

PHOTONIC COOLING

Effizientere Gebäudekühlung durch Nutzung von Photonik

G. Peharz, F. Kolb,
M. Beerman, D. N. Bird,
H. Schwaiger, R. de Wit,
M. Zuvela-Aloise, K. Andre

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

41/2018

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

PHOTONIC COOLING

Effizientere Gebäudekühlung durch Nutzung von Photonik

Mag. Dr. Gerhard Peharz, DI Florian Kolb, DI Martin Beermann,
David Neil Bird, Msc, DI Dr. Hannes Schwaiger
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

Dr. Rosmarie de Wit, DI Dr. Maja Zuvela-Aloise, Konrad Andre
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik — ZAMG

Weiz, April 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Kurzfassung | 10 |
| Abstract..... | 13 |
| 1 Einleitung..... | 16 |
| 1.1 Aufgabenstellung..... | 16 |
| 1.1.1 Ausgangssituation | 16 |
| 1.1.2 Projektziele..... | 17 |
| 1.2 Stand der Technik..... | 18 |
| 1.2.1 Gebäudekühlung | 18 |
| 1.2.2 Einfluss auf das Mikroklima | 22 |
| 1.2.3 Photonic Cooling | 24 |
| 1.2.4 Ergebnisse aus anderen Projekten..... | 26 |
| 1.3 Verwendete Methoden..... | 27 |
| 1.3.1 Mikroklimamodellierung, Stromverbrauch und THG- Emissionseinsparungen | 27 |
| 1.3.2 Photonic Cooling Technologie | 38 |
| 1.3.3 Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energieeinsparung im Gebäude | 41 |
| 2 Ergebnisse | 43 |
| 2.1 Überblick | 43 |
| 2.2 Mikroklimamodellierung, Stromverbrauch und THG-Emissionseinsparungen | 47 |
| 2.2.1 Bewertung des urbanen Klimas von Wien und zukünftige Klimaänderung .. | 47 |
| 2.2.2 Stromverbrauch und Treibhausgaseinsparungen | 50 |
| 2.2.3 Urbaner Temperaturanstieg verursacht durch anthropogene Wärmefreisetzung aus Klimaanlagen | 53 |
| 2.3 Photonic Cooling..... | 62 |
| 2.4 Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energie-einsparung im Gebäude..... | 69 |
| 2.4.1 Einsatzfall 1: Einfach-Splitanlage für Einzelraumklimatisierung | 69 |
| 2.4.2 Einsatzfall 2: Kompressionskältemaschine Bürogebäude..... | 72 |
| 2.4.3 Einsatzfall 3: Dessicant-Kühlung..... | 75 |
| 2.4.4 Einsatzfall 4: Büro-Container | 78 |
| 2.5 Diskussion der Ergebnisse | 80 |
| 2.5.1 Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien | 80 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 2.5.2 | Unsicherheitsquellen | 83 |
| 2.5.3 | Angemessenheit der Methode: ausgeschlossene Daten, Korrektur des Verbraucherverhaltens und ökonomische Einflüsse | 83 |
| 2.5.4 | Kritische Bemerkungen bezüglich der Einflusses von Klimaanlage auf das Stadtklima..... | 86 |
| 2.5.5 | Kritische Betrachtung der Photonic Cooling Technologie im Einsatz..... | 87 |
| 3 | Schlussfolgerungen | 89 |
| 3.1 | Quantifizierung des Einflusses von Klimaanlageabwärme auf städtisches Mikroklima, Stromverbrauch und THG Emissionen..... | 89 |
| 3.2 | Photonic Cooling..... | 90 |
| 3.2.1 | SWOT-Analyse..... | 90 |
| 3.3 | Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energie-einsparung im Gebäude..... | 91 |
| 4 | Ausblick und Empfehlungen | 92 |
| 5 | Verzeichnisse | 93 |
| 5.1 | Abbildungsverzeichnis | 93 |
| 5.2 | Tabellenverzeichnis | 96 |
| 5.3 | Literaturverzeichnis..... | 97 |
| 6 | Anhang..... | 105 |
| 6.1 | Ergänzendes Datenmaterial | 105 |

Kurzfassung

In diesem Sondierungsprojekt wurde der Ansatz des Photonic Cooling zur Gebäudekühlung auf seine praktische und kosteneffiziente Umsetzbarkeit bewertet. Konkret wurden dabei kostengünstige photonische Oberflächen und Konzepte evaluiert, die einerseits eine große Reflexion der einfallenden Solarstrahlung (>97%) aufweisen und andererseits die Wärmeabstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 8 und 13 Mikrometer nicht behindern. Aufbauend auf diesen Anforderungen wurden verschiedene Konzepte zur Gebäudekühlung mittels Photonic Cooling erarbeitet, sowie Modellrechnungen zu möglich erzielbaren Kühlleistungen durchgeführt als auch deren Auswirkung auf das Stadtklima abgeleitet. Auf Basis von Mikroklimamodellierungen wurde zudem die Auswirkung eines derartigen Ansatzes zur Minimierung der Ausbildung von städtischen Wärmeinseln evaluiert. Ziel dieser Untersuchungen war eine verbesserte Abschätzung geben zu können, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen ein Photonic Cooling Ansatz zur Gebäudekühlung sinnvoll eingesetzt und in weiterer Folge zu einer höheren Lebensqualität in Städten beitragen kann.

Ausgangssituation/Motivation

Bedingt durch den Klimawandel und durch die zunehmende Ausbildung von ausgeprägten Wärmeinseln im städtischen Bereich ist es zu erwarten, dass die Anzahl der Klimaanlage zur Raumkühlung und damit der Stromverbrauch im Sommer in städtischen Gebieten steigen wird. Die von den Klimaanlage zusätzlich generierte Abwärme, welche sich mit der vergrößerten Anzahl von Klimageräten entsprechend skaliert, lässt wiederum einen zusätzlichen unerwünschten Effekt auf das Mikroklima erwarten, der sich in weiterer Folge negativ auf die Gesundheit und die Lebensqualität der Menschen auswirken wird. In diesem Zusammenhang stellen innovative und energieeffiziente Kühlsysteme eine erstrebenswerte Zielsetzung dar.

Das Projekt „Photonic Cooling - Effizientere Gebäudekühlung durch Nutzung von Photonik“ hatte in diesem Zusammenhang als Zielsetzung abzuklären, inwieweit die Technologie des Photonic Cooling zur Reduktion von Wärmeinseln im städtischen Bereich sowie zur Verminderung des Stromverbrauchs von Klimageräten beitragen kann.

Inhalte und Zielsetzungen

Beim Photonic Cooling Ansatz soll die Strahlungskühlung speziell an sonnigen und klaren Tagen zusätzlich genutzt werden. In der Regel scheitert das Konzept zur Nutzung der photonischen Strahlungskühlung tagsüber daran, dass mehr Wärmeleistung durch solare Einstrahlung und/oder durch die warme Umgebungsluft aufgenommen wird als mittels Wärmestrahlung abgegeben werden kann. Obwohl der grundlegende Ansatz schon über einen längeren Zeitraum verfolgt wurde, ist es, bedingt durch die ständige technologische Weiterentwicklung sowie durch den zunehmenden Erkenntnisgewinn über die Wirkung von optischen und photonischen Strukturen, erst kürzlich gelungen, eine nennenswerte Kühlleistung auch während des Tages zu realisieren.

