden (IEA 2018). Der zunehmende Bedarf an Raumkühlung kann die Stromversorgungssysteme überlasten und Stromausfälle verursachen (ESMAP 2020a). Raumkühlung hat seit den 1990er Jahren wesentlich zum Anstieg des Gesamtstromverbrauchs beigetragen. Auf Raumkühlung entfielen 13 % des Gesamtwachstums der Stromnachfrage (IEA 2018).

Mit zunehmendem Kühlbedarf steigt der Energiebedarf. Allerdings leidet die Elektrizitätsinfrastruktur unter übermäßiger Hitze.

Insbesondere der sprunghafte Anstieg des *Spitzenstrombedarfs* während Hitzewellen stellt Stromversorgungssysteme vor Herausforderungen. Im Tagesverlauf erreicht die Stromnachfrage ihren Höhepunkt tagsüber in den Geschäftsgebieten und abends in den Wohngebieten (ESMAP 2020a). Raumkühlung kann an manchen Orten, z.B. in den USA, an extrem heißen Tagen mehr als 70% des Spitzenstrombedarfs in Privathaushalten ausmachen (IEA 2018). Selbst in Westeuropa, wo Klimaanlage bisher weniger weit verbreitet sind, können Hitzewellen den Strombedarf zeitweise drastisch erhöhen. So stieg beispielsweise während der Hitzewelle in Frankreich 2003 der Spitzenstrombedarf um 10 % im Vergleich zu weniger heißen Sommern (IEA 2018).

Heiße Lufttemperaturen haben zudem Auswirkungen auf die *Elektrizitätsinfrastruktur*. Stromnetze können beeinträchtigt werden, wenn sich Stromleitungen durch hohe Temperaturen und Nachfrage aufheizen und die Leistung einschränken (IEA 2018). Burillo et al. (2019) haben für Los Angeles County berechnet, dass bis 2060 Generatoren, Umspannwerke und Übertragungsleitungen bis zu 20 % der sicheren Betriebskapazität verlieren könnten und Anpassungen der Infrastruktur erforderlich sind, um auf höhere Spitzenlasten und die Überlastung von Hardware zu reagieren und Ausfälle zu vermeiden.

Luft- und Wasserqualität: Smog- und Feinstaubbelastung

Der voranschreitende Klimawandel erhöht den Kühlbedarf weltweit. Wenn die damit einhergehende steigende Nachfrage nach Energie mittels fossiler Quellen befriedigt wird, tragen die dabei entstehenden Emissionen zum weiteren Anstieg der Temperaturen bei. Gerade dann, wenn sich Emissionsquellen, wie etwa Koh-



lekraftwerke, in der Nähe städtischer Gebiete befinden, steigt die Smogbelastung. Der Zusammenhang zwischen steigenden Temperaturen und zunehmendem Smog ist nachgewiesen und vor allem in Indien und China für zahlreiche Todesfälle verantwortlich. Die Umstellung auf erneuerbare Energien, die zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führen soll, kann, kombiniert mit Maßnahmen zur Kühlung urbaner Gebiete, zur Abnahme der Smogbelastung führen (ESMAP 2020a). Auch Feinstaub belastet die Luftqualität insbesondere in urbanen Räumen; es existiert eine Wechselwirkung zwischen der Feinstaubbelastung und steigenden Temperaturen in urbanen Räumen (UBA 2021c). Der Hitzeinseleffekt ist besonders dort zu spüren, wo Begrünung und Luftzirkulation im städtischen Raum fehlen (Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. 2020).

Auch die Wasserqualität wird von steigenden Temperaturen negativ beeinflusst. Zunehmende Wassertemperaturen schädigen Flora und Fauna, ein Problem, das vor allem in städtischen Gebieten mit hoher Bodenversiegelung auftritt (ESMAP 2020a). Durch steigende Temperaturen kommt es zu Wasserverknappung – problematisch vor allem für die Binnenschifffahrt und die Landwirtschaft – sowie zu einem vermehrten Fischsterben, zu Algenwachstum und der Ausbreitung giftiger Blaualgen (UFZ 2019).

2.2.3 Ökonomische Auswirkungen

Arbeitsproduktivität

Große Teile der Weltbevölkerung sind von übermäßiger Hitze bei der Arbeit betroffen. Die Internationale Arbeitsorganisation (ILO) geht davon aus, dass über 1 Mrd. Arbeitnehmer/innen hohen Hitzeperioden ausgesetzt sind (ILO 2019). Steigende Temperaturen und Hitzeextreme haben negative Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität (UBA 2019a). Hierbei sind nicht nur Personen betroffen, die hauptsächlich im Freien arbeiten, sondern auch diejenigen, die in Innenräumen arbeiten (Bundesregierung 2020, S. 25). Weltweit gesehen sind vor allem (sub)tropische Länder mit niedrigen Einkommensniveaus und großen, informellen Arbeitsbereichen gefährdet (Lucas et al. 2014).

In verschiedenen Studien konnte nachgewiesen werden, dass erhöhte Temperaturen zu erhöhter Krankheitsanfälligkeit, abnehmender Konzentrationsfähigkeit (UBA 2019a) sowie eingeschränkter motorisch-kognitiver Leistungsfähigkeit führen (Ebi et al. 2021; Flouris et al. 2018). Die ILO nimmt konservativen Berechnungen zufolge an, dass ein globaler Temperaturanstieg um 1,5 °C bis 2100 zu einem Produktivitätsverlust von 2,2 % der Gesamtarbeitszeit führen wird, was 80 Mio. Vollzeitstellen entspricht (ILO 2019). Die hierdurch resultierenden wirtschaftlichen Verluste werden bis 2030 auf 2,4 Mrd. US-Dollar geschätzt. Hit-

Die Arbeitsproduktivität wird negativ von zunehmender Hitze beeinflusst. Dies gilt nicht nur für Tätigkeiten, die im Freien ausgeübt werden, sondern auch für Tätigkeiten in Innenräumen, die unzureichend temperiert sind.



zbedingte Produktivitätsverluste spielen dabei eine besondere Rolle in urbanen Ökonomien (ESMAP 2020a). Estrada et al. (2017) schätzen in einer Studie über 1.692 Städte weltweit, dass die Auswirkungen städtischer Hitze die Wirtschaftsleistung der durchschnittlichen Stadt bis 2100 um 5,6 % und in den am stärksten betroffenen Städten um bis zu 11 % verringern werden (Estrada et al. 2017).

2.3 Durchbrechen der Spirale negativer Wechselwirkungen

Es besteht die Gefahr, dass durch die genannten Auswirkungen von Überhitzung und den steigenden Bedarf an Kühlung ein Teufelskreis entsteht: Kühlung verschärft die Erderwärmung, indem die notwendige Elektrizität im Wesentlichen immer noch aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird, was zusätzliche CO₂-Emissionen verursacht (indirekte Emissionen). Zudem entweichen Kältemittel wie fluorierte Treibhausgase (F-Gase) aus Kühl- und Klimageräten (direkte Emissionen). Die Klimaschädlichkeit dieser F-Gase ist zwischen 100- bis 24.000-mal höher als die von CO₂, je nach eingesetztem Kältemittel (UBA 2022b; UNEP 2019). Gleichzeitig fördert die sich verschärfende Erderwärmung wiederum eine steigende Nachfrage nach Kühlung.

Die Auswirkungen der steigenden Temperaturen stehen häufig miteinander in Beziehung und bedingen sich gegenseitig. Sie treten nicht überall gleichermaßen auf, sondern sind oft abhängig von regionalen und lokalen Gegebenheiten. Ebenso sind nicht alle Menschen in allen Regionen in gleichem Maße betroffen. Ohne geeignete Maßnahmen dürften zukünftig aber immer mehr Menschen massiv unter steigenden Temperaturen leiden.

Bereits heute gibt es eine Vielzahl von Technologien und Maßnahmen, die den steigenden Kühlbedarf mit deutlich weniger Energieverbrauch decken und gleichzeitig die Kosten für Verbraucher deutlich senken können – sie bleiben jedoch bislang weitgehend ungenutzt. Um eine Transformation des Klima- und Kälte-sektors hin zu nachhaltiger Kühlung zu gewährleisten, gibt es drei Ansatzpunkte, die gemeinsam angegangen werden sollten (ESMAP 2020b):

1. Eine *Verringerung der Kühllast durch passive Kühlstrategien*, z. B. eine klimaan-gepasste Stadtplanung bzw. eine Ausstattung von Gebäuden derart, dass Hitze nicht eindringt und weniger Kühlung benötigt wird, sowie die Nutzung natürlicher Formen der Kühlung durch Wind, Wasser und Schatten (Kap. 4.1). Dadurch wird der Kühlbedarf von einzelnen Gebäuden oder Räumen verringert (Gloël et al. 2015). So kann verhindert werden, dass sich in einem Gebäude eine Wärmelast aufbaut, die energie- und kostenintensiv gekühlt werden muss. Auch nichttechnische Innovationen, wie beispielsweise Verhaltensanpassungen oder neue Geschäfts- und Finanzierungsmodelle, können Bestandteil einer passiven Kühlstrategie sein (Kap. 4.2).



2. Die Versorgung der *Kühllast durch energieeffiziente und klimaverträgliche Technologien*, also der Einsatz von effizienter Kälte- und Klimatechnik, die die erforderliche Kühlleistung mit möglichst wenig Energie und geringen Emissionen produziert (Kap. 4.3). Dadurch können direkte und indirekte Emissionen reduziert werden (Gloël et al. 2015; UNEP 2020). Direkte Emissionen können durch die Verwendung natürlicher Kältemittel mit keinem bzw. geringem Treibhausgaspotenzial wie CO₂, Ammoniak, Propan oder Isobutan vermieden werden. Indirekte Emissionen können durch eine höhere Energieeffizienz der Kühlsysteme und die Dekarbonisierung der Stromerzeugung reduziert werden.
3. Die *Optimierung und Kontrolle der Kühllast* während des Betriebes, um sicherzustellen, dass nur im notwendigen Umfang und in denjenigen Zeiträumen gekühlt wird, in denen ein Kühlbedarf besteht (Kap. 4.3). Möglich wird dies durch Automatisierung, Steuerung und gute Betriebs- und Wartungspraktiken, Überwachung der Systemleistung sowie die Berücksichtigung von Verhaltens- und Nutzungsmustern.

Bei globaler Betrachtungsweise werden der Bedarf für nachhaltige Kühlung sowie die Notwendigkeit eines integrierten Lösungsansatzes ersichtlich. In Kapitel 5 wird der Frage nachgegangen, ob diese Notwendigkeit auch in einer bislang klimatisch gemäßigten und von steigenden Temperaturen noch nicht außerordentlich betroffenen Zone wie Mitteleuropa und insbesondere Deutschland zukünftig ebenfalls der Fall sein wird. In Kapitel 6 werden die drei hier genannten Ansatzpunkte aufgegriffen und Handlungsfelder und -optionen formuliert, um eine Umsetzung nachhaltiger Kühlung in Deutschland zu unterstützen.





3 Kühlung: Nachhaltigkeit, Verfahren und Akteure

Es gibt verschiedene Begriffsverständnisse von Sustainable Cooling bzw. nachhaltiger Kühlung. Nachhaltig gestaltete Kühlverfahren greifen auf bestimmte, grundlegende Prinzipien zurück, mit denen Kühlung erreicht werden kann. Nicht selten werden je nach Anwendungsgebiet bzw. Kühlbedarf verschiedene Technologien eingesetzt. Dafür hat sich in Deutschland eine diversifizierte Kälte- und Klimabranche entwickelt, die unterschiedlichste Lösungen für Endanwender/innen anbietet. Flankiert wird die Branche von einer umfassenden und aktiven Forschungslandschaft, unterstützt von zahlreichen Fördermaßnahmen.

3.1 Definition nachhaltiger Kühlung

Auf den beiden Ausdrücken *Nachhaltigkeit* und *Kühlung* fußt das dieser Kurzstudie zugrunde liegende Begriffsverständnis von nachhaltiger Kühlung. Es rückt die Menschen in ihrer Umgebung in den Mittelpunkt der Betrachtung, da sie direkt und indirekt von den Effekten steigender Temperaturen betroffen sind. Verwandte Begriffe sind u. a. saubere Kühlung, Sustainable Cooling, Green Cooling und Clean Cooling.

Nachhaltigkeit wird hier in einem weiten Sinne verstanden, umfasst also nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische und soziale Nachhaltigkeit. Ein solches Begriffsverständnis liegt auch der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie zugrunde: Um den Bedürfnissen der heutigen und künftigen Generationen in Deutschland und allen Teilen der Welt gerecht zu werden, bedarf es einer wirtschaftlich leistungsfähigen, sozial ausgewogenen und ökologisch verträglichen Entwicklung (Bundesregierung 2021). Dabei geben die planetaren Grenzen zusammen mit der Orientierung an einem Leben in Würde für alle die absolute äußere Beschränkung vor (Bundesregierung 2021).

Kühlung kann allgemein als Prozess verstanden werden, in dem einem festen oder flüssigen Stoff Wärme entzogen wird, sodass der Stoff eine niedrigere Temperatur aufweist (ESMAP 2020b, S. 1). Laut den Vereinten Nationen (UNEP 2020, S. 10) bezieht sich Kühlung auf menschliche Aktivität, Konstruktionen oder Technologien, die Temperaturen reduzieren und dazu beitragen, Folgendes zu erreichen:

- einen angemessenen thermischen Komfort für Menschen (Klimatisierung) oder
- die Konservierung von Produkten und Erzeugnissen (Medikamente, Lebensmittel usw.; [Tief-]Kühlung) und



- die Gewährleistung effektiver und effizienter Prozesse durch Temperaturoptimierung (z.B. in Rechenzentren, industrieller oder landwirtschaftlicher Produktion und Bergbau).

Nachhaltige Kühlung soll einen angemessenen thermischen Komfort für Menschen in ihrer Umgebung erzeugen und bezeichnet daher sowohl Ansätze, die einen Kühlbedarf gar nicht erst entstehen lassen, als auch Prozesse, bei denen die Reduktion des Kühlbedarfs, die Klimatisierung und die (Tief-)Kühlung keine bzw. geringe Umweltbelastungen verursachen und gleichzeitig finanziell leistbar sowie für unterschiedliche soziale Bevölkerungsschichten gleichermaßen zugänglich, d.h. inklusiv, sind. Nachhaltige Kühlung erscheint zum Erreichen der Ziele des Pariser Klimaabkommens unumgänglich (UNEP 2020).

3.2 Standardverfahren für Kühlung und Klimatisierung

Im Fokus der weiteren Analyse stehen Verfahren, die thermischen Komfort für den Menschen in seiner Umgebung ermöglichen. Hier lassen sich *aktive und passive Kühlverfahren* unterscheiden. Während bei aktiven Kühlverfahren zur Kühlung bzw. Klimatisierung technische Arbeit bzw. thermische Energie hinzugefügt wird, kommen passive Kühlverfahren ohne Energiezufuhr oder Kältemittelkreislauf aus. Nachfolgend werden zunächst Kühlverfahren dargestellt, die auf einer *aktiven Kühlung* basieren, also in der Regel mit Strom betrieben werden.

Während aktive Kühlverfahren Energie benötigen, kommen passive Kühlverfahren ohne Energie aus.

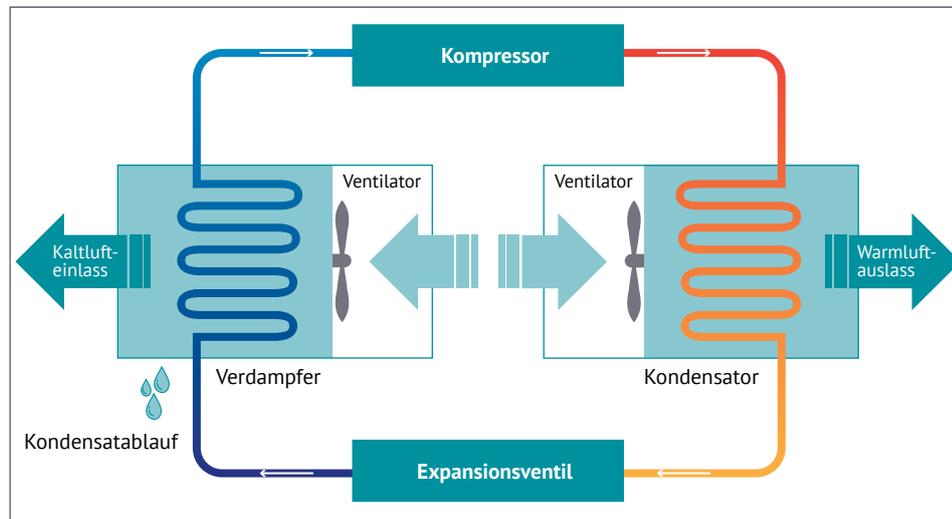
Zu den verbreitetsten Verfahren für Tiefkühlung und Klimatisierung gehört die elektrisch betriebene mechanische Kühlung, auch *Kompressionskältemaschine* genannt. Dabei wird Kälte durch die Zirkulation und isotherme Druckveränderungen eines flüssigen Kühlmittels in einem Kompressor erzeugt (Lange et al. 2016). Das Verfahren macht sich dabei die physikalischen Grundlagen der Wärmeübertragung beim Wechsel von Aggregatzuständen zunutze: Flüssigkeiten absorbieren Wärme beim Übergang in den gasförmigen Zustand und geben diese wieder ab, wenn sie zurück in den flüssigen Zustand kondensieren. Das Kältemittel wird im Kompressor unter Aufnahme der technischen Arbeit verdichtet und erhitzt sich. In einem Kondensator wird die entstandene Wärme abgeführt und anschließend der Druck in einem Drosselventil reduziert. Der entstandene Nassdampf wird dann unter Aufnahme der Wärme und somit Kühlung der Umgebungsluft verdampft, sodass das Kühlmittel wieder den flüssigen Zustand erreicht (IEA 2018, S. 15 f.). Abbildung 4 zeigt den Kühlkreislauf einer Kompressionskältemaschine.

Kompressionskältemaschinen haben eine elektrisch betriebene mechanische Kühlung. Sie werden für vielfältige Anwendungen eingesetzt.

Diese Funktionsweise lässt sich einerseits innerhalb der kompletten Temperaturspanne (inklusive der Tiefkühlung) nutzen und eignet sich somit für die meisten Kühlanwendungen, besitzt andererseits eine relativ geringe Baugröße, was beispielsweise für Haushaltskühlung oder mobile Anwendungen vorteilhaft ist (Lange et al. 2016). Aufgrund der Energiezufuhr durch Strom hat die Kompres-



Abb. 4 Funktionsweise einer Kompressionskältemaschine



Eigene Darstellung nach IEA 2018, S.16 ff.

sionskältemaschine im Gegensatz zu anderen Methoden einen relativ hohen Wirkungsgrad, geht dadurch jedoch mit hohen Betriebskosten einher. Die mechanische Funktionsweise erfordert darüber hinaus einen vergleichsweise hohen Wartungsaufwand. Dafür lässt sich diese Kühlmethode mit geringen Investitionskosten realisieren (Lange et al. 2016).

Im Gegensatz zur Kompressionskältemaschine ist die *Sorptionskältemaschine* (Ad- oder Absorption, abhängig vom Sorptionsmittel) aufgrund ihres Platzbedarfs weniger kommerziell verbreitet und findet in wenigen spezialisierten Anwendungen, wie spezielle medizinische Kühlanwendungen bei geringer bis mittlerer Feuchtigkeit, Gebrauch (Lange et al. 2016). Der hier stattfindende thermische Prozess basiert auf einem Stoffpaar, bestehend aus dem Kühl- und dem Absorptionsmittel. Stoffpaare sind beispielsweise Ammoniak und Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) für sehr tiefe Temperaturen oder Wasser und Lithiumbromid ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) für klimatechnische Anlagen in zwei unabhängigen geschlossenen Kühlkreisläufen (Grote/Feldhusen 2014). Da dieser Prozess ein thermischer Kreislauf ist und kaum Elektrizität benötigt wird, ist dieses Verfahren auch abseits der normalen Infrastruktur geeignet (Lange et al. 2016).

Das Kühlmittel verdampft dabei bei Umgebungstemperatur in einer Niedrigdruckumgebung. Die Verdampfung absorbiert Wärme aus der Umgebung und verursacht einen Kühleffekt. Das Absorptionsmittel nimmt das evaporierte Kühlmittel auf. Dadurch reduziert sich der Druck und weiteres Kühlmittel kann verdampfen. Das Kühlmittel wird anschließend mit thermischer Energie wieder aus dem Absorptionsmittel herausevaporiert und in seinen Originalzustand versetzt.

Bei Sorptionskältemaschinen handelt es sich um thermische Verdichter, die vor allem im medizinischen Bereich eingesetzt werden.



Der Wirkungsgrad der Absorptionskältemaschine fällt geringer aus als der einer Kompressionskältemaschine. Da das Wirkprinzip der Absorptionskältemaschine rein auf thermischer Energie basiert, lassen sich auch minderwertige Formen wie Abwärme aus industriellen Prozessen, Müll oder Solarenergie zur Energiezufuhr verwenden. Durch die Nutzung von Abwärme kann die Absorptionskühlung mit sehr geringen Kosten betrieben werden – zudem mit einem minimalen Wartungsaufwand –, da kaum mechanische Komponenten vorhanden sind. Die Anfangsinvestitionen sind jedoch vergleichsweise hoch (Lange et al. 2016).

Adiabate Kühlung basiert auf der Abkühlung der Luft durch Verdunstung von Wasser. Sie wird vor allem bei der Gebäudekühlung und zur Lagerung von Lebensmitteln genutzt.

Eine Kühlungsmethode, die überwiegend bei kleinen begehbaren Kühlräumen, kommerziellen und Haushaltseinheiten, aber auch bei mobilen Systemen Anwendung findet, ist die adiabate Kühlung, die beispielsweise bei der Gebäudekühlung oder im Lebensmittelbereich eingesetzt wird (Lange et al. 2016). Sie funktioniert nach dem Prinzip der Abkühlung der Luft durch Verdunstung von Wasser (Colt International GmbH 2022). Die adiabate Kühlung ist zwar sehr leistungsstark, durch physische Bedingungen in ihrem Temperaturbereich jedoch stark limitiert, da die niedrigstmögliche Temperatur etwa 1 bis 2 °C über Feuchtkugeltemperatur liegt und die erreichbare Temperaturspanne stark von den lokalen klimatischen Bedingungen abhängt. Dadurch findet die Kühlmethode vermehrt bei der Lagerung von Lebensmitteln wie (sub)tropischen Früchten und Gemüse Anwendung, eignet sich jedoch weniger für leicht verderbliche Lebensmittel wie Milchprodukte, Fleisch oder Fisch (Lange et al. 2016). Bei steigender Temperatur verdunstet das Wasser und kühlt die Luft durch Wärmeabsorption (Colt International GmbH 2022). Die adiabate Kühlung verursacht durch die Nutzung von Wasser als Kühlmittel im Vergleich zu anderen Kühlmethoden sehr geringe Betriebskosten und erfordert keine externe Zufuhr von Energie. Der Wartungsaufwand hängt von der lokalen Wasserqualität und -härte ab. Aus Hygienegründen ist zudem ein Wechsel des Kühlsystems alle 3 bis 5 Jahre erforderlich (Lange et al. 2016).

Die *Eiskühlung* (Lange et al. 2016) wird insbesondere bei der Lagerung bzw. beim Transport von leicht verderblichen Lebensmitteln, wie Milchprodukte, Fleisch und Fisch, bei Lagerungstemperaturen um die 0 °C verwendet. Die Kühlmethode lässt sich auf zwei Arten durchführen: entweder durch direkte Kühlung der Produkte mit Eis bzw. Eiswasser (Hydro Cooling) oder durch Kühlung der umgebenden Luft mit Kühlbatterien (Konvektion). Eis kann dabei auf Grundlage jeder der beschriebenen Kühlmethoden hergestellt werden, die sich für Tiefkühlung eignen. Die Eiskühlung setzt das Vorhandensein von sauberem Wasser voraus. Im Gegensatz zu anderen Kühlmethoden ist die Kontrollierbarkeit der Temperatur eingeschränkt, da sie abhängig von der verwendeten Eismenge ist. Da Energie lediglich bei der Produktion zugeführt werden muss, ist die Eiskühlung sehr transportabel, wenngleich auch bei geringer Reichweite. Sofern isolierte Lagerräume verfügbar sind, besitzt die Eiskühlung eine relativ hohe Effizienz, weist jedoch ansonsten hohe Temperaturverluste auf. Als Kühlmittel können neben Wasser



auch halogenierte Kühlmittel bei der Konvektion verwendet werden. Die Kosten sind abhängig von der genutzten Methode zur Eisproduktion.

Passive Kühlverfahren bieten zahlreiche Möglichkeiten, die Innentemperatur von Gebäuden niedrig zu halten, ohne dafür Strom zu verbrauchen (IEA 2018). Einige sehr grundlegende Verfahren sind u. a. die Verwendung von Schatten und Verdunstungen, Verdunstungskälte, Luft, Wasser oder die Ausrichtung von Gebäuden sowie die Begrünung von Fassaden und Dächern. So kann der Bedarf an aktiver Kühlung durch elektrisch betriebene Klimaanlage gesenkt werden. Dadurch wird die Kühllast minimiert und weniger Energie benötigt, um die Kühlung von Gebäuden bzw. die Entstehung einer angenehmen Raumtemperatur sicherzustellen.

3.3 Kühlbedarfe und -geräte

Kühlbedarfe können überall dort entstehen, wo der Mensch mit seiner Umwelt interagiert und auf thermischen Komfort angewiesen ist. Sie lassen sich im Wesentlichen nach dem Verwendungszweck der Klimatisierung und (Tief-)Kühlung klassifizieren (EIA 2021). Je nach Verwendungszweck, ob in privaten Haushalten oder unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen (z. B. Fleisch- oder Backhandwerk, Supermärkte, Hotel- und Gaststättengewerbe, Nahrungsmittel- und Chemieindustrie), existiert eine unterschiedliche Kältetechnik. Abbildung 5 zeigt eine Übersicht der Kühlbedarfe nach Sektoren und Verwendungszweck.

Abb. 5 Beispiele für Kühlbedarfe nach Sektoren und Verwendungszweck

	 privat	 Gewerbe	 Industrie	 Transport
Klima- tisierung	Mobilität	Banken	Automobil	
	Wohnraum	Bürogebäude	Elektronik	
		Datenzentren	Energie und Versorgung	
		Einkaufszentren öffentliche (Regierungs- und Verwaltungs-)Gebäude	Textil	
(Tief-) Kühlung	Lebensmittel	Gastgewerbe	Chemie und Zement	Chemie und Zement
	Getränke	Supermärkte	Getränke	Getränke
		Kaufhäuser	Lebensmittel	Lebensmittel
		Gesundheitsversorgung	Öl und Gas	Öl und Gas
		Transport	Pharma	Pharma

Eigene Darstellung nach EIU 2019, S.10



Die Vielfältigkeit der Anwendungen erfordert ein breites Spektrum anwendungsspezifischer technologischer Kühllösungen. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht gängiger Kühlgeräte nach dem Verwendungszweck der Klimatisierung bzw. (Tief-)Kühlung und dem Sektor.

Tab. 1 Gängige Kühlgeräte nach Verwendungszweck und Sektor

Sektor		Klimatisierung	(Tief-)Kühlung
privat	Wohnraum, Lebensmittel und Getränke	kompakte tragbare Klimageräte, kompakte Fensterklimate, Splitklimate, kompakte Dachklimaeinheiten	Kühlschränke, Gefriertruhen, Kühl-Gefrier-Kombinationen, Klimaschränke
	Mobilität, Fahrzeuge	mobile Klimaanlage	
Gewerbe	(öffentliche) Gebäude, Datenzentren, Hotelzimmer	kompakte Klimageräte, zentrale Klimaanlage, luft- und wassergekühlte Raumklimasysteme	gewerbliche Kältesysteme (zentral/dezentral)
Industrie	Fabriken und Prozesse	zentrale Klimaanlage, luft- und wassergekühlte Raumklimasysteme	industrielle Kühlsysteme
Transport	Kühlketten		Transportkälteanlagen

Quelle: Blumberg/Isenstadt 2019; Gloël et al. 2015; IEA 2018

Ausgehend vom festgelegten Begriffsverständnis von nachhaltiger Kühlung wird der Fokus auf die gängigsten Geräte zur Gewährleistung des menschlichen Komforts bezüglich Klimatisierung und Kühlung gelegt. Hierzu gehören die Klimatisierung und (Tief-)Kühlung im privaten und mobilen Bereich sowie in öffentlichen Gebäuden. Diese werden nachfolgend kurz anhand ihrer Funktion, verwendeter Kältemittel, Emissionen sowie Energiezufuhr dargestellt. Eine Übersicht über die Eigenschaften von Kühlgeräten für alle Sektoren findet sich in Tabelle 2.

Die kleinste Form von Kühltechnologien zur Klimatisierung sind *mobile Klimaanlage* (MACs) zur Klimatisierung von Kraftfahrzeugen. In der Regel werden hierfür Kompressionskältemaschinen in die Fahrzeuge eingebaut, die als Kühlmittel sehr häufig R134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan, ein Fluorkohlenwasserstoff) verwenden (Blumberg/Isenstadt 2019). MACs dienen dem Komfort von Autofahrer/innen und halten die Temperatur im Innenraum von Kraftfahrzeugen auf einem konstanten niedrigen Niveau (Möhlenkamp et al. 2017). Aufgrund des hohen möglichen Wirkungsgrades von Kompressionskältemaschinen werden MACs auch zur Kühlung von Wohnräumen eingesetzt. Beim Betrieb von MACs entstehen überwiegend (ca. 81 bis 88 %) indirekte CO₂-Emissionen. Die restlichen 20 % direkte CO₂-Emissionen lassen sich auf Kühlmittelleckagen bei der Herstellung, Wartung, Reparatur oder während des Betriebs und am Ende der Nutzungsdauer zurückführen. Insbesondere das weiterhin in Millionen älterer Fahrzeuge welt-



Tab. 2 Überblick über Kühlgeräte, verwendete Kühlmittel sowie alternative, klimafreundlichere Kühlmittel

Gerät		Kühlmittel (hoher GWP)	alternatives Kühlmittel (UNEP 2020)	Gesamtenergie- bedarf/Jahr (BIV et al. 2022)
Haushalts- kälte	kompakte Klima- anlagen	R407C, R410A	HFC-32, HC-290	40.903 GWh/a
	mobile Klima- anlagen	R134a (1,1,1,2-Tetrafluor- ethan; bis 2011)	HFC-1234yf (Tetrafluorpropen), HFC-152a, R-744 (CO ₂)	
	Kühlschränke, Gefriertruhen, Kombigeräte, Klima- schränke	FCKW (bis 1995), FKW, HFKW, SF8, NF3, Propan und Butan, Chlorver- bindungen, Wasser, Isobutan	HC-600a	
Gewerbe- und Indus- triekälte	zentrale Klima- anlagen	R407C, R410A, Wasser, Luft	HFO-1234ze, HFO-1233zd, R-514A	siehe unten
	gewerbliche Kälte- systeme (zentral/ dezentral)	FCKW (bis 1995), FKW, HFKW, SF8, NF3, Propan & Butan, Chlorver- bindungen, Wasser, Isobutan	HC-600a	11.831 GWh/a
	industrielle Kühl- systeme	R-404A	R-744 (CO ₂), R-448A, R-449A	28.106 GWh/a
Transport	Transportkälte- anlagen	R-404A, R410A		4.300 GWh/a

Eigene Zusammenstellung

weit am meisten verwendete Kühlmittel R134a besitzt einen GWP-Wert, der um das 1.300-Fache höher ist als der von CO₂. Die EU, Kanada und Japan haben die Verwendung von Kältemitteln für Klimaanlage mit einem GWP-Wert über 150 für neue Systeme bereits verboten (Blumberg/Isenstadt 2019).

Bei *Klimaanlagen* unterscheidet man zwischen kompakten Klimageräten unterschiedlicher Bauweise, beispielsweise zur Klimatisierung von Privathaushalten oder Hotelzimmern, und zentralen Klimaanlage zur Aufrechterhaltung des Raumklimas von größeren Gebäuden wie Bürokomplexen oder Einkaufszentren. Die Technologie basiert dabei oftmals auf einem Kompressionskühlkreislauf unter der Verwendung von teilfluorierten Kältemitteln wie R407C oder R410A (UBA 2020a). Eine Alternative für die Gebäudeklimatisierung mittels Kältemittelkreislauf sind luft- oder wassergekühlte Raumklimasysteme, die auf dem Prinzip der adiabaten Kühlung beruhen und als Kältemittel Wasser bzw. Luft verwenden.



Zur einfachen Konservierung bzw. Kühlung von Lebensmitteln und Getränken im *privaten Bereich* werden Kühlschränke und Gefriertruhen bzw. Kombigeräte oder Klimaschränke eingesetzt (Gloël et al. 2015). Das Kühlverfahren basiert auf der klassischen Kompressionskältemaschine, die früher häufig mit Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) und heute oft mit einer Zusammensetzung aus Propan und Butan (Dortmunder Mischung) betrieben wird. Neben diesem Kühlgemisch werden auch Chlorverbindungen, Wasser oder Isobutan verwendet.

Kühlgeräte, die nach dem Kompressionsprinzip funktionieren, tragen aufgrund der Verwendung von F-Gasen als Kühlmittel oft erheblich zur Umweltbelastung bei, da die verwendeten Kältemittel direkte Emissionen verursachen können. Dies ist insbesondere bei Splitklimageräten der Fall, die aufgrund der Vielzahl an Anschlüssen zu Leckagen neigen. Aufgrund dessen sind gemäß EU-Verordnung Dichtheitsprüfungen vorgesehen, die jedoch, beispielsweise bei zentralen Kältesystemen, in der Praxis schwer durchführbar sind (UBA 2020a).

Herausforderungen bei der Wahl des Kältemittels

Die Wahl eines passenden Kältemittels stellt eine Herausforderung für nachhaltige Kühlung dar, denn sie hängt von verschiedenen Faktoren wie der Effizienz des Kältemittels, der Auswirkung auf das Klima oder der Sicherheit, z.B. hinsichtlich Entflammbarkeit und Giftigkeit, ab.

Kältemittel auf Grundlage von Fluorkohlenwasserstoff (FKW) bzw. Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) wurden zunächst wegen ihrer Eigenschaften (geringe bis keine Toxizität, geringe bis keine Brennbarkeit) genutzt. Im Falle von FCKW zeigte sich jedoch ein ozonschichtschädigendes Potenzial, sodass u.a. FKW als Ersatzmittel genutzt wurde. Dieses wies aber wiederum ein erhebliches Treibhausgaspotenzial (hohes GWP) auf, sodass Kältemittel aus fluorierten Kohlenwasserstoffen ebenfalls Gegenstand einer Verbotsdiskussion sind und schrittweise abgebaut werden sollen (Kap. 5.2.2) (Becken et al. 2010; RefNat4Life 2021a).

Die Wahl des richtigen Kältemittels ist sehr voraussetzungsreich, da Kältemittel unterschiedlich effizient und klimafreundlich sind.

Natürliche Kältemittel bzw. auch synthetische Hydrofluoroolefinkältemittel (HFO) verfügen zwar über ein sehr geringes GWP, lassen sich aufgrund der anderen Kriterien jedoch nicht flächendeckend für jeden Anwendungsfall verwenden (ESMAP 2020b). Zu den natürlichen Kältemitteln, welche kein Ozonabbaupotenzial und kein oder nur ein sehr geringes Treibhauspotenzial besitzen, gehören Kohlenwasserstoffe (KWs), Kohlendioxid (CO₂), Ammoniak (NH₃), Wasser (H₂O) und Luft (RefNat4Life 2021b).

- Propan (R-290) und Isobutan (R600a) sind die meistverwendeten Kohlenwasserstoffe zur natürlichen Kühlung. Sie finden Anwendung im privaten Bereich in herkömmlichen Kühlschränken oder Klimageräten, aber auch im kommer-



ziellen Bereich, wie bei der Kühlung in Supermärkten (GCI o.J.). R-290 besitzt beispielsweise eine höhere thermodynamische Effizienz als vergleichbare F-Gase, wie R-22 oder R-410A, die vor allem in kleinen Klimageräten eingesetzt werden, ist jedoch hochentzündlich, sodass der Einsatz in Innenräumen nur eingeschränkt möglich ist (ESMAP 2020b).



- Kohlendioxid (R-744) und Ammoniak (R-171), die ebenfalls sehr geringe GWP-Werte von 1 bzw. geringer aufweisen, sind in ihrer Anwendung auf große kommerzielle und industrielle Anwendungen begrenzt, weil große Drücke nötig sind und Ammoniak hoch toxisch ist (ESMAP 2020b). Kohlendioxid ist dagegen nicht toxisch und lässt sich in verschiedenen Bereichen wie kommerzielle, industrielle und Transportkühlung verwenden. In Wärmepumpen³ eignet es sich sowohl zum Kühlen als auch zum Wärmen. Ammoniak wird vor allem in der Lebensmittelherstellung zur Prozess- und Lagerkühlung genutzt.
- Luftkühlung wurde zunächst nur an Bord von Schiffen verwendet. Mittlerweile werden mit Luft Flugzeug- und ICE-Kabinen gekühlt.
- Wasser kann in jedem Aggregatzustand als Kühlmittel verwendet werden. Meistens wird es jedoch zur Verdunstungskühlung benutzt, um die Umgebungsluft abzukühlen.
- HFO sind die neueste Generation synthetischer Kältemittel, mit einem geringen Treibhauspotenzial und einem Ozonabbaupotenzial von null. Sie verfügen über eine geringe Entflammbarkeit und Toxizität und werden überwiegend in

³ Wärmepumpen werden üblicherweise zum Heizen eingesetzt, eignen sich aufgrund ihres Funktionsprinzips aber auch zur Kühlung. Insbesondere die in den letzten Jahren steigenden Energiekosten für Gas- und Ölheizungen haben zu einer verstärkten Nachfrage nach Wärmepumpen im Privatbereich geführt (VDMA 2019, S.79).



großen Kühlaggregaten oder mobilen Klimaanlage verwendet, da – verglichen mit herkömmlichen Kältemitteln – ihre Effizienz gering und die Kosten hoch sind (ESMAP 2020b).

Angesichts der Vielfalt der Kältemittel und der teils erheblichen Risiken und Umweltauswirkungen, die mit ihrem Einsatz einhergehen, kommt der Ausbildung von Fachpersonal, das die Maschinen sicher installiert, wartet und am Ende ihres Lebenszyklus ordnungsgemäß entsorgt, eine besondere Rolle zu. Kältemittel spielen in den etablierten Technologien eine zentrale Rolle. Da sie meistens umweltschädlich sind, werden sie streng kontrolliert und unterliegen besonderen regulatorischen Rahmenbedingungen.

3.4 Das deutsche Kälte- und Klimainnovationssystem

3.4.1 Die deutsche Kälte- und Klimabranche

Die Kälte- und Klimatechnikbranche umfasst die Sektoren Kälte, Klima, Lüftung und Wärmepumpen, entlang deren Wertschöpfungskette Akteure aus den Bereichen Handwerk und Industrie sowie Handel, Wissenschaft und Bildungsinstitutionen genauso wie Betreiber der Anlagen aktiv sind.

Gemäß der Statistik des Zentralverbandes des Deutschen Handwerks (ZDH) waren 2020 in Deutschland ca. 3.000 Kälte-Klima-Fachbetriebe (Gewerk Kälteanlagenbau) mit etwa 38.500 Mitarbeitenden tätig, die überwiegend in einem oder mehreren der vielfältigen Branchenverbände organisiert sind.⁴ Ähnliche Zahlen sind beim Statistischen Bundesamt verfügbar. Es wurden für 2019 im Sektor Kälteanlagenbauer 2.390 Unternehmen mit 38.500 Beschäftigten gezählt, die einen Umsatz von 6,47 Mrd. Euro erwirtschaften (Destatis 2021, S. 5). Von den Unternehmen beschäftigt fast die Hälfte (49%) 50 Personen und mehr, in weiteren 20% sind 20 bis 49 Personen tätig. 15% der Unternehmen beschäftigen 10 bis 19 Personen, 10% zwischen 5 bis 9 Personen und ca. 6% unter 5 Personen (Destatis 2021, S. 13). Der Durchschnitt liegt bei 16 Mitarbeiter/innen pro Betrieb.

Die deutsche Kälte- und Klimabranche ist sehr heterogen zusammengesetzt, aber sehr gut in Verbänden und Netzwerken organisiert.

Zu den prominenten Verbänden der Kälte- und Klimatechnikbranche zählen der Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe (VDKF), der Zentralverband Kälte Klima Wärmepumpen (ZVKKW) und der Bundesinnungsverband des Deutschen Kälteanlagenbauerhandwerks (BIV). Darüber hinaus sind zahlreiche weitere relevante Verbände sowie Netzwerke zu nennen, die verschiedene Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft vereinen, deren Interessen vertreten und sowohl ihre Mitglieder als auch öffentliche und private Anwender/innen sowie die Öffentlichkeit informieren und beraten (Tab. 3). Ein weiteres Beispiel ist der Forschungsrat

⁴ DKV: Welttag der Kältetechnik. Vortrag am 26.6.2022



Kältetechnik e. V.⁵, in dem sich Vertreter/innen der Industrie sowie Forschungsinstitutionen zusammengeschlossen haben. Ziel des Vereins ist es, die Kältetechnik durch technisch-wissenschaftliche Forschung weiter voranzutreiben. Darüber hinaus spielen regionale Cluster mit Schwerpunkt Energie eine wichtige Rolle, die Akteure im Bereich Kälte- und Wärmetechnik in einer Region vereinen: z.B. Energy Saxony e. V. in Sachsen, Klima-Innovativ e. V. in Bayern, Umwelttechnologie-Cluster Bayern e. V., Thüringer Erneuerbare Energien Netzwerk (TheEN) e. V. in Thüringen, ENERGIEregionNürnberg e. V. in Bayern sowie die Netzwerkagentur Erneuerbare Energien Schleswig-Holstein (EE.SH).

Ein wichtiges Branchenevent ist die „Chillventa – Weltleitmesse für Kältetechnik“⁶, auf der die weltweite Community regelmäßig in Nürnberg zusammenkommt.

Ausgewählte industrielle Zusammenschlüsse im Bereich Kälte- und Klimatechnik in Deutschland

- Bundesinnungsverband des Deutschen Kälteanlagenbauerhandwerks (BIV)
- Zentralverband Kälte Klima Wärmepumpen e. V. (ZVKKW)
- Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V. (DKV)
- Fachverband Gebäude-Klima e. V.
- Forschungsrat Kältetechnik e. V.
- Historische Kälte- und Klimatechnik e. V.
- Innovationsnetzwerk Kälteanlagen & Speichertechnik (INKaS)
- IZW e. V. Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik
- RLT Raumluftechnische Geräte Herstellerverband e. V.
- Verband Deutscher Kühllhäuser & Kühllogistikunternehmen e. V.

Differenzierte Angaben zu Umsätzen im Klima- und Kältemarkt sind nur schwer zu finden, weil je nach Betrachtung unterschiedliche Marktsegmente zusammengefasst werden und beispielsweise auch die Branchen Heizung und Sanitär umfassen. Zusammen betrachtet haben diese Marktsegmente 2022 einen Umsatz von rund 54,7 Mrd. Euro erwirtschaftet (Statista GmbH 2022a). Marktstudien, die einen differenzierteren Blick ermöglichen können, sind in der Regel kostenpflichtig. Anhand frei zugänglicher Quellen können jedoch vereinzelt Aussagen zu Deutschland, Europa und global formuliert werden, um den Markt im Bereich Klima und Kälte zumindest in Ansätzen zu charakterisieren.

Der globale Kältemarkt erwirtschaftete 2020 ca. 100 Mrd. Euro Umsatz. Davon entfielen 60 Mrd. Euro auf Gewerbe- und 28 Mrd. Euro auf Industriekälte (Häken 2020).

⁵ <http://www.fkt.com/home/> (9.12.2022)

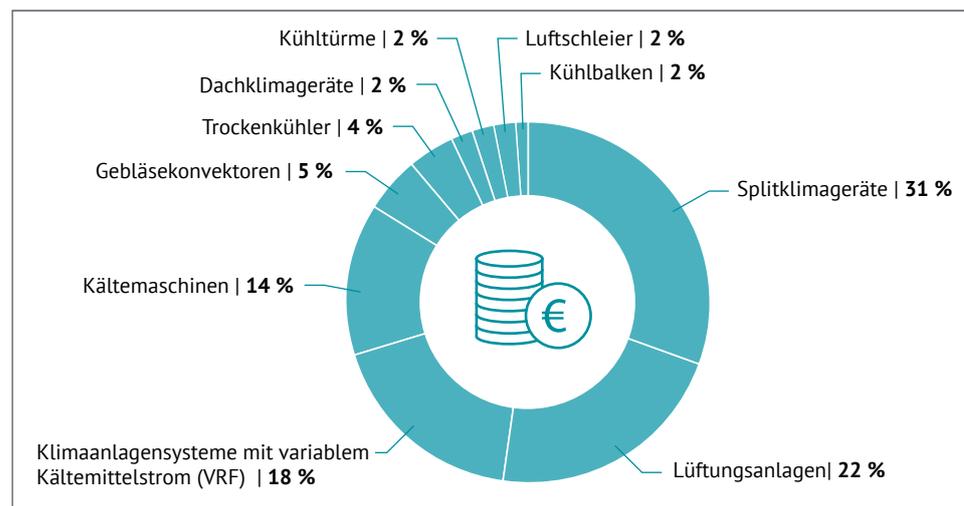
⁶ <https://www.chillventa.de/> (9.12.2022)



Eine aggregierte Betrachtung des globalen Kühlungsmarkts inklusive Heizungsgeräten ergibt mit 210 Mrd. Euro Umsatzvolumen mehr als das Doppelte (Statista GmbH 2022c).⁷ Für Deutschland wird für 2022 ein Umsatz inklusive Heizung von 2,1 Mrd. Euro mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum bis 2027 von 5,4% geschätzt (Statista GmbH 2022b).

Das Marktanalyseunternehmen Eurovent Market Intelligence kommt in einer Berechnung für 2018 im Bereich Klimageräte auf einen Umsatz von 7,5 Mrd. Euro in Europa (Abb. 6). Davon entfallen rund 1 Mrd. Euro Umsatz auf den deutschen Markt (KKA 2019). Dementsprechend hätte Deutschland bezogen auf Klimageräte, vergleichbar mit Frankreich, einen Marktanteil am globalen Kältemarkt – dieser enthält neben den genannten Klimageräten auch andere Kühlgeräte – von rund 1%.

Abb. 6 Umsatz mit Klimageräten in der EU-28 (2018)



Eigene Darstellung nach KKA 2019

Grundsätzlich erwies sich die Zeit der Pandemie auch für die deutsche Kältewirtschaft als schwierig, etwa durch verändertes Kundenverhalten, Betriebsschließungen und Unterbrechungen der Lieferketten (BIV et al. 2022, S.4). Dennoch konnte sich die Branche in der Pandemie gut behaupten, da Komponenten und Anlagen der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik aufgrund ihrer vielfältigen Anwendung in der Lebensmittelversorgung, im Infektionsschutz und zur Aufrechterhaltung der industriellen Produktion als systemrelevante Ausrüstungen genutzt wurden (BIV et al. 2022, S. 6).

⁷ Die verwendete Quelle erlaubt keine Unterteilung in Kühl- und Heizungstechnik. Daher bleiben gewisse Unschärfen bestehen.



Zuletzt verzeichnete die Branche trotz der unsicheren wirtschaftlichen Entwicklung der vergangenen 2 Jahre keine wesentlichen Einbrüche, die Umsätze entwickelten sich gegenüber dem Vorjahr sogar positiv. Außerdem prognostizierten Unternehmen nach dem Ergebnis der Kälte-Klima-Konjunkturumfrage 2021 durch den Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe (VDKF 2021) auch für 2022 überwiegend (60 %) noch eine gute Auftragsentwicklung (BIV et al. 2022, S.6). Die tatsächliche Entwicklung könnte jedoch vor dem Hintergrund des Ukraine-Kriegs und nach wie vor gestörter Lieferketten schwächer ausfallen. Als ein kritischer Faktor werden die stark steigenden Preise für Rohstoffe (insbesondere für Kupfer, Edelstahl und Holz) gesehen, die einen hemmenden Einfluss auf die Branchenentwicklung haben könnten (BIV et al. 2022, S.6).

Ebenso wie andere Branchen ist auch die Kälte-Klima-Branche vom Fachkräftemangel betroffen. Seit einigen Jahren setzen die Unternehmen daher verstärkt auf Ausbildung (VDKF 2021). Der Auszubildendenstand für Mechatroniker/innen für Kältetechnik lag im Berichtszeitraum 2020 bei 4.658 (2019: 4.519) männlichen und 98 weiblichen (2019: 100) Auszubildenden. Etwa die Hälfte der bundesweit rund 3.000 Unternehmen im Bereich Kälteanlagenbau bildet auch aus. Im Vergleich zum Vorjahr konnte die Zahl der Auszubildenden noch einmal erhöht werden. Weitere Anstrengungen haben die Berufsverbände dahingehend unternommen, die Ausbildungsgänge zu modernisieren und damit attraktiver zu gestalten. Beispielsweise wird von der Europäischen Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung (ESaK) ein dualer Bachelorstudiengang in den Fachrichtungen Kältesystemtechnik und Klimasystemtechnik angeboten. Ferner soll der Beruf durch Kampagnen noch stärker bekannt gemacht werden (Häken 2020).

Mit einer bedarfsgerechten Modernisierung der Ausbildungsgänge reagiert die Branche auf den Fachkräftemangel.

3.4.2 (Forschungs-)Förderung von Kälte- und Klimatechnologien

Die Förderung im Bereich Kälte- und Klimatechnologien auf Bundesebene erfolgt im Wesentlichen durch Zuschüsse, Förderung von Forschungsvorhaben sowie Unterstützung von Netzwerken und Organisationen:

- *Zuschüsse für die Investition in Kälte- und Klimaanlage:* Das BMUV gewährt im Rahmen der NKI Zuschüsse für den Einsatz von energieeffizienten Kälte- und Klimaanlage, die mit natürlichen Kältemitteln betrieben werden (BMWK 2022b). Die Kälte-Klima-Richtlinie⁸ trat 2008 in Kraft und wurde seitdem mehrmals novelliert und der Entwicklung auf dem Kältemarkt angepasst (UBA 2022c). Ziel ist es, durch Investitionsanreize den Einsatz von Klimaschutztechnologien in der Kälte- und Klimatechnik zu stärken und langfristig bis 2050

⁸ Richtlinie zur Förderung von Kälte- und Klimaanlage mit nicht-halogenierten Kältemitteln in stationären und Fahrzeug-Anwendungen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (Kälte-Klima-Richtlinie) vom 27.8.2020



weitgehend treibhausgasneutral zu werden. Zuletzt wurde insbesondere der Anwendungsbereich auch auf kleinere Anlagen ausgedehnt sowie die Vielfalt der förderfähigen Geräte erhöht (Liehm/Hoffmann 2021).

- *Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik*: Im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Innovationen für die Energiewende“ fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) den Aufbau der neuen „Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik“. Dafür stellt das Ressort von März 2021 bis April 2025 etwa 15 Mio Euro bereit. Das Projekt wird von der Professur Technische Thermodynamik der Technischen Universität Chemnitz koordiniert.⁹ Forschungspartner sind das Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden sowie das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Freiburg (Bundesregierung 2022).
- *Innovationsnetzwerk Kälteanlagen & Speichertechnik (INKaS)*: Das INKaS ist ein thematisches Leitnetzwerk des Bundeswirtschaftsministeriums und unterstützt Anwender aus Industrie und Gewerbe, dem Wohnungsbau sowie Kommunen bei der Vorplanung und Implementierung innovativer, kosteneffizienter Anlagentechnologien. Dazu bietet INKaS u. a. ein kostenfreies Energieaudit zur Identifizierung von Energieeinsparpotenzialen bei Gebäuden und Prozessen an.¹⁰
- Im Rahmen des 7. *Energieforschungsprogramms* fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima verschiedene Forschungsschwerpunkte, in denen auch Kältetechnik adressiert wird (BMWE 2021; BMWK 2022a) :
 - *Forschung im Bereich Gebäude und Quartiere mit Versorgung mit Wärme und Kälte*: Kälteversorgungssysteme sollen wirtschaftlich und ökologisch verbessert werden. Zu den Forschungsschwerpunkten zählen etwa innovative Konzepte zur Betriebsführung von Wärme- und Kältenetzen, innovative Wärme- und Kälteerzeugungstechniken im Anlagenverbund, innovative Messtechniken für Wärme- und Kältenetze, Maßnahmen zur Transformation und Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung im Bestand, die Umsetzung von ambitionierten, innovativen Wärme- und Kälteversorgungskonzepten sowie die technologieoffene, multiple Einspeisung in Wärme- und Kältenetze (EFH 2022).
 - *Forschung im Bereich Prozesswärme*: Weiter zielt das BMWK im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms auf die Senkung des Primärenergieverbrauchs und der energiebedingten CO₂-Emissionen in den Sektoren Industrie und Gewerbe, die durch unterschiedliche Wege erreicht werden kann. Mit Blick auf Kälte geht es um die Bereitstellung und Nutzung von Prozesswärme bzw. -kälte, etwa industrielle Kälteerzeugung und Kältetechnik in Industrie und Handel, oder die Optimierung der Wärme- und Kälteerzeugung mit Strom.
 - *Geothermie*: Für die Erdwärmenutzung kommen je nach Tiefenlage (oberflächennah, mitteltief, tief), Geologie und Anwendungszweck verschiedene

⁹ <https://ketec.online/foerderung> (5.4.2023)

¹⁰ www.inkas-netzwerk.de/startseite.html (6.4



Technologien zum Einsatz. Der Ausbau der geothermischen Wärme- und Kältebereitstellung ist ein strategisches Ziel für eine zukünftige Energieversorgung. Auch sollen Wärme- und Kältespeicher weiterentwickelt werden, beispielsweise Untergrundspeicher als saisonale wie auch als situative Speicher bei kurzzeitigen Energieüberschüssen.

- *Deutscher Kältepreis*: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) hat im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) bislang sechs Mal innovative Unternehmen und Personen ausgezeichnet, die besonders emissionsarme Lösungen in der Kälte- und Klimatechnik entwickelt haben. Der Deutsche Kältepreis wurde zuletzt 2018 verliehen. Er ist mit insgesamt 52.500 Euro dotiert (Deutscher Kältepreis¹¹ und FU Berlin 2017).

Auf europäischer Ebene wurden Forschung und Entwicklung im Bereich (Wärme- und) Kälteerzeugung bereits im 7. Rahmenprogramm (FP7) unterstützt und ist auch im Nachfolgeprogramm Horizon 2020 ein wichtiger Schwerpunkt mit verschiedenen Strategien und Maßnahmen:

- Die *Richtlinie (EU) 2018/2001*¹² enthält Bestimmungen zur Beschleunigung der Entwicklung erneuerbarer Energien im Wärme- und Kältesektor, insbesondere durch eine stärkere politische Priorisierung dieses Sektors durch zu erreichende Zielvorgaben. Der Vorschlag zur Novellierung der Richtlinie (EU) 2018/2001 von 2021 enthält eine Verschärfung der Zielvorgaben für Wärme und Kälte (Artikel 23) sowie für Fernwärme und Fernkälte (Artikel 24).
- Die *EU-Strategie für den Wärme- und Kältesektor* (EK 2016) von 2016 ermöglichte einen ersten Überblick über den Energieverbrauch und den Brennstoffmix des Wärme- und Kältesektors in den wichtigsten Endverbrauchssektoren Gebäude



11 www.co2online.de/ueber-uns/kampagnen-projekte/deutscher-kaeltepreis/ (9.12.2022)

12 Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung) vom 7.6.2022



und Industrie. In der Strategie wurden zudem Maßnahmen und Instrumente benannt. Diese wurden in dem 2019 verabschiedeten Paket „Saubere Energie für alle Europäer“ umgesetzt und beziehen sich auf die Steigerung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz.

- Des Weiteren wurde von der EU-Kommission eine Reihe von Studien über den Wärme- und Kältesektor in Auftrag gegeben, die im Juni 2022 veröffentlicht wurden und deren Erkenntnisse in neue Gesetzesinitiativen einfließen sollen. In Bezug auf Kälte waren das:
 - › *Studie über Fernwärme und -kälte* zum Überblick über den Markt und rechtliche Rahmenbedingungen auf Basis von zehn Fallstudien (EK 2022a)
 - › Studie über einen Fahrplan zur politischen Unterstützung der *Dekarbonisierung von Wärme und Kälte* mit Empfehlungen für politische Maßnahmen für die Raumheizung in Gebäuden und die Prozesswärmeindustrie sowie eine Metastudie über wichtige Literatur (EK 2021b)
 - › Studie über *erneuerbare Kühlung* mit einer Analyse für den am 14. Dezember 2021 verabschiedeten Delegierten Rechtsakt (Delegated Act) über die Methodik zur Anrechnung erneuerbarer Energien in der Kühlung und Fernkälte (EK 2022c)
- Die Europäische Kommission (EK 2021a) hat am 14. Dezember 2021 eine neue *Methode zur Berechnung der Menge an erneuerbarer Kälte und Fernkälte* veröffentlicht. Es wird dargelegt, wie Kälte auf das Gesamtziel eines Mitgliedstaats für erneuerbare Energien angerechnet werden kann und wie diese zu den sektoralen Zielen der Richtlinie 2018/2001/EU beiträgt.
- Der *Investors Dialogue on Energy* ist eine Stakeholderplattform, die Expert/innen aus dem Energie- und Finanzsektor aller EU-Länder zusammenbringt, um Finanzierungsstrategien und -instrumente im Zusammenhang mit dem europäischen Green Deal zu verbessern und zu mobilisieren. Eine der fünf Arbeitsgruppen (WG 4 Heating & Cooling) beschäftigt sich mit Heizen und Kühlen (EK 2022b).
- Die *European Technology and Innovation Platform on Renewable Heating and Cooling*¹³ bringt verschiedene Stakeholder aus den Bereichen, Biomasse, Geothermie, Solarthermie und Wärmepumpen zusammen, um erneuerbare Energien für Wärme und Kühlung zu nutzen.
- Einen *Überblick über Forschung und Entwicklung zu Wärme und Kühlung im Bereich Smart Energy Systems* innerhalb von Horizon 2020 bietet der Überblicksartikel von Saletti et al. (2020).

3.4.3 Forschungslandschaft: Themengebiete, Disziplinen, Publikationsintensität

Zur Charakterisierung der Forschungslandschaft im Bereich nachhaltiger Kühllösungen wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen analysiert. Näher

¹³ www.rhc-platform.org/ (9.12.2022)



betrachtet wurden die Publikationsstärke von Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern, häufig bearbeitete Themengebiete sowie publikationsstarke Forschungsinstitutionen.

Methodische Vorgehensweise Publikationsanalyse

Für die Analyse wissenschaftlicher Fachartikel wurde die Publikationsdatenbank „Scopus“¹⁴ genutzt und alle zwischen 2015 und 2021 publizierten Fachartikel wurden berücksichtigt, die im Titel und/oder in der Kurzzusammenfassung den Begriff Cooling System (Kühlanlagen, Kühlungssysteme) tragen (Zeitpunkt der Abfrage 30.9.2022).

Kühlanlagen bzw. Kühlungssysteme decken nicht die gesamte Bandbreite des formulierten Begriffsverständnisses von nachhaltiger Kühlung ab. Technische Systeme stellen dennoch eine wichtige Facette nachhaltiger Kühllösungen und somit ein relevantes Forschungsfeld dar. Die methodische Vorgehensweise per Eingrenzung über diesen Begriff wurde deshalb gewählt, weil nachhaltige Kühlung bislang noch kein eigenständiges und klar abgrenzbares Forschungsfeld ist, das sich mithilfe von spezifischen, auf das Forschungsgebiet zugeschnittenen Suchwörtern eingrenzen ließe.

Der in dieser Analyse gewählte Begriff Cooling System hingegen wird insbesondere für die Beschreibung von Kühlanlagen bzw. Kühlungssystemen genutzt und ist damit sehr genau. Alternative Suchbegriffe wie Refrigeration, Air Conditioning oder Cooling bilden jeweils nur Teilbereiche der Forschungslandschaft ab. Eine Datenbankabfrage mit Cooling System sollte folglich den Suchraum zum Thema Kühlungssysteme vergleichsweise scharf abbilden. Dennoch ist selbst bei einem sehr eindeutigen Suchbegriff wie Cooling System davon auszugehen, dass bei dem Versuch, die Grundgesamtheit aller Publikationen zu erfassen, Lücken bleiben.

Inwieweit Kühlsysteme in Verbindung mit dem Aspekt Nachhaltigkeit behandelt wurden, wurde in einem weiteren Analyseschritt geprüft. Dazu wurden die Themengebiete Umweltwissenschaften sowie Geowissenschaften und Planetologie als Restriktionen gewählt, da vermutet werden kann, dass Querbezüge zum Themenbereich Nachhaltigkeit bestehen, beispielsweise in den Themen Erderwärmung, Klimawandel oder Klimafolgenanpassung.

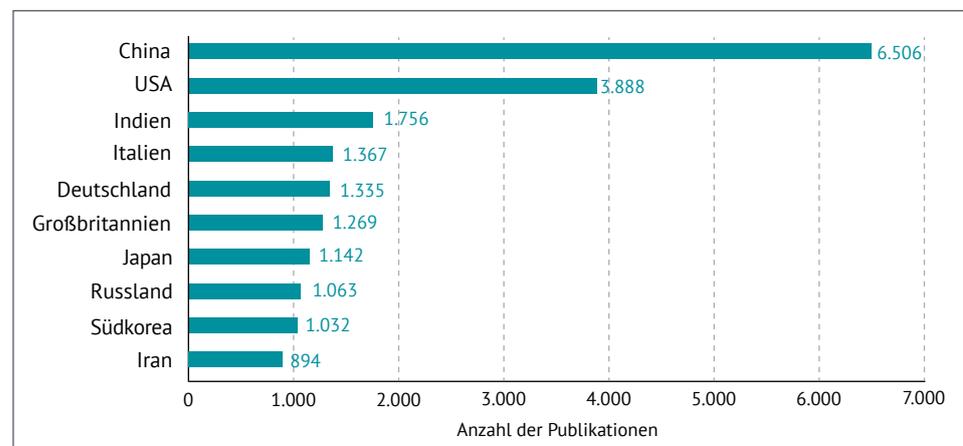
¹⁴ Scopus ist eine multidisziplinäre Literaturdatenbank, die einen (Voll-)Zugriff auf mehr als 75 Mio Peer-Review-Fachartikel und Konferenzbeiträge aus den Naturwissenschaften, Technik, Medizin, Sozialwissenschaften sowie Kunst- und Geisteswissenschaften ermöglicht.



Deutschland liegt bei den Publikationen zu Kühlanlagen bzw. Kühlsystemen im weltweiten Vergleich an fünfter Stelle.

Im untersuchten Zeitraum von 2015 bis 2021 wurden 26.257 wissenschaftliche Publikationen im Bereich Kühlanlagen/Kühlungssysteme veröffentlicht. Zu den publikationsstärksten Staaten (Abb. 7) zählen China mit 6.506 (24,5%) Veröffentlichungen, gefolgt von den USA mit 3.888 (14,8%) an zweiter und Indien mit 1.756 (6,6%) an dritter Stelle. Mit 1.335 Veröffentlichungen (5%) liegt Deutschland an fünfter Stelle.

Abb. 7 Top 10 der Staaten mit Publikationen im Bereich Kühlanlagen/Kühlungssysteme (Cooling Systems)



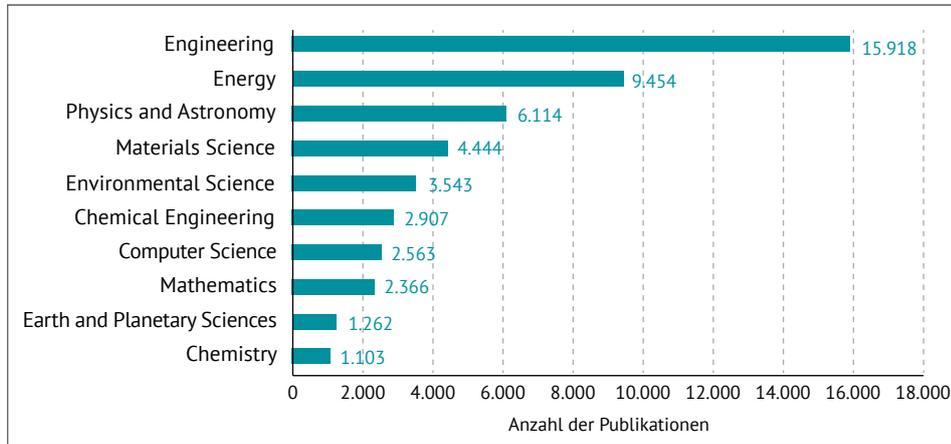
Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

Im nächsten Schritt wurde untersucht, welchen wissenschaftlichen Kategorien die Publikationen zugeordnet sind, was als ein Anhaltspunkt für ihre thematische Ausrichtung gelten kann. Abbildung 8 zeigt die zehn Themenfelder, in denen international am häufigsten im Bereich Kühlanlagen/Kühlungssysteme publiziert wurde. Als fünftstärkstes Themenfeld wurden in den Umweltwissenschaften (Environmental Science) insgesamt 3.543 Publikationen (13,5%) veröffentlicht.

Eine Betrachtung der Ergebnisse für Deutschland (Abb. 9) zeigt, dass von den insgesamt 1.335 Publikationen mehr als die Hälfte (791 Veröffentlichungen) dem Themenfeld Ingenieurwissenschaften zugeordnet ist. An fünfter Stelle liegt das Themenfeld Mathematik (128), das anders als in internationaler Perspektive einen höheren Rang einnimmt. Ähnlich hoch ist mit 127 die Anzahl der Publikationen im Themenfeld Umweltwissenschaften. Sowohl national als auch international liegt das Themenfeld Materialwissenschaften (300) an vierter Stelle. Dies könnte bedeuten, dass Forschungen im Bereich Materialwissenschaften auch in Deutschland ein wesentlicher Bestandteil bei der Weiterentwicklung von Kühlsystemen sind. Zudem könnte die Anzahl der Publikationen im Themenfeld Umweltwissenschaften darauf hinweisen, dass Kühlsysteme in Deutschland im Zusammenhang mit umweltrelevanten Aspekten diskutiert werden.

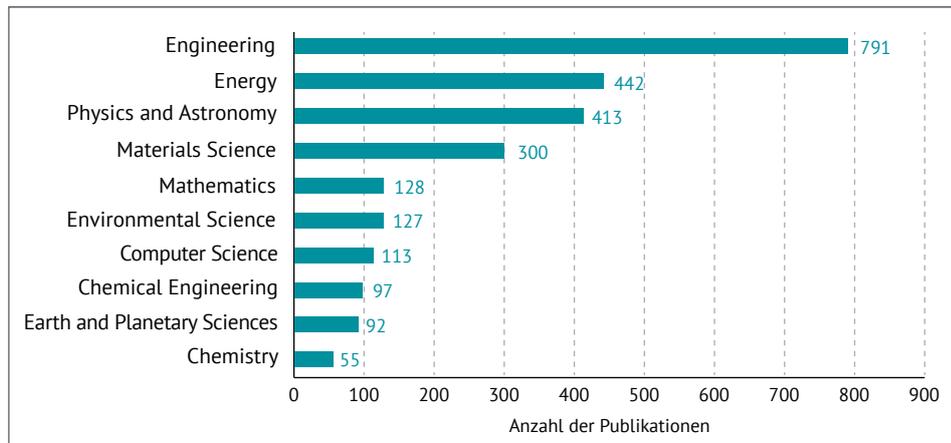


Abb. 8 Top 10 der Themenfelder mit Publikationen im Bereich Kühlanlagen/ Kühleysteme – international



Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

Abb. 9 Top 10 der Themenfelder mit Publikationen im Bereich Kühlanlagen/ Kühleysteme – Deutschland



Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

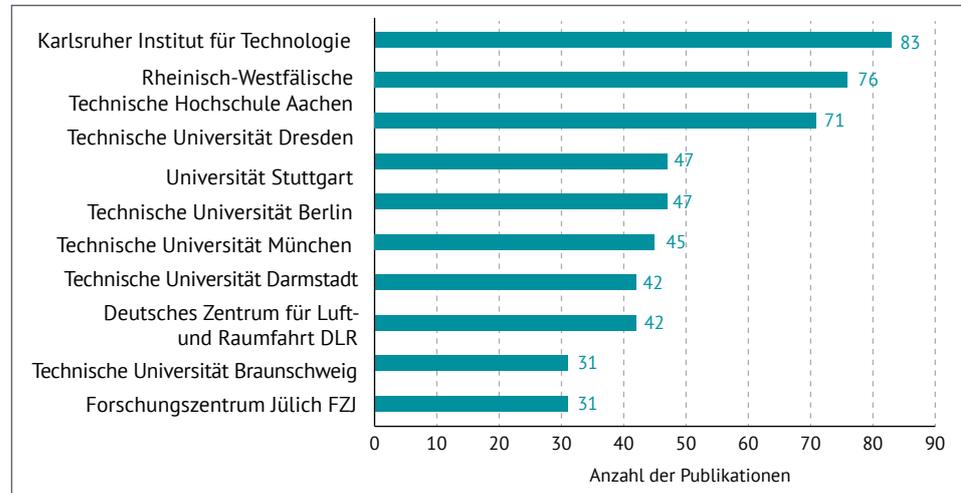
Ein Blick auf die publikationsstärksten deutschen Akteure zeigt ein breit gefächertes Bild von Wissenschaftsakteuren im Bereich Kühlanlagen/Kühleysteme (Abb. 10). Zumeist handelt es sich um Universitäten, lediglich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und das Forschungszentrum Jülich sind als außeruniversitäre Forschungseinrichtungen unter den zehn publikationsstärksten Akteuren in Deutschland vertreten.