Methodische Vorgehensweise

Für eine praktische Umsetzung des Photonic Cooling Ansatzes waren und sind allerdings noch viele Fragen offen. Zum einen ist es erforderlich, kostengünstige Materialien und Herstellungsverfahren für die zugrundeliegenden (photonischen) Beschichtungen zu finden, zum anderen mussten Konzepte erarbeitet werden, die eine Integration des Photonic Cooling-Ansatzes in ein Gebäude ermöglichen, ohne die dabei erreichbare Kühlleistung nennenswert zu verringern. Letztlich galt es nachzuweisen, dass ein derartiger Ansatz auch tatsächlich zu einer energieeffizienten Gebäudekühlung und zu einer Abnahme der Ausbildung von städtischen Wärmeinseln beitragen kann. All diese Themen adressierte das vorliegende Projekt und liefert damit erste Erklärungen hinsichtlich des Anwendungspotentials sowie über mögliche Ansätze für eine praktische Umsetzung und Implementierung des Photonic Cooling Konzeptes.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Quantifizierung des Einflusses von Klimaanlageabwärme auf städtisches Mikroklima, Stromverbrauch und Treibhausgas (THG) Emissionen

Im Rahmen des Projektes wurde ein Zusammenhang zwischen der Abwärme von Klimaanlageanlagen auf die lokale Temperaturzunahme in Städten hergestellt und der Einfluss dieser Wärmeabgabe auf das zukünftige Stadtklima untersucht. Basierend auf Messungen des Stromverbrauchs und den maximalen Kühlgradtagen für das Jahr 2009 – 2016 wurde ein Modell entwickelt, und somit erstmals die Berechnung der Einfluss von Abwärme von Klimaanlageanlagen auf das Stadtklima von Wien, sowie eine Prognose für die Situation im Jahr 2050, ermöglicht. Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass die benötigte elektrische Energie zur Gebäudekühlung von derzeit 22 GWh/Jahr auf 95 (33 - 189) GWh/Jahr bis zum Jahre 2050 ansteigen wird. Darüber hinaus wurden bestehende sozio-ökonomische Modelle zur Prognose des Energieverbrauchs durch Klimaanlageanlagen in Städten weiterentwickelt.

Photonic Cooling

Im Bereich der Photonic Cooling Technologie wurden effiziente Funktionsmuster mit kostengünstigen, kommerziell verfügbaren Materialien realisiert und anschließend deren Wärmeabstrahlungsleistung experimentell bestimmt. Die günstigsten Ausführungsformen von Photonic Cooling wurden zum Patent angemeldet. Aus einer im Rahmen des Projektes durchgeführten SWOT Analyse lässt sich jedoch eine wesentliche Schlussfolgerung ziehen: Aus aktueller Perspektive bietet sich mittelfristig kein kommerzielles Verwertungspotential für Photonic Cooling.

Das ökonomische Potential von Photonic Cooling lässt sich nur langfristig in Kombination mit innovativen Kühlkonzepten erschließen. Eine Konsequenz aus dieser Schlussfolgerung ist, dass kein akuter Handlungsbedarf an weiterführenden Verwertungsaktivitäten besteht. Demnach ist das Verwertungspotential von Photonic Cooling ein langfristiges und diese

Technologie kann nur in Kombination mit Klimasystemen funktionieren, die sich von heutigen Standardlösungen deutlich unterscheiden.

Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energie-einsparung im Gebäude

Erstmals wurden verschiedene Einsatzszenarien von Photonic Cooling in der Gebäudetechnik analysiert und deren potentielle Energieersparnis bestimmt. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der 4 Einsatzfälle, dass die bemerkenswert positiven Eigenschaften der Photonic-Kühltechnik grundsätzlich nur genutzt werden können, wenn deren Einsatz in Gebieten stattfindet, die an den meisten Tagen des Jahres einen wolkenfreien Himmel haben und zudem eine sehr geringe Luftfeuchtigkeit aufweisen. Der bisher erreichte Entwicklungsstand der Photonic-Kühlfläche müsste auch durch entsprechende Forschungsanstrengungen wesentlich gesteigert werden. Sowohl die derzeit erreichte Abkühlung als auch die spezifische Infrarotstrahlungsleistung müssten für einen sinnvollen Praxiseinsatz verbessert und das thermodynamische Verhalten der Photonic-Kühlplatten durch entsprechende Kennlinienfelder für eine Berechnung zugänglich gemacht werden.

Ausblick

Erstmals wurde das Potential von Photonic Cooling für eine Verbesserung des urbanen Mikroklimas untersucht. Die zunehmende Wärmeabgabe von Klimaanlagen und die daraus resultierende Zunahme der lokalen Stadttemperatur wurden auf Basis einer Abschätzung zur zukünftigen Verbreitung von Klimageräten und für zukünftig vorherrschende Stadttemperaturen ermittelt. Da der Einfluss der Wärmeabgabe von Klimaanlagen auf das Stadtklima auf Basis von vorliegenden Ergebnissen aus der Literatur untersucht wurde, können aus den in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnissen nur generelle Schlussfolgerungen über den Einfluss auf die erwarteten Maximaltemperaturen gezogen werden. Schlussfolgerungen auf den Ort der auftretenden Wärmeinseln oder eine lokal zuordenbare Temperaturzunahme würden außerdem eine orts aufgelöste Klimamodellierung erfordern. Des Weiteren konnte hinsichtlich der Photonic Cooling Technologie kein kurz- bzw. mittelfristiges kommerzielles Verwertungspotential identifiziert werden.

Jedoch werfen die Projektergebnisse eine Reihe von interessanten weiterführenden Fragestellungen auf, die in zukünftigen F&E Projekten untersucht werden sollen. Diese Fragestellungen umfassen einerseits die Untersuchung des lokalen Wärmeinseleffektes durch Klimaanlagen auf einer kleineren Skala und alternative Städte (Bauweise). Weiters werden F&E Aktivitäten angestrebt, die die Realisierung und Charakterisierung von Photonic Cooling Funktionsmustern zum Ziel haben und gleichzeitig deren Integration in innovative Kühlsysteme vorantreiben.

Abstract

Within the scope of the project a photonic cooling approach was investigated and evaluated in terms of feasibility and cost efficiency for building applications. In particular cost-efficient photonic surfaces and concepts were investigated which need to have a high reflectivity in of the incident solar radiation (>97%) and a high emission coefficient within the spectral range of 8 – 13 micrometer in order to enable the emission of heat into the sky. Based on these requirements, different approaches utilizing photonic cooling concepts in particular for cooling of buildings were developed and potential reductions of the electric power required for cooling are estimated. In addition, potential mitigation effects of the photonic cooling approach on the overheating of cities were modelled. The main aim of the project was to create reliable knowledge regarding the feasibility of photonic cooling approaches for air-conditioning applications and whether the approach can contribute to an improvement of quality of life in cities of tomorrow.

Starting point / motivation

In the wake of climate change and the rising number of heat islands in urban landscapes, energy expenses for air conditioning, especially during the summer, will increase dramatically. The waste heat generated by additionally installed air conditioners will worsen the micro climate even more, thereby negatively affecting health and quality of life of citizens. Innovative cooling concepts that do not additionally require electrical power might be also a way to lower the costs for cooling.

In this context, the aim of the project “Photonic Cooling – Efficient cooling of buildings through the use of photonic” was to evaluate the suitability of the Photonic Cooling technology to reduce the occurrence and the size of urban heat islands and to lower the power consumption due to air conditioning.

Contents and Goals

Another requirement within the Photonic Cooling approach is the usage of radiation cooling in particular on sunny and clear days. Radiation cooling during daytime is challenging, as in general more heat is absorbed by the cooling system through solar irradiation and heat transfer from the ambient air than radiated off into space. Even though the basic approach of radiation cooling has been pursued for quite some time, the experimental implementation of devices with substantial cooling power yields has been successful only recently. This can be attributed to the continuously ongoing advancements in technology and to an improvement of know-how concerning the physics behind (nano-) optical and photonic structures.

Methods

There were and still are many open questions with respect to the realization of such devices: For instance, cost efficient fabrication techniques for the required surface coatings needed to be found; sophisticated concepts concerning the integration of the cooling devices into a building architecture had to be developed; and finally, a decisive proof was required for the claim that photonic cooling can provide noticeable cooling power yields that also might contribute to a reduction of urban heat islands. All these subjects were addressed within this project and the obtained results provide a clarification regarding the feasibility of some photonic cooling concepts as well as their practical implementation.

Results

In summary, the following results were achieved:

Quantification of the impact of air conditioning waste heat on urban microclimate, electricity consumption and greenhouse gas (GHG) emissions

Within the project “Photonic Cooling”, a relation between waste heat generated by air conditioning and an increase of urban temperature was derived with the intention to estimate the impact of this anthropogenic heat release on urban climate. Based on measurements of electricity consumption and the maximum degree of cooling for the period 2009 – 2016, the employed simulation model allowed for an estimation of the influence on the urban climate due to the waste heat generated by air conditioning. Additionally, the model provided also a prognosis of the situation in 2050 for the city of Vienna. The results derived from this model indicate that the electrical energy used for cooling will increase from currently 22 GWh/year to 95 (33 - 189) GWh/year by 2050. In addition, socio-economic models predicting energy consumption by air conditioning in cities have been developed.

Photonic Cooling

In the area of photonic cooling technology, efficient functional models have been realized with low-cost and commercially available materials. Their radiation performance has been determined through experiment and a patent was filed for these functional photonic cooling models. However, one of the main conclusions drawn from a SWOT analysis is that there is no medium-term commercial potential for exploiting photonic cooling.

The economic potential of Photonic Cooling can only be exploited on a long-term scale in combination with other innovative cooling concepts. Another consequence of this conclusion is that there is no urgent need for further exploitation activities in the current situation. Concluding, the potential for exploitation of photonic cooling is only on a long-term scale while the photonic cooling technology can only work in combination with air conditioning systems, which are significantly different from today's standard systems.

Use of photonics cooling for building cooling / energy saving in the building

For the first time, application scenarios of photonic cooling technology in building technology were analyzed and the potential energy savings were determined. In summary, the results from 4 different applications show that the remarkably positive properties of photonic cooling technology can only be used in areas having a cloud-free sky and a low humidity on most days of the year. The cooling surface of the photonic cooling technology has to be significantly improved by appropriate research efforts in order to improve the achieved cooling yield in general as well as the specific emission power yields within the infrared regions in particular. In addition, the thermodynamic behavior of the photonic cooling surface has to be investigated in more detail providing a more comprehensible guideline for future applications.

Prospects / Suggestions for future research

For the first time, the potential of photonic cooling in order to improve the urban microclimate was assessed in detail. Estimates of future anthropogenic heat emissions and their resulting increase in urban temperatures were considered as a function of the air conditioning penetration rate and for future temperatures. As the effect of anthropogenic heat release on urban temperatures was estimated based on a literature study, in the present study only information related to the maximum temperature effect is presented, but no information regarding the local distribution of the temperature maximum as well as the spatial extent of such effect can be deduced. However, this shortcoming can be overcome by a direct modelling approach of such conditions enabling a more detailed analysis. With regard to the practical implementation of photonic cooling technology, no application having a short- or medium-term commercial exploitation potential could be identified.

However, the project results further raise a number of interesting questions that should be examined in future R&D projects. These questions include on the one hand the investigation of the local heat island affected by waste heat generated by air conditioning on a decreased scale and for alternative city designs (construction). Furthermore, R&D activities concerning the realization and characterization of photonic cooling functional models have to be pursued in order to enable their integration into upcoming and innovative cooling systems.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

In diesem Sondierungsprojekt wurde der Ansatz des Photonic Cooling zur Gebäudekühlung auf seine praktische und kostengünstige Umsetzbarkeit und seine Wirkung hin evaluiert. Konkret wurden dabei vor allem kostengünstige photonische Oberflächen und Konzepte in Betracht gezogen, die möglichst viel solare Strahlung reflektieren (>97%) und die Wärmestrahlung im Bereich zwischen 8 und 13 Mikrometer als Abstrahlung ins kalte Weltall möglichst nicht behindern. Darauf aufbauend wurden Konzepte zur Gebäudekühlung mittels Photonic Cooling erarbeitet, sowie Modellrechnungen zur möglichen Kühlleistung durchgeführt und deren Auswirkung auf das Stadtklima abgeleitet. Auf der Basis von Mikroklimamodellierung wurde zudem die Auswirkung eines derartigen Ansatzes zur Minimierung der Ausbildung von städtischen Wärmeinseln evaluiert. Ziel war es auf Basis dieser Erkenntnisse eine bessere Abschätzung geben zu können, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen ein Photonic Cooling Ansatz für die Gebäudekühlung sinnvoll eingesetzt werden kann und zu einer höheren Lebensqualität in Städten beitragen kann.

1.1.1 Ausgangssituation

Generell wird erwartet, dass der Bedarf an Gebäudekühlung zukünftig zunehmen wird. Die Gründe dafür sind insbesondere:

- Umgebungsklimabedingt: durch Veränderung sowohl des globalen Klimas als auch des Mikroklimas in Städten und Ballungsgebieten aufgrund zunehmender Stadtverdichtung und Flächenversiegelung („Städtische Hitzeinseln“) wird eine Zunahme der Kühlgradtage erwartet (Pretenthaler, F. et al., 2007).
- Baumaterialbedingt: durch zunehmenden großflächigen Einsatz von Glas und den dadurch bedingten zunehmenden solaren Einträgen, bzw. durch den vermehrten Einsatz von leichten Baumaterialien mit verringerter Wärmespeicher- und Wärmeausgleichsfähigkeit der Gebäudemasse.
- Nutzungsbedingt: durch zunehmende innere thermische Lasten bedingt durch steigende Anzahl und damit verbunden die Abwärme stromverbrauchender Geräte und Installationen, sowohl in Wohn- als auch Dienstleistungsgebäuden, sowie durch zunehmende städtische Gebäudenutzflächen und steigende Komfortansprüche der Gebäudenutzer.

Um den steigenden Bedarf an Gebäudekühlung von einem ebenfalls steigenden Energiebedarf zu entkoppeln, und damit einen Beitrag zu den nationalen und europäischen Klima- und Energiezielen zu leisten, sieht die auf die energetische Optimierung von Gebäuden gerichtete Gebäude Richtlinie EPBD (Energy Performance of Buildings Directive; Richtlinie 2010/31/EU) als zentrale Maßnahmen die Reduktion des Energiebedarfs, die Verminderung von Energieverlusten und die Deckung des restlichen Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien vor. Umgelegt auf die Gebäudekühlung sind die drei Haupt- Maßnahmenbereiche:

1. Reduktion der Kühllast, sowohl außeninduziert durch die Optimierung der Gebäudehülle, aber auch des städtebaulichen Umfeldes (z.B. Gebäudebeschattung, Einsatz von Oberflächen mit hohem Albedo, Verdunstungskühlung durch Vegetation und Wasser, Freihalten von städtischen Frischluftschneisen, Reduktion der Bodenversiegelung, Reduktion von Abwärmeabgabe an die Umgebung), als auch inneninduziert, z.B. durch Einsatz energieeffizienter Geräte mit geringerer Abwärme.
2. Einsatz passiver regenerativer Kühlsysteme bzw. wo aktive Kühlsysteme benötigt werden, Erhöhung der Effizienz und Leistungszahl.
3. Einsatz von erneuerbarem Strom bzw. Wärme als Antriebs- und Hilfsenergie aktiver Kühlsysteme.

Der in diesem Projekt adressierte technologische Ansatz beinhaltet Beiträge zu den Maßnahmenbereichen 1 und 2.

1.1.2 Projektziele

Im Zusammenhang mit den voran beschriebenen Maßnahmen stellen innovative energieeffiziente Kühlsysteme eine anstrebenswerte Zielsetzung dar. Das Projekt setzte sich daher mit der Technologie des Photonic Cooling auseinander und klärte damit inwieweit ein substantieller Beitrag zur Reduktion von städtischen Wärmeinseln und des Stromverbrauchs für die Raumkühlung geleistet werden kann. Im konkreten wurden folgende Projektziele adressiert:

Ziel 1: Quantifizierung des Einflusses von Klimaanlageabwärme auf städtisches Mikroklima und des Strombedarfs unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen

Ziel 2: Kostengünstigere Photonic Cooling Technologien

Ziel 3a: Analyse von Optionen zur Implementierung von Photonic Cooling zur Gebäudekühlung und Evaluierung der möglichen Effizienzsteigerung eines Kälteprozesses durch Senkung der Rückkühltemperatur über Photonic Cooling

Ziel 3.b: Aufbauend auf die potentiell am besten geeigneten Konzepte: des potentiellen Einflusses auf das Mikroklima in Städten

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Gebäudekühlung

Eine Kühlung von Gebäuden ist immer dann erforderlich, wenn ohne zusätzliche technische Installationen zur Wärmeabfuhr aus dem Gebäude die Raumtemperatur nicht innerhalb des Behaglichkeitsbereichs gehalten werden kann. Für die Behaglichkeit im Gebäude müssen neben der Temperatur auch Luftfeuchte und Luftwechsel mitbedacht werden, welche unter dem Begriff Konditionierung bzw. Klimatisierung zusammengefasst wird. Der zu erreichende Behaglichkeitsbereich eines Gebäudes liegt bei ca. 20-24°C und bei ca. 30-65% relativer Raumfeuchte. Der Ausgangspunkt der zu konditionierenden Luft im h-x- Mollier-Diagramm (siehe Abbildung 1) ist entscheidend für die Wahl der Luftbehandlungsfunktionen (Erwärmung, Kühlung, Befeuchtung, Entfeuchtung) und der Art des Konditionierungssystems (Siemens Building Technologies, 2007)