Die bisherigen Analyseschritte haben noch keinen direkten Fokus auf nachhaltige Kühlverfahren gelegt. Eine direkte Suche nach der Begriffskombination Sus-

Deutschland publiziert zum Thema Kühlanlagen häufig in den Ingenieurwissenschaften, die für die Entwicklung von Kühleystemen besonders relevant sein dürften.



Abb. 10 Publikationsstärkste Institutionen im Bereich Kühlanlagen/Kühlungssysteme in Deutschland



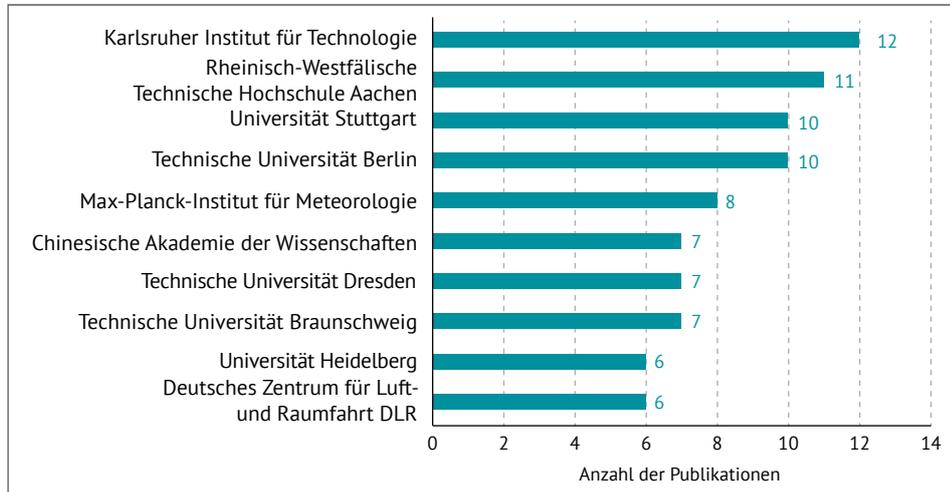
Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

tainable und Cooling ergab lediglich 110 Publikationen weltweit zwischen 2015 und 2021. Daher wurde eine Analyse der Publikationen vorgenommen, die in den beiden Themenfeldern Umweltwissenschaften (Environmental Science) und Geowissenschaften und Planetologie (Earth and Planetary Sciences) veröffentlicht wurden. Im Untersuchungszeitraum wurden weltweit 4.251 Publikationen verzeichnet. Mit 199 Veröffentlichungen belegt Deutschland hier den sechsten Platz, während die ersten drei Plätze von China (963), den USA (652) und Indien (292) belegt werden.

Ein Blick auf die in Deutschland erschienenen Publikationen zeigt, dass, auch mit der Eingrenzung auf die beiden genannten Themenfelder, größtenteils Universitäten zu den publikationsstärksten Akteuren gehören (Abb. 11). Mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie, der Universität Heidelberg und der Chinesischen Akademie der Wissenschaften tauchen Akteure auf, die ohne eine Einschränkung der Themenfelder nicht unter den zehn publikationsstärksten Akteuren waren.



Abb. 11 Publikationsstärkste Institutionen im Bereich Kühlanlagen/Kühlungssysteme in Deutschland in den Themenfeldern Umweltwissenschaften und Geowissenschaften/Planetologie



Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

Zusammenfassend kann mit Blick auf die Publikationsanalyse festgestellt werden, dass die Publikationsintensität zu nachhaltiger Kühlung nur näherungsweise analysiert werden kann. Unter der Annahme, dass Publikationen zu Kühlsystemen bzw. Kühlungsanlagen in den Themenfeldern Umweltwissenschaften sowie Geowissenschaften und Planetologie Bezüge zu Nachhaltigkeit aufweisen, könnten immerhin rund 16 % (4.251) der zwischen 2015 und 2022 publizierten Artikel und Beiträge zum Thema nachhaltiger Kühlung gezählt werden. Ausgeklammert aus der Scopus-Analyse wurde zudem der Bereich passiver Kühlösungen bzw. urbaner Kühlösungen, da diese Lösungen auf die Vermeidung des Kühlbedarfs abzielen und den Einsatz bzw. den Betrieb technischer Systeme reduzieren sollen.





4 Innovationsbereiche

Um eine nachhaltige Kühlung angesichts steigender Kühlbedarfe zu erreichen, bieten sich Innovationen in verschiedenen Bereichen an. Im Innovationsbereich urbaner Kühllösungen sollen durch städtebauliche und architektonische Maßnahmen, d.h. durch Gebäude- und Quartiersgestaltung, zukünftige oder bereits entstandene Kühlbedarfe verringert werden. Daneben existieren nichttechnische Innovationen, die dazu beitragen können, Kühlbedarfe zu reduzieren. Und nicht zuletzt können aktive Kühlmethode aufgrund ihrer Funktionsweise einen Beitrag zur nachhaltigen Kühlung leisten, indem Energiebedarf und Emissionen reduziert werden.

4.1 Urbane Kühllösungen

Städte, insbesondere solche mit hoher Bevölkerungsdichte, können zunehmend zu Hitzeinseln werden (Kap. 2.2). Urbane Kühllösungen können sowohl die Innenraum- als auch die Außentemperaturen in Städten senken, indem der Wärmeeintrag reduziert wird. Da sich Städte hinsichtlich ihrer Geografie, ihrer Größe und räumlichen Anordnung, der Gebäudetypen und Bauweisen sowie der klimatischen und meteorologischen Gegebenheiten voneinander unterscheiden, sind individuell angepasste Strategien zum Umgang mit zunehmender Hitze erforderlich, bei denen die verschiedenen verfügbaren Lösungen, angepasst an die lokalen Gegebenheiten, miteinander kombiniert werden (ESMAP 2020a). Nachfolgend werden daher verschiedene Lösungsansätze exemplarisch vorgestellt. Einen ersten Überblick bietet Tabelle 3.

Tab. 3 Unterscheidung von Lösungsansätzen urbaner Kühlung

	Beschreibung	Beispiele im Kontext Sustainable Cooling
kühle Dächer, Gehwege und Wände	<ul style="list-style-type: none">• stadtweite Begrünung von Dachflächen und Fassaden• Verwendung heller Farben für Dächer, Hauswände und Gehwege• Unterstützung von Verdunstungskühlung auf entsiegelten (Verkehrs-)Flächen durch Verwendung geeigneter Materialien bzw. Grünflächen• Reduzierung von versiegelten Flächen, Verbot von Schottergärten• primärer Zweck: Senkung von Außen-/Umgebungslufttemperatur durch Reflexion von Sonnenlicht und Maximierung von Wärmeabstrahlung	<ul style="list-style-type: none">• Erhöhung der Sonnenreflexion durch hellere Farben kann die durchschnittliche Außentemperatur um 0,3 bis 1 °C absenken (Santamouris 2014).• Dachbegrünung hat sowohl einen Verschattungseffekt als auch eine kühlende Wirkung in der unmittelbaren Umgebung (Brune et al. 2017, S.12 f.).• Dachbegrünung kann die Lufttemperatur um 0,3 bis 3 °C reduzieren (Santamouris 2014).• Begrünte Dächer tragen auch zur Kühlung von Gebäuden, insbesondere Dachgeschossen bei. Begrünte Fassaden haben Vorteile für alle Geschosse (Brune et al. 2017, S.21 ff.).• Beispiele für Dach- und Fassadenbegrünung in Deutschland werden u. a. in DIFU 2020 und DIFU 2021 aufgeführt.



Bäume, Parks und Grünflächen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau der grünen Infrastruktur durch Schaffung bzw. Erhalt von Baumbeständen entlang von Verkehrswegen, durch Schaffung bzw. Erhalt von Parks und sonstigen Grünflächen • primärer Zweck: Senkung von Außen-/Umgebungslufttemperatur durch Schaffung von Schatten, Reflexion von Hitze und Verdunstungskühlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bäume entlang von Straßen können einen Kühleffekt zwischen 0,4 und 3 °C entwickeln. Am stärksten ist der Effekt im Umkreis von 30 m um den jeweiligen Baum (McDonald et al. 2016). Beispiele für Modellvorhaben zur Schaffung von mehr grüner Infrastruktur in deutschen Städten finden sich u. a. in BBSR 2021.
Luft- und Wasserkühlung	<ul style="list-style-type: none"> • städtebauliche Maßnahmen zur Maximierung der natürlichen Windströme und Minimierung von Stauwärme zur Entsiegelung von Flächen sowie zur Schaffung von Wasserflächen • primärer Zweck: Senkung von Außen-/Umgebungslufttemperatur durch Verdunstungskühlung und Windkühlung 	<ul style="list-style-type: none"> • In Singapur konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1,5 m/sec eine Verringerung der Lufttemperatur um 2 °C zur Folge hatte (ESMAP 2020a). • Auch in deutschen Städten werden Luftleitbahnen bzw. Frischluftschneisen bei der Planung von Stadtquartieren berücksichtigt, so in Soest und Bochum (Großmann/Sinning 2022).
Quartierskälte	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlung mehrerer Gebäude über eine zentrale Anlage zur Kälteerzeugung und ein Rohrleitungssystem • Integration in Fernwärmenetze sowie Nutzung von Abwärme möglich • Nutzung natürlicher Kühlung durch See- und Flusswasser • primärer Zweck: effiziente Deckung des Kühlbedarfs mehrerer Gebäude 	<ul style="list-style-type: none"> • Beispiele für Quartierskältesysteme finden sich im In- (Berlin) und Ausland (Dubai, Wien). Die erhofften Effekte sind Einsparung von Energie sowie Reduktion der CO₂-Emissionen (Futurezone 2020; Hartley 2018). Auch eine Integration von Fernwärme- und Fernkältenetzen ist möglich, wie das Beispiel der Stadt München zeigt (Neff 2022).
Kühlzentren	<ul style="list-style-type: none"> • öffentliche Räume, beispielsweise Bibliotheken, Sport- und Schwimmhallen, Gemeindezentren o. ä., in denen eine thermisch komfortable Umgebung zugänglich ist • überwiegend Deckung des Kühlbedarfs mit (zentralen) Klimaanlage • primärer Zweck: Schutz vulnerabler Gruppen vor hohen Temperaturen und extremer Hitze 	<ul style="list-style-type: none"> • Bislang fehlen in Deutschland Beispiele für derartige Einrichtungen.
Innenräume	<ul style="list-style-type: none"> • bauliche Maßnahmen zur Verschattung (Außenjalousien, Rollläden, Schiebeelemente, Sonnenschutzverglasung etc.) • Durchführung für Neu- und Bestandsbauten • primärer Zweck: Verringerung des Wärmeeintrags und damit des Kühlbedarfs von Innenräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Bauliche Maßnahmen können erhebliche Energieeinsparpotenziale aufweisen. In Dubai konnte beispielsweise gezeigt werden, dass ca. ein Viertel der Energie im Gebäudebereich durch Nutzung passiver, nichtmechanischer Kühllösungen eingespart werden konnte (ESMAP 2020a).

Eigene Zusammenstellung

4.1.1 Konzept der klimaangepassten Stadt

Als Alternative zum Einsatz von konventionellen, aktiven Kühlungstechnologien wird seit Ende der 2000er Jahre zunehmend das Konzept der klimaangepassten Stadt diskutiert und umgesetzt, das sich u. a. am Leitbild einer Stadt mit ausreichend Frischluftkorridoren orientiert.



Städte sind stärker als das Umland von Hitze betroffen. Da sich Städte nachts in weitaus geringerem Maß als das Umland abkühlen, weisen sie im Vergleich zum Umland zumeist eine höhere Sterblichkeitsrate bei Hitzewellen auf. Die tatsächliche Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Land hängt von einer Reihe von Faktoren wie der Größe und der geografischen Lage der Stadt, dem Bodenversiegelungsgrad, den Emissionen aus Abwärme, der Luftverunreinigung und der Dichte der bebauten Flächen ab (Lózan et al. 2019, S.11 f.). Vor allem dicht bebaute Innenstädte mit wenig Stadtgrün kühlen sich nachts kaum ab (Kurmann/Kellerhoff 2020). In asiatischen und australischen Städten nutzen teils über 80% der Haushalte Klimaanlage, was nicht nur – wie beschrieben – einen negativen Effekt auf die Treibhausgasemissionen hat, sondern durch die plötzlich auftretenden Laständerungen im Stromnetz zu lokalen Stromausfällen führen kann. Zudem verschärfen Klimageräte den Hitzeinseleffekt in Städten, indem sie Wärme aus der Wohnung in die ohnehin überhitzte Stadt befördern und selbst zusätzliche Wärme abstrahlen (Kurmann/Kellerhoff 2020).

Das Umland hat für die klimaangepasste Stadt eine wichtige Funktion als Lieferant kühler und schadstoffarmer Luft. Aufgrund vorhandener Bauwerke ist eine ideale Luftzirkulation in Städten im Nachhinein jedoch schwer herstellbar. Auch gewünschte Verdichtungen im Hinblick auf den Wohnungsbau stehen oftmals in Konflikt zu den Erfordernissen einer möglichst ungehinderten Luftzirkulation. Ein Lösungsansatz, um Verdichtung und Abkühlung in Einklang zu bringen, ist die intensivere Begrünung z.B. von Hinterhöfen, Fassaden und Dächern unter Einsatz der beschriebenen passiven Kühlkonzepte, ebenso das Anlegen von Parks auf Konversionsflächen. Im Gegensatz zu versiegelten Flächen bewirkt die Sonnenenergie auf begrünten Flächen Verdunstung und entsprechend Verdunstungskälte und trägt daher weniger stark zur Erwärmung bei (Kurmann/Kellerhoff 2020). Nachfolgend werden die einzelnen Bestandteile einer klimaangepassten Stadt im Detail erläutert, um die jeweiligen Einzelmaßnahmen und ihre Wirkungen darzustellen.

Klimaangepasste Städte zeichnen sich durch ausreichend Frischluftkorridore, Luftzirkulation und kühle, schadstoffarme Luft aus.

4.1.2 Kühle Dächer, Gehwege und Wände

Ein Ansatz, Temperaturen in Städten zu senken, ist die Erhöhung des Rückstrahlvermögens von Oberflächen. Infrage kommende Oberflächen sind Wände bzw. Fassaden, Dächer und Verkehrswege (Straßen-, Fuß- und Radwege). Weiterhin ist die Entsiegelung von Flächen ebenso eine Maßnahme wie die Begrünung von Dachflächen und Fassaden.

Helle Farben für Dächer, Gebäudewände und Gehwege haben einen temperatur-senkenden Effekt, indem sie Sonnenlicht reflektieren und Wärmeabstrahlung maximieren (Hartley 2018). Dadurch wird die Aufwärmung der Oberfläche (Wärmeabsorption) und der Umgebungsluft verringert (ESMAP 2020a, S.22). Dieses



Prinzip ist seit Jahrhunderten von weißgetünchten Häusern bekannt – etwa aus dem Süden Europas und afrikanischen Staaten (ESMAP 2020a, S.22). Während dunkle Dachflächen nur rund 20% des eintreffenden Sonnenlichts reflektieren, können weiße Dachflächen zwischen 70 und 80% des Sonnenlichts zurückstrahlen. Sie sind durchschnittlich zwischen 28 und 36 °C kühler als dunkle Dachflächen (GCCA/ R20 Regions of Climate Action 2012, S. 11).

Auch Begrünung oder die Verwendung von unterschiedlichen Materialien kann isolierende Schichten erzeugen. So konnten Hausdächer in der indischen Stadt Mumbai beispielsweise mit lokal verfügbaren Materialien wie Kunststoffplatten, Schaumstoffplatten und Aluminiumfolie schichtweise abgedeckt werden, um die Erwärmung zu verringern (Hartley 2018, S.5 unter Verweis auf Gadgil 2017). Ein ähnliches Projekt wurde in der indischen Stadt Ahmedabad durchgeführt, wobei eine Dachbeschichtung aus Verpackungsmaterialien und landwirtschaftlichen Abfallprodukten verwendet wurde (ESMAP 2020a, S.29).

Verkehrswege bzw. -flächen wie Straßen, Rad- und Fußwege sowie Parkplätze stellen ebenfalls Flächen dar, deren Aufhellung einen kühlenden Effekt haben kann (Hartley 2018). Verkehrswege bzw. -flächen können zwischen 20 und 66% der Fläche einer Stadt ausmachen (ESMAP 2020a, S.33). In Gegenden mit hoher Luftfeuchtigkeit können Bodenbeläge eingesetzt werden, die einen Wasserrückhalt ermöglichen und zur Verdunstungskühlung beitragen. Auch die gleichzeitige Verschattung mit Bäumen kann den kühlenden Effekt unterstützen. Eine Entsiegelung von Flächen trägt zudem zum besseren Regenwassermanagement bei.



Eine Möglichkeit, hellere Oberflächen zu erzeugen, ist die Verwendung hellerer Materialien, also beispielsweise hellere Gesteinsmischungen für den Asphalt oder den Beton (ESMAP 2020a, S.33 ff.) sowie das Auftragen zusätzlicher heller Beschichtung. In der US-amerikanischen Stadt Phoenix beispielsweise gehören aufgehellte Verkehrsflächen zu einem Bündel an Maßnahmen, um mit steigenden Temperaturen umzugehen. Die Oberflächentemperatur der mit einem reflektierenden Material behandelten Verkehrswege konnte um ca. 6 °C¹⁵ gesenkt werden (Peters 2022). Auch in Bern und Zürich wurde im Rahmen von Forschungsprojekten mit hellen Straßenbelägen experimentiert und es konnte ein Absinken der Oberflächentemperatur um bis zu 12 °C ermittelt werden (Titz 2022). Allerdings zeigte sich in den genannten Beispielen aus den USA und der Schweiz, dass die Lebensdauer diese Straßenbeläge begrenzt war und Beschichtungen bzw. Farben regelmäßig erneuert werden mussten – im Falle der Stadt Phoenix sogar alle 2 Jahre (Titz 2022). Weiterhin verursachen innovative Straßenbeläge, Beschichtungen und Farben auch höhere Baukosten.

Aufgehellte Oberflächen können an Fassaden, auf Dächern und auf Verkehrswegen erzeugt werden und so eine kühlende Wirkung entfalten.

Gebäudewände stellen ebenfalls Flächen dar, die mittels Verwendung geeigneter Materialien und heller Farben oder Begrünung kühlende Effekte haben können. Infrage kommt beispielsweise der Einsatz weißer Fliesen, wie sie bei den Regierungsgebäuden der indischen Stadt Ahmedabad verwendet werden (Hartley 2018, S.6). Andere innovative Ansätze sollen eine einfachere Umgestaltung von Bestandsbauten ermöglichen. Ein solcher Ansatz stellt ein in den USA an der Columbia University entwickeltes weißes Polymer dar, das ähnlich wie eine Fassadenfarbe aufgebracht werden und Wassertropfen aufnehmen kann. Wenn diese Wassertropfen verdunsten, bleiben kleinste Luftlöcher zurück, die das Reflexionsvermögen der Beschichtung erhöhen und Gebäude kühlen können (Mandal et al. 2018).

Ein gesteigertes Reflexionsvermögen von Dachflächen und Verkehrswegen kann dazu beitragen, das gesamte städtische Rückstrahlvermögen von Sonnenlicht zu erhöhen. Der dadurch verringerte Kühlbedarf unterstützt die Vermeidung von CO₂-Emissionen (Hartley 2018, S.6).

Durch *stadtweite Begrünung von Dachflächen und Fassaden* kann die Lufttemperatur um bis zu 3 °C gesenkt werden (ESMAP 2020a, S.14). Die vollständige Begrünung von Fassaden führt zur Verschattung, Reflexion des Sonnenlichts sowie zu kühlerer Luft durch Verdunsten von Wasser über die Blätter der Pflanzen (NABU 2021). Da Fassaden im Vergleich zu Dächern eine größere Fläche darstellen, ist die Begrünung von Fassaden in Summe effektiver als die Dachbegrünung (Sieker et al. 2019, S.13). In Paris wurden beispielsweise zwischen 2001 und 2020 (PARIS 2020) Hunderte von Wänden bepflanzt, um zu einer Abkühlung der Stadt beizu-

15 12 °F im Original



tragen (Hartley 2018). Bis 2026 sollen außerdem bis zu 170.000 weitere Bäume im Stadtgebiet von Paris gepflanzt werden, um die bislang messbaren Effekte zu verstärken (Masterson 2022).

Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, Fassaden zu begrünen bzw. begrünte Fassaden zu klassifizieren: Je nachdem, ob das Wurzelwerk im Boden oder an der Fassade verankert ist, lässt sich bodengebundene von fassadengebundener Begrünung unterscheiden. Dann gibt es Bepflanzung, die Kletterhilfen benötigt, modular angebracht wird oder als Flächenkonstruktion entsteht (Brune et al. 2017, S. 9 f.; Schmauck 2019, S. 11 f.).

Dach- und Wandflächen können durch Begrünung einen kühlenden Effekt auf ihre Umgebung haben.

Dachflächen haben zwar im Vergleich zu Fassaden eine geringere Fläche, können allerdings immer noch zwischen 30 und 50 % der versiegelten Fläche einer Stadt ausmachen (Brune et al. 2017, S. 6) und bieten daher Flächenpotenziale für die Begrünung. Geeignet sind ebene bis schwach geneigte Dachflächen (Sieker et al. 2019, S. 25). Es gibt unterschiedliche Ansätze, die Begrünung zu realisieren: Eine extensive Dachbegrünung ist durch geringe Anbautiefe und geringen Pflegeaufwand gekennzeichnet und besteht üblicherweise aus Moosen, Gräsern, Sukkulenten und Kräutern. Intensive Dachbegrünung kann grundsätzlich auch als Aufenthaltsort (z. B. als Dachgarten) genutzt werden, zeichnet sich durch verschiedene Pflanzformen wie Sträucher, Bäume und Rasenflächen aus, verursacht dementsprechend allerdings auch einen höheren Pflegeaufwand und stellt höhere Anforderungen an die Statik (Brune et al. 2017, S. 6 ff.; Schmauck 2019, S. 9 f.).

Üblicherweise ist eine Entscheidung zwischen einer Begrünung von Dachflächen und einer Aufhellung selbiger Flächen zu treffen, anders als bei Verkehrswegen, die sich grundsätzlich eher für eine Aufhellung anbieten. Daher ist im Zweifelsfall in Abhängigkeit von lokalen Einflussfaktoren zu ermitteln, welche der beiden Alternativen einen stärkeren positiven Effekt bietet (Phelan et al. 2015). Synergieeffekte können entstehen, wenn begrünte Dächer mit Photovoltaikanlagen (PV) kombiniert werden. Dabei kühlt die Umgebungstemperatur durch Verschattung ab und gleichzeitig erhöht sich der Wirkungsgrad der PV-Anlagen (Brune et al. 2017, S. 29; Köhler et al. 2002; Shafique et al. 2020).

4.1.3 Bäume, Parks und Grünflächen

Bäume, Parks und Grünflächen spielen eine wichtige Rolle bei der Temperaturregulation in Städten, da sie Schatten spenden, Hitze reflektieren und die Luft durch Evapotranspiration kühlen (Hartley 2018). Evapotranspiration bedeutet sowohl eine Verdunstung über Pflanzen (Transpiration) als auch eine Verdunstung über den Boden (Evaporation) (BBSR 2015, S. 38). Die Erhöhung bzw. Erhaltung des Baumbestandes entlang von Straßen kann insbesondere im unmittelbaren Umkreis um die Bäume zur Senkung der Lufttemperatur um bis zu 3 °C



beitragen (ESMAP 2020a, S. 14). In Australien konnte sogar gezeigt werden, dass Baumbestand und Rasenflächen die Oberflächentemperatur während extremer Hitzetage tagsüber um bis zu 6 °C senken konnten (Li 2022). Allerdings konkurrieren Stadtbäume um die knappe innerstädtische Fläche, leiden ggf. unter Trockenstress und bedürfen daher der besonderen Aufmerksamkeit sowohl hinsichtlich des Altbaumbestandes als auch bei der Neupflanzung (Dickhaut et al. 2019).



Die Effekte eines Ausbaus des Baumbestandes in Städten wurde in den USA modelliert. Den Ergebnissen zufolge könnte der Kühlbedarf um bis zu 20 % gesenkt werden, wenn je Gebäude drei Bäume gepflanzt werden und dies in Kombination mit einer Aufhellung der Dach- und Fassadenflächen erfolgt (Hartley 2018). Ein noch stärkerer Kühleffekt lässt sich erzielen, wenn ein heterogener Baumbestand geschaffen wird (Li 2022).

Allerdings kommt es auch bei Strategien der Stadtbegrünung darauf an, wie diese im Detail umgesetzt werden. Unter Umständen kann es zu einem Zielkonflikt zwischen (Ab-)Kühlung einerseits und Luftqualität andererseits kommen. Mittelbar trägt die Erwärmung der Stadt nämlich zu einer besseren Luftqualität bei, da sie durch das Aufsteigen der warmen, schadstoffreichen Luft die Luftzirkulation mit dem Umland antreibt. Durch Bäume in den Straßen könnte das Aufsteigen der warmen Luft eingeschränkt werden, was sich negativ auf die Luftqualität auswirken könnte. Dichte Bepflanzung mit Hecken oder Sträuchern kann ebenfalls die Strömung kühler Luft beeinträchtigen (BBSR 2015, S. 36).

Die grüne Infrastruktur spielt eine wichtige Rolle bei der Kühlung von Städten.



4.1.4 Kühlen mit Wind und Wasser

Städtebauliche Maßnahmen zur *Maximierung der natürlichen Windströme und Minimierung von Stauwärme, zur Entsiegelung von Flächen sowie zur Schaffung von Wasserflächen* (blaue Infrastruktur) tragen ebenfalls zur Senkung der Lufttemperatur bei.

Die *Maximierung der natürlichen Windströme* kann für eine Zufuhr kalter Luft sorgen und Stauwärme minimieren. Eine hohe Gebäudedichte verhindert dies allerdings häufig (Hartley 2018). Die dafür erforderlichen Freiflächen müssen entweder erhalten oder durch Rückbau bestehender Gebäude geschaffen werden (BBSR 2016, S.21, 2021, S.42). Es gibt zahlreiche Einflussfaktoren auf die Windbewegungen in Stadtgebieten. Dazu zählen neben der Gebäudedichte auch die Größe und Höhe von Gebäuden, ihre Ausrichtung sowie die Ausrichtung von Straßen und das Vorhandensein von Frei- und Grünflächen (Busch 2018, S.73). Insbesondere bei Neubauten bzw. Neubaugebieten kann die Gebäudeausrichtung zur Beeinflussung von Luftströmungen mit berücksichtigt werden (BBSR 2012, S.22). Der Luftaustausch wird vom städtischen Umland beeinflusst, d. h., Luftschneisen müssen mit dem Umland verbunden sein. Insbesondere große, zusammenhängende land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen sind für die Entstehung von kalter Luft im städtischen Umland von Bedeutung (Offermann et al. 2022, S.54).

Eine *Entsiegelung von Flächen* stellt eine Möglichkeit dar, die Luft durch Verdunstung zu kühlen, da sie Feuchtigkeit an die Luft abgeben (BBSR 2012, S.10; Offermann et al. 2022, S.54). Die Flächen können beispielsweise in Wasserflächen umgewandelt oder bepflanzt werden. Infrage kommende Flächen in bebauten Stadtgebieten sind (Innen-)Höfe, gewerblich genutzte Flächen und Stellplatzflächen Stellplätze (BBSR 2015, S.36). Allerdings beeinflusst die Verfügbarkeit von Wasser die Kühlleistung der Flächen. Trockene Rasenflächen oder andere mit niedriger Vegetation bepflanzte Flächen sind in ihrer Kühlleistung eingeschränkt (BBSR 2015, S.38).

Wind, Wasserflächen und entsiegelte Flächen spielen eine wichtige Rolle bei der Senkung der Lufttemperatur in Stadtgebieten.

Wasserflächen tragen ebenfalls zur Verdunstungskühlung in Städten bei. Die Effekte einzelner Innovationen, die auf die Nutzung von Regenwasser durch Verdunstungskühlung zurückgehen und die Dach- und Fassadenbegrünung sowie weitere Maßnahmen umfassen, konnten im Rahmen von Fallstudien durch Modellierungen beispielhaft quantifiziert werden (Sieker et al. 2019). Darin wurde die Ebene einzelner Gebäude von Stadtquartieren sowie vom gesamten Stadtgebiet unterschieden. Insgesamt zeigte sich: Regenwasserverdunstung kann im gesamtstädtischen Bereich einen temperatursenkenden Effekt von 0,9 °C haben; in Abhängigkeit der jeweiligen Stadtstruktur bewegt sich der Effekt zwischen 0,5 und 1,3 °C (Sieker et al. 2019, S.55 ff.). Auf Quartiersebene erwiesen sich Fassadenbegrünung und Stadtbegrünung, insbesondere mit Bäumen, als wirksame



Maßnahmen, um Hitzestress über einen längeren Zeitraum zu reduzieren (Sieker et al. 2019, S. 50). Letztlich lassen sich mit Fassaden-, aber auch mit Dachbegrünungen Effekte im Gebäudeinnenbereich erzielen. Die Effekte sind abhängig von der Ausrichtung und der Geschossebene der Innenräume und lassen sich durch Baumbestand um das Gebäude noch verstärken. Auch eine zusätzliche Bewässerung kann den Effekt verstärken. Die für Kühlung erforderliche Energie lässt sich zwischen 10% durch Dachbegrünung und 50% durch Beschattung mit Bäumen reduzieren (Sieker et al. 2019, S.44 ff.). Darüber hinaus sind die Effekte passiver Maßnahmen nur schwer zu quantifizieren, auch hinsichtlich ihrer möglichen Kosten. Allerdings können alle Maßnahmen, die eine Entstehung eines Kühlbedarfs von vornherein vermeiden, hinsichtlich ihres Hebeleffekts als hoch eingeschätzt werden.

4.1.5 Öffentliche Kühlzentren

Neben privaten Wohngebäuden, Büro- und sonstigen nichtöffentlichen Gewerbegebäuden kann eine thermisch komfortable Umgebung für Menschen auch in öffentlichen Kühlzentren bzw. Kühlräumen erzeugt werden. Vor allem bei extremen Temperaturen bzw. Hitzewellen sollen so vulnerable Bevölkerungsgruppen geschützt werden. Dazu zählen beispielsweise ältere oder obdachlose Menschen oder sonstige Personen etwa mit niedrigen Einkommen, deren Wohnumgebungen nicht oder nur unzureichend gekühlt sind. Infrage kommen für die Einrichtung solcher Kühlzentren öffentliche Gebäude, wie Bibliotheken, Sport- und Schwimmhallen, Gemeindezentren, Kirchen, Behörden, Einkaufszentren, Bahnhöfe oder vergleichbare Einrichtungen (B/L-Ad-hoc AG GAK 2017, S.670; Hartley 2018). Während beispielsweise US-amerikanische Städte bereits seit mehreren Jahren solche Kühlzentren einrichten (Hermann 2006; Spiegel Online 2005), fehlen solche Einrichtungen bislang in deutschen Städten (Tagesspiegel 2022). Üblicherweise werden solche öffentlichen Kühlzentren mit – meist zentralen – Klimaanlageanlagen gekühlt.

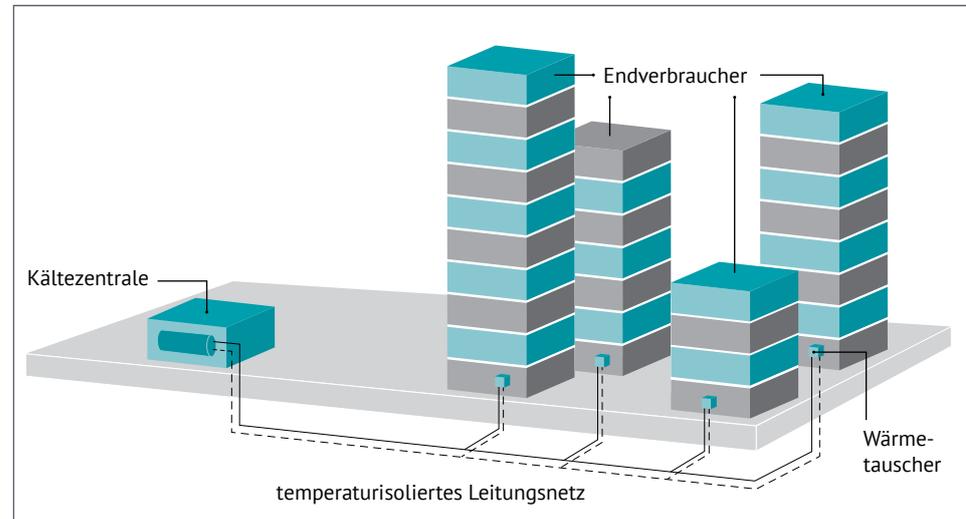
4.1.6 Quartierskälte

Quartiers- bzw. Fernkälte (Abb. 12) stellt einen Ansatz dar, bei dem mehrere Gebäude über eine zentrale Anlage zur Kälteerzeugung und ein Rohrleitungssystem gekühlt werden (Hartley 2018). Als Kühlmittel wird üblicherweise Wasser verwendet, sodass je nach Verfügbarkeit Grund-, Fluss- oder Meerwasser genutzt werden kann. Als Energiequelle für die zentrale Anlage kommt neben fossilen oder erneuerbaren Energiequellen auch Abwärme aus Kraftwerken oder Industrieanlagen infrage (Hartley 2018).

Quartierskältesysteme existierten bereits im 19. Jahrhundert, wobei als Kältemittel Ammoniak oder Solelösungen eingesetzt wurden. Sie wurden zunächst ent-



Abb. 12 Schematische Darstellung eines Quartierskältesystems



Eigene Darstellung nach Hartley 2018

wickelt, um kundenspezifische Kühlbedarfe, z. B. die Kühlung von Lagerhäusern, zu decken. Beispiele für derartige Systeme fanden sich u. a. in den US-amerikanischen Städten Denver, St. Louis und New York (Østergaard et al. 2022, S.2 f.). In den 1960er und 1970er Jahren wurden Fernkältesysteme mit Kompressionskältemaschinen und Wasser als Kühlmittel nicht nur in den USA, sondern auch in Frankreich (Paris), Deutschland (Hamburg; Interview Urbaneck) und Japan (Østergaard et al. 2022, S. 3) eingesetzt. Mit dem Beschluss des Montrealer Protokolls (Kap. 6.2.2) wurden Quartierskältesysteme zunehmend erweitert, um Möglichkeiten natürlicher Kühlung durch See- und Flusswasser zu nutzen (Østergaard et al. 2022, S.3 f.). Um die Jahrtausendwende und mit der zunehmenden Bedeutung nachhaltiger Kühllösungen erfolgte eine zunehmende Integration von Wärmepumpen, Abwärmenutzung und Fernwärmenetzen sowie Wärmespeichern (Østergaard et al. 2022, S.4 ff.).

Es gibt aktuelle nationale und internationale Beispiele für Systeme zur Erzeugung von Fernkälte. So hat die Stadt Dubai das bislang weltweit größte Netzwerk für Quartierskälte entwickelt. Bis 2030 sollen 40% des städtischen Kältebedarfs durch Quartierskälte gedeckt und gleichzeitig der Energieverbrauch der erforderlichen Kältetechnik um 50% gesenkt werden (Hartley 2018). Auch in zwei Stadtteilen von Barcelona gibt es seit 2004 ein mit erneuerbaren Energien betriebenes Fernkältenetz. Zur Kälte- bzw. Wärmebereitstellung wird u. a. die Abwärme aus einer Abfallverwertungsanlage genutzt (Offermann et al. 2022, S. 65). In Wien soll das Fernkältenetz bis 2030 auf rund 50 Kilometer ausgebaut werden und öffentliche Gebäude im Innenstadtbereich mit Kälte versorgen. So sollen bis zu 70% Energie und 50% CO₂ eingespart werden (Futurezone 2020).



Auch in Berlin gibt es eine Kältezentrale, die das Quartier rund um den Potsdamer Platz mit Kälte versorgt. Eingesetzt werden Kompressionskälteanlagen und Absorptionskältemaschinen, die Abwärme aus einem Heizkraftwerk nutzen (Futurezone 2020). Das Fernkältenetz der Stadt München wiederum ist ein Beispiel für die Integration von Fernwärme- und Fernkältenetzen (Neff 2022; Interview Urbaneck). Mit Fernkältenetzen werden typischerweise Energieeinsparpotenziale zwischen 40 und 50% gegenüber einer Nutzung individueller Kühllösungen generiert. Ebenso besteht die Möglichkeit, Belastungsspitzen durch die Nutzung von Speichern auszugleichen (Hartley 2018).

Quartierskälte bzw. Fernkältesysteme können im Vergleich zu individuellen Kühlsystemen effizienter sein.

4.1.7 Bauliche Maßnahmen

Thermischer Komfort im Gebäudeinneren kann auch durch bauliche Maßnahmen erzeugt werden. Dies lässt sich auch als sommerlicher Wärmeschutz bezeichnen und ist in Deutschland für Neubauten nachzuweisen (Offermann et al. 2022, S. 50). Zum einen kann durch Wärmeisolierung von Dachflächen und Fenstern die Optimierung der Wärmespeicherfähigkeit von Innenräumen erreicht werden. Zum anderen gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Minderung der Wärmeinträge durch Verschattung, beispielsweise Außenjalousien, Rollläden, außenliegende Schiebeelemente bzw. Sonnenschutzlamellen oder auch Sonnenschutzglas¹⁶ (Offermann et al. 2022, S. 50). Diese Maßnahmen können ebenso in Bestandsbauten durchgeführt werden (Offermann et al. 2022, S. 52; SynVer*Z 2020, S. 3). Im Gebäudebau kann auch für eine kühlende Luftzirkulation gesorgt werden (ESMAP 2020a), beispielsweise durch den Einbau größerer Abluftrohre.

Bauliche Maßnahmen sollen durch Verschattung dazu beitragen, einen Kühleffekt zu erzielen.

4.2 Nichttechnische Innovationen

Neben technischen lassen sich im Kontext nachhaltiger Kühllösungen relevante Anwendungen nichttechnischer Innovationen feststellen, bei denen der Neuigkeitswert nicht primär auf technische Komponenten wie Materialien, Komponenten oder technologisches Wirkprinzip zurückzuführen ist, sondern vielmehr auf immaterielle Bestandteile (Hauschildt et al. 2016).

Zu den nichttechnischen Innovationen zählen insbesondere Geschäftsmodell-, Dienstleistungs- und Prozessinnovationen, die einen gewinnorientierten, marktwirtschaftlichen Bezug aufweisen. In einem erweiterten Innovationsverständnis gehören auch soziale Innovationen, die in erster Linie gemeinwohlorientiert sind, zu den nichttechnischen Innovationen (Heimer et al. 2016). Tabelle 4 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Typen nichttechnischer Innovationen.

16 Sonnenschutzglas weist Nachteile im Winter auf, da die Erwärmung von Gebäudeteilen gemindert wird (Offermann et al. 2022, S.50).



Tab. 4 Unterscheidung von Typen nichttechnischer Innovationen hinsichtlich des primären Zwecks und des Wirkprinzips

	Beschreibung	Beispiele im Kontext Sustainable Cooling
soziale Innovation	<ul style="list-style-type: none"> • neue Ansätze für gesellschaftliche Veränderungen (Social Engineering) • politische Innovationen, neue individuelle Lebensstile oder Arten des Zusammenlebens (Hauschildt et al. 2016) • primärer Zweck: Steigerung des Gemeinwohls 	<ul style="list-style-type: none"> • Siesta: traditioneller Mittagsschlaf in Spanien, u. a. zur Vermeidung der Mittagshitze. In nordeuropäischen Ländern wäre die Einführung eine soziale Innovation.
Geschäftsmodellinnovation	<ul style="list-style-type: none"> • umfassende Erneuerung der gesamten Funktions- und Wertschöpfungslogik • Änderung der Art und Weise, <i>welche</i> Werte für Kund/innen geschaffen werden (neuartiger Kundennutzen), <i>wie</i> diese geschaffen werden und wie daraus <i>Umsätze</i> für das Unternehmen generiert werden können • primärer Zweck: privatwirtschaftliche Gewinnerzielung 	<ul style="list-style-type: none"> • Cooling as a Service: Anbieten nachhaltiger Kühlung als Betreibermodell (Cooling as a Service Initiative 2020)
Prozessinnovation	<ul style="list-style-type: none"> • neue Ansätze zur inner- oder überbetrieblichen Erbringung materieller (in der Regel Produkte) oder immaterieller Güter (in der Regel Dienstleistungen); primäres Ziel: Steigerung von Qualität und/oder Effizienz der Produktion • Prozessinnovationen können die Verbesserung von Abläufen innerhalb eines Unternehmens oder entlang der gesamten Wertschöpfungskette betreffen. • primärer Zweck: privatwirtschaftliche Gewinnerzielung 	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der Effizienz und Qualität in Kühlketten, beispielsweise beim Transport von Impfstoffen in Entwicklungsländern (GIZ 2021; WHO 2013)
Dienstleistungsinnovation	<ul style="list-style-type: none"> • Anbieten neuartiger oder verbesserter Dienstleistungen • Einbindung der Kund/innen notwendig, sofern Dienstleistung nicht mit physischem Produkt gekoppelt (hybrides Produkt) • primärer Zweck: privatwirtschaftliche Gewinnerzielung 	<ul style="list-style-type: none"> • Dienstleistungen können allgemein zur nachhaltigen Kühlung beitragen (Djellal/Gallouj 2016) und insbesondere als Finanzinnovationen die Verbreitung von Ansätzen nachhaltiger Kühlung unterstützen
Finanzinnovation	<ul style="list-style-type: none"> • Spezialform der Dienstleistungsinnovation (immaterielle Dienstleistung) • Neuerungen im Finanzsektor, wie beispielsweise neue Finanzprodukte und Finanzierungsinstrumente • in der Regel ausgelöst durch Deregulierungen am Finanzmarkt • entspricht der Produktinnovation bei materiellen Gütern (Benkenstein 1998) • primärer Zweck: privatwirtschaftliche Gewinnerzielung 	<ul style="list-style-type: none"> • innovative Finanzierungsmodelle zur Ermöglichung von Modellen nachhaltiger Kühlung, beispielsweise soziale Wirkungskredite (SWK) (SEforALL 2022)

Eigene Zusammenstellung in Anlehnung an Heimer et al. 2016



4.2.1 Kulturelle Anpassungen

Kulturelle Praktiken können die Anpassung u. a. an heiße Umgebungen ermöglichen (Hansen et al. 2013). Beispiele dafür finden sich bei den Bevölkerungen Nordafrikas und der Arabischen Halbinsel. Die in diesen Regionen beheimateten Völker, wie die nomadischen Beduinen und halbnomadischen Tuareg, haben eine spezielle Kleidung und Architektur entwickelt, um sich an die extreme Hitze anzupassen.

Eine in Europa verbreitete kulturelle Anpassung zur Reduzierung des Kühlungsbedarfs stellt die Änderung von Arbeitszeiten dar: Indem die Tageszeiten größter Hitze arbeitsfrei gestellt werden, können die heißesten Stunden vermieden und die kühleren genutzt werden, was insbesondere bei harter körperlicher Arbeit relevant ist, um Gesundheitsschädigungen zu vermeiden. Das mit großer Hitze assoziierte Risiko von Herz-Kreislauf-Problemen kann so reduziert werden. Aber auch für andere Tätigkeiten, wie Büroarbeit, könnte so die Konfrontation mit Spitzentemperaturen vermieden werden, um das gesunde und produktive Arbeiten im Sinne der Arbeitsstättenverordnung zu erleichtern (BMAS 2010).

Tägliche Hitzepausen sind beispielsweise in Spanien als Siesta kulturell üblich. Ähnliche Traditionen finden sich in anderen heißen europäischen Ländern wie in Portugal, Griechenland oder im Süden Italiens und Frankreichs. Die Siesta dauert üblicherweise gut 2 Stunden und wird nach dem Mittagessen abgehalten, das in Spanien üblicherweise gegen 14 Uhr eingenommen wird. Die Arbeit wird dann wieder gegen 17 Uhr oder in den Sommermonaten tendenziell erst gegen 18 Uhr wiederaufgenommen und – bei Regelarbeitszeit – bis 21 Uhr fortgesetzt.

Ebenso gängig ist bei Hitzeperioden eine generelle Verkürzung der wöchentlichen Arbeitszeit von 40 auf 35 Stunden, sodass nach einer Arbeitszeit von 8 bis 15 Uhr der restliche Tag arbeitsfrei ist und zur Erholung genutzt werden kann. Eine der Siesta vergleichbare Arbeitspause oder eine Umstellung der französischen Sommerzeit von der mitteleuropäischen Sommerzeit zur Greenwich Mean Time schlagen beispielsweise Hendel et al. 2016 für Frankreich vor.

Diese Maßnahme hätte vermutlich einen großen, positiven Einfluss auf den Energiebedarf für Kühlanlagen – würde jedoch gleichzeitig eine große kulturelle und ggf. legislative Anpassungsleistung auf nationaler Ebene bedeuten. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die kulturelle Anpassung an Umweltphänomene wie extreme Hitze ein langwieriger Prozess ist, der über mehrere Generationen verläuft (Banwell et al. 2009).

Kulturelle Anpassungen können längere Mittagspausen oder verkürzte Arbeitszeiten in Sommermonaten umfassen.



4.2.2 Innovative Finanzierungsmodelle

Das Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht von 1987 wird durch das Kigali Amendment (Zusatzprotokoll) von 2016 um Zeitpläne für die stufenweise Mengenbeschränkung der Kältemittel der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW), die mehrere 1.000-mal schädlicher als Kohlendioxid sind, in Industrie- und Entwicklungsländern ergänzt (UBA 2016). Das Kigali Amendment verpflichtet die Länder, die HFKW-Produktion um mehr als 80 % in den nächsten 30 Jahren zu reduzieren.

Die kohlenstoffarme Entwicklung im Bereich der Klimaanlage muss einerseits den Ersatz von Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial durch Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial in der Kühltechnik (direkte HFKW-Emissionen) berücksichtigen sowie andererseits eine deutliche Verbesserung der Energieeffizienz von Geräten (indirekte CO₂-Emissionen) unterstützen. Die schrittweise Einstellung der Produktion und des Verbrauchs von HFKW ist im Kigali Amendment zum Montrealer Protokoll klar geregelt und fällt in den Zuständigkeitsbereich des Multilateralen Fonds (MLF). Finanzierungen aus dem MLF werden in der Regel als Zuschüsse gewährt und in erster Linie von den Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme – UNEP, United Nations Development Programme – UNDP, United Nations Industrial Development Organization – UNIDO) und der Weltbank sowie von einigen spezialisierten bilateralen Agenturen durchgeführt.

Weniger Klarheit besteht hingegen über die verfügbaren Finanzierungsquellen für Energieeffizienzmaßnahmen, wie beispielsweise energieeffiziente, nachhaltige Kühlung, in Entwicklungsländern (Usinger et al. 2018).

Diese Finanzierungslücke kann u. a. durch innovative Finanzierungsmodelle, wie soziale Wirkungskredite (SWK) geschlossen werden. SWK sind beispielsweise von der Weltbank geförderte Finanzierungsinstrumente, bei denen soziale Dienstleistungen mit privaten Mitteln vorfinanziert und im Erfolgsfall öffentlich rückvergütet werden. Dazu wird ein leistungsbezogener Vertrag zwischen einem privaten Investor, einem öffentlichen Geldgeber und einem Anbieter von Sozial- oder Umweltdienstleistungen (Wasser- und Sanitärversorgung, Energiedienstleistungen) geschlossen.

Kommunen können so beispielsweise private Investitionen in die städtische Kühlung durch Kreditlinien oder Risikogarantien fördern. Wo es Energieeffizienzfonds gibt (öffentliche Finanzierungen für Energieeffizienzmaßnahmen öffentlicher Kunden mit Rückzahlungen auf Grundlage der geschätzten Energieeinsparungen), können Kommunen diese Mittel zur Finanzierung bestimmter Investitionen in die städtische Kühlung nutzen (ESMAP 2020a).



4.2.3 Cooling as a Service

Die Lebenszykluskosten¹⁷ effizienter, klimafreundlicher Kühlgeräte sind in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass die Anschaffungskosten im Verhältnis zu den Betriebskosten höher sind (UNEP 2017). Das führt bei preissensiblen Käufer/innen dazu, tendenziell billigere und klimaschädlichere Geräte anzuschaffen.

Hier setzt die Geschäftsmodellinnovation Cooling as a Service (CaaS) an (Tab. 4). Kund/innen zahlen nicht für den Besitz einer Kälteanlage (Klimaanlage, Kühlschränke o.Ä.), sondern entrichten eine nutzungsabhängige Gebühr für die Kühlungsdienstleistung an den Hersteller der Kühlanlagen. Dieser übernimmt alles andere: Wartung, Instandhaltung und die Stromkosten. Der Kühlanlagenhersteller bleibt rechtlich Besitzer der Geräte und bietet lediglich die Kühlungsdienstleistung an. Der Dienstleister erhält dadurch einen Anreiz, effiziente und wartungsarme Geräte anzubieten, da er für die Energiekosten und etwaige Neuananschaffung aufkommen muss. Effizientere, rentable Anlagen erhöhen ceteris paribus seine Gewinnmarge.

Der Vorteil von CaaS aus Kundensicht ist u.a., dass für die Kühlsysteme keine anfänglichen Investitionskosten anfallen. Sie zahlen lediglich die jeweils verbrauchten Kühleinheiten, was den Anreiz für einen effizienten Verbrauch verstärkt, den Kühlungsbedarf auf das benötigte Maß zu reduzieren.

Insgesamt besteht in dem CaaS-Modell der Anreiz, möglichst energieeffiziente Anlagen einzusetzen und wenig Strom zu verbrauchen, was zu einer Reduzierung schädlicher Umwelteffekte beitragen kann.

Insbesondere bei preisbewussteren Käuferschichten der wachsenden globalen Mittelschicht können diese Modelle einen großen Hebel entfalten: Es wird erwartet, dass sich die asiatisch-pazifische Mittelschicht bis 2030 verdreifacht und mit 3 Mrd. Menschen ein Drittel der Weltbevölkerung stellen wird. Die sich verändernden Lebensstile und Bedarfe dieser wachsenden Mittelschicht werden die Nachfrage nach Kühlung vermutlich erhöhen (University of Birmingham 2018).

CaaS wird seit Anfang 2019 vor allem von der Basel Agency for Sustainable Energy (BASE)¹⁸ sowie von der Clean Cooling Collaborative (ehemals Kigali Cooling Efficiency Program – K-CEP)¹⁹ angeboten. Die CaaS-Initiative agiert dabei im

Kühlung als Dienstleistung kann eine effiziente Nutzung von Kühlanlagen und somit eine Reduzierung negativer Umweltwirkungen zur Folge haben.

¹⁷ Die Lebenszykluskosten werden als die Summe aller einmaligen (Anschaffung) und wiederkehrenden Kosten (Wartung, Energiekosten) über die gesamte Lebensdauer eines Geräts berechnet.

¹⁸ BASE ist eine Schweizer Stiftung, die Partnerin von UNEP ist.

¹⁹ K-CEP ist eine von Climatework verantwortete philanthropische Vereinigung, die das Kigali Amendment des Montrealer Protokolls zur Reduzierung des Verbrauchs und der Produktion von Fluorkohlenwasserstoffen unterstützen möchte.



Wesentlichen als Plattform, die interessierte Kund/innen, Technologieprovider und Investoren zusammenbringt und diesen z.B. Musterverträge oder Berechnungsmodelle für die Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit einzelner Vorhaben zur Verfügung stellt (Cooling as a Service Initiative 2020). CaaS-Projekte werden in der Dominikanischen Republik, in Jamaika, Südafrika und Mexiko realisiert. In Mexiko konnten laut Abramskieln/Richmond (2019) beispielsweise auf Basis des CaaS-Modells innerhalb von 7 Jahren 18.000 t CO₂-Emissionen gegenüber dem Betrieb einer weniger effizienten Kältemaschine eingespart werden.

4.2.4 Erhöhung der Energieeffizienz in Entwicklungs- und Schwellenländern

Mit der Umsetzung des Kigali Amendments (Kap. 5.2.2) soll die Energieeffizienz bei aktiven Kühltechnologien verbessert werden, um einerseits den Kühlbedarf gefährdeter Bevölkerungsgruppen zu gewährleisten und gleichzeitig den Gesamtbedarf an Energie für die Kühlung zu senken.

Ansätze im Rahmen dieser Bemühungen zur Erfüllung der Kigali-Ziele sind die Schließung von Kühlketten, die Erhöhung der Kühleffizienz und die Reduzierung schädlicher Nebeneffekte der Kühlung (Vermeidung klimaschädlicher Kältemittel) durch Green-Cooling-Projekte der Entwicklungshilfe, die mit einfachen Mitteln einen großen Effekt erzielen können. Beispielsweise können Kühlketten zum Transport von Impfstoffen in entlegene ländliche Gebiete geschlossen werden durch den Einsatz wiederverwendbarer, isolierender Transportboxen und durch Zwischenlagerung in Kühlschränken, die mit Solarenergie betrieben werden (Interview Römer). Allgemein steht Green Cooling für Technologien, die natürliche Kältemittel und Schaumtreibmittel verwenden, die weder dem Klima noch der Umwelt schaden, aber die gleiche oder eine bessere Energieeffizienz aufweisen. In über 40 Entwicklungs- und Schwellenländern wurden durch die GIZ (GIZ 2022) mehr als 240 Projekte umgesetzt, die diesem Leitgedanken folgen.

4.3 Technologische Innovationen

Sind Kühlbedarfe bereits entstanden und können durch passive Lösungen nicht auf einen angemessenen thermischen Komfort für Menschen reduziert werden, ist es erforderlich, mittels technologischer Lösungen – unter Zuführung von mechanischer Energie oder Wärme – Temperaturen anhand von Kältekreisläufen zu reduzieren. Grundlegender Hebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit solcher Methoden ist die Verminderung der CO₂-Emissionen durch die *Reduzierung der zugeführten Energie, die Verbesserung der Anlagen- bzw. Systemeffizienz, die Verwendung eines natürlichen Kältemittels* (Kap. 3.3), *das Recycling von Kältemitteln oder die Entwicklung einer gänzlich neuen nachhaltigen Technologie*. Auch die intensive Nutzung bereits vorhandener, jedoch bisher wenig bekannter bzw. genutzter



Kühltechnologien kann einen Beitrag zur Reduzierung des Stromverbrauchs bei der Energiezufuhr zukünftiger Kühllösungen leisten. Beispiele sind:

- Die *Kombination von Kompressions- und Absorptionskältemaschinen* zur Klimatisierung von Gebäuden ist oftmals sowohl ökonomisch als auch ökologisch von Vorteil. Dabei können unter bestimmten Bedingungen die Effizienzvorteile der Absorptions- und der Kompressionskältemaschine für die Grundlast bei konstantem Temperaturhub und niedrigen Temperaturen genutzt werden. Technisch wird dies durch Kaskaden- oder Parallelschaltungen von Anlagen realisiert. Solche Kombinationen finden beispielsweise bei Blockheizkraftwerken oder Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken Anwendung (Richter et al. 2014, S.23).
- Die aktive bzw. passive Kühlung anhand von *Wärmepumpen* bietet ebenfalls Energieeinsparpotenzial. Die aktive Kühlung nutzt den umgekehrten Prozess der Wärmezufuhr von Räumen durch Absorption der Umgebungstemperatur. Wärme aus den Räumen wird an die Umgebung abgegeben und die Räume werden um bis zu 3 °C gekühlt. Diese Technologie lässt sich ausschließlich für Luftwärmepumpen, nicht jedoch für Wasser- oder Erdwärmepumpen realisieren (Vaillant 2022a). Die passive Wärmepumpenkühlung kombiniert hingegen diese Technologie mit einem Oberflächenheizsystem und führt überschüssige Raumwärme an das Wasser bzw. die Sole ab. Raumtemperaturen lassen sich um 8 bis 12 °C senken. Im Gegensatz zur aktiven Wärmepumpe ist die passive Wärmepumpe energieeffizienter, da sich die Energiezufuhr lediglich auf die Pumpe beschränkt (Vaillant 2022b).
- Neben der *Sorptionskühlung* bietet die *adiabate Kühlung* bei der Gebäudekühlung ein Energieeinsparpotenzial gegenüber konventionellen Methoden. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist zum einen die technologische Weiterentwicklung der Systeme für die entsprechenden Anwendungsfälle sowie die Qualifizierung von Fachkräften. Eine exemplarische Anwendung findet die Sorptionskühlung in einer Kreissparkasse in Bremerhaven, bei der die anfallende Wärme im Sommer zum Kühlen und im Winter zu Heizen genutzt werden kann. Adiabate Kühlsysteme wurden im Rahmen des Leuchtturmprojekts „Hof Siemering“ eingeführt, um dem Wärmeverlust bei der Warmwasserbereitung zu begegnen (Clausen 2014).
- Für die Klimatisierung von und Tiefkühlung in Privathaushalten können als *natürliche Kältemittel* (Kap. 3.3) vor allem Propan und Isobutan verwendet werden. Luft- und Wasserkühlung findet bereits heute oftmals Anwendung bei zentralen Klimaanlageanlagen zur Gebäudekühlung. Allerdings sind bis zu einem flächendeckenden Einsatz natürlicher Kältemittel noch einige Hürden zu überwinden, z.B. Finanzierungsmöglichkeiten, Normen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie die Qualifizierung von Fachpersonal bezüglich der sicheren Handhabung dieser Kältemittel (GIZ 2020). Diese und weitere Umsetzungsbarrieren werden in Kapitel 5.2.1 und 6.2.1 erläutert.



- Die Verordnung (EU) Nr. 517/2014²⁰ hat durch die gezielte Verknappung von Kältemitteln zu erheblichen Preissteigerungen geführt. Die *Wiederaufbereitung* von bereits im Markt befindlichen Kältemitteln wird somit aus ökonomischer Sicht zunehmend interessant. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft können Kältemittel so aufbereitet werden, dass sie wieder über ihre ursprünglichen Eigenschaften verfügen und gleichwertig zu neuen Kältemitteln verwendet werden können (Guallar-Herrero 2021).
- Durch die *Nutzung von Abwärme* aus Industrieprozessen, Müll oder Solarenergie zur aktiven Kühlung als Energiezufuhr für Sorptionskältemaschinen wird keine zusätzliche thermische Energie für den Betrieb dieser Anlagen benötigt.²¹ Die Nutzung von Solarenergie kann insbesondere in Kombination mit der Warmwasseraufbereitung verwendet werden, sodass im Sommer hohe Überschusswärmeerträge zur Verfügung stehen und der zusätzliche Energiebedarf für Pumpen und Rückkühlung gering ausfällt (Richter et al. 2014).

Technologische Innovationen im Bereich der nachhaltigen Kühlung sind insbesondere *Festkörperkühlssysteme* (Solid-state-Cooling-Systeme), bei denen die Materialeigenschaften von Festkörpern zur Wärmeübertragung genutzt werden anstatt von flüssigen Kältemitteln. Alle Festkörperkühlssysteme basieren auf dem Effekt der Wärmeentwicklung. Hierzu gehört die magnetokalorische Kühlung, die elastokalorische Kühlung, die thermoelektrische Kühlung und die barokalorische Kühlung (ESMAP 2020b):

20 Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006

21 <https://www.soundenergy.nl/applications/> (5.4.2023)



- Bei der *magnetokalorischen Kühlung* werden Materialien gekühlt, indem sie einem wechselnden Magnetfeld ausgesetzt werden (BIV et al. 2022). Bei der Erzeugung eines Magnetfeldes richten sich die magnetischen Atome in eine Richtung aus, wobei Wärme erzeugt wird, die anhand eines Kühlmittels, z.B. Wasser, abgeführt werden kann. Die Technologie wird im Bereich niedriger Temperaturen genutzt und aktuell nicht für die Umgebungskühlung verwendet, bietet aber Potenzial dafür. Bisher kann die magnetokalorische Kühlung beispielsweise für die Kühlung von Getränken eingesetzt werden.²²
- Die *elastokalorische Kühlung* nutzt den Effekt der Wärmeentwicklung bei der Verformung eines Festkörpers durch Erzeugung von Spannungen im Bauteil, beispielsweise durch Aufbringung einer Zugkraft. Wird diese wieder gelöst, kühlt das Material wieder ab und absorbiert Wärme aus der Umgebung. Die verwendeten Materialien verfügen über hochelastische Eigenschaften, sodass sie nach der Abkühlung wieder ihre Ausgangsform erreichen. Nickel-Titan-Legierungen weisen dabei nach aktuellem Stand der Forschung die besten Materialeigenschaften auf. Die elastokalorische Kühlung wird gegenwärtig für die kommerzielle Anwendung noch erforscht (Kirsch et al. 2018).
- Das Funktionsprinzip der *thermoelektrischen Kühlung* basiert auf einer Temperaturdifferenz, die aus der Durchleitung von Strom durch einen Halbleiter resultiert. Anwendungsgebiete sind insbesondere Elektronikkomponenten. Die Nutzungsmöglichkeiten für die Umgebungskühlung werden aktuell erforscht. Die Form der Kühlung kann beispielweise bei Lieferketten verwendet werden und soll im Gegensatz zur Eiskühlung kontrollierbare Temperaturniveaus aufrechterhalten können.²³
- Durch die Veränderung der Molekülstruktur von Plastikkrystallen unter Druckkräften lässt sich Wärme erzeugen, wodurch ein Temperaturgefälle entsteht. Wenn die Wärme abgeführt wird, etwa durch Luft oder Wasser, tritt ein Kühleffekt auf. Dieses Verfahren, das sich bisher in der Frühphase der Entwicklung befindet und daher noch nicht kommerziell genutzt wird, nennt man *barokalorische Kühlung*.²⁴

Neben der Entwicklung gänzlich neuer Technologien existieren technologische Innovationen, die sich geologische Phänomene und Gegebenheiten zunutze machen, wie die geothermische Kühlung, Brunnen- und Flusswasserkühlung oder radiative Kühlung. Diese Kühlmethoden sind nicht gänzlich neu, finden jedoch nur vereinzelt Anwendung.

22 <https://www.magnotherm.com/about/> (5.4.2023)

23 <https://phononic.com/> (5.4.2023)

24 <https://barocal.com/technology> (5.4.2023)



- *Geothermie* bezeichnet einen Wärmeaustauschprozess mit Erdwärme und lässt sich sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen einsetzen.²⁵ Anhand von Förder- und Verpressbohrungen, die mit einer thermalwasserführenden Gesteinschicht verbunden sind, wird Wasser an die Erdoberfläche gepumpt und Wärme ausgetauscht. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass nicht alle Regionen in Deutschland für geothermische Wärmeaustauschprozesse geeignet sind. Geologische Formationen für die Implementierung geothermischer Kühlungstechnologien existieren beispielsweise zwischen Basel und Frankfurt entlang des Oberrheingrabens (Bracke/Huenges 2022).
- Durch die Verwendung von *Brunnen- oder Flusswasser* als Rückkühlmedium kann die benötigte Kälte gefördert statt technisch erzeugt und die Effizienz der Klimageräte um den Faktor 4 bis 7 erhöht werden. Im Jahresverlauf ist die schwankende Wassertemperatur und ggf. die erforderliche Wasserkühlung durch eine Kältemaschine zu berücksichtigen. Je nach Wasserqualität ist zudem mit einem hohen Wartungsaufwand zu rechnen. Ein Beispiel für Brunnenkühlung ist die Gebäudekühlung bei Radio Bremen, die als Alternative zur konventionellen Kühlung geplant wurde, um das umliegende Wohngebiet vor Schallemissionen und Versorgungsleitungen zu bewahren (Clausen 2014).
- *Radiative Kühlung* nutzt die Temperatur des Himmels. Sonnenlicht wird in einem ersten Schritt von Paneelen reflektiert und in einem zweiten Schritt wird Wärme an den kühlen Himmel abgegeben. Diese Paneele sind in der Lage, 2- bis 3-mal so viel Energie zu sparen, wie sich durch Solarenergie bei gleicher Fläche erzeugen lässt. Zudem lässt sich die Technologie auch nachts betreiben. Praxisbeispiele sind Lebensmittelgeschäfte in Stockton und Sacramento, Kalifornien.²⁶

Technische Innovationen können aus Sicht der jeweiligen Anlageneffizienz betrachtet werden. Es kann jedoch auch eine systemische Perspektive eingenommen werden, die Wechselwirkungen berücksichtigt, die entstehen, wenn Kühlanlagen beispielsweise aus erneuerbaren Energiequellen wie etwa PV-Anlagen versorgt werden und somit auch als Energiespeicher dienen können. Die systemische Betrachtung wird aus Gründen der Komplexitätsreduktion an dieser Stelle nicht weiter verfolgt.

25 <https://dandelionenergy.com/>; https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d8545-2/*/*Petrothermales%20System.html?op=Wiki.getwiki (5.4.2023)

26 <https://www.skycoolsystems.com/technology/> (5.4.2023)



5 Bedeutung nachhaltiger Kühlung in Deutschland

Die Darstellung der Innovationsbereiche hat gezeigt, welche Facetten nachhaltige Kühlung aufweisen kann. Der Blick auf Deutschland zeigt, dass auch hierzulande mit einem steigenden Bedarf an nachhaltigen Kühllösungen zu rechnen ist. Getrieben wird dieser Bedarf durch die klimatischen Veränderungen im Zuge des Klimawandels und durch demografische Entwicklungen, die letztlich in einer großen Gruppe möglicher betroffener und vulnerabler Personen resultieren.

Die Realisierung nachhaltiger Kühllösungen in Deutschland ist abhängig von Rahmenbedingungen, die eine Umsetzung sowohl treiben als auch hemmen können. Ökonomische Faktoren wie etwa die Fachkräfteverfügbarkeit oder die Innovationsstärke der deutschen Klima- und Kältebranche spielen ebenso eine Rolle wie regulatorische Rahmenbedingungen.

5.1 Steigender Bedarf an nachhaltigen Kühllösungen

In Kapitel 3 wurde die weltweite Bedeutung nachhaltiger Kühlung angesichts des rasant voranschreitenden Klimawandels und weiterer Einflussfaktoren geschildert. Es wurde deutlich, dass der Bedarf an Kühlung künftig weltweit zunehmen wird. Bereits heute existieren vielfältige Innovationen, die dazu beitragen können, den steigenden Bedarf an Kühlung zu vermeiden bzw. nachhaltig zu decken (Kap. 4). Offen blieb die Frage, inwieweit auch Deutschland von dieser übergeordneten Entwicklung betroffen ist und dementsprechend die Förderung nachhaltiger Kühllösungen in den geschilderten Innovationsbereichen vorangetrieben werden sollte. Denn es zeigt sich immer deutlicher, dass Deutschland sich ebenfalls auf eine zunehmende Erwärmung einzustellen hat (Kap. 5.1.1). Angesichts des demografischen Wandels dürfte zudem die Gruppe der möglichen Betroffenen zukünftig immer größer werden (Kap. 5.1.2). Bereits jetzt sind aufgrund dieser beiden Entwicklungen negative gesundheitliche Effekte bei der deutschen Bevölkerung zu beobachten (Kap. 5.1.2).

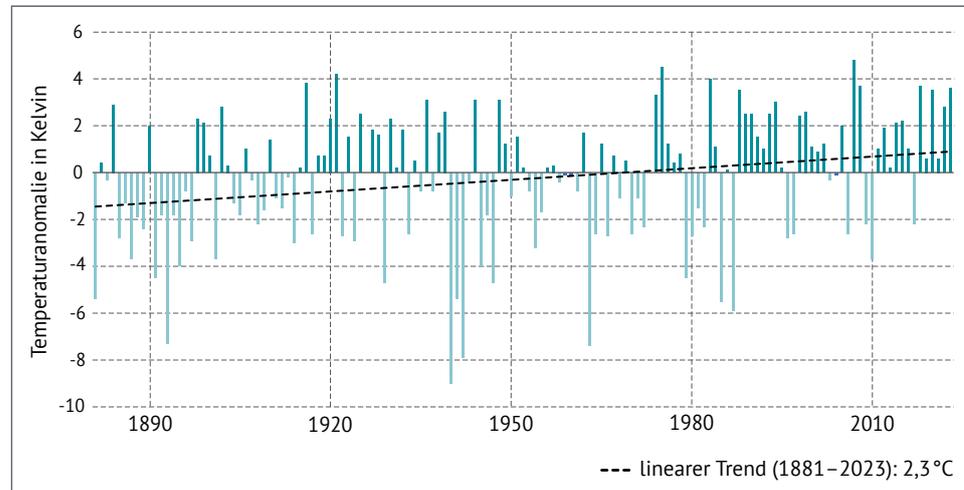
5.1.1 Klimawandel in Deutschland

Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits deutlich spürbar und betreffen nahezu alle Bereiche der Gesellschaft. Die Temperaturen in Deutschland steigen seit etwa 1970 kontinuierlich an (Kaspar et al. 2020). Seit Beginn der Klimaaufzeichnungen 1881 hat sich die mittlere Lufttemperatur hierzulande bis 2021 um 1,6 °C erhöht (Abb. 13) (DWD 2022a). Dabei erfolgt die Erwärmung in Deutschland im Vergleich zum vorindustriellen Niveau schneller als im globalen Mittelwert mit 1,1 °C (DWD 2022a; Kaspar et al. 2020). Seit den 1970er Jahren ist jedes

Der Klimawandel ist in Deutschland bereits deutlich spürbar, da die Erwärmung bislang höher als der globale Durchschnitt ist.



Abb. 13 Temperaturentwicklung in Deutschland von 1881 bis 2023



Abgebildet sind die positiven (dunkel) und negativen (hell) Abweichungen der Lufttemperatur vom vieljährigen Mittelwert 1961 bis 1990 für Deutschland.