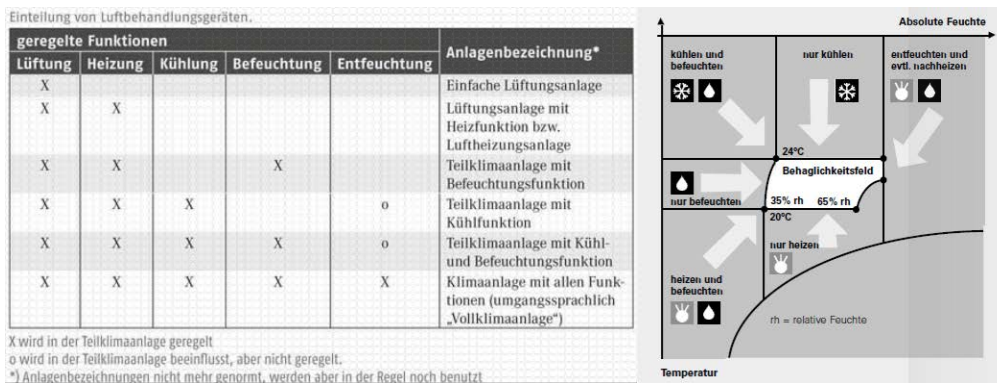


Abbildung 1: Luftkonditionierung nach Funktionen zur Erreichung des Behaglichkeitsfeldes im h, x Diagramm (Quelle: Hans-Joachim Heinze, Lüftungs- und Klimatechnik für maximale Behaglichkeit. 2012. Online Artikel abgerufen am 11.10.2018 <http://www.ikz.de/nc/news/article/gute-raumluft-isterwuensch-0051099.html> (linke Bildhälfte); Siemens Building Technologies. Das h,x-Diagramm, Aufbau und Anwendung. Broschüre. (rechte Bildhälfte))

In der Literatur gibt es zahlreiche Übersichten und Einteilungen von Kühl- und Klimatisierungsanlagen. Gebäudekühlungen lassen sich über drei unterschiedliche Aspekte prinzipiell unterscheiden:

1. Kälteerzeugung
 - a. passive Systeme (direkte Nutzung eines natürlichen Temperaturniveaus zur Kühlung)
 - b. aktive Kältemaschinen mit thermodynamischen Kreisprozess und Antriebsenergie Strom oder Wärme
2. Kälteverteilung / -übergabe
 - a. luftgeführt / Konvektion
 - b. wasser- (kältemittel-) geführt / Strahlung, Konvektion
3. Rückkühlung
 - a. trocken
 - b. nass
 - c. hybrid

Abbildung 2 stellt in einer Übersicht den Stand der Technik zu Gebäudekühlsystemen dar. Auch wenn die Wahl von Gebäudekühlsystemen grundsätzlich von gebäudetechnischen Kriterien eingeschränkt wird, insbesondere bei Nachrüstungen hinsichtlich Kälteverteilung und –abgabe, stehen meist verschiedene anlagentechnische Optionen zur Verfügung. Im Sinne der eingangs beschriebenen Ziele der Effizienzerhöhung sowie des Einsatzes von erneuerbarer Primärenergie als Antriebs- und Hilfsenergie beim Kühlen werden neben der konventionellen Kompressionskältemaschine zunehmend thermische Kältemaschinen mit erneuerbarer Solar- oder Fernwärme als Antriebsenergie sowie passive Kühlsysteme zur Nutzung natürlich vorhandener Temperaturniveaus eingesetzt. Geschlossene wie offene Ab- bzw. Adsorptionsanlagen sowie Free Cooling Konzepte stehen im Fokus zahlreicher aktueller Forschungsprojekte und Studien (Wyssen I. et al., 2010; SolaRück, 2015; Wiemken E. et al., 2013; Wallisch A. et al., 2011; Preisler A. et al., 2012; Preisler A. et al., 2012; Nocke B. et al., 2013; Jakob U., et al., 2015; Gunczy S., 2011; IEA Solar Heating and Cooling Programm - Task 38: Solare Kühlung und Klimatisierung)

| Kälteerzeugung | | Aktive Kühlung | | | | | | Passive Kühlung | | | |
|---|-----------------------------------|---|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|-----------|-----------------------|-------------|
| | | Kompressions- kältemaschine (zentral) | Kompressions- kältemaschine (Splitgerät) | Absorptions- kältemaschine | Adsorptions- kältemaschine | Flüssigsorption (DEC) | Feststoff- Sorption (DEC) | Nachtkühlung | Erdsonden | Brunnen, Zisternen | Rückkühlung |
| Kältequelle | Geschl. Kreis-prozess | ■ | | | | | | | | | |
| | Offener Prozess | | | | | ■ | | | | | |
| | Außenluft | | | | | | | ■ | | ■ | |
| | Erdreich | | | | | | | | ■ | | |
| Antriebsenergie | Grund-, Regenwasser | | | | | | | | | ■ | |
| | Strom | ■ | | | | | | | | | |
| | Hilfsstrom (Pumpen, Ventilatoren) | ■ | | | | | | | | | |
| Rückkühlung * | Wärme (Solar-, Fernwärme) | | | ■ | | | | | | | |
| | Trockenkühlung | ■ | | | | | | | | | |
| | Geschl. Kühlturm | ■ | | | ■ | | | | | | |
| | Offener Kühlturm | | | ■ | | | | | | | |
| Verteilmedium ** | Hybridkühlung | | | ■ | | | | | | | |
| | Wasser (16-20°C) | | | ■ | | | | | ■ | | |
| | Wasser (6-18°C) | ■ | | | | | | | | | |
| | Kältemittel | | ■ | | | | | | | | |
| | Zuluft (direkt) | | | | | ■ | | ■ | | | |
| Kälteabgabe | Zuluft (Wärmetauscher) | ■ | | | | | | | | | |
| | Kühldecke | ■ | | ■ | | | | | ■ | | |
| | Bauteilaktivierung | | | ■ | | | | | ■ | | |
| | Fan Coils | | ■ | | | | | | | | |
| Kälteabgabe | Zuluft-, Umluftkühlung | ■ | | | | | | ■ | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| * üblicherweise eingesetzte Rückkühlung | | | | | | | | | | | |
| ** je nach gebäudetechnischer Machbarkeit reines Kaltwassersystem, Kombination Kaltwassersystem und zentrale Lüftungsanlage, oder reines Luftsystem | | | | | | | | | | | |

Abbildung 2: Übersicht über Gebäudekühlsysteme.

Die Beschreibung der Effizienz von Kühlanlagen erfolgt über elektrische bzw. thermische Leistungszahlen. Diese Leistungszahlen setzen die Kühlleistung ins Verhältnis zur eingebrachten elektrischen bzw. thermischen Leistung. Leistungszahlen werden in der Nutzkälteproduktion als *Energy Efficiency Ratio* (EERel EERth) bezeichnet, hingegen *Coefficient of Performance COP* bei Nutzwärmeproduktion. Es wird zwischen Leistungszahlen für die Kältemaschine (Kälteleistung im Verhältnis zur Antriebsenergie Strom bzw. Wärme) und für das Kältesystem (Kälteleistung im Verhältnis zur Summe aus

elektrischer Antriebsenergie und Hilfsenergie für Pumpen, Ventilatoren) (siehe auch Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen, BMLFUW 2015) unterschieden. Typische Leistungszahlen für Kältemaschinen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Ein wesentliches Element für die Erhöhung der Energieeffizienz aktiver Kühlanlagen ist die Rückkühlung, also die Abführung der im Kühlvorgang aufgenommenen Wärme.