Quelle: DWD 2022a

Jahrzehnt wärmer als das vorherige gewesen (DWD 2020). Seit Beginn des Auswertungszeitraumes 1881 waren die Jahre von 2011 bis 2020 mit einem Temperaturanstieg gegenüber von 1881 bis 1910 von 2 °C das bisher wärmste Jahrzehnt. Die Anzahl der heißen Tage (von mindestens 30 °C) hat sich zwischen 1951 und 2018 von etwa 3 auf ca. 10 Tage erhöht, wobei im Jahr 2018 mit 20 Hitzetagen die meisten jemals gemessenen Hitzetage erfasst wurden (UBA 2019b).

Klimaprojektionen auf Grundlage der IPCC-Szenarios zeigen für Deutschland für alle Jahreszeiten weiter steigende Temperaturen (Kahlenborn et al. 2021). Das Szenario RCP2.6 geht von einer konsequenten Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen aus, während das RCP8.5-Szenario eine globale Entwicklung ohne Klimaschutzmaßnahmen annimmt (DWD 2022a). Die Wahl des Szenarios hat für die Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) einen geringeren Einfluss auf die Temperaturentwicklung, wohingegen sich die Projektionen gegen Ende des Jahrhunderts stark unterscheiden (Kahlenborn et al. 2021). Das RCP2.6-Szenario projiziert bis 2100 eine mittlere Temperaturerhöhung von 0,9 bis 1,6 °C (15. bis 85. Perzentil) gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Kahlenborn et al. 2021). Für das RCP8.5-Szenario wird ein mittlerer Temperaturanstieg zwischen 3,1 und 4,7 °C (15. bis 85. Perzentil) angenommen.

Der weitere Anstieg der mittleren Temperaturen in den kommenden Jahren wird zu mehr und intensiveren Wetterextremen in Deutschland führen (DWD 2022a). Klimaveränderungen werden von abstrakten, statistischen Kenngrößen zu real spürbaren Phänomenen und es wird deutlich, dass auch Deutschland zunehmend



von Extremwetterereignissen betroffen sein wird (DWD 2022a). Studien zeigen: Die Bevölkerung von gemäßigten Klimazonen ist besonders nachteilig von steigenden Temperaturen betroffen, da sie traditionell nicht auf extrem heiße Tage und Hitzewellen vorbereitet ist (EIU 2019) und das Risikobewusstsein für Hitze in der Bevölkerung noch nicht in der Breite ausgeprägt ist. Für die USA wurde beispielsweise gezeigt, dass die Sterblichkeit älterer Menschen in sonst kühlen Regionen bei Temperaturen über 29 °C höher ist als in wärmeren Regionen (Heutel et al. 2017). Ähnliches dürfte auch für Deutschland gelten, nachdem der Umgang mit Hitze hierzulande bislang eher von nachgeordneter Bedeutung gewesen ist (Biermann et al. 2022) und im Gebäudebau bisher die Wärmedämmung im Vordergrund stand. Eine ganzheitliche Betrachtung von Kühlung und Heizung dürfte künftig an Bedeutung gewinnen.

5.1.2 Demografische Entwicklungen und gesundheitliche Folgen zunehmender Hitze

Deutschland gehört nach Japan und den Philippinen zu den Ländern, die 2018 weltweit am stärksten von steigenden Temperaturen betroffen waren (Eckstein et al. 2019, S. 6). Das Jahr war das heißeste seit Beginn der Aufzeichnungen.

Hauptbetroffene von Hitze sind in Deutschland, wie auch weltweit, vor allem (alleinstehende) ältere Menschen, chronisch Kranke, Menschen mit Behinderungen, Schwangere und Kleinkinder (Rylander et al. 2013; UBA 2019b); eine Gruppe, die rund 9 Mio Menschen umfasst (Huth et al. 2022).

In Deutschland sind Hitzewellen infolge des Klimawandels etwa seit der Jahrtausendwende ungewöhnlich häufig und führen seitdem regelmäßig zu einer erhöhten Sterblichkeit, insbesondere in älteren Altersgruppen (RKI 2019). Bundesweite Daten zeigen, dass in den Sommern 2006 und 2015 jeweils etwa 6.000 Menschen mehr gestorben sind, als ohne Hitzewelle zu erwarten gewesen wäre (an der Heiden et al. 2019; Bundesregierung 2020). Auch in den ungewöhnlich warmen Jahren von 2018 bis 2020 kam es zu einer erhöhten Anzahl hitzebedingter Sterbefälle: 2018: 8.700, 2019: 6.900, 2020: 3.700 (Winklmayr et al. 2022). In diesen Jahren ist erstmals eine signifikante Anzahl hitzebedingter Sterbefälle in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren aufgetreten. Diese 3 Jahre wiesen mehr Hitzewochen auf als die übrigen Jahre zwischen 2012 und 2021 (Winklmayr et al. 2022, S. 452 ff.).

In einer Auswertung von Daten seiner mehr als 10 Mio Versicherten hat der BKK-Landesverband Nordwest den Zusammenhang zwischen steigenden Temperaturen und der Zunahme klimasensibler Erkrankungen untersucht. Die Analyse ergab, dass klimasensible Erkrankungen von 2010 bis 2019 teilweise drastisch angestiegen sind. Bislang sind die durch Hitze verursachten Gesundheitsschäden



jedoch größtenteils außerhalb der gesellschaftlichen Wahrnehmung geblieben (BKK-LV 2021).

Hitzeschäden in der Bevölkerung nehmen zu. Bislang wird diese Entwicklung jedoch noch nicht angemessen gesellschaftlich wahrgenommen.

Die Anzahl der jährlich diagnostizierten Hitzeschäden, z.B. Hitzeerschöpfung, Hitzekollaps, Hitzekrampf und Hitzschlag, ist deutlich angestiegen (BKK-LV 2021, S. 3). Mit zunehmender Anzahl an Hitzetagen war ein messbarer Anstieg der Krankenhauseinweisungen infolge von Flüssigkeitsmangel zu verzeichnen (BKK-LV 2021, S. 4; ESMAP 2020a, S. 6f.). Wird der überdurchschnittliche Flüssigkeitsverlust ab einer Temperatur von über 30 °C nicht ausgeglichen, steigt das Risiko für Thrombosen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Nierenversagen (BKK-LV 2021, S. 4; Sherwood/Huber 2010, S. 9552). Die Zahl der Krankenhauseinweisungen aus diesem Grund stieg um 31,5 % an, was hochgerechnet auf die Gesamtbevölkerung 633.000 Einweisungen entspricht (BKK-LV 2021, S. 4). Krankenhauseinweisungen betreffen insbesondere Säuglinge, Kleinkinder und Menschen ab 75 Jahren.

Hitze führt bei Arbeitnehmer/innen zu Erkrankungen bis hin zur Arbeitsunfähigkeit. Zwischen April und September 2019 kamen auf 100.000 BKK-Versicherte hitzebedingte 102 Arbeitsunfähigkeitstage. Das entspricht einer Verdreifachung gegenüber 2011. Hiervon sind insbesondere Berufsgruppen, die im Freien arbeiten, Verkäufer/innen und Krankenpfleger/innen betroffen (BKK-LV 2021, S. 3). Der voranschreitende Klimawandel begünstigt die Ausbreitung von Infektionskrankheiten. Steigende sommerliche Temperaturen, mildere Winter und verstärkte Niederschläge bieten günstige Bedingungen für Krankheitserreger, Überträger und Wirtstiere. Beispielsweise ist die von Zecken übertragene Lyme-Borreliose in allen Bundesländern auf dem Vormarsch – mit besonders hohen Anstiegen in Thüringen (53 %) und NRW (50 %). Es kommt zu einer deutlichen Zunahme von Allergien. Die Zahl der an Heuschnupfen erkrankten Menschen wuchs um ca. 30 %. Durch den Klimawandel bedingte vermehrte Sonnen- und UV-Einstrahlung erhöht das Risiko für Erkrankungen der Haut erheblich. Die ambulante Behandlung dieser Patientengruppe wuchs um 78 %. Zudem nahm die Zahl der Krankenhauseinweisungen aufgrund bösartiger Neubildungen der Haut deutlich zu (BKK-LV 2021, S. 5 ff.).

Der Gesundheitsbereich, der mit den Folgen zunehmender Hitze umgehen muss, ist bislang unzureichend an die erwarteten Temperaturanstiege angepasst.

Es zeigt sich, dass die zu erwartenden Auswirkungen von Hitze Anpassungen des Verhaltens, aber auch der Gesundheitsinfrastruktur erfordern. So ist beispielsweise der Gebäudebestand im Gesundheitssektor, also Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen, selbst noch nicht an die zu erwartenden Temperaturanstiege angepasst (BKK-LV 2021). Aufgrund der Altersstruktur der deutschen Gesellschaft, der steigenden Lebenserwartung, aber auch der sozioökonomischen Entwicklungen ist vorstellbar, dass die gesundheitlichen Effekte künftig noch stärker sichtbar werden (Bunz/Mücke 2017).



Zukünftig werden sich die Anteile der vulnerablen Bevölkerungsgruppen verändern. Aufgrund des demografischen Wandels steigt der Anteil älterer gegenüber dem Anteil junger Menschen und insbesondere dem der Kleinkindern. 2030 werden 26 % (21,6 Mio) der deutschen Bevölkerung älter als 65 Jahre (2022: 22 % oder 18,8 Mio) und damit besonders beeinträchtigt von bzw. gefährdet durch steigende Temperaturen sein (Destatis 2022). Bei Kleinkindern bleibt aktuellen Modellierungen zufolge der Anteil mit rund 3 % an der Gesamtbevölkerung ungefähr gleich (2022: 2,4 Mio, 2030: 2,2 Mio). Zusammengenommen könnten 2030 also fast 30 % der deutschen Bevölkerung zur vulnerablen Gruppe gehören.

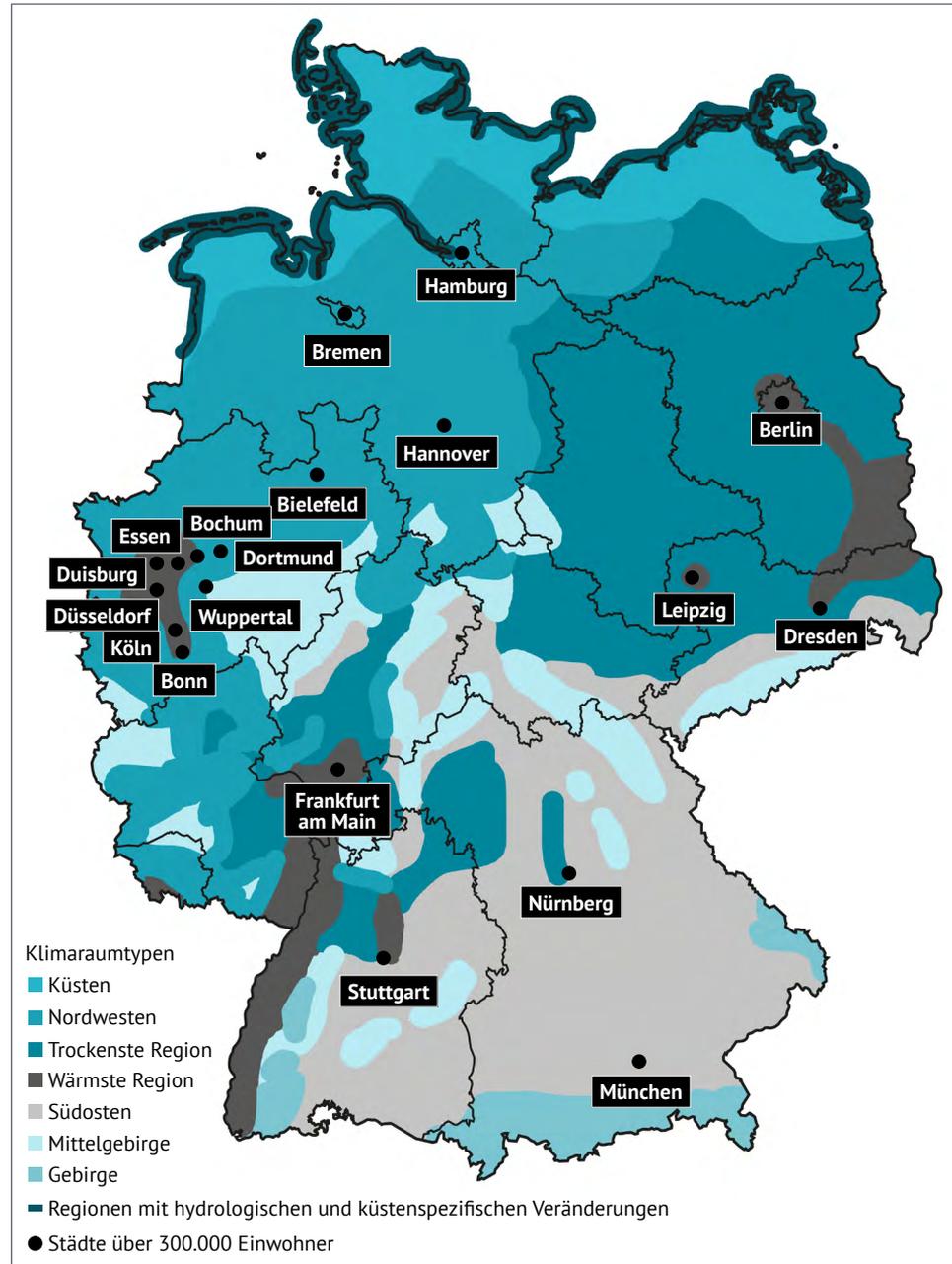
Nicht nur die Zahl älterer Menschen steigt in Deutschland künftig, sondern auch die Zahl der Stadtbewohner/innen. Grund hierfür ist die zunehmende Urbanisierung. 2030 sollen ca. 79 % der deutschen Bevölkerung in Städten leben (UN DESA 2018), also rund 65 Mio Menschen. Vor allem die Entstehung von Hitzeinseln kann zu einer höheren gesundheitlichen Belastung für die Stadtbevölkerung führen (UBA 2020b). In Deutschland waren die Großstädte, darunter Berlin, Frankfurt am Main und München, in der jüngeren Vergangenheit besonders von Hitze betroffen. In den überdurchschnittlich warmen Sommern 2003, 2005 und 2016 traten sowohl heiße Tage als auch Tropennächte, in denen die Temperatur über 20 °C beträgt, in den genannten Städten häufiger auf als im bundesweiten Mittel (UBA 2019b, S. 152f.). 2018 war insbesondere Frankfurt am Main betroffen (UBA 2023). Künftig dürften Zahl und Dauer von Hitzeperioden zunehmen und damit auch die Zahl von heißen Tagen und Tropennächten. Diese Effekte können auch weiterhin vor allem in ohnehin schon wärmeren Stadtgebieten auftreten (Kahlenborn et al. 2021, S. 30).

Die Menschen in Deutschland werden künftig nicht allerorts gleichermaßen von zunehmender Hitze betroffen sein. Vielmehr wird es, wie heute auch schon, regionale Unterschiede geben. Im Rahmen einer Klimawirkungs- und Risikoanalyse wurden für Deutschland sieben unterschiedliche Klimaregionen ermittelt und deren zukünftige Veränderungen modelliert (Abb. 14): Küsten, Nordwesten, trockenste Region, wärmste Region, Südosten, Mittelgebirge und Gebirge (Kahlenborn et al. 2021, S. 102 ff.).

Vor allem trockenste Region, wärmste Region, Südosten und Gebirge sind dadurch gekennzeichnet, dass die Zahl der Hitzetage und zum Teil auch die Zahl der tropischen Nächte überdurchschnittlich ansteigen (Kahlenborn et al. 2021, S. 104).



Abb. 14 Kartendarstellung der sieben Klimaraumtypen



Eigene Darstellung nach Kahlenborn et al. 2021, S.103

5.2 Rahmenbedingungen für die Entwicklung nachhaltiger Kühllösungen

Die Realisierung nachhaltiger Kühllösungen ist abhängig von wirtschaftlichen, regulatorischen und innovationspolitischen Rahmenbedingungen. Bei den öko-



nomischen Rahmenbedingungen ist festzustellen, dass nachhaltige Kühllösungen zwar wirtschaftliche Potenziale bieten, diese jedoch aufgrund fehlender Nachfrage und von Fachkräftemangel nur schwer realisiert werden können. Auf der regulatorischen Ebene werden vor allem die Verwendung klimaschädlicher Kältemittel und die Nutzung energieeffizienter Geräte reguliert. Die Gestaltung des innovationspolitischen Rahmens kann dazu beitragen, dem Fachkräftemangel zu begegnen sowie die Umsetzung städtebaulicher Maßnahmen zu fördern.

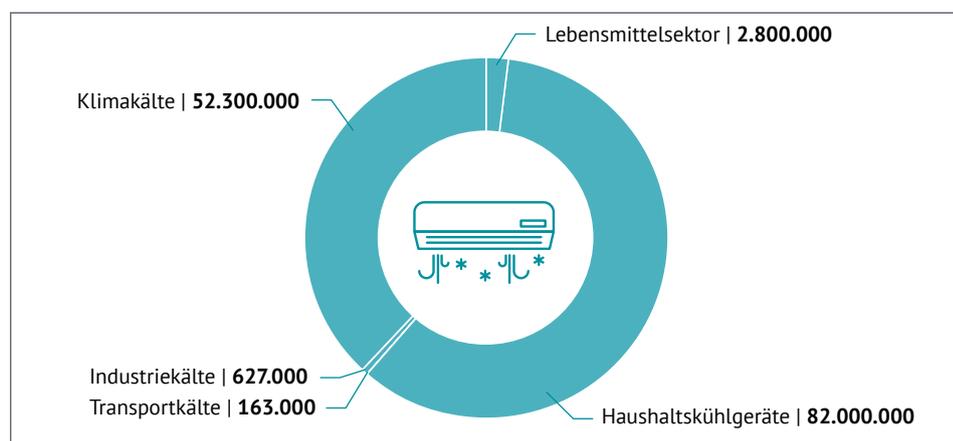
5.2.1 Ökonomische Rahmenbedingungen

Das deutsche Kälte- und Klimaakteurssystem ist vielfältig und deckt verschiedene Bereiche ab, in denen technische Innovationen umgesetzt und unterschiedliche Kühlbedarfe bedient werden können. Die ökonomischen Rahmenbedingungen werden von verschiedenen Faktoren geprägt. Dazu zählen die Entwicklung des Kühlbedarfs in Deutschland, die Fachkräfteverfügbarkeit bzw. die Qualifizierungsbedarfe sowie die Barrieren und Anreizstrukturen für unternehmerische Investitionsaktivitäten.

Steigender Kühlbedarf in Deutschland

In Deutschland gab es 2017 rund 138 Mio Kältesysteme (ohne Wärmepumpen)²⁷, deren Aufteilung nach unterschiedlichen Sektoren in Abbildung 15 dargestellt ist.

Abb. 15 Anzahl der Kältesysteme in Deutschland



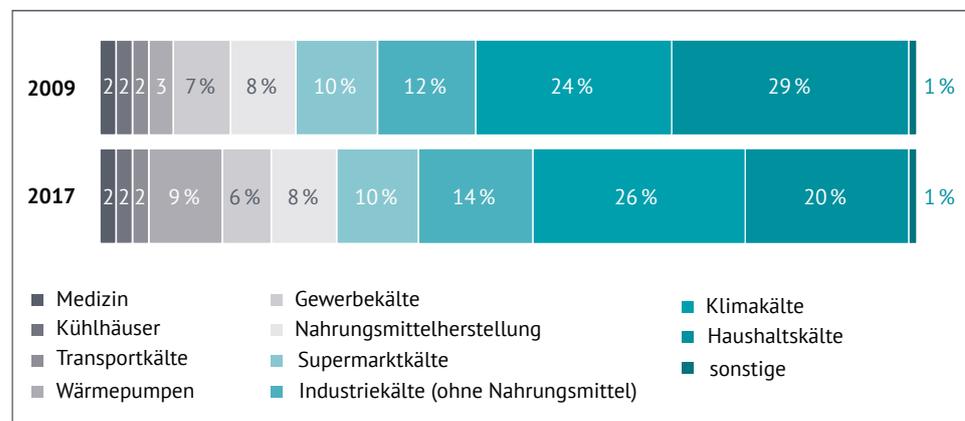
Eigene Darstellung in Anlehnung an DKV: Welttag der Kältetechnik. Vortrag am 26.6.2022

27 DKV: Welttag der Kältetechnik. Vortrag am 26.6.2022



2017²⁸ entfielen 14,0% des gesamten deutschen Stromverbrauchs auf kältetechnische Anwendungen. Zwischen 2009 und 2017 stieg der zugehörige Energiebedarf um 6% von 82 auf 87 TWh (VDMA 2019, S. 13 f.). Hierbei ist zu beachten, dass Wärmepumpen mitberücksichtigt werden. Ohne dieses im genannten Zeitraum stark gewachsene Segment ist der Anteil der Kältetechnik am Stromverbrauch sogar zurückgegangen, von 13,6 auf 12,5% (VDMA 2019, S. 14). Der Energiebedarf für Klimakälte, also alle Anwendungen, die zur Erzeugung eines angemessenen thermischen Komforts für Menschen in Gebäuden und Fahrzeugen dienen, hat im betrachteten Zeitraum ebenfalls zugenommen, von 24% im Jahr 2009 auf 26% 2017 (Abb. 16).

Abb. 16 Gesamtenergiebedarf von Kältetechnik 2009 und 2017



Eigene Darstellung nach VDMA 2019, S.13

Obwohl schwer abschätzbar, dürfte der künftige Bedarf an Kühlösungen und Kältetechnik steigen.

Der zukünftige Bedarf an Kältetechnik ist sowohl hinsichtlich der Nachfrageentwicklung nach Geräten als auch hinsichtlich des Energiebedarfs nur schwer einzuschätzen. Dies liegt an der eingeschränkten und heterogenen Daten- bzw. Studienlage (Goetschkes et al. 2021). Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass – einhergehend mit den klimatischen und demografischen Veränderungen – der Bedarf an Kältetechnik in Deutschland ansteigen wird.

Geringe Marktnachfrage und Marktbarrieren

Wenn es um die systematische Ausweitung von nachhaltiger Kühlung geht, stellt die bisher fehlende Marktnachfrage eine der Kernherausforderungen dar (ESMAP 2020b). Das von der Weltbank verantwortete Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) hat eine Reihe zugrunde liegender Marktbarrieren identifiziert, die für die fehlende Nachfrage verantwortlich sind (ESMAP 2020b):

²⁸ Neuere Zahlen lagen im Recherchezeitraum bis 30. September 2022 nicht vor.



u.a. mangelnde Kenntnis der vielen Vorteile nachhaltiger Kühlung, mangelnde Transparenz der möglichen Kosteneinsparungen durch energieeffiziente Kälte- und Klimatechnik, fehlende Bewertungen der Effizienz sowie die Komplexität in Entscheidungssituationen aufgrund der verschiedenen verfügbaren Technologien und Abwägungen zwischen unterschiedlichen Kältemitteloptionen (ESMAP 2020b, S.65 ff.). In vielen Ländern ist eine Kombination von Hindernissen zu konstatieren, die miteinander verbunden sind und sich gegenseitig beeinflussen (ESMAP 2020b). Aus diesem Grund sind mehrgleisige Anstrengungen und ein integrierter Ansatz notwendig, die auf die spezifischen Marktbedingungen des jeweiligen Landes zugeschnitten sind, um die Hindernisse wirkungsvoll zu beseitigen (ESMAP 2020b).

Inwieweit die Marktbarrieren auch für deutsche Unternehmen gelten, kann nicht mit Gewissheit geschlussfolgert werden. Eine positive Nachfrageentwicklung bei Kühl- und Klimageräten ist bislang nicht prognostizierbar. Allerdings ist die deutsche Klima- und Kältetechnikbranche diversifiziert aufgestellt und hat Anbieter vielfältiger Lösungen, insbesondere auch Sonderlösungen, in ihren Reihen (Kap. 3.4.1; Interview Siegele/Denzinger). Zugleich zeigt sich aber, dass bestimmte Fertigkeiten, wie etwa die Massenproduktion von Haushaltskühlschränken und Klimageräten, in Deutschland nicht mehr uneingeschränkt vorhanden sind, sondern Produktionskapazitäten in andere Länder verlagert wurden (Interview Siegele/Denzinger). Um zukünftig verstärkt nachhaltige Kühllösungen entwickeln zu können, ist es erforderlich, dass das notwendige Wissen über diese Lösungen zielgenau von Akteuren aus Forschung und Entwicklung zu den möglichen Anbietern solcher Lösungen transferiert wird und der Schritt von der Entwicklung zur Marktreife gelingt. Ein Know-how-Transfer zwischen verschiedenen Akteursgruppen innerhalb der Klima- und Kältetechnikbranche unterstützt die Verbreitung des Wissens über nachhaltige Lösungen und kann die Transformation der Klima- und Kältetechnikbranche begleiten. Für den Technologietransfer wiederum sind finanzielle Mittel für Entwickler/innen nachhaltiger Kühllösungen erforderlich (Interview Siegele/Denzinger), die beispielsweise durch die Politik bereitgestellt werden könnten.

Marktbarrieren dürften auch in Deutschland die Einführung nachhaltiger Kühllösungen behindern.

Fehlende Fachkräfte/fehlendes Know-how

Die Umstellung der Klima- und Kältetechnikbranche auf nachhaltige Kühllösungen erfordert den Einsatz effizienterer Geräte und nachhaltiger Kältemittel. Den Fachkräften und Betreibern von Kühlanlagen mangelt es heute oftmals an Know-how bezüglich der Einsatzmöglichkeiten und Nachhaltigkeit bereits bestehender Kühltechnologien, sodass existierende energieeffiziente Verfahren, wie *Sorptionskältemaschinen, adiabate Kühlung oder hybride Systeme*, z.B. unter Nutzung von Wärmepumpen, bisher eher wenig Verwendung finden (Interview Urbaneck). Vor allem die künftig wichtiger werdende Nutzung natürlicher Kälte-



mittel erfordert zusätzliche Schulungsmaßnahmen. Zwar ist in Deutschland das Weiterbildungsangebot bereits entsprechend umgestellt, allerdings besteht im Umschulungsbereich noch Nachholbedarf (Interview Siegele/Denzinger).

Eine zusätzliche Herausforderung sind saisonale Schwankungen beim Fachkräftebedarf. Ähnlich wie bei Heizungstechniker/innen, die eher in der kälteren Jahreszeit zum Einsatz kommen, kann erwartet werden, dass vor allem in den Sommermonaten die Nachfrage nach Kältetechniker/innen zunehmen wird. Solchen Fluktuationen auf dem Arbeitsmarkt könnte dadurch begegnet werden, dass Heizungs- und Klimatechnik stärker als bisher miteinander verzahnt werden (Interview Siegele/Denzinger).

Um dem erwarteten Fachkräftemangel zu begegnen und fehlendes Know-how auszugleichen, ist eine Anpassung der Ausbildungs- und Qualifizierungsbedarfe erforderlich.

Da Klimageräte in deutschen Haushalten bisher eher die Ausnahme sind, könnte eine stark ansteigende Nachfrage im Privatbereich die verfügbaren Produktionskapazitäten der deutschen Klima- und Kältetechnikbranche übersteigen (Interview Siegele/Denzinger). Die Möglichkeiten, Kapazitäten ausweiten zu können, sind allerdings durch die Fachkräfteverfügbarkeit begrenzt. Unternehmen der Kälte-Klima-Branche in Deutschland setzen daher verstärkt auf Ausbildung. Zuletzt ist die Zahl der Auszubildenden in diesem Bereich leicht gestiegen (HLK 2020). Wie in vielen anderen Bereichen dürfte angesichts der demografischen Veränderungen sowie der Veränderungen im Bildungsbereich zukünftig eine Lücke zwischen zu besetzenden Lehrstellen sowie der Verfügbarkeit geeigneter Auszubildender entstehen.

Finanzielle Barrieren und Anreize



Die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen ist mit finanziellem Aufwand verbunden. Die Möglichkeiten, Fördergelder und Fremdkapital zu erhalten, sind für die an einer Umsetzung beteiligten Akteure eingeschränkt. Fördermittel können beispielsweise in Abhängigkeit von der jeweiligen Haushaltslage auf Bundes-, Länder- oder kommunaler Ebene nur begrenzt verfügbar sein (Interview Urbaneck). Außer mit öffentlichen Fördermitteln können nachhaltige Kühllösungen auch durch Subventionen, Steuervergünstigen oder spezifische Förderkredite, etwa durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) oder das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), finanziell gefördert werden (Usinger et al. 2018; Interview Siegele/Denzinger). Zugänge zu solchen Finanzierungsmöglichkeiten können durch Barrieren erschwert sein, beispielsweise durch das Fehlen passgenauer Förderkredite: Während die BAFA die Sanierung bzw. die Errichtung neuer Kälte- und Klimaanlage bezuschusst, umfasst die KfW-Förderung zwar Maßnahmen im Förderschwerpunkt Energieeffizienz und erneuerbare Energien, die den sommerlichen Wärmeschutz oder Kältetechnik zur Raumkühlung bei Nichtwohngebäuden fördern, die jedoch nicht auf nachhaltige Kühllösungen spezifiziert sind (Interview Siegele/Denzinger; KfW 2021).

Hindernisse für urbane Kühlungslösungen

Urbane Kühllösungen sind üblicherweise passive Lösungen, bei denen ein Entstehen des Kühlbedarfs vermieden wird. An ihrer Umsetzung sind verschiedene Akteursgruppen kooperativ beteiligt: Stadtplanung, Bauämter, Architektur, Planungsbüros, Baugewerbe sowie Garten- und Landschaftsbau. Allerdings ist die Bedeutung nachhaltiger bzw. passiver Kühllösungen bislang noch nicht bei allen beteiligten Akteuren ins Bewusstsein gerückt (Interview Siegele/Denzinger).

An erster Stelle kann also ein fehlendes Problembewusstsein die Umsetzung urbaner Kühllösungen behindern. Die Koordinierung von Lösungsansätzen erfordert jedoch die übergreifende Zusammenarbeit unterschiedlicher Stellen (ESMAP 2020a, S. 63). Ebenso notwendig sind strategische Instrumente wie beispielsweise Hitzeaktionspläne (Kap. 6.1.1). Solche Pläne kommen bislang trotz zunehmender Betroffenheit in deutschen Städten eher selten zum Einsatz (Hagelstange et al. 2021, S. 20). Die Umsetzung urbaner Kühllösungen wird also durch eine fehlende strategische Auseinandersetzung mit der Herausforderung zunehmenden Kühlbedarfs behindert (ESMAP 2020a, S. 63).

Ein weiteres Hindernis sind fehlende Finanzierungsmöglichkeiten oder fehlende wirtschaftliche Anreize. Dies führt dazu, dass Kosten und Nutzen nicht gleichmäßig auf Betroffene und für die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen erforderliche Akteure verteilt sind. Da beispielsweise eine grüne Infrastruktur nicht unmittelbar zu Renditen führt (ESMAP 2020a, S. 63), also zunächst eher Kosten



verursacht als finanziellen Ertrag erzeugt, sind wirtschaftliche Anreize erforderlich, um Akteure zu Investitionen in grüne Infrastruktur zu bewegen.

Allerdings zeigt sich, dass in Deutschland trotz existierender Barrieren Maßnahmen ergriffen werden, um urbane Kühllösungen umzusetzen. So werden beispielsweise in fast der Hälfte der deutschen Kommunen (47 %; n = 182) Dach- und Fassadenbegrünung unterstützt (Bundesregierung 2020, S. 37). Auch der Ausbau von Fern- bzw. Quartierskälte (Kap. 4.1) spielt bereits stellenweise eine Rolle, wenngleich bislang nur in 5 % der Kommunen (Hagelstange et al. 2021, S. 5). Die ökonomischen Potenziale von Fern- bzw. Quartierskälte werden global als stark steigend eingeschätzt: Weltweit soll das Marktvolumen zwischen 2015 und 2024 um ein Drittel auf ca. 17,3 Mrd. US-Dollar zunehmen (Hartley 2018). Dies könnte dazu führen, dass vermehrt Investitionen in Fern- und Quartierskälte getätigt werden.

5.2.2 Regulatorische Rahmenbedingungen

Regulatorische Rahmenbedingungen, die den Einsatz nachhaltiger Kühllösungen in Deutschland befördern können, sind auf verschiedenen Ebenen verortet. Globale, nationale und regionale Richtlinien bieten Handlungsoptionen, mit denen die negativen Umweltwirkungen von Kühllösungen reduziert werden können. Dies soll zum einen durch die Vermeidung klimaschädlicher Kühlmittel und zum anderen durch den Einsatz energieeffizienter Geräte erreicht werden.

Vermeidung klimaschädlicher Kühl- bzw. Kältemittel

Internationale Umweltabkommen, wie das Kyoto-Protokoll von 2009 und das Montrealer Protokoll von 1987, zielen darauf ab, die Verwendung fluoriierter Treibhausgase (F-Gase) einzuschränken und dadurch die Ozonschicht zu schützen (UBA 2022d). Die völkerrechtlich verbindlichen Vorgaben beider Abkommen sind in europäische Verordnungen und Richtlinien umgesetzt. Zusätzlich dazu sind weitere Rechtsvorschriften auf europäischer Ebene in Kraft. Damit sollen die EU-Umweltschutzziele erreicht werden. Auf nationaler Ebene werden europäische um nationale Rechtsvorschriften ergänzt (UBA 2022d).

Das *Montrealer Protokoll*, das 1987 von 24 Regierungen sowie der Kommission der Europäischen Gemeinschaft unterzeichnet wurde, sollte helfen, die Ozonschicht zu schützen, indem es den Ausstieg aus der Produktion und Verwendung von Stoffen markierte, die zum Abbau der Ozonschicht führen, vor allem FCKW. Bis 2009 hatten 197 Staaten das Protokoll ratifiziert. Dies hat dazu geführt, dass seit den späten 1980er Jahren die Produktionsmenge von ozonabbauenden Stoffen zwischen 95 und 99 % zurückgegangen ist (EIA 2022; UBA 2022d). 2016 wurde das Protokoll um das *Kigali Amendment* ergänzt, welches am 1. Januar 2019 in



Kraft getreten ist. Damit sollte auch der Einsatz von teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) durch ihre schrittweise Abschaffung begrenzt werden. Diese Ergänzung erweiterte das Montrealer Protokoll um Stoffe, die als Ersatz für FCKW genutzt wurden, jedoch nicht die Ozonschicht schädigten, allerdings ebenfalls klimaschädlich waren (EIA 2022; RefNat4Life 2021a, S. 2). Bis 2047 soll deren Einsatz um durchschnittlich 80 % gegenüber 2016 reduziert werden (UNEP 2020, S. 19).

In die Reihe internationaler Abkommen gehört auch das 2005 in Kraft getretene *Kyoto-Protokoll*. Darin finden sich Emissionsreduktionspflichten sowohl für die klassischen Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) als auch für die fluorierten Treibhausgase, jedoch keine darauf bezogenen, konkreten Maßnahmen (UBA 2021a). Das nachfolgende *Pariser Klimaabkommen* von 2015 hat ebenfalls Konsequenzen für den Klima- und Kältesektor. Diese betreffen die Vermeidung direkter Emissionen, also den Ausstoß der klimaschädlichen Stoffe, und die Erhöhung der Energieeffizienz zur Reduktion indirekter Emissionen. Allerdings haben nur wenige Länder (Ghana, Jordanien und Vietnam) diesen Sektor im Rahmen ihrer national festgelegten Beiträge erwähnt. Anders sieht es bei Reduktionszielen bezüglich der im Kyoto-Protokoll erwähnten Treibhausgase und der Energieeffizienz aus. Von den 197 Ländern, die das Abkommen unterzeichnet haben, erwähnen 83 Länder im Rahmen ihrer national festgelegten Beiträge explizit Fluorkohlenwasserstoffe, 143 Länder erwähnen Energieeffizienz (Usinger et al. 2018, S. 7). Die Berücksichtigung des Klima- und Kältesektors in den national festgelegten Beiträgen ist daher bislang nur sehr begrenzt erfolgt.

Auf europäischer Ebene hat sich die Europäische Union als Vertragsstaat des Kyoto-Protokolls zur Emissionsminderung verpflichtet und dementsprechend eigene Klimaschutzziele formuliert. Um diese Ziele zu erreichen, wurden u. a. die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 und die Richtlinie 2006/40/EG²⁹ erlassen, die das Inverkehrbringen und die Verwendung fluoriertes Treibhausgase regeln (UBA 2022d). Zentrales Element der Verordnung ist eine gezielte Verknappung fluoriertes Kältemittel und somit die Reduzierung ihres Treibhausbeitrags (Brackemeier/McNally 2020). Gemäß Verordnung Nr. 517/2014 werden die Verkaufsmengen von HFKW bis 2030 schrittweise auf 21 % des Konsums im Jahr 2015 begrenzt (RefNat4Life 2021a, S. 5). Die Richtlinie 2006/40/EG regelt die Verwendung von Kältemitteln in Fahrzeugklimaanlagen. Seit dem 1. Januar 2017 sind Kältemittel mit einem GWP von über 150 (Kap. 4.3) in neuen Pkw und Pkw-ähnlichen Nutzfahrzeugen verboten und müssen ersetzt werden (UBA 2022d). Als Ersatz kommen CO₂ oder R1234yf (Tetrafluorpropen) infrage, wobei Letztgenanntes nicht

29 Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG



nur brennbar, sondern insbesondere im Brandfall auch umwelt- und gesundheits-schädlich ist (UBA 2022a).

Im Juni 2022 hat die EU-Kommission einen Vorschlag für eine Verordnung angenommen, der Verbesserungen der Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht und der Umsetzung des Montrealer Protokolls enthält. Verbesserungsvorschläge betreffen u. a. die Vereinfachungen von Kontrollmaßnahmen sowie die Steigerung der Koordination unterschiedlicher nationaler Zollvorschriften (EK 2020).

Die Bekämpfung der illegalen Einfuhr von Kältemitteln unterstützt die Einhaltung der europäischen Klimaschutzziele.

Die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 zeigt neben den eigentlichen Reduktionszielen weitere, nicht unbedingt intendierte Folgen. Zum einen konnten mit der schrittweisen Reduktion der fluorierten Kältemittel Innovationen in den Bereichen neuer Kältemittel und Wiederaufbereitung im Markt vorhandener Kältemittel angestoßen werden (Brackemeier/McNally 2020, S. 2). Allerdings ist auf dem europäischen Markt auch eine hohe Preisdiskrepanz zu anderen Märkten entstanden, sodass die illegale Einfuhr von Kältemitteln zugenommen hat (Brackemeier/McNally 2020, S. 2 f.). Der Aspekt der illegalen Einfuhr von Kältemitteln wurde auf nationaler Ebene zuletzt 2021 adressiert. Mit dem Dritten Gesetz zur Änderung des Chemikaliengesetzes³⁰ soll der illegale Handel mit fluorierten Treibhausgasen bekämpft werden. Unter anderem soll dies durch strengere Sanktionen sowie eine Begleitdokumentation, die entlang der Lieferkette erstellt werden muss, erreicht werden (Thalheim 2021).

Auf nationaler Ebene wurden in Deutschland hierfür die Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV)³¹ (UBA 2021b) und die Chemikalien-Ozonschichtverordnung (ChemOzonSchichtV)³² umgesetzt. Seit dem 1. Januar 2015 ist zudem ein Verwendungsverbot für alle teilhalogenierten ozonabbauenden Kältemittel, auch für aufgearbeitete Kältemittel, in Kraft (UBA 2014).

5.2.3 Innovationspolitische Rahmenbedingungen

Innovationspolitische Rahmenbedingungen prägen die zukünftige Entwicklung und Umsetzung innovativer Lösungen. Zwei wesentliche Innovationspfade – die Steigerung der Energieeffizienz sowie der Ersatz klimaschädlicher Kältemittel – wurden bereits in Kapitel 4.3 dargestellt. Die genannten regulatorischen Rahmenbedingungen zielen vor allem auf die Vermeidung klimaschädlicher Kältemittel ab (Kap. 5.2.2). Die Forschung an alternativen, natürlichen Kältemitteln ist

30 Drittes Gesetz zur Änderung des Chemikaliengesetzes – Bekämpfung des illegalen Handels mit fluorierten Treibhausgasen (vom 3.6.2021)

31 Verordnung zum Schutz des Klimas vor Veränderungen durch den Eintrag bestimmter fluorierter Treibhausgase (Chemikalien-Klimaschutzverordnung – ChemKlimaschutzV), zuletzt geändert am 19.6.2020

32 Verordnung über Stoffe, die die Ozonschicht schädigen (Chemikalien-Ozonschichtverordnung – ChemOzonSchichtV), zuletzt geändert am 19.6.2020



ein Innovationspfad, der einen verbindlichen zeitlichen Rahmen aufweist, vorgegeben durch den schrittweisen Ausstieg aus der Verwendung klimaschädlicher Kältemittel.

Es bestehen allerdings auch andere innovationspolitische Rahmenbedingungen, mit denen insbesondere der verstärkte Einsatz passiver Kühlösungen gefördert werden kann. Zum einen betrifft dies Vorgaben für bauliche Maßnahmen, zum anderen die Förderung von Maßnahmen zur Klimaanpassung in Städten.

Auf nationaler Ebene regelt das Gebäudeenergiegesetz (GEG)³³ u. a. den sommerlichen Wärmeschutz für Wohngebäude bzw. den intendierten Schutz der Bewohner/innen. Gleichzeitig soll sichergestellt werden, dass Klimatisierungsbedarf aus Energiespargründen möglichst vermieden wird. (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2021, S.50). Als problematisch bei der derzeitigen Rechtslage erweist sich u. a., dass Grenzen für eine behagliche Temperatur ebenso wie gesundheitsschädliche Temperaturbereiche nicht eindeutig festgelegt werden können und für unterschiedliche Fälle, etwa durch den Arbeitsschutz oder auch im schulischen Bereich auf Länderebene, verschieden geregelt sind. Die Entscheidung für eine bauliche oder eine anlagentechnische Gewährleistung des sommerlichen Wärmeschutzes durch eine Kühl- bzw. Klimaanlage kann anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen zugunsten anlagentechnischer Lösungen getroffen werden. Dies ist dann mit einem entsprechenden Energieverbrauch verbunden, anders als eine passive, bauliche Maßnahme.

³³ Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG), zuletzt geändert am 20.7.2022



Auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene existieren Fördermöglichkeiten für die Begrünung von Dächern und Fassaden.

Mit dem Bundesprogramm Biologische Vielfalt, der Städtebauförderung sowie im Rahmen von KfW-Förderprogrammen stehen auf Bundesebene finanzielle Fördermöglichkeiten für die *Begrünung von Dächern und Fassaden* bereit. Dazu kommen Aktivitäten auf Landes- und kommunaler Ebene (Schmauck 2019, S.41.49). So lassen sich insbesondere Klimaanpassungen in Städten realisieren, die ihrerseits einen Beitrag zur Vermeidung des urbanen Hitzeinseleffekts leisten. Insgesamt lässt sich in deutschen Kommunen zwar ein positiver Trend hin zu mehr begrünten Dachflächen und Fassaden beobachten, jedoch bleiben viele Potenziale noch ungenutzt, sodass hier weiterer Handlungsbedarf besteht, etwa bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Gründächern im Vergleich zu PV-Dächern oder kombinierten Solargründächern (begrünte Dachflächen und PV-Anlagen) (Mann et al. 2020, S.61).



6 Handlungsfelder

Ausgehend von dem weltweiten und auch in Deutschland erkennbaren Bedarf an nachhaltigen Kühllösungen und den geschilderten bzw. analysierten Innovationsbereichen können politische Handlungsfelder aufgezeigt werden. Innerhalb der einzelnen Handlungsfelder können Optionen bzw. Maßnahmen dargestellt werden, die umgesetzt werden können, um nachhaltige Kühllösungen zu implementieren. Die Handlungsfelder lassen sich unterteilen in vorbeugende bzw. präventive Handlungsfelder, bei denen die Entstehung von Kühlbedarfen vermieden wird (Kap. 6.1), und begleitende Handlungsfelder, die dazu beitragen, einen entstandenen Kühlbedarf nachhaltig zu bedienen (Kap. 6.2). Dazu gehören der Einsatz effizienter und emissionsarmer Technologien, die Optimierung der Kühllast und die Schließung von Kühlkreisläufen.

6.1 Kühlbedarf durch vorbeugende Maßnahmen vermeiden

Mit urbanen Kühllösungen wurden Innovationen geschildert, die vor allem dazu beitragen, den Hitzeinseleffekt in Städten zu minimieren und thermischen Komfort für Menschen in Innenräumen erzeugen. Es handelt sich größtenteils um passive Lösungen, mit Ausnahme der Kühlzentren und Quartierskälte, bei denen Kühlgeräte zum Einsatz kommen. Auch kulturelle bzw. Verhaltensanpassungen können vorbeugenden Charakter haben. Die Umsetzung urbaner Kühllösungen, die dazu beitragen sollen, Kühlbedarf gar nicht erst entstehen zu lassen, ist daher vor allem auf der kommunalen Ebene angesiedelt (Kap. 6.1.1). Es gibt jedoch auch eine Ebene der übergeordneten Handlungsfelder, die Querschnittscharakter haben (Kap. 6.1.2). Weil davon auszugehen ist, dass künftig vermehrt heiße Tage und länger andauernde Hitzewellen auftreten werden, spielt die Vorbeugung bzw. Vorbereitung eine wichtige Rolle.

6.1.1 Kommunale Ebene

Auf kommunaler Ebene bestehen vor allem Handlungsoptionen zur Stärkung passiver Kühllösungen. Eine Förderung des kommunalen Klimaschutzes kann dazu beitragen, Kühlbedarf zu vermeiden. Des Weiteren besteht die Option, Bestandsbauten an zunehmende Hitze anzupassen und so eine Kühlung der Innenräume zu ermöglichen. Eine rechtzeitige Warnung vor sich abzeichnenden Hitzewellen ist notwendig und hilfreich, um proaktiv vorbeugende Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu ergreifen. Dem Ausbau von Hitzewarndiensten kommt daher eine große Bedeutung zu. Auch die Formulierung von Hitzeaktionsplänen mit Maßnahmen, die während der Hitzewellen zu ergreifen sind, wäre zielführend und vorbeugend.

Förderung des kommunalen Klimaschutzes



Kommunaler Klimaschutz spielt eine wichtige Rolle bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland (Handschuh et al. 2020, S. 109). Über die nationale Klimaschutzinitiative wurden seit 2008 ca. 16.650 Projekte in 3.650 Kommunen gefördert (Handschuh et al. 2020, S. 5). Vor allem angesichts der in den letzten Jahren gehäuft aufgetretenen Extremwetterereignisse, insbesondere Hitzewellen, kann unmittelbare Betroffenheit zu einem Treiber für die Umsetzung von Vorbeugungsmaßnahmen werden. Waren 2008 noch lediglich 8% der deutschen Kommunen nach eigenen Angaben von Hitzeperioden betroffen, waren es 12 Jahre später schon 70% (Hagelstange et al. 2021, S. 18).

Trotz des hohen Maßes an Betroffenheit zeigen regelmäßig durchgeführten Befragungen in Kommunen auch punktuell Nachholbedarf bei der Umsetzung konkreter Maßnahmen zur nachhaltigen Kühlung: So verfolgen beispielsweise nur rund 5% der deutschen Kommunen Maßnahmen zum Ausbau der Fernkälte (Hagelstange et al. 2021, S. 5). Klimaschutzkonzepte sind grundsätzlich in einer Vielzahl der deutschen Kommunen vorhanden bzw. in Arbeit (87%). Die Erstellung solcher Konzepte wird seit 2008 vom BMUV im Rahmen der Kommunalrichtlinie gefördert (Hagelstange et al. 2021, S. 4). Neben der Finanzierung durch die Kommunalrichtlinie nehmen Kommunen in Deutschland weitere Förderprogramme des Bundes oder der KfW in Anspruch. Auch eine Förderung auf Landesebene trägt zur Umsetzung kommunaler Klimaschutzmaßnahmen bei (Hagelstange et al. 2021, S. 6).

Da Kommunen jedoch nicht vollumfänglich über Handlungsmöglichkeiten verfügen, steht seit 2019 mit dem Klimaschutzgesetz ein Bundesgesetz zur Verfügung, das kommunale Anstrengungen unterstützen soll (Hagelstange et al. 2021, S. 21; Handschuh et al. 2020, S. 20).

Bestandsbauten an Hitze anpassen

Eine Handlungsoption für Kommunen besteht darin, den Gebäudebestand auch nachträglich an Hitze anzupassen. Bei Neubauvorhaben können Kühllösungen bereits während der Planung berücksichtigt werden. Möglichkeiten, den Wärmeeintrag zu mindern, die Wärmespeicherfähigkeit zu optimieren und die Luftzirkulation zu verbessern, wurden in Kapitel 5.1 vorgestellt. Insbesondere bei der Optimierung der Wärmespeicherfähigkeit durch geeignete Dämmung besteht im Wohngebäudebestand noch Nachholpotenzial. Jährlich wurden bislang weniger als 1% der Wohngebäude nachträglich isoliert (Eckstein et al. 2019). Zum Teil lassen sich Maßnahmen kurzfristig realisieren, wie beispielsweise die Verdunklung durch Vorhänge, Jalousien, Markisen, Fenster- oder Rollläden und Sonnenschirme bei direkter Sonneneinstrahlung sowie die Berücksichtigung der Empfehlungen zur Anpassung des Lüftungsverhaltens (B/L-Ad-hoc AG GAK 2017, S. 668). Eine mittelfristige Anpassungsmaßnahme kann neben der Installation von Ver-

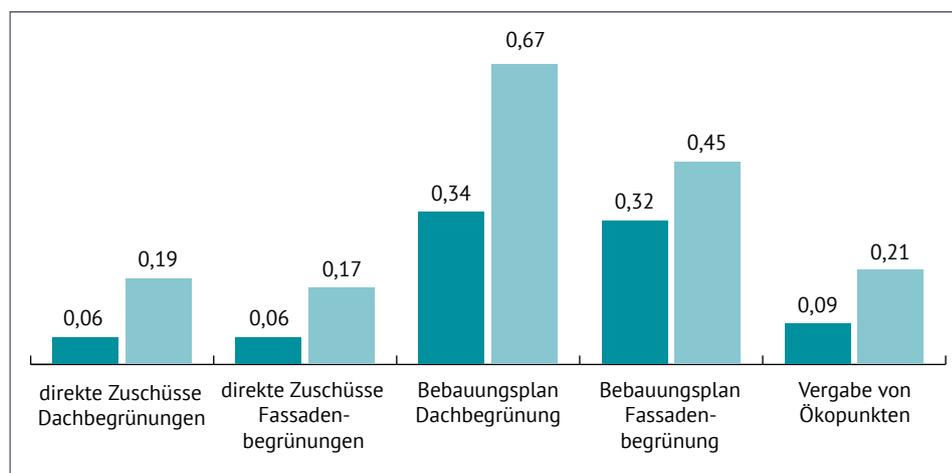


schattungselementen, Wand- und Dachisolierungen sowie Dach- und Fassadenbegrünung auch der Einbau von Kühl- und Klimaanlage sein (B/L-Ad-hoc AG GAK 2017, S.668).

Maßnahmen der Dach- und Fassadenbegrünung können bei Neu- sowie Bestandsbauten durchgeführt werden. In Deutschland nimmt die Bedeutung dieser Maßnahmen zwar zu, es sind allerdings noch längst nicht alle Begrünungspotenziale ausgeschöpft. Seit 2008 hat sich die Zahl der jährlich begrüneten Dachflächen verdoppelt (Mann et al. 2020, S.16). Jedoch werden ca. 90% der neu entstehenden Dachflächen nicht begrünt (Mann et al. 2020, S.60). Inwieweit Potenziale im Gebäudebestand genutzt werden, lässt sich aktuell nicht beziffern. Hinsichtlich kommunaler Förderinstrumente zeigt sich eine leicht positive Tendenz (Abb. 17): Sowohl mit Blick auf Förderprogramme als auch auf Bebauungspläne und Abwassergebührenordnungen (gesplittete Abwassergebühr als Anreiz für Dachbegrünung) und die Vergabe von Ökopunkten³⁴ sind positive Entwicklungen erkennbar (Mann et al. 2020, S. 26 ff.). Ferner existieren Richtlinien, die bei Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen unterstützen (Sieker et al. 2019, S.25).

Die Anpassung des Gebäudebestands an zunehmende Hitze kann ein wichtiger Hebel bei der Realisierung nachhaltiger Kühllösungen sein. Hier bestehen noch Nachholpotenziale.

Abb. 17 Entwicklung kommunaler Fördermaßnahmen für Dach- und Fassadenbegrünung



Eigene Darstellung nach Mann et al. 2020, S.27

34 Ökopunkte sind Wertpunkte, die vergeben werden, um zu ermitteln, wie hoch der durch einen negativen Eingriff in Natur und Landschaft entstehende Kompensationsbedarf ist. Negative Effekte, etwa durch Versiegelung/Bebauung, können teilweise durch positive Effekte ausgeglichen werden, sodass die Kompensationsmaßnahmen anhand der Gegenüberstellung der negativen und positiven Wertpunkte ermittelt werden können (Mann et al. 2022, S.76).



Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung

Maßnahmen, die auf eine Begrünung von Dächern, Fassaden und innerstädtischen Flächen abzielen, haben zur Folge, dass die Nutzung von Regenwasser an Bedeutung gewinnt. Bislang ist Verdunstungskühlung durch Regenwasser kein zentraler Bestandteil der Regenwasserbewirtschaftung. Diese zielt eher auf Ableitung und Versickerung ab. Eine Ausweitung der grünen Infrastruktur kann auch dazu beitragen, dass Regenwasser zur Verdunstungskühlung beiträgt (Sieker et al. 2019). Insofern können bestehende Regelwerke zur Abwasserbewirtschaftung dahingehend überprüft werden, ob durch ein intelligentes, dezentrales Regenwassermanagement ein Beitrag zur Verdunstungskühlung geleistet werden kann. Vor allem die stärkere Berücksichtigung von Verdunstung im Wasserrecht und die Anpassung der Baugesetzgebung mit Blick auf die Schaffung planerischer Grundlagen zur Berücksichtigung von Maßnahmen zur Verdunstungskühlung können hier in Betracht gezogen werden.

Stadtklimakarten als Planungsinstrumente

Ein relevantes Planungsinstrument stellen präzise Stadtklimakarten dar, mit denen Städte ihre Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels vorbereiten können. Stadtklimakarten können als Grundlage für die Entwicklung zukünftiger Bebauungspläne herangezogen werden (Landeshauptstadt Potsdam 2019). Sie weisen sowohl Risikozonen für Hitze und Überschwemmungen als auch Kaltluftschneisen aus, durch die kühle Luft aus der ländlicheren Umgebung in die Innenstadt strömen kann. In diese Karten fließen zahlreiche Daten ein, u. a. zur Höhe von Gebäuden, zum Grad der Versiegelung oder zu Grün- und Geländeoberflächen (Kampe 2020, S. B 6). Stadtklimakarten, die auch als Klimaanalysekarten oder Klimafunktionskarten bezeichnet werden, werden entsprechend der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1³⁵ erstellt. Beispiele finden sich in zahlreichen deutschen Städten, u. a. in Berlin³⁶, Leipzig³⁷ oder Mannheim³⁸ sowie zahlreichen weiteren Städten und Kommunen.

Zur Abschätzung der ökologischen und ökonomischen Effekte mittels Ausbau der grünen Infrastruktur in Städten stehen Instrumente wie beispielsweise das Onlineportal „Stadtgrün Wertschätzen“³⁹ zur Verfügung. Mithilfe solcher Instrumente können sowohl die positiven Effekte durch Ausbau der grünen Infra-

35 VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1: Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen

36 <https://www.berlin.de/umwelt/themen/klima-energie/artikel.119766.php> (9.12.2022)

37 <https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/energie-und-klima/stadtklima> (9.12.2022)

38 <https://stadtklimaanalyse-mannheim.de/> (9.12.2022)

39 <https://www.stadtgruen-wertschaetzen.de/app/stadtgruenapp> (9.12.2022)



struktur als auch die negativen Effekte durch Wegfall ebendieser Infrastruktur ermittelt werden (IÖW 2022).

Ausbau von Hitzewarndiensten und -aktionsplänen

Hitzewarndienste sind ein Instrument, um betroffene und vulnerable Bevölkerungsgruppen rechtzeitig vor dem Eintreten von Hitzeereignissen zu warnen, so dass die Menschen Maßnahmen zu ihrem Schutz ergreifen können. In Deutschland werden Hitzewarnungen in zwei Stufen (I: starke Wärmebelastung und II: extreme Wärmebelastung) vom Deutschen Wetterdienst (DWD) herausgegeben. Sie richten sich an zuständige Stellen, Alten- und Pflegeheime, Kindergärten sowie ambulante und stationäre Pflegeeinrichtungen und an die allgemeine Bevölkerung (B/L-Ad-hoc AG GAK 2017, S.665). Auch Warnsysteme des Bevölkerungsschutzes, wie etwa die Apps „Katwarn“ und „Nina“, informieren über Extremwetterereignisse einschließlich örtlicher, außergewöhnlicher Hitzebelastungen.

Unter Einbeziehung von Hitzewarnsystemen können Hitzeaktionspläne mit dem Ziel, die negativen Folgen extremer Hitze zum Schutz der Bevölkerung zu reduzieren, auf kommunaler oder Landesebene ausgearbeitet werden (Jay et al. 2021, S.718 ff.). 2017 hat die Bund/Länder-Ad-hoc-Arbeitsgruppe „Gesundheitliche Anpassungen an die Folgen des Klimawandels (GAK)“ acht Handlungsempfehlungen formuliert, mit denen die Kernelemente von Hitzeaktionsplänen umgesetzt werden können. Zu den Kernelementen zählen (B/L-Ad-hoc AG GAK 2017, S.663):

1. Zentrale Koordinierung und interdisziplinäre Zusammenarbeit
2. Nutzung eines Hitzewarnsystems
3. Information und Kommunikation
4. Reduzierung von Hitze in Innenräumen
5. Besondere Beachtung von Risikogruppen
6. Vorbereitung der Gesundheits- und Sozialsysteme
7. Langfristige Stadtplanung und Bauwesen
8. Monitoring und Evaluation der Maßnahmen

In Hitzeaktionsplänen werden diese Kernelemente sowie die Kommunikations- und Informationsflüsse zwischen den einzelnen Bestandteilen definiert. Außerdem beinhalten sie kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen, die ergriffen werden können, um mit auftretenden Hitzeereignissen umzugehen.

Allerdings gibt es gegenwärtig sowohl Defizite in der Kenntnis über die Empfehlungen als auch bei der eigentlichen Umsetzung der Empfehlungen in Form von Hitzeaktionsplänen. Während bei einer Befragung aus dem Jahr 2020 auf Landesebene immerhin 91 % der berücksichtigten Stellen Kenntnis der Handlungsemp-



fehlungen bekundeten, waren es von den Städten und Gemeinden nur 54 % und auf Ebene der Landkreise nur 41 % (Kaiser et al. 2021a, S. 20).

Wenngleich sich die Handlungsempfehlungen primär an die Bundesländer richten, erfolgt die Umsetzung von Hitzeaktionsplänen aufgrund regionaler bzw. lokaler Spezifika auf kommunaler Ebene. Trotz der in den vergangenen Jahren häufiger aufgetretenen extremen Hitzeereignisse ist bislang keine umfassende Entwicklung bzw. Umsetzung von Hitzeaktionsplänen erfolgt. Nur rund ein Viertel (26 %) der befragten Bundesländer bzw. ein Fünftel (22 %) der befragten Städte und Gemeinden gaben an, Hitzeaktionspläne zu erarbeiten bzw. bereits umgesetzt zu haben (Kaiser et al. 2021a, S. 23). Größte Umsetzungsbarrieren sind den Angaben zufolge fehlendes Personal und fehlende finanzielle Unterstützung (Kaiser et al. 2021a, S. 24; Kaiser et al. 2021b, S. 33).

Hitzeaktionspläne können ein wichtiges Instrument sein, um vulnerable Gruppen vor Hitze zu schützen. Bei der Umsetzung besteht allerdings noch Nachholbedarf auf kommunaler wie auch auf Bundesebene.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich bei einer 2022 durchgeführten Recherche: Auf Landkreisebene (n=299) gaben rund 80 % an, keinen Hitzeaktionsplan oder vergleichbare Hitzeschutzkonzepte zu besitzen (Biermann et al. 2022); einen Hitzeaktionsplan, der alle acht Empfehlungen berücksichtigt, hat bislang keine Kommune in Deutschland umgesetzt (Hamann 2022). Ähnlich sieht es auf Landesebene aus. Auch einen bundeseinheitlichen Hitzeaktionsplan gibt es bislang nicht (Deutschlandfunk 2022). Entsprechende Vorhaben sind jedoch gegenwärtig durch das BMUV in Erarbeitung (BMU 2021, S. 7).

6.1.2 Übergeordnete Ebene

Die Ausführungen zum Ausbau von Hitzewarndiensten und zu Hitzeaktionsplänen haben gezeigt, dass die Umsetzung vorbeugender Maßnahmen zur Steigerung nachhaltiger Kühlung nicht nur auf die kommunale Ebene beschränkt bleibt. Vielmehr bestehen Wechselwirkungen bzw. wechselseitige Abhängigkeiten zwischen kommunaler, Landes- und Bundesebene. Daher können auch Handlungsoptionen identifiziert werden, die einen Querschnittscharakter aufweisen.

Nachhaltige Kühlung als Querschnittsaufgabe

Die Fragestellungen und Lösungsansätze rund um nachhaltige Kühlung sind komplex und facettenreich. Die konkreten Probleme, die sich für eine Stadt oder Kommune ergeben, lassen sich nicht mit eingefahrenen, singulären Denk- und Aktionsmustern lösen – weder was die Strukturen und Prozesse auf politischer Ebene (Verwaltungsstrukturen, Vergabe- und Bewilligungsverfahren etc.) noch auf fachlicher Ebene (einzelne, miteinander konkurrierende Fachperspektiven) betrifft. Entsprechende Schlussfolgerungen sind sowohl auf internationaler wie auch nationaler Ebene möglich (Keith et al. 2020).



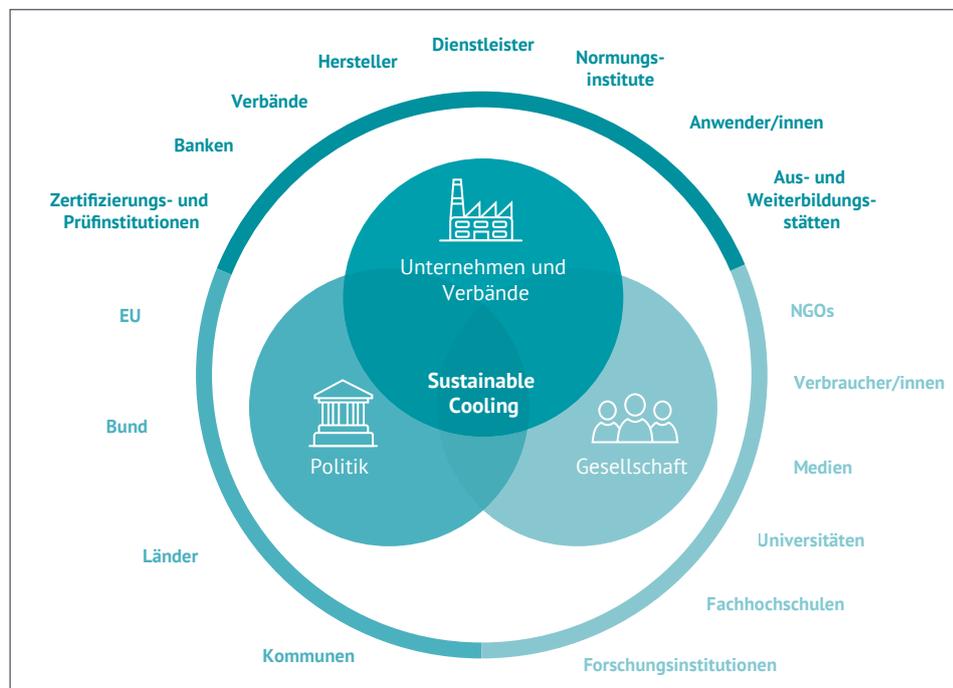
Wenn nachhaltige Kühlung als Querschnittsaufgabe betrachtet wird, bei der passive und aktive Kühlösungen integriert und je nach lokalen Erfordernissen angepasst werden, dann bedarf es sowohl der interdisziplinären, ressortübergreifenden Zusammenarbeit als auch einer zentralen Koordinierung. Dies erscheint vor dem Hintergrund der föderal verteilten Zuständigkeiten und der in unterschiedlichen Behörden verankerten Verantwortlichkeiten unumgänglich (B/L-Ad-hoc AG GAK 2017, S.664f.).

Auf kommunaler Ebene ist eine zentrale Verankerung in der Stadtverwaltung sinnvoll, bei der die Umsetzung nachhaltiger Kühlösungen ressortübergreifend vorangetrieben wird. Auch ressortübergreifender Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer sowie die Ermöglichung von Lernprozessen können dabei unterstützen (Westermann et al. 2021).

Sensibilisierung und Beteiligung relevanter Akteure

Um die Querschnittsaufgabe Sustainable Cooling angehen zu können, ist zunächst eine Sensibilisierung und Beteiligung relevanter Akteure erforderlich. Abbildung 18 gibt einen Überblick über Akteursgruppen, die als relevant erachtet werden.

Abb. 18 Akteursgruppen im Bereich nachhaltige Kühlung



Eigene Darstellung



Die drei großen Akteursgruppen – Politik, Gesellschaft und Unternehmen/Verbände – umfassen jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure, die von den Auswirkungen eines steigenden Kühlbedarfs betroffen sind und daher an der Umsetzung nachhaltiger Lösungen beteiligt sein müssen.

- *Politische Akteure* können für eine ressort- und behördenübergreifende Zusammenarbeit sensibilisiert werden. Zudem können sie durch geeignete Maßnahmen das Risikobewusstsein in der Bevölkerung stärken, lokale Frühwarnsysteme für Extremwetter einrichten sowie die Resilienz kritischer Infrastrukturen durch gezielte Prävention und Anpassung erhöhen. Eine bereits implementierte Maßnahme ist beispielsweise das Internetportal „klima-mensch-gesundheit.de“, mit dem die Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA) über die Auswirkungen steigender Temperaturen und vorbeugende Maßnahmen informiert und Planungsgrundlagen für eine hitzeverträgliche Gestaltung menschlicher Umgebungen bereitstellt (BMG 2022).
- *Gesellschaftliche Akteure* sind durch eine hohe Heterogenität und unterschiedlich starke Betroffenheit gekennzeichnet. Die Nutzung von Hitzewarndiensten und Informationsangeboten kann dazu beitragen, unterschiedliche Gruppen zu sensibilisieren. Insbesondere der Schutz vulnerabler Gruppen, also ältere Menschen und Kinder sowie Personen mit Erkrankungen, sollte dabei im Vordergrund stehen. Handlungsbedarfe können durch Befragungen eruiert und sichtbar gemacht werden (Westermann et al. 2021, S.262). Auch die Kenntnis erforderlicher Verhaltensanpassungen, z.B. angemessene Bekleidung und angepasste Arbeitszeiten, kann durch die Kommunikation durch geeignete Akteure – wie etwa Verbraucherzentralen – gesteigert werden (Westermann et al. 2021, S.264). Akteure in Wissenschaft und Forschung sind gleich in mehrerer Hinsicht betroffen bzw. an der Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen beteiligt. Zum einen spielt die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften eine wichtige Rolle, die beispielsweise von Fachhochschulen und Universitäten ausgefüllt werden kann. Zum anderen trägt die Forschung an und Entwicklung von innovativen Kühllösungen sowie deren Transfer in die Anwendung dazu bei, nachhaltige Kühllösungen zu verbreiten.
- *Wirtschaftliche Akteure*, also Unternehmen und Verbände, spielen mit ihrer Innovationskraft eine wichtige Rolle bei der Entwicklung nachhaltiger Kühllösungen in effiziente Technologien und neue Geschäftsmodelle. Ihre Sensibilisierung kann zum einen durch geeignete regulatorische und innovationspolitische Rahmenbedingungen erfolgen. Zum anderen können entlang der Wertschöpfungsketten die verschiedenen Akteure für die Realisierung gemeinsamer Ziele sensibilisiert werden, indem Kapazitäten aufgebaut und Innovationspotenziale gehoben werden (ESMAP 2020b, S. 75 ff.).

Bei der Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen, die einen integrierten Ansatz verfolgen, sind alle drei Akteursgruppen von Bedeutung. Allerdings ist zu berücksichtigen,



sichtigen, dass zum Teil Zielkonflikte und unterschiedlich verteilte Betroffenheiten bestehen, die ein gemeinsames Handeln erschweren können.

Öffentliche Investitionen und Beschaffung

Ein wichtiger Hebel, nachhaltige Kühllösungen umzusetzen, können öffentliche Investitionen und Beschaffung sein. Infrage kommt dafür zum einen die erstmalige Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen in öffentlichen Gebäuden. Zum anderen können auch die bislang genutzten Kühltechnologien in öffentlichen Gebäuden unter Berücksichtigung von technischen Kriterien und Lebenszyklusanalysen auf ihre Nachhaltigkeit hin überprüft werden. Dies umfasst die Energieeffizienz der genutzten Anlagen ebenso wie die eingesetzten Kältemittel.

Bei der Beschaffung von Kältemitteln ist beispielsweise zu überprüfen, nach welchen Kriterien entschieden wird. Bei der Wahl der Kältemittel kann es ausschließlich um den Einsatz von Kältemitteln mit geringem GWP, niedriger Brennbarkeit (Brandschutz) und geringer bis gar keiner Toxizität (Umwelt- und Gesundheitsschutz) gehen. Alternativ könnte auch die Verwendung natürlicher Kältemittel verbindlich festgelegt werden.