Tabelle 1: Leistungszahlen verschiedener Kältemaschinen

| Kompressionskältemaschine (luftgekühlt) | Kompressionskältemaschine (wassergekühlt) | Splitgerät | Absorptionskältemaschine Wasser/LiBromid | Absorptionskältemaschine Ammoniak/Wasser | Adsorptionskältemaschine | Sorptionsanlagen (DEC) |
|---|---|------------|--|--|--------------------------|------------------------|
| EERel | EERel | EERel | EERth | EERth | EERth | EERth |
| 5-7 | 6-9 | 2,5-5,5 | 0,6-1,2 | 0,3-0,7 | 0,4-0,7 | 0,5-1 |

Quelle: Stadt Wien, Leitfaden zu: Energieeffiziente Klimatisierung, Solares Kühlen

Die Rückkühlung hat aufgrund der deutlich höheren abzuführenden Wärmemengen bei den thermischen Kälteanlagen eine größere Bedeutung als bei Kompressionskältemaschinen. Abbildung 3 stellt ein Schema der Ab- bzw. Adsorption dar. Die Rückkühlung dient im geschlossenen Kreisprozess der Abführung der Niedertemperatur-Sorptionswärme (nach der Aufnahme des Kältemitteldampfes im Ab (Ad-)sorber), sowie der Hochtemperatur-Kondensationswärme im Kondensator (nach dem Austreiben des Kältemittels im Generator mit zugeführter Wärme). In der Kompressionskältemaschine ist die Rückkühlung mit dem Kondensator verbunden.

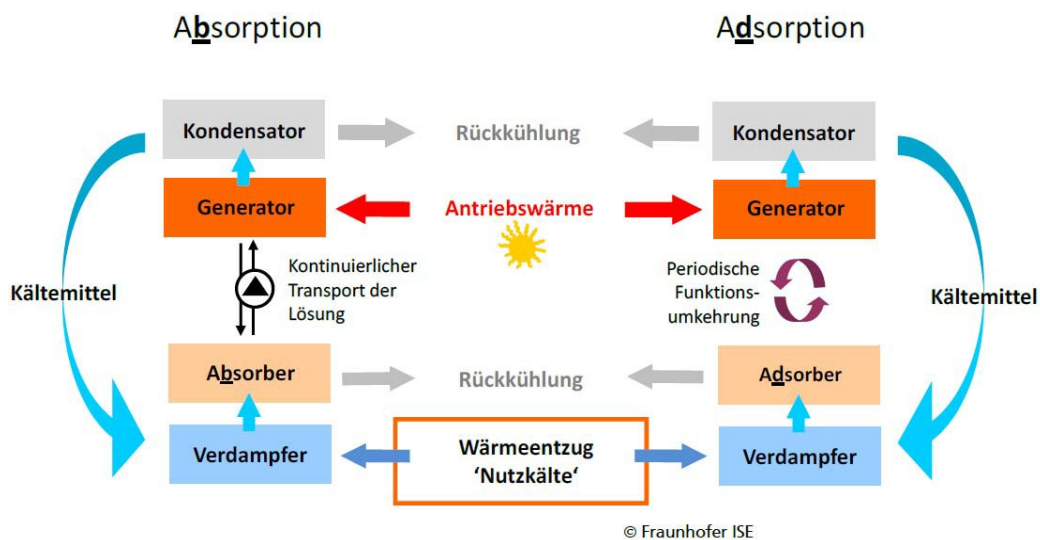


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema der thermischen Flüsse in der Ab- / Adsorption (Quelle: Wiemken E. et al. (2013), Planungsleitfaden für Solare Kühlung, Fraunhofer-Institut für Solare-Energiesysteme (ISE), Freiburg)

Potential für Effizienzsteigerungen und höhere Leistungszahlen besteht über die Reduktion des Temperaturhubs (= Kühlwasseraustrittstemperatur – Kaltwasseraustrittstemperatur) und damit zusammenhängend über die Reduktion der elektrischen Strombedarfs im Rückkühlsystem (z.B. für Kühlwasserpumpen, Kühlturmventilatoren). Das Potential zur Erhöhung des durchschnittlichen EER-Wertes bei Kompressionskältemaschinen durch

Anhebung der Kaltwasservorlauftemperatur bzw. Senkung der Kühlwasser-austrittstemperatur liegt bei 0,08 bis 0,25 Punkten pro °C Annäherung der beiden genannten Temperaturen (Wallisch A. et al., 2011). Für solar-thermische Kältemaschinen wird der Hilfsenergiebedarf an Strom für trockene Rückkühlung thermischer Kältemaschinen in der Literatur mit ca. 0,0125 – 0,091 kW_{el} pro 1 kW Rückkühlleistung, bzw. für nasse Rückkühlung mit ca. 0,005 – 0,060 kW_{el} pro 1 kW Rückkühlleistung (ohne Wasseraufbereitungsanlage) angegeben. Im Projekt InnoCool wurden für eine beispielhafte solarthermische Kältemaschine inklusive Rückkühlung im Nasskühlturm die Verbrauchsanteile elektrischer Energie erhoben (siehe Abbildung 4). Der Anteil der Rückkühlung lag bei über 60%.

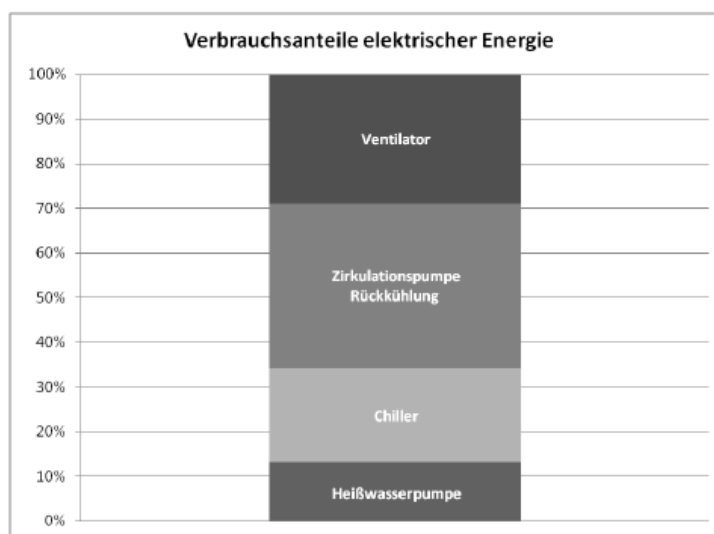


Abbildung 4: Verbrauchsanteile der elektrischen Energie in einem beispielhaften thermischen Kühlsystem (Quelle: Bericht zu Projekt InnoCool, siehe Kapitel 1.1.1).

Der elektrische Leistungsbedarf für die Rückkühlung wurde für eine beispielhafte thermische Kältemaschine einschließlich Kühlwasserpumpen sogar mit ca. 82% des gesamten Strombedarfs ermittelt [Wiemken E. et. al (2013), Planungsleitfaden für Solare Kühlung, Fraunhofer-Institut für Solare-Energiesysteme (ISE). Freiburg]. Wird nur die Rückkühlung ermittelt, entfallen ca. 75% des elektrischen Leistungsbedarfes hierfür auf die Kühlwasserpumpen; das verbleibende Viertel wird für den Antrieb der Kühlturmventilatoren benötigt.

Ein ebenfalls schon lange verfolgter Ansatz zur Kühlung basiert auf der Nutzung von Strahlungskühlung. In der konkreten Anwendung wird Strahlungskühlung speziell nachts genutzt um Kühlung für Gebäude zu realisieren. Beispielsweise wird am Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) seit vielen Jahren der Ansatz der passiven Infrarot-Nachtkühlung erforscht. Dabei wird die Abstrahlung während der Nacht dazu genutzt Wasser einer Regenwasserzisterne abzukühlen das als Kältespeicher für eine Gebäudekühlung tagsüber genutzt wird. In mehreren von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekten wurden dabei die Grundlagen dafür erarbeitet den kalten Nachthimmel als Kühlmechanismus für Gebäudekühlung zu verwenden (ZAE Bayern, 2018).

Dieses Prinzip ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt bzw. werden damit in der Nacht Kühlleistungen zwischen 50 und 150 W/m² durch Strahlungskühlung erzielt.