Die Anpassung von Investitions- und Beschaffungsrichtlinien kann sowohl für Bundes- als auch für Landesbehörden umgesetzt werden.

6.2 Kühlbedarf auf nachhaltige Weise decken

Wenn Kühlbedarf schon besteht, sollte er auf nachhaltige Weise gedeckt werden. Die dazu eingesetzten Technologien sollten effizient und emissionsarm sein. Dies setzt voraus, dass der Einsatz solcher Technologien nicht an Barrieren scheitert. Weiterhin können die Kühllast im Betrieb optimiert und Kühlkreisläufe geschlossen werden.

6.2.1 Abbau von Umsetzungsbarrieren

Nicht nur die Umsetzung passiver bzw. vorbeugender Lösungsansätze weist Barrieren auf. Auch die Realisierung nachhaltiger Kühllösungen mit technischen Mitteln ist durch Hindernisse gekennzeichnet. Um diese abzubauen, müssen die Barrieren zunächst identifiziert werden. Sodann können geeignete Anreizstrukturen geschaffen werden. Die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen sollte den gesamten Lebenszyklus technischer Anlagen berücksichtigen. Dazu gehören auch eine Betrachtung der Entsorgungsphase und eine kontinuierliche Überprüfung der Effektivität der genutzten Maßnahmen.



Wirtschaftliche Anreize und Steuern

Vor allem die ökonomischen Rahmenbedingungen erweisen sich gegenwärtig noch als eher hinderlich für die Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen (Kap. 5.2.1). Bei der Realisierung technischer Lösungen können wirtschaftliche Anreize unterstützend wirken. Zum einen kann dies über Rabatte auf nachhaltige Technologien erreicht werden. Zum anderen können Steuern, beispielsweise auf Grundlage von CO₂-Äquivalenten, dazu genutzt werden, Kältemittel mit höherem GWP auch höher zu besteuern. Ebenso kann die Besteuerung auch die Entsorgungsphase, also das Recycling oder die Vernichtung der eingesetzten Kältemittel, berücksichtigen, sodass nachhaltige Entsorgung mit steuerlichen Vorteilen verbunden ist (Usinger et al. 2018). Subventionen können ebenfalls eingesetzt werden, um negative Anreize abzubauen. Damit derartige Finanzinstrumente ihre Wirkung entfalten können, ist Kenntnis der Finanzierungsbedürfnisse ebenso erforderlich wie ein umfassender Überblick über Finanzierungsquellen und -akteure. Das betrifft sowohl politische Akteure, die über die Nutzung von Finanzinstrumenten entscheiden, als auch wirtschaftliche Akteure, die Finanzinstrumente nutzen wollen. Maßnahmen zur Kommunikation von verfügbaren Finanzierungsinstrumenten können den Nutzungsgrad erhöhen.

Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus: Recycling- und Vernichtungsvorschriften

Es ist bereits angeklungen, dass die Verwendung von Kältemitteln eine grundsätzliche Herausforderung darstellt (Kap. 3.2). In der Regel müssen sie am Ende ihres Lebenszyklus ordnungsgemäß aus den Anlagen entnommen werden. Anschließend erfolgt die Lagerung oder Entsorgung. Alternativ kann auch eine Wiederaufbereitung oder Rezyklierung durchgeführt werden. Bei der Gestaltung von Anreizstrukturen, die nachhaltige Lösungen unterstützen sollen, sind daher diese Phasen des Lebenszyklus möglichst zu berücksichtigen. Dies betrifft auch technische Anlagen bzw. Kühl- und Klimageräte am Ende ihrer Lebensdauer. Die einzelnen verwertbaren Bestandteile können entfernt werden. Eine Zerkleinerung und Trennung in wiederverwertbare Stoffe (z.B. Eisen, Kupfer, Aluminium und Kunststoffe) kann durchgeführt werden. Auf diese Weise können Rohstoffe für die Produktion neuer Kühlgeräte gewonnen werden. Hier besteht international noch Nachholbedarf, denn die Entsorgung ist in zahlreichen Ländern nicht reguliert (GIZ 2019).

Lebenszyklusanalysen können im Rahmen der öffentlichen Beschaffung genutzt werden, um die Vor- bzw. Nachteile unterschiedlicher Kühl- und Kältesysteme zu beurteilen.

Für die Entscheidungssituationen, wie beispielsweise der öffentlichen Beschaffung, zwischen unterschiedlichen nachhaltigen Kühllösungen sind Lebenszyklusanalysen (Life-Cycle-Climate-Performance-Studien) wichtige Instrumente, um insbesondere direkte und indirekte Emissionen zu ermitteln und unterschiedliche Lösungen, die verschiedene Kältemittel und unterschiedliche Energieeffizienzen aufweisen, miteinander vergleichen zu können (Gloël et al. 2015;



Kahlen et al. 2021). So gibt es beispielsweise Lebenszyklusanalysen von mobilen Klimaanlage (Kap. 3.2) (Blumberg/Isenstadt 2019). Eine weitere wichtige Größe sind die Kosten, die über den gesamten Lebenszyklus nachhaltiger Kühllösungen entstehen. Auch hierzu existieren bereits Analysen, die Lebenszykluskosten unterschiedlich effizienter Anlagen vergleichen (ESMAP 2020b). Allerdings ist zu beachten, dass jeder Lebenszyklusanalyse spezifische Parameter, beispielsweise zu den klimatischen Bedingungen in der Umgebung, zugrunde liegen. Insofern ist es naheliegend, dass für Entscheidungssituationen dezidierte Lebenszyklusanalysen durchgeführt werden müssen, um die relevanten Parameter berücksichtigen zu können.

Überblick behalten: (obligatorische) Berichterstattung

Es hat sich gezeigt, dass der zukünftige Bedarf an Kühlung nur schwer abgeschätzt werden kann. Dies hat Auswirkungen auf die künftige Nachfrage nach Technologien, Kältemitteln und Fachkräften. Eine Verbesserung der Daten- und Informationsgrundlage durch ein kontinuierliches Monitoring kann dabei unterstützen, Maßnahmen angepasst auf zukünftige Bedarfe zuzuschneiden. Dies kann etwa die Regulierung der eingesetzten Kältemittel betreffen. Ein detailliertes Monitoring der verwendeten Mengen unterschiedlicher Kältemittel kann Aufschluss darüber geben, ob gemäß den Regulierungsvorschriften zugelassene Mengen überschritten werden und verschärfte Regulierung erforderlich ist. Meldepflichten über eingeführte und verwendete Mengen an Kältemitteln sind wirksame Instrumente, um die erforderlichen Informationen zu erheben. Andere Parameter können beispielsweise mit intelligenten Systemen (Kap. 6.2.3) erfasst und zur Optimierung von Kühllasten genutzt werden.

6.2.2 Effiziente Versorgung von Kühllasten

Im Betrieb von Kühlanlagen ist die Erhöhung der Energieeffizienz ein Hebel auf dem Weg zu nachhaltiger Kühlung. Dies ist vor allem bei technischen Lösungen möglich, mit denen aktiv Kühlbedarf gedeckt wird. Auch die Regulierung von Kältemitteln kann dazu beitragen, auf Kältemittel umzusteigen, deren Verwendung das Heben von Effizienzpotenzialen ermöglicht.

Regulierung von Kältemitteln: Verbote und Quoten

Die internationalen und nationalen Regulierungen zum Umgang mit Kältemitteln sind eine wichtige Handlungsoption bei der Umsetzung nachhaltiger Kühllösungen. Durch sie kann die Verwendung klimaschädlicher Kältemittel bzw. mit hohem GWP eingeschränkt und der Einsatz klimaneutraler Kältemittel befördert werden. Im Wesentlichen können entweder Verbote oder Quoten genutzt werden, um klimaschädliche Kältemittel zu regulieren.



Beispiele für solche Regularien sind die Richtlinie 2006/40/EG⁴⁰ mit dem seit 2017 geltenden Verbot von Kältemitteln mit einem GWP über 150 in Fahrzeugklimaanlagen oder auch die Verordnung (EU) Nr. 517/2014⁴¹, die neben einem Verbot bestimmter Kältemittel auch einen zeitlich befristeten Ausstiegszeitplan enthält (Kap. 5.2.2). Quoten hingegen dienen dazu, die genutzte Menge von Kältemitteln in einzelnen Ländern zu beschränken. Sie können sich auf die Produktion, den Verbrauch oder den Im- und Export beziehen und führen in der Regel dazu, dass die zulässige Gesamtmenge an Kältemitteln zwischen verschiedenen Akteuren aufgeteilt wird (GCI 2022).

Bislang zeigt sich allerdings, dass in Deutschland noch Handlungsbedarf besteht, wenn die Reduktionsziele bis 2030 erreicht werden sollen (Gschrey et al. 2020, S. 62 ff.). Ferner ist zu beachten, dass eine Regulierung von Kältemitteln nicht nur unter Klimaschutzaspekten erfolgen kann, sondern auch andere Aspekte wie Umwelt- und Gesundheitsschutz in die Weiterentwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen einfließen können.

Steigerung der Energieeffizienz

Die Steigerung der Energieeffizienz von Kühlanlagen ist ein wichtiger Hebel auf dem Weg zu nachhaltiger Kühlung. Thematisiert wurde bereits u. a. in Kapitel 2.1, dass ineffiziente Geräte häufig kostengünstiger sind und häufiger angeschafft werden und durch sie die Realisierung nachhaltiger Lösungen verzögert werden kann. Als wirksam erweist sich eine nachvollziehbare Kennzeichnung bzw. Energietikettierung, die Verbraucher/innen in ihrer Entscheidungsfindung beim Kauf von Kühl- und Klimageräten unterstützen kann. Auch für Hersteller kann eine Kennzeichnung Anreiz sein, energieeffiziente Geräte herzustellen. Weiterhin lassen sich Mindeststandards definieren, die Mindestanforderungen an Energieeffizienz festlegen und ein Verbot von Geräten erleichtern, die diese Standards nicht erfüllen (IEA 2018; UNEP 2017). Neben der Anlageneffizienz spielt auch die Systemeffizienz eine Rolle. Damit ist gemeint: Die Effizienz von Kühlanlagen hängt auch von der Art der Stromerzeugung ab, d. h., Strom aus erneuerbaren Energiequellen ist bei einer Gesamtbewertung der Klimafreundlichkeit von Kühlung anders einzuschätzen als Kühlung, die mit fossilen Energieträgern erzeugt wird. Eine solche systemische Betrachtung sowie die Bewertung sind jedoch nicht Gegenstand dieser Kurzstudie (Kap. 1).

40 Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG

41 Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006



Förderung energieeffizienter Geräte

Bislang existieren in Deutschland auf Bundesebene verschiedene Maßnahmen, um energieeffiziente Kälte- und Klimaanlage zu fördern (Kap. 3.4.2). Bezuschusst werden im Rahmen der NKI durch das BMUV der Einsatz energieeffizienter Kälte- und Klimaanlage, die mit nichthalogenierten Kältemitteln arbeiten. Zudem wurde im Rahmen der genannten Initiative von 2009 bis 2018 insgesamt 6-mal der Deutsche Kältepreis für innovative Lösungen im Bereich Klima- und Kältetechnik vergeben (Kap. 3.4.2). Innovationsnetzwerke, wie beispielsweise das INKaS, können ebenfalls dazu beitragen, den Einsatz energieeffizienter Geräte zu fördern. Hinzu kommen Maßnahmen auf Landes- und kommunaler Ebene, deren Auflistung hier den Berichtsrahmen sprengen würde. Grundsätzlich ließe sich überprüfen, welcher Effekt mit den bisherigen Maßnahmen zur Förderung erreicht wurde und an welchen Stellen ggf. nachgesteuert werden sollte.

6.2.3 Optimierung von Kühllasten

Die Schließung von Kühlkreisläufen soll das Entstehen direkter Emissionen durch Austritt von Kältemitteln vermeiden. Hierzu ist eine Verbesserung der Sicherheit erforderlich. Weiterhin können intelligente Systeme dabei unterstützen, Kühlbedarf gezielt zu ermitteln und zu steuern sowie Belastungen zu verschieben. Die Optimierung von Kühllasten kann auch durch Verhaltensanpassungen erreicht werden.



Verbesserung der Sicherheit: Normen, zertifiziertes Personal und Leckagekontrollen

Zur Vermeidung direkter Emissionen kommen drei Ansatzpunkte infrage. Insbesondere die Nutzung natürlicher Kältemittel ist mit Sicherheitsrisiken verbunden, da einige von ihnen (z.B. Propan oder HFC-1234yf/Tetrafluorpropan) eine erhöhte Brennbarkeit aufweisen. Bislang ist die maximale Füllmenge mit Kältemitteln durch Normen und Standards festgelegt.⁴² Bei einem Umstieg auf natürliche Kältemittel müssten diese Normen bzw. die technischen Spezifikationen dahingehend angepasst werden, dass auch höhere Füllmengen zulässig sind. Die mit einer höheren Füllmenge einhergehenden Risiken der erhöhten Brennbarkeit müssten allerdings durch zusätzliche Sicherheitssysteme gemindert werden. Um die Sicherheit zu erhöhen, ist zudem eine entsprechende Schulung des Personals hinsichtlich der Verwendung natürlicher Kältemittel erforderlich (GIZ 2020). Entsprechend geschultes und zertifiziertes Personal kann dazu beitragen, Kühlgeräte und -anlagen gemäß den geltenden Normen und Standards optimal betreiben zu können.

Die Vermeidung von Kühlmittleckagen trägt zur Verringerung direkter Emissionen bei. Daher sind regelmäßige Kontrolle und Wartung technischer Anlagen ebenfalls ein Aspekt, um die Sicherheit zu erhöhen. Die verpflichtende Kontrolle durch Anlagenbetreiber erscheint diesbezüglich sinnvoll.

Einsatz intelligenter Systeme und Verhaltensanpassungen

Der allgemeine Trend zur Vernetzung und automatisierten Steuerung technischer Systeme ist auch im Bereich Kältetechnik zu beobachten. Durch die Integration von Sensortechnik und Steuerungssystemen können nicht nur direkte Umgebungsbedingungen erfasst, sondern auch gezielt Anpassungen an der Temperaturregulierung vorgenommen werden. Damit kann gezielt der Kälte- bzw. Klimatisierungsbedarf in einer spezifischen Umgebung adressiert werden. Derartige Systeme vergleichen einen Istzustand mit einem Sollzustand und können erforderliche Anpassungen vornehmen.

Die Anpassungen individuellen Verhaltens bzw. auch kultureller Praktiken stellt eine weitere Möglichkeit dar, mit steigenden Temperaturen zielführend umzugehen (Kap. 4.2). Änderungen von Arbeitszeiten, Hitzepausen während der Arbeitszeit, aber auch das Tragen geeigneter Kleidung sind Maßnahmen, die aktiv unterstützt werden können. Da kulturelle Veränderungsprozesse mitunter langfristig ablaufen, sollten Verhaltensanpassungen nicht nur durch geeignete Maßnahmen zur Sensibilisierung, sondern auch durch entsprechende rechtliche Rahmenbedingungen, u.a. Arbeitsschutzrecht, Arbeitsstättenverordnung und Fürsorgepflichten des Arbeitsgebers, gefördert werden.

⁴² Für einen Überblick über internationale Standards siehe auch Colbourne 2018



7 Literatur

- ▶ Abramskiehn, D.; Richmond, M. (2019): Cooling as a Service (CaaS). Lab Instrument Analysis. Global Innovation Lab for Climate Finance. https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2020/07/Cooling-as-a-Service-CaaS_Instrument-analysis.pdf (5.4.2023)
- ▶ An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62(5), S. 571–579
- ▶ B/L-Ad-hoc AG GAK (Bund/Länder-Ad-hoc Arbeitsgruppe „Gesundheitliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels (GAK)“) (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. In: Bundesgesundheitsblatt 60(6), S. 662–672
- ▶ Banwell, C.; Dixon, J.; Bambrick, H.; Hinde, S.; Kjellstrom, T.; Lucas, R.; Hannigan, I. (2009): Socio-cultural reflections on comfort and heat in Australia with implications for climate change adaption. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 6(57), S. 572023
- ▶ Barlow, K.; Christy, B.; O’Leary, G.; Riffkin, P.; Nuttall, J. (2015): Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. In: Field Crops Research 171, S. 109–119
- ▶ BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2012): Hitze in der Stadt. Strategien für eine klimaangepasste Stadtentwicklung. Berlin, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/sonderveroeffentlichungen/2012/DL_HitzeStadt.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (5.4.2023)
- ▶ BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise „Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen ...“. Bonn, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2015/DL_UeberflutungHitzeVorsorge.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (5.4.2023)
- ▶ BBSR (2016): Klimaresilienter Stadtumbau. Bilanz und Transfer von StadtKlimaExWoSt. Bonn, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2017/klimaresilienter-stadtumbau-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (5.4.2023)
- ▶ BBSR (2021): Green Urban Labs. Strategien und Ansätze für die kommunale Grünentwicklung. (Haury, S.; Eyink, H.; Heck, B.) Bonn
- ▶ Becken, K.; de Graaf, D.; Elsner, C.; Hoffmann, G.; Krüger, F.; Martens, K.; Plehn, W.; Sartorius, R. (2010): Fluorierte Treibhausgase vermeiden. Wege zum Ausstieg. Umweltbundesamt, Climate Change 08, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climat_change_08_2010_gesamt_mit_erratum_3.9.2014.pdf (5.4.2023)



- ▶ Benkenstein, M. (1998): Besonderheiten des Innovationsmanagements in Dienstleistungsunternehmen. In: Bruhn, M.; Meffert, H. (Hg.): Handbuch Dienstleistungsmanagement. Wiesbaden, S. 689–703
- ▶ Berry, H. L.; Bowen, K.; Kjellstrom, T. (2010): Climate change and mental health: a causal pathways framework. In: International journal of public health 55(2), S. 123–132
- ▶ Biermann, K.; Geisler, A.; Polke-Majewski, K.; Venohr, S. (2022): Hitzetote in Deutschland: Der Tod kommt bei Sonnenschein. ZEIT ONLINE, <https://www.zeit.de/politik/deutschland/2022-06/hitze-gefahr-tote-hitzeperioden-klimawandel> (5.4.2023)
- ▶ BIV (Bundesinnungsverband des Deutschen Kälteanlagenbauerhandwerks); ZVKKW (Zentralverband Kälte Klima Wärmepumpen e.V.); VDKF (Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V.); DKV (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.); Bauverlag BV GmbH (2022): Branchenbuch der Kälte- und Klimatechnik 2022. https://www.biv-kaelte.de/fileadmin/user_upload/mitglieder/Werbemittel/branchenbuch-der-kaelte-und-klimatechnik-2022.pdf (5.4.2023)
- ▶ BKK-LV (BKK-Landesverband NORDWEST) (2021): Gehäufte Wetterextreme führen zu zunehmenden Gesundheitsschäden. <https://www.bkk-lv-nordwest.de/download.php?id=1839#:~:text=o%20Hitze%20f%C3%BChrt%20bei%20Arbeitnehmer,Ausbreitung%20von%20Infektionserkrankungen%20zu%20beobachten.> (14.4.2023)
- ▶ Blumberg, K.; Isenstadt, A. (2019): Mobile air conditioning: The life-cycle costs and greenhouse-gas benefits of switching to alternative refrigerants and improving system efficiencies. The International Council on Clean Transportation, Washington, D.C. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_mobile-air-cond_CBE_201903.pdf (5.4.2023)
- ▶ BMAS (Bundesministerium für Arbeit und Soziales) (2010): Technische Regeln für Arbeitsstätten – Raumtemperatur (ASR A3.5). Zuletzt geändert durch die Bek. vom 1. März 2022. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-5.pdf?__blob=publicationFile (2.5.2023)
- ▶ BMG (Bundesministerium für Gesundheit) (2022): Hitze | Hitzeaktionspläne. <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/service/begriffe-von-a-z/h/hitze-hitzeaktionsplaene.html> (5.4.2023)
- ▶ BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2021): Ressortforschungsplan 2022. Berlin, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Forschung/ressortforschungsplan_gesamt_2022_bf.pdf (5.4.2023)
- ▶ BMWF (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2021): Förderbekanntmachung Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“. Bundesanzeiger AT 29.6.2021 B2, Berlin



- ▶ BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klima) (2022a): Forschungsförderung des BMWK im 7. Energieforschungsprogramm. <https://www.energieforschung.de/energieforschungspolitik/energieforschungsprogramm/foerderschwerpunkte> (5.4.2023)
- ▶ BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klima) (2022b): Klimaschutzinitiative – Maßnahmen an Kälte- und Klimaanlageanlagen. <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMWi/kaelte-und-klimarichtlinie.html> (5.4.2023)
- ▶ Bracke, R.; Huenges, E. (2022): Roadmap Tiefengeothermie für Deutschland. Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende. Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie; Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungs-Zentrum; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik; Fraunhofer-Institut für Bauphysik; Karlsruher Institut für Technologie; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf> (5.4.2023)
- ▶ Brackemeier, B.; McNally, J. (2020): Eiskalt: Das Geschäft mit illegalen Kältemitteln. Chillventa, <https://www.chillventa.de/de-de/wissen/artikel-finden/2020/interview/chillventa-eiskalt-das-geschaeft-mit-illegalen-kaeltemitteln> (6.4.2023)
- ▶ Brune, M.; Bender, S.; Groth, M. (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Climate Service Center Germany, Report 30, Hamburg, <https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/report30.pdf> (5.4.2023)
- ▶ Bundesregierung (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf (5.4.2023)
- ▶ Bundesregierung (2021): Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021 – Kurzfassung. Wiesbaden
- ▶ Bundesregierung (2022): Forschungsprogramm und Forschungsinitiativen. Wissenschaft zur Energiewende. <https://www.bundesregierung.de/bregde/suche/forschungsprogramm-und-forschungsinitiativen-450266> (5.4.2023)
- ▶ Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. (2021): GEG 2020 Gebäudeenergiegesetz. Leitfaden für Wohngebäude. Berlin, https://www.juwoe.de/pdf/DE/Broschueren/GEG2020_20210409_Webversion_final_0.pdf?m=1618239113& (5.4.2023)
- ▶ Bunz, M.; Mücke, H.-G. (2017): Klimawandel – physische und psychische Folgen. In: Bundesgesundheitsblatt (60), S. 632–639
- ▶ Burillo, D.; Chester, M.; Pincetl, S.; Fournier, E. (2019): Electricity infrastructure vulnerabilities due to long-term growth and extreme heat from climate change in Los Angeles County. In: Energy Policy 128©, S. 943–953



- ▶ Burke, M.; González, F.; Baylis, P.; Heft-Neal, S.; Baysan, C.; Basu, S.; Hsiang, S. (2018): Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. In: *Nature Climate Change* 8(8), S. 723–729
- ▶ Burke, M.; Hsiang, S. M.; Miguel, E. (2015): Climate and Conflict. In: *Annual Review of Economics* 7(1), S. 577–617
- ▶ Busch, J. (2018): Designing Urban Microclimates. Passive Low-Tech-Kühlung im Entwurf städtischer Außenräume. Dissertation, Braunschweig, https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00045227/Diss_Busch_Julian.pdf (5.4.2023)
- ▶ Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H. et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt, *Climate Change* 24, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf (5.4.2023)
- ▶ Byers, E.; Gidden, M.; Leclère, D.; Balkovic, J.; Burek, P.; Ebi, K.; Greve, P.; Grey, D.; Havlik, P.; Hillers, A.; Johnson, N. et al. (2018): Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots. In: *Environmental Research Letters* 13(5), S. 55012
- ▶ Clausen, J. (2014): Innovationspotentialanalyse und Roadmap Klimaangepasste Kältetechnik. Potentiale und Innovationssystem. artec – Forschungszentrum Nachhaltigkeit, https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2016/01/WSB29_Kaltetechnik.pdf (5.4.2023)
- ▶ Colbourne, D. (2018): International Safety Standards in Air Conditioning, Refrigeration and Heat Pumps. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/user_upload/Publications/EN_International_Safety_Standards_in_Air_Conditioning_Refrigeration_and_Heat_Pump.pdf (5.4.2023)
- ▶ Colt International GmbH (2022): Wie funktioniert adiabatische Kühlung? <https://www.colt-info.de/wie-funktioniert-adiabatische-kuehlung.html> (5.4.2023)
- ▶ Cooling as a Service Initiative (2020): CaaS. How it works. <https://www.caas-initiative.org/how-it-works> (5.4.2023)
- ▶ Cooper, R. (2019): The Impacts of Extreme Heat on Mental Health. *Psychiatric Times*, <https://www.psychiatrictimes.com/view/impacts-extreme-heat-mental-health> (5.4.2023)
- ▶ Cox, S. (2016): Your air conditioner is making the heat wave worse. *The Washington Post*, <https://www.washingtonpost.com/posteverything/wp/2016/07/22/your-air-conditioner-is-making-the-heat-wave-worse/> (5.4.2023)
- ▶ Destatis (Statistisches Bundesamt) (2021): Produzierendes Gewerbe. Unternehmen, tätige Personen und Umsatz im Handwerk – Jahresergebnisse. Berichtsjahr 2019. Fachserie 4 Reihe 7.2, Wiesbaden, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Handwerk/Publikationen/Down>



- loads-Handwerk/unternehmen-personen-umsatz-2040720197004.pdf?__blob=publicationFile (2.5.2023)
- ▶ Destatis (2022): Bevölkerungspyramide: Altersstruktur Deutschlands 2030. <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/#!y=2030&a=3,65&g> (5.4.2023)
 - ▶ Deutschlandfunk (2022): Maßnahmen bei Hitzewellen – Wie Hitzeaktionspläne bei Extremwetter helfen sollen. <https://www.deutschlandfunk.de/hitzeaktionsplaene-100.html> (5.4.2023)
 - ▶ Dickhaut, W.; Doobe, G.; Eschenbach, A.; Fellmer, M.; Gerstner, J.; Gröngröft, A.; Jensen, K.; Lauer, J.; Reisdorff, C.; Sandner, A.; Titel, S. et al. (2019): Entwicklungskonzept Stadtbäume. Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. Hamburg, <https://fiona.uni-hamburg.de/3573328e/sik-entwicklungskonzept-stadtbaeume.pdf> (5.4.2023)
 - ▶ Diettrich, S.; Siebert, D. (2019): Der Vormarsch der umweltschädlichen Klimaanlagen. Belastung für die Atmosphäre. Deutschlandfunk, <https://www.deutschlandfunk.de/belastung-fuer-die-atmosphaere-der-vormarsch-der-100.html#:~:text=Weltweit.,Klimaanlagen%20bis%202050%20erh%C3%B6hen%20wird> (5.4.2023)
 - ▶ DIFU (Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH) (2020): Klimawandel in Kommunen. Jetzt vorsorgen und gestalten! Köln, <https://repository.difu.de/handle/difu/258899> (5.4.2023)
 - ▶ DIFU (2021): Ausgezeichnete Praxisbeispiele. Klimaaktive Kommune 2020. Ein Wettbewerb des Bundesumweltministeriums und des Deutschen Instituts für Urbanistik. Köln, <https://repository.difu.de/handle/difu/581217> (5.4.2023)
 - ▶ Djellal, F.; Gallouj, F. (2016): Service Innovation for Sustainability: Paths for Greening Through Service Innovation. In: Toivonen, M. (Hg.): Service innovation. Novel ways of creating value in actor systems. Tokyo, S. 187–215
 - ▶ DWD (Deutscher Wetterdienst) (2020): Klimastatusbericht Deutschland. Jahr 2020. Offenbach
 - ▶ DWD (2022a): Klimastatusbericht Deutschland. Jahr 2021. Offenbach
 - ▶ DWD (2022b): Stadtklima – die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html (5.4.2023)
 - ▶ Ebi, K.; Capon, A.; Berry, P.; Broderick, C.; de Dear, R.; Havenith, G.; Honda, Y.; Kovats, S.; Ma, W.; Malik, A.; Morris, N. et al. (2021): Hot weather and heat extremes: health risks. In: *The Lancet* 398(10301), S. 698–708
 - ▶ Eckstein, D.; Künzel, V.; Schäfer, L.; Wings, M. (2019): Global Climate Risk Index 2020. Who suffers most from extreme weather events? Weather-related loss events in 2018 and 1999 to 2018. German Watch e.V., Bonn/Berlin, https://www.germanwatch.org/sites/default/files/20-2-01e%20Global%20Climate%20Risk%20Index%202020_13.pdf (5.4.2023)
 - ▶ EFH (Energieforschungsverbund Hamburg) (2022): Forschungsprogramme und Förderinstrumente im Energiebereich. <https://energieforschungsverbund>.



- hamburg/contentblob/16500056/1b4002f72571f00c7b7a361305256ed6/data/foerderinformationen-q3-2022.pdf (6.4.2023)
- ▶ EIA (Environmental Investigation Agency) (2021): Pathway to Net-Zero Cooling Product List. <https://eia-international.org/wp-content/uploads/2021-Pathway-to-Net-Zero-Cooling-Product-List-SPREADS.pdf> (5.4.2023)
 - ▶ EIA (2022): Climate change and cooling. <https://eia-international.org/climate/climate-change/> (5.4.2023)
 - ▶ EIU (The Economist Intelligence Unit) (2019): The Cooling Imperative. Forecasting the size and source of future cooling demand. <http://www.eiu.com/graphics/marketing/pdf/TheCoolingImperative2019.pdf> (5.4.2023)
 - ▶ EK (Europäische Kommission) (2016): Eine EU-Strategie für die Wärme- und Kälteerzeugung. Brüssel
 - ▶ EK (2018): Developments and Forecasts of Growing Consumerism. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/growing-consumerism/more-developments-relevant-growing-consumerism_en (5.4.2023)
 - ▶ EK (2020): Schutz der Ozonschicht – Überprüfung der EU-Vorschriften. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12310-Schutz-der-Ozonschicht-Überprüfung-der-EU-Vorschriften_de (5.4.2023)
 - ▶ EK (2021a): European Commission adopts new methodology rules for renewable cooling. https://ec.europa.eu/info/news/european-commission-adopts-new-methodology-rules-renewable-cooling-2021-dec-16_en (5.4.2023)
 - ▶ EK (2021b): Policy Support for Heating and Cooling Decarbonisation. Roadmap. (Gerard, F.; Guevera Opinska, L.; Smit, T.; Rademaekers, K.; Braungardt, S.; Monejar Montagud, M. E.) Brüssel, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/977806> (6.4.2023)
 - ▶ EK (2022a): District heating and cooling in the European Union. https://energy.ec.europa.eu/publications/district-heating-and-cooling-european-union_de (6.4.2023)
 - ▶ EK (2022b): Investors Dialogue on Energy. Assessing and upgrading financing schemes in the EU to remove barriers and mobilise financing in the context of the European Green Deal. https://energy.ec.europa.eu/topics/funding-and-financing/investors-dialogue-energy_en (5.4.2023)
 - ▶ EK (2022c): Renewable cooling under the revised Renewable Energy Directive. https://energy.ec.europa.eu/renewable-cooling-under-revised-renewable-energy-directive_en (6.4.2023)
 - ▶ ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) (2020a): Primer For Cool Cities. Reducing Excessive Urban Heat with a focus on passive measures. Knowledge Series 031/20, Washington, D.C., <https://documents1.worldbank.org/curated/en/605601595393390081/pdf/Primer-for-Cool-Cities-Reducing-Excessive-Urban-Heat-with-a-Focus-on-Passive-Measures.pdf> (5.4.2023)
 - ▶ ESMAP (2020b): Primer for Space Cooling. Knowledge Series 030/20, Washington, D.C., <https://documents1.worldbank.org/curated/en/131281601358070522/pdf/Primer-for-Space-Cooling.pdf> (5.4.2023)



- ▶ Estrada, F.; Botzen, W.; Tol, R. (2017): A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. In: *Nature Climate Change* 7(6), S.403–406
- ▶ Flouris, A.; Dinas, P.; Ioannou, L.; Nybo, L.; Havenith, G.; Kenny, G.; Kjellstrom, T. (2018): Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis. In: *The Lancet Planetary Health* 2(12), S.e521-e531
- ▶ FU Berlin (Freie Universität Berlin) (2017): Deutscher Kältepreis 2018. https://www.fu-berlin.de/forschung/service/foerderung/newsletter/2017-23-11/preise/dt_kaeltepreis.html (5.4.2023)
- ▶ Futurezone (2020): Fernkälte in Wien wird ausgebaut. <https://futurezone.at/digital-life/fernkaelte-wien-ausbau/402066844> (6.4.2023)
- ▶ Gadgil, M. (2017): „Cool roofs“ beat the heat in slum homes. *MumbaiMirror*, <https://mumbaimirror.indiatimes.com/mumbai/other/cool-roofs-beat-the-heat-in-slum-homes/articleshow/58188062.cms> (5.4.2023)
- ▶ Ganzleben, C.; Ian, M. (2019): Healthy environment, healthy lives. How the environment influences health and well-being in Europe. EEA report 21/2019, Luxembourg, https://www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives/at_download/file (5.4.2023)
- ▶ GCCA (Global Cool Cities Alliance); R20 Regions of Climate Action (2012): A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements. https://coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf (5.4.2023)
- ▶ GCI (Green Cooling Initiative) (o.J.): The technology behind Green Cooling. <https://www.green-cooling-initiative.org/green-cooling/technology> (5.4.2023)
- ▶ GCI (2022): Policy instruments. <https://www.green-cooling-initiative.org/green-cooling/policy-instruments> (6.4.2023)
- ▶ GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH) (2019): Proklima – naturally cool! Green Cooling – for the protection of the climate and the ozone layer. Eschborn, <https://www.giz.de/expertise/downloads/01%20Proklima%20Naturally%20Cool%20EN.pdf> (5.4.2023)
- ▶ GIZ (2020): Fit for green cooling. How to quality, certify and register the RAC workforce of the future. https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/user_upload/giz2020_Fit_for_Green_Cooling_QCR_brochure.pdf (5.4.2023)
- ▶ GIZ (2021): Rethinking Health Cold Chains. Green Cooling for the effective and safe distribution of vaccines. (Ziegler, N.; Breitfeld, J.; Schabel, J.), https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/user_upload/Flyer_Vaccines_Cold_Chain_sps.pdf (2.5.2023)
- ▶ GIZ (2022): Proklima, integrated ozone and climate protection. <https://www.giz.de/fachexpertise/html/61049.html> (5.4.2023)
- ▶ Gloël, J.; Oppelt, D.; Becker, C.; Heubes, J. (2015): Green Cooling Technologies. Market Trends in Selected Refrigeration and Air Conditioning Subsectors. GIZ GmbH, https://www.giz.de/de/downloads/giz2015_en_gci_study_market_trends.pdf (5.4.2023)