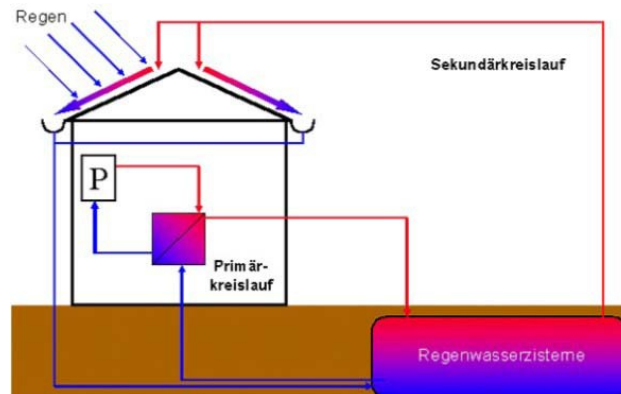


Abbildung 5: Schemazeichnung des Kühlprinzips zur Nutzung der Strahlungskühlung während der Nacht. Damit werden in der Nacht Kühlleistungen zwischen 50 und 150 W/m² erreicht. (Quelle: ZAE Bayern).

Prinzipiell funktioniert die Strahlungskühlung auch tagsüber bei Sonnenschein bzw. wenn die größten Kühllasten anfallen. Jedoch ist der Wärmeeintrag durch Solarstrahlung und durch die Umgebung (speziell Konvektion warme Umgebungsluft) tagsüber deutlich größer als die Kühlleistung die mittels Strahlung an den Himmel bzw. an das Weltall abgegeben wird.

1.2.2 Einfluss auf das Mikroklima

Eine durch bauliche Verdichtung modifizierte Landschaftsstruktur führt zu städtischen Wärmeinseln die sich negativ auf die Gesundheit und die Lebensqualität der Menschen auswirken. In städtischen Gebieten wird die eingestrahlte solare Energiemenge stärker als in land- und forstwirtschaftlichen Flächen absorbiert und auch deutlich länger gespeichert. Grund dafür sind einerseits die Art, aber auch Farbgebung der vorhandenen Oberflächen wie Hausdächer, Straßen, Abstellflächen für Autos und sonstige verbaute Flächen und andererseits die höhere Wärmespeichereigenschaft der vorhandenen Materialien (Absorptions- und Emissionspotential). Darüber hinaus verstärkt der durch humane Aktivitäten erhöhte Energieverbrauch das Phänomen der sogenannten UHI (*Urban Heat Island*) von Stadtgebieten und verursacht:

1. vor allem in den Sommermonaten eine stärkere Erwärmung urbaner Flächen mit einhergehendem, stärkerem, zum Teil fossil erzeugtem, Stromverbrauch für die Raumkühlung von Wohnungen, Bürogebäuden und Häusern, sowie
2. einen negativen Einfluss auf die städtische Strahlungsbilanz, damit einhergehend höherer Energieverbrauch und dadurch verstärkten, negativen Beitrag zum Klimawandel.

Die Gebäudekühlung hat in den letzten Jahren in Österreich stark zugenommen, wobei erwartet wird, dass im Zuge der Klimaerwärmung und der sich künftig entwickelnden Stadterweiterung der Energieaufwand für Raumkühlung bzw. -belüftung stark steigen wird. Eine erhöhte Intensität oder Häufigkeit von Hitzewellen in den Sommermonaten könnte dabei weitreichende Folgen in Hinblick auf Stadtklima, Energieeinsatz, Gesundheit und Lebensqualität in den Städten nach sich ziehen.

Schon mehrfach wurde das Ansteigen der Anzahl von Klimaanlage zu Raumkühlungszwecken in den USA, Europa und Asien dokumentiert. Simulationen des Energieverbrauchs haben gezeigt, dass mit dem Klimawandel der daraus resultierende Anstieg der Energienachfrage zu Kühlzwecken mehr zunimmt, als die Reduktion des Energiebedarfs für Heizung und Raumwärme beträgt.

Die Untersuchungen hinsichtlich möglicher Verringerungen des Phänomens der UHIs sollten aber nicht nur in Richtung von Energieeinsparungen gehen, sondern auch auf eine Verbesserung des örtlichen Stadtklimas abzielen. Neben einer erhöhten Stromnachfrage infolge des Klimawandels (siehe Töglhofer C et al., 2012) wird auch die Anzahl der Tage mit extremer Hitze zunehmen, insbesondere in den Stadtgebieten. Bereits durchgeführte Klimawandelszenarien zeigen, dass sowohl die Länge, als auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzeperioden zunehmen wird. Außergewöhnliche Sommer wie jener des Jahres 2003 und 2013 könnten im 21igsten Jahrhundert bereits als Regelfall angesehen werden (Schär, C et al., 2004; Fischer, E.M. et al., 2010). Extreme Hitzewellen haben große Auswirkungen auf den menschlichen Organismus und die Lebensqualität und können auch zu schweren gesundheitlichen Problemen führen (EEA Report No 2/2012; Robine et al., 2008; Muthers S et al., 2010). Derzeit untersuchen Žuvela-Aloise et al. (Žuvela-Aloise, 2013) den Einfluss des zukünftigen Klimawandels auf das Stadtklima in österreichischen Städten. Eine vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelte Methode wird angewandt, um die Verteilung der Wärmebelastung in Wien zu evaluieren. Basierend auf Topographie- und Landnutzungsdaten simuliert das städtische Klimamodell MUKLIMO_3 (Sievers U. et al., 1986, Sievers, U. (1995)) die Temperaturverteilung in der Stadt unter Berücksichtigung potentieller atmosphärischer Zustände während der Hitzeperioden. Mit Klimaparametern aus einer Beobachtungsstation oder einem regionalen Klimamodell als Grundlage, werden relevante Klimaindizes mit der sogenannten „*cuboid method*“ (Früh, B. et al., 2011; Žuvela-Aloise M et al., 2014) berechnet.

Zukünftige Klimaszenarien für die Stadt Wien zeigen einen mäßigen Anstieg in der Anzahl der Sommertage in der Mitte und einen starken Anstieg am Ende des 21. Jahrhunderts (Abbildung 6). Dabei fällt auf, dass das Ausmaß zukünftiger Erwärmung in städtischen Gebieten stark von der Prognose des regionalen Klimamodells, welches in der Evaluierung herangezogen wurde, abhängt. Die Unsicherheiten in der zukünftigen Klimaentwicklung sollten in einer langfristigen Planung von Vermeidungsstrategien natürlich berücksichtigt werden. Um den Einfluss der städtischen Baustrukturen und des anthropogenen Wärmeeintrages auf die atmosphärische Zirkulation zu untersuchen, wurden unterschiedliche Parametrisierungsansätze zur Beschreibung der Energieaustauschprozesse entwickelt und mit regionalen Modellen gekoppelt. Ein Vergleich existierender Stadtklimamodelle (Grimmond C. S. B. et al., 2010; Grimmond C. S. B. et al., 2011) zeigt betreffend der Evaluierung der Oberflächenenergiebilanz unterschiedliche Verhalten der Modelle für verschiedene Energieflüsse. Gängige urbane Parametrisierungsschemen für regionale Klimamodelle sind „*Town Energy Balance*“ (TEB), (Masson, V., 2000; Masson, V., 2006) und „*Building Effect Parameterization*“ (BEP) (Martilli A. et al., 2002). Das BEP Schema wurde zusammen mit dem „*Building Energy Model*“ (BEM) (Salamanca F. et al., 2010) im WRF Modell integriert und weltweit verwendet (Simulationen für New York, Madrid, Trento). Das

TEB Schema mit ISBA „Interaction between Soil, Biosphere, and Atmosphere“ Schema für Vegetation (Noilhan, J. et al., 1989) wurde in der Modellgruppe ALADIN verwendet. Beide Schemata wurden in COSMO-CLM integriert und Versuchssimulationen deutscher Städte durchgeführt (Schubert S. et al., 2012; Sändig B. et al., 2011; Trusilova K. et al., 2013). Diese Modelle ermöglichen Einschätzungen von Änderungen der Lufttemperatur in städtischen Gebieten, bedingt durch die zusätzlich abgegebene Abwärme von Klimaanlage.

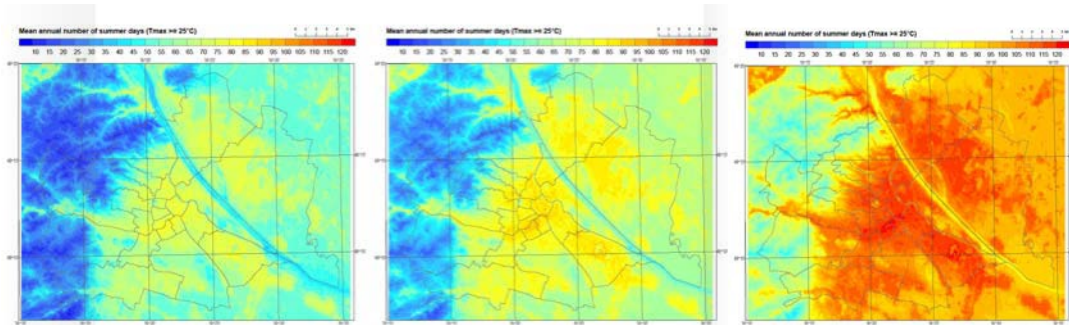


Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl von Sommertagen in Wien, berechnet mit dem städtischen Klimamodell MUKLIMO_3 und der „cuboid method“ basierend auf der Beobachtungszeitreihe von 1981- 2010 (links) und IPCC Klimaszenario RCP 8.5 basierend auf EURO-CORDEX Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 (mitte) und Zeitraum 2021-2100 (rechts). (Quelle: IVF Projekt, Urban climate in Central European cities and global climate change.)

Eine Studie, basierend auf einem regionalen atmosphärischen Modell für Paris, hat gezeigt, dass der Einsatz von Klimaanlage zu einer Erhöhung der Lufttemperatur um 0,5°C während der Hitzewelle im Jahr 2003 beigetragen hat (de Munck C. et al., 2012, Tremeac B. et al., 2012). Im zukünftigen Klimaszenario, im Zuge dessen eine Verdoppelung der Anzahl der Klimaanlage als wahrscheinlich erscheint, führt dies zu einem zu erwartenden Anstieg der Lufttemperatur um 2°C. Wie stark die Klimaanlage die städtische Wärmeinsel in Wien beeinflussen und in welcher Größenordnung sich deren zukünftiger Einfluss ändern wird, ist jedoch derzeit noch unbekannt.

1.2.3 Photonic Cooling

Ein schon lange verfolgter Ansatz zur Kühlung basiert wie schon weiter oben ausgeführt auf der Nutzung von Strahlungskühlung. Erste wissenschaftliche Arbeiten dazu datieren aus dem 19. Jahrhundert (Eriksson T. S. et al., 1982). Konkret finden sich in der internationalen Literatur eine Reihe von Arbeiten zum Potential von Strahlungskühlung, ein Ansatz der insbesondere mit Beginn der 70er Jahren des letzten Jahrhunderts zunehmend an Bedeutung gewonnen hat (Eriksson T. S. et al., 1982; Sakkal F. et al., 1983; Harrison A. W. et al., 1978; Orel B. et al., 1993; Catalanotti S. et al., 1975; Granqvist C. et al., 1981; Granqvist C. et al., 1980; Nilsson T. et al., 1992). Dabei wurden verschiedene Materialien und Beschichtungen im Hinblick auf ihre Eigenschaft, im Wellenlängenbereich von 0.2 - 2 µm möglichst wenig zu absorbieren und im Wellenlängenbereich zwischen 8 - 13 µm möglichst viel an Strahlung zu emittieren, untersucht. Allerdings konnten diese Untersuchungen, bedingt durch Limitierungen in den Herstellungsmöglichkeiten, noch keine hohen Wirkungen der Strahlungskühlung nachweisen, insbesondere nicht untertags, wodurch eine real nutzbare Anwendung lange Zeit nicht gegeben war. Die Zunahme der technologischen Möglichkeiten in den letzten Jahren, insbesondere der Fertigung von Mikro- und Nanostrukturen und detaillierte theoretische Arbeiten ermöglichten hier aber jüngst sehr große Fortschritte (Raman A.P. et al., 2014; Gentle

A.R. et al., 2010; Zhu L. et al., 2014; Zhu L. et al., 2015; Suryawanshi C.N. et al., 2009; Hossain M. M. et al., 2015; Safi T. S. et al., 2015; Bermel . et al., 2015). Ein Ansatz zur Nutzung von Strahlungskühlung der auch tagsüber zur einer Abkühlung unter die Umgebungstemperatur führt, wurde kürzlich von der Universität Stanford im renommierten Journal Nature publiziert (Raman A.P. et al., 2014). Dabei wurde gezeigt, dass sich mit einem geeigneten photonischen Design die Oberflächentemperatur eines Körpers signifikant unter die Umgebungstemperatur abkühlen lässt, auch wenn die Oberfläche direkt mit Sonnenlicht bestrahlt wird. In Abbildung 7 ist ein Ergebnis dieser Arbeit gezeigt, wo klar zu erkennen ist, dass die Oberfläche des photonischen Kühlers tagsüber zwischen 3 und 7 K unter der Umgebungstemperatur liegt, obwohl die auftreffende solare Einstrahlungsintensität mit über 850 W/m² zur Mittagszeit relativ hoch ist. Die photonische Struktur die Raman et al. in (Raman A.P. et al., 2014) dabei verwendeten basiert auf einem mehrschichtigen Interferenzlagen-System bestehend aus Hafniumoxid und Siliziumoxid, das auf einem Siliziumwafer mit einem Durchmesser von 12 cm mittels eines Vakuumprozesses abgeschieden wurde. Eine Kühlleistung von bis zu 60 W/m² wurde mittels thermodynamische Simulationen ermittelt, wobei dieser Wert primär von der Temperatur des photonischen Kühlers, der Himmelstemperatur und der thermischen Isolation gegenüber der Umgebung abhängt (Raman A.P. et al., 2014).

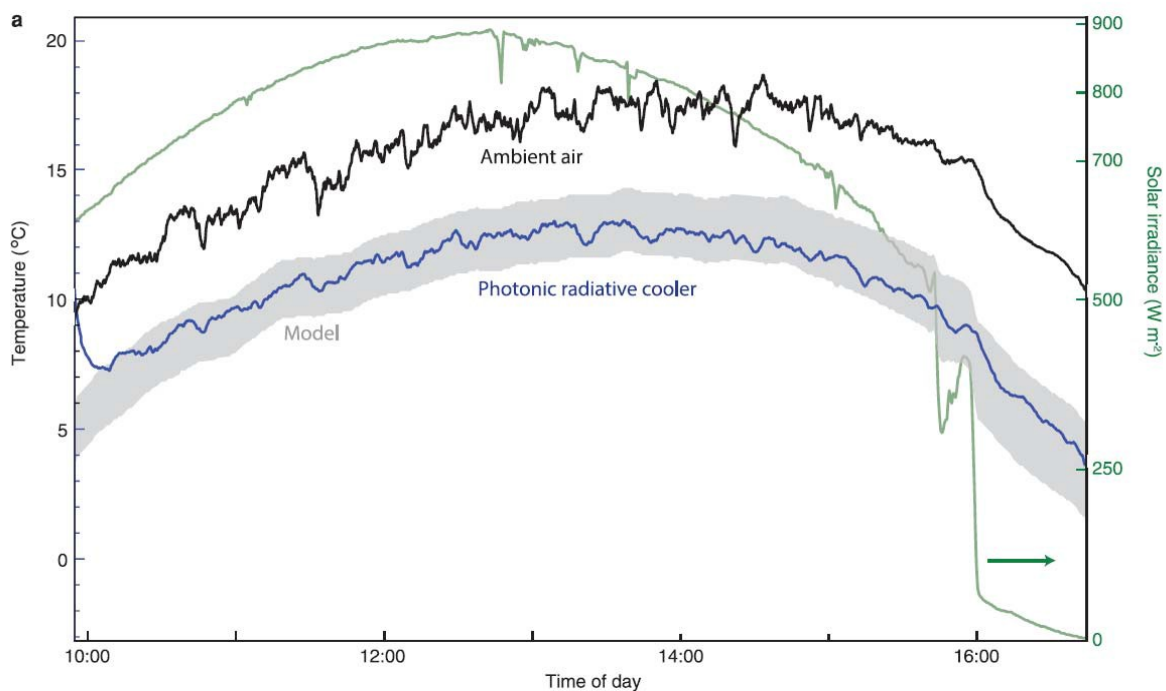


Abbildung 7: Zeitlicher Temperaturverlauf eines Siliziumwafers, welcher mit einer photonischen Struktur beschichtet und direkter Sonneinstrahlung ausgesetzt wurde. Trotz direkter Sonneneinstrahlung ist deutlich die Temperaturdifferenz von 3 – 7 K zwischen Strahler (beschichteter Siliziumwafer) und Umgebungstemperatur zu erkennen. (Quelle: Raman A. P. et al., *Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight*, Nature, 2014, doi:10.1038/nature13883)