- ▶ Goetschkes, C.; Schmidt, D.; Rogotzki, R.; Kanngießner, A. (2021): Kältetechnik in Deutschland. Metastudie Kältebedarf Deutschland. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen, https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/referenzen/flexkaelte/K%C3%A4ltetechnik_in_Deutschland-Metastudie_K%C3%A4ltebedarf_Deutschland.pdf (5.4.2023)
- ▶ Gourджи, S.; Sibley, A.; Lobell, D. (2013): Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. In: *Environmental Research Letters* 8(2), S. 1–10
- ▶ Großmann, L.; Sinning, H. (2022): Cool Down Cities. Wie Städte bei Hitze herunterkühlen und bewohnerorientierte Klimaanpassungen urbane Transformationen bewirken. In: *Forum Wohnen und Stadtentwicklung* 1/2020, S. 41–46
- ▶ Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (2014): *Dubbel*. Berlin/Heidelberg
- ▶ Gschrey, B.; Osterheld, S.; Kleinschmidt, J. (2020): Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland. Realitätscheck und Projektion. Umweltbundesamt, Texte 164/2020, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/texte_164-2020_implementation_des_eu-hfk-w-phase-down_in_deutschland.pdf (5.4.2023)
- ▶ Guallar-Herrero, E. (2021): Kältemittel-Aufbereitung in drei Schritten erklärt. *Kälte Klima Aktuell* 01, https://www.kka-online.info/artikel/kka_Kaeltemittel-Aufbereitung_in_drei_Schritten_erklaert_3612501.html (5.4.2023)
- ▶ Hagelstange, J.; Rösler, C.; Runge, K. (2021): Klimaschutz, erneuerbare Energien und Klimaanpassung in Kommunen. Maßnahmen, Erfolge, Hemmnisse und Entwicklungen – Ergebnisse der Umfrage 2020. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH, Köln, <https://repository.difu.de/bitstreams/df75d659-3136-427a-b31f-c6eaf07097be/download> (6.4.2023)
- ▶ Häken, R. (2020): Kälte- und Klimatechnik: Kühle Brise im Dauerlauf. REGIO MANAGER GmbH, <https://www.regiomanager.de/rhein-wupper/themen/immo-bilien-technik-/kuehle-brise-im-dauerlauf> (5.4.2023)
- ▶ Hamann, L. (2022): Klimawandel: Tun deutsche Städte genug gegen Hitze? ZDF, <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/klima-hitzewelle-staedte-anpassung-100.html> (5.4.2023)
- ▶ Handschuh, A.; Haubner, O.; Jossin, J.; Peters, O.; Raphael, D.; Roth, A.; Ruge, K.; Walter, J.; Witte, K. (2020): *Monitor Nachhaltige Kommune. Bericht 2020. Schwerpunktthema Klima und Energie*. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh, <https://repository.difu.de/handle/difu/579558> (6.4.2023)
- ▶ Hansen, A.; Bi, P.; Saniotis, A.; Nitschke, M.; Benson, J.; Tan, Y.; Smyth, V.; Wilson, L. (2013): Extreme heat and climate change: adaptation in culturally and linguistically diverse (CALD) communities. *National Climate Change Adaptation*. <https://core.ac.uk/download/pdf/30676967.pdf> (5.4.2023)
- ▶ Hartley, B. (2018): *Cooling Solutions for Urban Environments*. Sustainable Energy for All, <https://www.seforall.org/system/files/2019-05/CoolingSolutionsforUrbanEnvironments.pdf> (5.4.2023)



- ▶ Hauschildt, J.; Salomo, S.; Schultz, C.; Kock, A. (2016): Innovationsmanagement. München
- ▶ Heimer, T.; Berger, F.; Enekel, K.; Radauer, A.; Talmon-Gros, L.; John, R.; Jöstingmeier, M.; Köhler, T.; Pflanz, K.; Ritter, C. (2016): Ökonomische und verwaltungstechnische Grundlagen einer möglichen öffentlichen Förderung von nichttechnischen Innovationen. Technopolis Group; Institut für Sozialinnovationen Consulting; VDI/VDE-IT GmbH, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/studie-zu-nichttechnischen-innovationen.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (5.4.2023)
- ▶ Hendel, M.; Azos-Diaz, K.; Tremeac, B. (2016): Behavioral Adaptation to Heat-Related Health Risks in Cities. <https://hal.science/hal-01375603v2> (2.5.2023)
- ▶ Hermann, M. (2006): Alltag ohne Strom. taz, <https://taz.de/!395943/> (5.4.2023)
- ▶ Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (2020): Unsere Städte schwitzen. <https://www.helmholtz-klima.de/aktuelles/unsere-staedte-schwitzen> (5.4.2023)
- ▶ Heutel, G.; Miller, N.; Molitor, D. (2017): Adaptation and the Mortality Effects of Temperature Across U.S. Climate Regions. National Bureau of Economic Research, Working Paper 23271, Cambridge, <https://www.nber.org/papers/w23271> (5.4.2023)
- ▶ HLK (2020): Kälte-Klima-Branche: Keine Corona-Sorgen, dafür Fachkräftemangel. Aktualisierung 4.1.2022, <https://hlk.co.at/artikel/kaelte-klima-branche-keine-corona-sorgen-dafuer-fachkraeftemangel/> (5.4.2023)
- ▶ Huth, K.; Joeres, A.; Steeger, G. (2022): Mindestens neun Millionen Menschen durch Hitze gefährdet. ZEIT ONLINE, <https://www.zeit.de/politik/deutschland/2022-07/hitze-lebensgefahr-senioren-behinderte-risikogruppe-schutz> (5.4.2023)
- ▶ IEA (International Energy Agency) (2017): Space cooling: More access, more comfort, less energy. Energy Efficiency Insights Briefs, <https://www.iea.org/reports/insights-brief-space-cooling> (5.4.2023)
- ▶ IEA (2018): The Future of Cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning. https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf (5.4.2023)
- ▶ IEA (2021): Cooling. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling> (5.4.2023)
- ▶ IEA (2022): Space Cooling. <https://www.iea.org/reports/space-cooling> (5.4.2023)
- ▶ ILO (International Labour Organization) (2019): Working on a Warmer Planet. The impact of heat stress on labour productivity and decent work. Genf
- ▶ Im, E.-S.; Pal, J.; Eltahir, E. (2017): Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia. In: Science Advances 3(8), S. 1–7
- ▶ IÖW (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH) (2022): Stadtgrün ist Millionen wert – Nutzen berechnen auf www.stadtgruen-wertschaetzen.de.



- <https://www.ioew.de/news/article/stadtgruen-ist-millionen-wert-nutzen-be-rechnen-auf-wwwstadtgruen-wertschaetzende> (5.4.2023)
- ▶ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2023): Synthesis Report of the Sixth Assessment Report (AR6). Summary for Policymakers. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (14.4.2023)
 - ▶ Jay, O.; Capon, A.; Berry, P.; Broderick, C.; Dear, R. de; Havenith, G.; Honda, Y.; Kovats, S.; Ma, W.; Malik, A.; Morris, N. et al. (2021): Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. In: *The Lancet* 398(10301), S. 709–724
 - ▶ Kahlen, L.; Moie, J.; Munzinger, P.; Teutsch, L. (2021): Green Cooling in Public Procurement. How to advance the procurement of climate-friendly and energy efficient air conditioners in the public sector. GIZ GmbH, https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/user_upload/GIZ_Proklima_Green_Cooling_in_Public_Procurement_final.pdf (5.4.2023)
 - ▶ Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schauser, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland - Kurzfassung. Umweltbundesamt, Climate Change 26, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf (5.4.2023)
 - ▶ Kaiser, T.; Kind, C.; Dudda, L. (2021a): Bund/Länder-Handlungsempfehlungen zur Erarbeitung von Hitzeaktionsplänen: Bekanntheit und Rezeption in Bundesländern und Kommunen. Bundesamt für Strahlenschutz; Bundesinstitut für Risikobewertung; Robert Koch-Institut; Umweltbundesamt, Umwelt + Mensch Informationsdienst 1, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/umid_01-2021-beitrag_2_hitze.pdf (5.4.2023)
 - ▶ Kaiser, T.; Kind, C.; Dudda, L.; Sander, K. (2021b): Klimawandel, Hitze und Gesundheit: Stand der gesundheitlichen Hitzevorsorge in Deutschland und Unterstützungsbedarf der Bundesländer und Kommunen. Bundesamt für Strahlenschutz; Bundesinstitut für Risikobewertung; Robert Koch-Institut; Umweltbundesamt, Umwelt + Mensch Informationsdienst 1, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/umid_01-2021-beitrag_3_hitze.pdf (6.4.2023)
 - ▶ Kampe, H. (2020): Stadtplanung im Klimawandel. Potsdam wappnet sich gegen Hitze und extreme Wetterereignisse. In: *Der Tagesspiegel – Potsdamer Neueste Nachrichten | Wissenschaft im Zentrum*, S. B6
 - ▶ Kaspar, F.; Friedrich, K.; Imbery, F. (2020): 2019 global zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung in Deutschland im globalen Kontext. Deutscher Wetterdienst, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf?__blob=publicationFile&v=4#:~:text=%C3%9Cber%20den%20Gesamtzeitraum%20betr%C3%A4gt%20der,Deutschland%20st%C3%A4rker%20aus%20als%20weltweit (2.5.2023)
 - ▶ Keith, L.; Meerow, S.; Wagner, T. (2020): Planning for Extreme Heat: A Review. In: *Journal of Extreme Events* 6(3&4), S. 1–27



- ▶ KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) (2021): Förderreport KfW Bankengruppe. https://www.kfw.de/Presse-Newsroom/Pressematerial/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport_2021.pdf (2.5.2023)
- ▶ Kirsch, S.-M.; Welsch, F.; Michaelis, N.; Schmidt, M.; Wieczorek, A.; Frenzel, J.; Eggeler, G.; Schütze, A.; Seelecke, S. (2018): NiTi-Based Elastocaloric Cooling on the Macroscale: From Basic Concepts to Realization. In: *Energy Technology* 6(8), S. 1567–1587
- ▶ KKA (Kälte Klima Aktuell) (2019): Der Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Kältemarkt 2018. 25 Jahre Eurovent Market Intelligence. https://www.kka-online.info/artikel/kka_Der_Heizungs-_Lueftungs-_Klima-_und_Kaeltemarkt_2018_3441386.html (5.4.2023)
- ▶ Köhler, M.; Schmidt, M.; Laar, M.; Wachsmann, U.; Krauter, S. (2002): Photovoltaic panels on greened roofs: Positive interaction between two architectures. Proceedings of RIO 02 – World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro
- ▶ Kurmann, F.; Kellerhoff, P. (2020): Damit Städte nicht ins Schwitzen kommen. In: *VDI Nachrichten* 34/35, S. 20
- ▶ Lalit, R. (2020): These innovations could keep us cool without heating the planet. World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/these-innovations-could-keep-us-cool-without-heating-us-up/> (5.4.2023)
- ▶ Landeshauptstadt Potsdam (2019): Potsdam als Praxispartner im Forschungsprojekt „ExTrass“ der Universität Potsdam. <https://www.potsdam.de/potsdam-als-praxispartner-im-forschungsprojekt-extrass-der-universitaet-potsdam> (5.4.2023)
- ▶ Lange, B.; Priesemann, C.; Geiss, M.; Lambrecht, A. (2016): Promoting Food Security and Safety via Cold Chains. Technology options, cooling needs and energy requirements. GIZ GmbH, https://www.giz.de/de/downloads/giz_2016_Food_Security_Cold_Chains.pdf (5.4.2023)
- ▶ Li, L. (2022): This is how small green spaces can help keep cities cool during heatwaves. World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2022/06/small-green-spaces-cities-cool-heat-waves/> (5.4.2023)
- ▶ Liehm, M.; Hoffmann, C. (2021): Fördermöglichkeiten für Kälte- und Klimaanlagen mit natürlichen Kältemitteln – Kälte Klima Aktuell 04. https://www.kka-online.info/artikel/kka_Foerdermoeglichkeiten_fuer_Kaelte-_und_Klimaanlagen_mit_natuerlichen_K_3673522.html (5.4.2023)
- ▶ Lózan, J.; Breckle, S.-W.; Graßl, H.; Kasang, D.; Matzarakis, A. (2019): Städte im Klimawandel. In: Lózan, J.; Breckle, S.-W.; Graßl, H.; Kasang, D.; Matzarakis, A.; Kuttler, W. (Hg.): *Warnsignal Klima. Die Städte*. Hamburg, S. 11–20
- ▶ Lucas, R.; Epstein, Y.; Kjellstrom, T. (2014): Excessive occupational heat exposure: a significant ergonomic challenge and health risk for current and future workers. In: *Extreme Physiology & Medicine* 3(1), S. 1–8
- ▶ Mandal, J.; Fu, Y.; Overvig, A.; Jia, M.; Sun, K.; Shi, N.; Zhou, H.; Xiao, X.; Yu, N.; Yang, Y. (2018): Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. In: *Science* 362(6412), S. 315–319



- ▶ Mann, G.; Gohlke, R.; Wolff, F. (2020): BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2020. Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland. Neu begrünte Flächen – Bestand und Potenziale – Kommunale Förderung. (Mollenhauer, F.; Luck, S.; Herfort, S.; van Meegen, S.) Bundesverband GebäudeGrün e.V., Berlin, https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Marktreport/BuGG-Marktreport_Gebaeudegruen_2020_high_.pdf (5.4.2023)
- ▶ Mann, G.; Gohlke, R.; Wolff, F. (2022): BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2022. Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland. Zahlen zu neu begrünten Flächen – Förderinstrumente – Branchenverzeichnis (Fachunternehmen). Bundesverband GebäudeGrün e.V., Berlin, https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Marktreport/BuGG-Marktreport_Gebaeudegruen_2022.pdf (5.4.2023)
- ▶ Mares, D.; Moffett, K. (2016): Climate change and interpersonal violence: a „global“ estimate and regional inequities. In: *Climatic Change* 135(2), S.297–310
- ▶ Masterson, V. (2022): The best way to keep cool in heatwaves? Plant 170,000 trees, according to Paris. World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2022/08/paris-trees-climate-change/> (5.4.2023)
- ▶ McDonald, R.; Kroeger, T.; Boucher, T.; Longzhu, W.; Salem, R.; Adams, J.; Bassett, S.; Edgecomb, M.; Garg, S. (2016): Planting Healthy Air. A global analysis of the role of urban trees in addressing particulate matter pollution and extreme heat. The Nature Conservancy, Arlington
- ▶ Möhlenkamp, A.; Lemke, N.; Köhler, J. (2017): Nachhaltige Kälteerzeugung. Untersuchung der Energieeffizienz natürlicher Kältemittel in Transportkälteanlagen. Umweltbundesamt, *Climate Change* 09, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-06_climate-change_09-2017_transportkaelte.pdf (5.4.2023)
- ▶ Mühr, B.; Kubisch, S.; Marx, A.; Stötzer, J.; Wisotzky, C.; Latt, C.; Siegmann, F.; Glattfeder, M.; Mohr, S.; Kunz, M. (2018): Dürre & Hitzewelle Sommer 2018 (Deutschland). 18. August 2018 – Report No. 1. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology, https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_Duerre_Hitzewelle_Deutschland_report.pdf (5.4.2023)
- ▶ NABU (Naturschutzbund Deutschland e.V.) (2021): Fassadenbegrünung in der Stadt. Wieso das Grün am Haus für Klima und Tierwelt gut ist. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/oekologisch-leben/balkon-und-garten/grundlagen/dach-wand/28541.html> (5.4.2023)
- ▶ Neff, B. (2022): Kälte, die aus Sendling kommt. *Süddeutsche Zeitung*, <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-fernkaelte-stadtwerke-1.5636496> (5.4.2023)
- ▶ Offermann, M.; Lindner, S.; Reiser, M.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Kocher, D.; Bruse, M.; Cramer, L. (2022): Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa. Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima. Umweltbundesamt, *Climate Change* 30, Dessau-Roßlau, <https://www.um>



- weltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_30-2022_nachhaltige_gebaeudeklimatisierung_in_europa.pdf (5.4.2023)
- ▶ Østergaard, P.; Werner, S.; Dyrelund, A.; Lund, H.; Arabkoohsar, A.; Sorknæs, P.; Gudmundsson, O.; Thorsen, J.; Mathiesen, B. (2022): The four generations of district cooling – A categorization of the development in district cooling from origin to future prospect. In: *Energy* 253, S. 1–14
 - ▶ PARIS (2020): *Végétalisons la ville*. <https://www.paris.fr/pages/vegetalisons-la-ville-2459> (5.4.2023)
 - ▶ Peters, A. (2022): America's hottest city keeps getting hotter: How Phoenix is battling extreme heat. *Fast Company*, https://www.fastcompany.com/90763919/in-phoenix-where-temperatures-continue-to-rise-a-race-against-time-to-weatherproof-the-city?partner=rss&utm_source=rss&utm_medium=feed&utm_campaign=rss+fastcompany&utm_content=rss (5.4.2023)
 - ▶ Phelan, P.; Kaloush, K.; Miner, M.; Golden, J.; Phelan, B.; Silva, H.; Taylor, R. (2015): Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. In: *Annual Review of Environment and Resources* 40(1), S. 285–307
 - ▶ RefNat4Life (Refrigerants, Naturally! for LIFE) (2021a): Politischer Rahmen. Leitliniendokument. <https://refnat4life.eu/wp-content/uploads/2021/07/Leitfaden-politischer-Kontext-Deutschland.pdf> (6.4.2023)
 - ▶ RefNat4Life (2021b): Technologie-Leitfaden. Eine Anleitung. https://refnat4life.eu/wp-content/uploads/2021/07/Leitfaden-Technologie_de.pdf (6.4.2023)
 - ▶ Richter, M.; Safarik, M.; Heinrich, C. (2014): Klimafreundliche Gebäudeklimatisierung. Ein Ratgeber für Architekten, Bauherren und Planer 2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/klimafreundliche_gebaeudeklimatisierung.pdf (6.4.2023)
 - ▶ RKI (Robert Koch-Institut) (2019): Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess-Mortalität; Berlin und Hessen, Sommer 2018. In: *Epidemiologisches Bulletin* 23, S. 193–206
 - ▶ Rylander, C.; Odland, J.; Sandanger, T. (2013): Climate change and the potential effects on maternal and pregnancy outcomes: an assessment of the most vulnerable - the mother, fetus, and newborn child. In: *Global Health Action* 6, doi: 10.3402/gha.v6i0.19538
 - ▶ Saletti, C.; Morini, M.; Gambarotta, A. (2020): The Status of Research and Innovation on Heating and Cooling Networks as Smart Energy Systems within Horizon 2020. In: *Energies* 13(11), S. 1–27
 - ▶ Santamouris, M. (2014): Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. In: *Solar Energy* 103, S. 682–703
 - ▶ Sanz-Barbero, B.; Linares, C.; Vives-Cases, C.; González, J.; López-Ossorio, J.; Díaz, J. (2018): Heat wave and the risk of intimate partner violence. In: *Science of The Total Environment* 644, S. 413–419



- ▶ Schmauck, S. (2019): Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen. Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten 538, Bonn, <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript538.pdf> (5.4.2023)
- ▶ SEforALL (Sustainable Energy for All) (2018): Chilling Prospects: Providing Sustainable Cooling For All. https://www.seforall.org/system/files/gather-content/SEforALL_CoolingForAll-Report.pdf (6.4.2023)
- ▶ SEforALL (2021): Chilling Prospects 2021. Tracking Sustainable Cooling for All. <https://www.seforall.org/system/files/2021-05/Chilling-Prospects-21-SEforALL.pdf> (6.4.2023)
- ▶ SEforALL (2022): Chilling Prospects 2022. Tracking Sustainable Cooling for All. <https://www.seforall.org/system/files/2022-07/seforall-chilling-prospects-2022.pdf> (6.5.2023)
- ▶ Shafique, M.; Luo, X.; Zuo, J. (2020): Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. In: *Solar Energy* 202, S.485–497
- ▶ Sherwood, S.; Huber, M. (2010): An adaptability limit to climate change due to heat stress. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(21), S.9552–9555
- ▶ Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; Leßmann, D.; Tils, R. von; Becker, C.; Hübner, S. (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Umweltbundesamt, Texte 111/2019, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-16_texte_111-2019_verdunstungskuehlung.pdf (6.4.2023)
- ▶ Spiegel Online (2005): Hitzewelle in den USA: Öffentliche Kühlräume für überhitzte New Yorker. <https://www.spiegel.de/panorama/hitzewelle-in-den-usa-oeffentliche-kuehlraeume-fuer-ueberhitzte-new-yorker-a-366970.html> (5.4.2023)
- ▶ Statista GmbH (2022a): Anzahl der Unternehmen im Sanitär-Heizung-Klima-Handwerk in Deutschland von 2004 bis 2022. Stand 2.5.2022, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/272680/umfrage/anzahl-der-unternehmen-im-sanitaer-heizung-klima-handwerk/> (5.4.2023)
- ▶ Statista GmbH (2022b): Heizung & Kühlung - Deutschland. Stand 30.6.2022, <https://de.statista.com/outlook/cmo/heimwerker-baumaerkte/heizung-kuehlung/deutschland> (6.4.2023)
- ▶ Statista GmbH (2022c): Heizung & Kühlung – Weltweit. Stand 30.6.2022, <https://de.statista.com/outlook/cmo/heimwerker-baumaerkte/heizung-kuehlung/weltweit> (6.4.2023)
- ▶ SynVer*Z (Synthese- und Vernetzungsprojekt Zukunftsstadt) (2020): Klimaanpassung in der Zukunftsstadt. Wie sich Städte auf extreme Wetterereignisse vorbereiten. Fokus*Z, Berlin, https://www.nachhaltige-zukunftsstadt.de/downloads/FokusZ_Heft_Klimaanpassung.pdf (2.5.2023)



- ▶ TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2021): Sustainable Cooling – nachhaltige Kühlung bei Hitze. (Ehrenberg-Silies, S.; Richter, S.) TAB-Themenkurzprofil 43, Berlin
- ▶ Tagesschau (2021a): „Das Schlimmste kommt erst noch“. Berichtsentwurf des Weltklimarats. <https://www.tagesschau.de/ausland/weltklimarat-erderwaer-mung-bericht-101.html> (5.4.2023)
- ▶ Tagesschau (2021b): Kritische Marke bereits 2030 erreicht. IPCC-Bericht zur Erderwärmung. <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/weltklimarat-be-richt-klimawandel-101.html> (5.4.2023)
- ▶ Tagesspiegel (2022): Wegen erwarteter Hitzewelle: Linke fordert öffentliche Kühlräume gegen Hitzewellen. <https://www.tagesspiegel.de/politik/linke-for-dert-offentliche-kuhlraume-gegen-hitzewellen-5894674.html> (5.4.2023)
- ▶ Thalheim, M. (2021): Handel mit fluorierten Treibhausgasen. Industrie- und Handelskammer Chemnitz, <https://www.ihk.de/chemnitz/innovation/umwelt-schutz/reach/handel-mit-fluorierten-treibhausgasen-5035750> (5.4.2023)
- ▶ Titz, S. (2022): Helle Strassenbeläge sollen die Städte vor Aufheizung bewahren – die Idee tönt gut, aber die Anforderungen sind hoch. Neue Zürcher Zeitung, <https://www.nzz.ch/wissenschaft/klimawandel-helle-strassenbelaege-sollen-die-staedte-kuehlen-ld.1682000> (5.4.2023)
- ▶ UBA (Umweltbundesamt) (2014): HFCKW-Kältemittel ab 1. Januar 2015 verboten. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/hfckw-kaeltemittel-ab-1-januar-2015-verboten#:~:text=Zum%20Schutz%20der%20Ozonschicht%20ist,Klimaanlagen%20eingesetzt%2C%20etwa%20zur%20Geb%C3%A4udeklimatisierung.> (2.5.2023)
- ▶ UBA (2016): Aus für klimaschädliche Kältemittel HFKW eingeleitet. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/aus-fuer-klimaschaedliche-kaeltemittel-hfk-w> (5.4.2023)
- ▶ UBA (2019a): IG-I-1: Hitzebedingte Minderung der Leistungsfähigkeit. <https://www.umweltbundesamt.de/ig-i-1-das-indikator#ig-i-1-hitzebedingte-minderung-der-leistungsfahigkeit> (6.4.2023)
- ▶ UBA (2019b): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf (6.4.2023)
- ▶ UBA (2020a): Gebäudeklimatisierung. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/gebäudeklimatisierung> (6.4.2023)
- ▶ UBA (2020b): Gesund durch den Sommer in der Stadt. <https://www.umweltbundesamt.de/gesund-durch-den-sommer-in-der-stadt#die-folgen-von-hitze-fur-die-menschliche-gesundheit-ein-brandheisses-thema> (6.4.2023)
- ▶ UBA (2021a): Internationale Abkommen. Kyoto-Protokoll der Klimarahmenkonvention. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte->

- treibhausgase-fckw/kaelteportal-rechtliche-grundlagen/internationale-abkommen#kyoto-protokoll-der-klimarahmenkonvention (6.4.2023)
- ▶ UBA (2021b): Nationale Regelungen zu fluorierten Treibhausgasen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/nationale-regelungen-zu-fluorierten-treibhausgasen?parent=93207> (6.4.2023)
 - ▶ UBA (2021c): Wirkungskomplex: Hitze. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/klimawandel-gesundheit/wirkungskomplex-hitze> (6.4.2023)
 - ▶ UBA (2022a): Autoklimaanlagen mit fluorierten Kältemitteln. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/klimaanlagen-in-auto-bus-bahn/autoklimaanlagen-fluorierten-kaeltemitteln#autoklimaanlagen-mit-fluorier-tem-kaltemittel> (6.4.2023)
 - ▶ UBA (2022b): Emissionen fluoriertes Treibhausgas („F-Gase“). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-fluoriertes-treibhausgas-f-gase#entwicklung-in-deutschland-seit-1995> (6.4.2023)
 - ▶ UBA (2022c): Förderung von Kälte- und Klimaanlagen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/natuerliche-kaeltemittel-in-stationaeren-anlagen/allgemeine-informationen/foerderung-von-kalte-und-klimaanlagen> (6.4.2023)
 - ▶ UBA (2022d): Rechtliche Regelungen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen#aktuelles> (6.4.2023)
 - ▶ UBA (2023): Gesundheitsrisiken durch Hitze. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#indikatoren-der-lufttemperatur-heisse-tage-und-tropennachte> (6.4.2023)
 - ▶ UFZ (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung) (2019): Einfluss von Hitze und Trockenheit auf die Wasserqualität in Deutschlands Gewässern. Satellitengestützte Umweltanalytik kann Daten liefern. https://www.ufz.de/index.php?de=36336&webc_pm=27/2019 (5.4.2023)
 - ▶ UN DESA (Department of Economic and Social Affairs) (2018): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. File 2: Percentage of Population at Mid-Year Residing in Urban Areas by Region, Subregion, Country and Area, 1950-2050. https://population.un.org/wup/download/Files/WUP2018-F02-Proportion_Urban.xls (2.5.2023)
 - ▶ UN DESA (2019a): World Population Prospects 2019. Highlights. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf (5.4.2023)
 - ▶ UN DESA (2019b): World Urbanization Prospects 2018. Highlights. <https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf> (2.5.2023)



- ▶ Underwood, B.; Guido, Z.; Gudipudi, P.; Feinberg, Y. (2017): Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. In: Nature Climate Change 7(10), S. 704–707
- ▶ UNEP (UN Environment Programme) (2017): Accelerating the Global Adoption of Climate-friendly and Energy-efficient Refrigerators. <https://storage.googleapis.com/clasp-siteattachments/U4E-RefrigerationGuide-201705-Final.pdf> (5.4.2023)
- ▶ UNEP (2019): What you should know about sustainable cooling. <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/what-you-should-know-about-sustainable-cooling> (6.4.2023)
- ▶ UNEP (2020): Cooling Emissions and Policy Synthesis Report. Benefits of cooling efficiency and the Kigali Amendment. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33094/CoolRep.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (5.4.2023)
- ▶ University of Birmingham (2018): A cool world. Defining the energy conundrum of cooling for all, <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/energy/Publications/2018-clean-cold-report.pdf> (5.4.2023)
- ▶ USDA (United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service) (2022): World Agricultural Production. Circular Series WAP 6-22, <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf> (6.4.2023)
- ▶ Usinger, J.; Röser, F.; Müller, N.; Dören, K. (2018): Coordinating finance for sustainable refrigeration and air conditioning. GIZ GmbH, https://www.green-cooling-initiative.org/fileadmin/Publications/2018_09_Coordinating_finance_for_sustainable_RAC.pdf (5.4.2023)
- ▶ Vaillant (Vaillant Group Austria GmbH) (2022a): Aktive Kühlung mit einer Wärmepumpe. <https://www.vaillant.at/privatanwender/tipps-und-wissen/heiztechnologien/warmepumpen/funktionsweise-warmepumpe/kuhlen-mit-warmepumpe/#:~:text=Aktive%20K%C3%BChlung%20mit%20einer%20W%C3%A4rmepumpe,zu%203%20C2%B0C%20senken.> (5.4.2023)
- ▶ Vaillant (2022b): Passive Kühlung mit einer Wärmepumpe. <https://www.vaillant.at/privatanwender/tipps-und-wissen/heiztechnologien/warmepumpen/funktionsweise-warmepumpe/kuhlen-mit-warmepumpe/#:~:text=Aktive%20K%C3%BChlung%20mit%20einer%20W%C3%A4rmepumpe,zu%203%20C2%B0C%20senken.> (5.4.2023)
- ▶ VDKF (Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V.) (2021): Kälte-Klima-Konjunkturumfrage 2021. <https://www.vdkf.de/kaelte-klima-konjunkturumfrage-2021-2/> (5.4.2023)
- ▶ VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) (2019): Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland. Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten 2017. https://www.fuchs.com/fileadmin/schmierstoffe/Produkte/Lieferprogramm/Industrieschmierstoffe/Kaeltemaschinenoele/Energiebedarf_fuer_Kaeltetechnik_in_



- Deutschland_Herausgeber_Forschungsrat_Kaeltetechnik_e.V._im_VDMA.pdf (5.4.2023)
- ▶ Vecellio, D.; Wolf, S.; Cottle, R.; Kenney, W. (2022): Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). In: *Journal of applied physiology* 132(2), S.340–345
 - ▶ Wessel, G. (2021): Kühle Wohnung, warmer Planet. Das Klimaanlagen-Dilemma. Deutschlandfunk, <https://www.deutschlandfunkkultur.de/das-klimaanlagen-dilemma-kuehle-wohnung-warmer-planet-100.html> (5.4.2023)
 - ▶ Westermann, J.; Bolsius, J.; Kunze, S.; Schünemann, C.; Sinning, H.; Ziemann, A.; Baldin, M.-L.; Brüggemann, K.; Brzoska, P.; Ehnert, F.; Goldberg, V. et al. (2021): Hitzeanpassung von Stadtquartieren: Akteursperspektiven und Umsetzungsansätze. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 30(4), S.257–267
 - ▶ WHO (World Health Organization) (2013): Innovative passive cooling options for vaccines. Evidence Brief, https://media.path.org/documents/TS_opt_passive_cooling_br.pdf (5.4.2023)
 - ▶ WHO (2014): Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. Genf, http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/134014/9789241507691_eng.pdf;jsessionid=FC9673E1D5C17CE46ABF2DC2EE2077A3?sequence=1 (6.4.2023)
 - ▶ Winklmayr, C.; Muthers, S.; Niemann, H.; Mücke, H.-G.; an der Heiden, M. (2022): Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. In: *Deutsches Ärzteblatt international* 119(26), S.451–459
 - ▶ WMO (World Meteorological Organization) (2022): Temperatures in Europe increase more than twice global average. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/temperatures-europe-increase-more-twice-global-average> (5.4.2023)
 - ▶ Wu, C.; Zaitchik, B.; Gohlke, J. (2018): Heat waves and fatal traffic crashes in the continental United States. In: *Accident; analysis and prevention* 119, S.195–201
 - ▶ Xu, C.; Kohler, T.; Lenton, T.; Svenning, J.-C.; Scheffer, M. (2020): Future of the human climate niche. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117(21), S.11350–11355
 - ▶ Yadav, N.; Sharma, C. (2018): Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi. In: *Sustainable Cities and Society* 37, S.298–306
 - ▶ Zimmermann, N. (2022): Hitze: Wie viel Schwüle halten wir aus? UBIMET GmbH, <https://uwz.at/de/a/feuchtkugeltemperatur-wie-viel-schwuele-halten-wir-aus> (5.4.2023)



8 Anhang

8.1 Interviewpartner/innen

Name	Organisation
Bernhard Siegele	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Philip Denzinger	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Urbaneck	Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik KETEC (TU Chemnitz)
Jens Schuberth	Umweltbundesamt (UBA)
Barbara Gschrey	Öko-Recherche
Joachim Schadt	Secon Kälteanlagen GmbH
Dietram Oppelt	Heat GmbH/Refrigerants Naturally
Claudia Becker	Heat GmbH/Refrigerants Naturally
Roland Handschuh	Coolskills
Tim Kriesten	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IOER)
Julia Römer	Coolar UG

Die Interviews fanden im Zeitraum Dezember 2021 bis Oktober 2022 statt, der Workshop mit Expert/innen am 12. Juli 2022.

8.2 Abbildungen

Abb. 1	Der Hitzeinseleffekt	19
Abb. 2	Bestand an Klimaanlageanlagen nach Land bzw. Region 2016	22
Abb. 3	Effekte des Klimawandels und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	24
Abb. 4	Funktionsweise einer Kompressionskältemaschine	35
Abb. 5	Beispiele für Kühlbedarfe nach Sektoren und Verwendungszweck	37
Abb. 6	Umsatz mit Klimageräten in der EU-28 (2018)	44
Abb. 7	Top 10 der Staaten mit Publikationen im Bereich Kühlanlagen/ Kühlungssysteme (Cooling Systems)	50
Abb. 8	Top 10 der Themenfelder mit Publikationen im Bereich Kühlanlagen/Kühlssysteme – international	51
Abb. 9	Top 10 der Themenfelder mit Publikationen im Bereich Kühlanlagen/Kühlungssysteme – Deutschland	51
Abb. 10	Publikationsstärkste Institutionen im Bereich Kühlanlagen/ Kühlungssysteme in Deutschland	52



Abb. 11	Publikationsstärkste Institutionen im Bereich Kühlanlagen/ ühlungssysteme in Deutschland in den Themenfeldern Umweltwissenschaften und Geowissenschaften/Planetologie	53
Abb. 12	Schematische Darstellung eines Quartierskältesystems	64
Abb. 13	Temperaturentwicklung in Deutschland von 1881 bis 2023	76
Abb. 14	Kartendarstellung der sieben Klimaraumtypen	80
Abb. 15	Anzahl der Kältesysteme in Deutschland	81
Abb. 16	Gesamtenergiebedarf von Kältetechnik 2009 und 2017	82
Abb. 17	Entwicklung kommunaler Fördermaßnahmen für Dach- und Fassadenbegrünung	93
Abb. 18	Akteursgruppen im Bereich nachhaltige Kühlung	97

8.3 Tabellen

Tab. 1	Gängige Kühlgeräte nach Verwendungszweck und Sektor	38
Tab. 2	Überblick über Kühlgeräte, verwendete Kühlmittel sowie alternative, klimafreundlichere Kühlmittel	39
Tab. 3	Unterscheidung von Lösungsansätzen urbaner Kühlung	55
Tab. 4	Unterscheidung von Typen nichttechnischer Innovationen hinsichtlich des primären Zwecks und des Wirkprinzips	66