1.2.4 Ergebnisse aus anderen Projekten

Das Projekt baute auf den wesentlichen Ergebnissen des im Programm „Stadt der Zukunft“ abgelaufenen Projekts KELVIN (Reduktion städtischer Wärmeinseln durch Verbesserung der Abstrahleigenschaften von Gebäuden und Quartieren, FFG Nummer 845136) auf. Darin

wurden unterschiedliche Konzepte zur Reduktion städtischer Wärmeinseln untersucht und die dadurch zu erwartenden Folgewirkungen in Bezug auf ein kühleres Stadtmikroklima und die Energieeinsparung durch geringeren Stromverbrauch abgeschätzt. Im Speziellen wurden die Auswirkungen der Abstrahleigenschaftsänderungen unterschiedlicher Flächen wie Dächer, Straßen, Parkflächen, aber auch der Einfluss von Gründächern eingehend untersucht und im Anschluss das Ergebnis in Form von Energieeinsparungs- und Emissionsreduktionsberechnungen für die Stadt Wien quantifiziert. Ein Ergebnis war, dass eine flächendeckende Anwendung hochreflektierender Dachdeckungen in Wien mit einem Rückstrahlvermögen von ca. 70% in Kombination mit der Annahme einer vollen Umsetzung des vorhandenen Gründachpotentials zu einer starken Abnahme der Anzahl an Hitzetagen führen. Das bedeutet aber auch, dass umgerechnet auf die Stadt Wien ein Stromeinsparungspotential - bei gleichbleibender derzeitiger Kühlleistung - von 5.000 – 20.000 MWh pro Jahr erreicht werden kann. Damit könnten zwischen 600 und 2000 t CO₂ Äquivalente an Treibhausgasemissionen eingespart werden. Es unterstreicht die energie- und klimatechnische Bedeutung des derzeitigen, besonders aber künftigen Energieverbrauchs für Raumkühlung, der infolge des Klimawandels in Österreich um 60-100% ansteigen wird (Mueller A. et al., 2014).

Spezifische Ergebnisse im Vergleich zu anderen Projekten werden in Abschnitt 2.5 detailliert diskutiert.

1.3 Verwendete Methoden

1.3.1 Mikroklimamodellierung, Stromverbrauch und THG-Emissionseinsparungen

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wird untersucht, inwiefern der Einsatz von "Photonic Cooling"-Techniken einen begünstigenden Einfluss auf das Mikroklima hat. Dieses Thema ist deshalb von höchster Relevanz, da zu erwarten ist, dass sich der beobachtete Temperaturanstieg des regionalen Klimas auch in Zukunft fortsetzen wird, was in weiterer Folge zu einer verstärkten Hitzebelastung in urbanen Gebieten, in Verbindung mit dem städtischen Wärmeinseleffekt (engl. urban heat island, UHI), führt. Neben den negativen Auswirkungen auf Gesundheit und menschliches Wohlbefinden, führt diese Entwicklung zu einem erhöhten Energiebedarf für die Raumkühlung durch den Einsatz von Klimaanlage (engl. air conditioning, AC), welche aufgrund ihrer Abwärme-Emissionen wiederum einen negativen Einfluss auf das urbane Klima haben (Abbildung 8). Der Einsatz von Photonic Cooling als Alternative zu herkömmlichen Klimaanlage könnte die anthropogenen Wärmeemissionen reduzieren und sich somit positiv auf das Mikroklima auswirken.

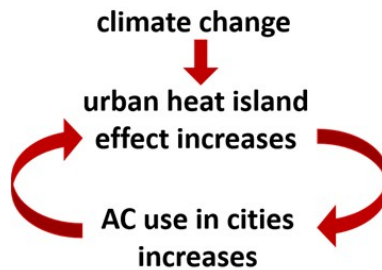


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Feedback-Zyklus: Eine Verstärkung des urbanen Wärmeinseleffektes und damit ein Anstieg städtischer Temperaturen haben einen verstärkten Einsatz von Klimaanlage zur Folge, was wiederum zu einer Erhöhung der städtischen Temperaturen, bedingt durch erhöhte anthropogene Wärmeemissionen, führt.

Um das Potential von Photonic Cooling hinsichtlich einer Verbesserung der urbanen Wärmebelastung abzuschätzen, wird als Ausgangsbasis zunächst eine Situation betrachtet, in der ein erhöhter Kühlbedarf durch den Einsatz herkömmlicher Klimaanlage gedeckt wird, was in einem Temperaturanstieg, bedingt durch eine erhöhte anthropogene Wärmeemissionen, resultiert. Das Potential von Photonic Cooling wird dann durch Eliminierung bzw. Reduktion dieses durch den erhöhten Einsatz von Klimaanlage bewirkten Temperaturanstiegs ermittelt. In dieser Studie wird das Potential anhand einer Fallstudie für Wien, unter Berücksichtigung der klimatischen Situation bis 2050, berechnet. Zu diesem Zwecke wurden mithilfe von städtischen Klimaszenarien für die Stadt Wien die Auswirkungen des Klimawandels auf die urbane Hitzebelastung bewertet. Diese Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Schritte: im Falle eines projizierten Temperaturanstiegs als Folge des Klimawandels sind weitere Untersuchungen erforderlich. Basierend auf den Klimaprojektionen kann die Änderung des Energieverbrauchs von Klimaanlage, bedingt durch einen erhöhten Kühlbedarf, bestimmt werden. Diese Resultate werden als Input für den letzten Schritt benötigt, in welchem der Anstieg der urbanen Temperaturen abgeschätzt wird. In den folgenden Kapiteln erfolgt eine detaillierte Beschreibung dieser Methoden.

1.3.1.1 Bewertung des Stadtklimas von Wien und zukünftige Klimaänderung (AP2)

Basierend auf Beobachtungs- und Modelldaten wird die städtische Hitzebelastung für Wien sowie deren zukünftige Änderung quantifiziert. Die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen (Definition Sommertag: $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) wird aus homogenisierten Temperaturzeitreihen der beiden Messstationen Wien Hohe Warte (HW) und Wien Innere Stadt (IS) gewonnen. Diese Messstationen werden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) betrieben, wobei sich die Station HW in einem Wohngebiet im Nordwesten der Stadt Wien und die Station IS unmittelbar im Stadtzentrum befindet. Die Beobachtungsdaten werden für die Untersuchung von Klimaänderungen in der Vergangenheit sowie für die Analyse des aktuellen Klimazustandes eingesetzt und bilden eine Basis für die Validierung der Modellergebnisse.

Für die Bewertung des zukünftigen Klimas werden Simulationen regionaler Klimamodelle (RCM) als Resultat der EURO-CODEX Initiative (Jacob et al., 2013) herangezogen. In

diesen Simulationen werden verschiedene Emissionsszenarien, sogenannte Representative Concentration Pathways (RCPs), berücksichtigt, die im 5. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Moss et al., 2010; IPCC, 2013), definiert wurden. Mit den RCPs wird die Änderung des Strahlungsantriebs, beispielsweise verursacht durch veränderte Treibhausgasemissionen oder Landnutzungsänderungen, bis zum Jahre 2100 im Vergleich zu vorindustriellen Werten angegeben. In den EURO-CORDEX Simulationen werden folgende RCP-Szenarien berücksichtigt: Szenario RCP4.5 entspricht einem Anstieg der Strahlungsantriebes bis zu einem Wert von 4,5 W/m² und einer Stabilisierung nach 2100 (RCP4.5, Smith und Wigley, 2006; Clarke et al., 2007; Wise et al., 2009); Szenario RCP8.5 beschreibt eine Zunahme des Strahlungsantriebes bis hin zu einem Wert von 8,5 W/m² am Ende des 21. Jahrhunderts (RCP8.5, Riahi et al., 2007); im Szenario RCP 2.6 kommt es zunächst vor dem Jahr 2100 zu einem Anstieg des Strahlungsantriebes bis zu einem Wert von 3 W/m² und einem darauffolgenden Rückgang auf 2,6 W/m² (RCP2.6, van Vuuren et al., 2007).

Mithilfe regionaler Klimamodelle lassen sich zwar zentrale Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas im 21. Jahrhundert treffen, jedoch können kleinräumige Gebiete, wie beispielsweise Städte, nur unzureichend erfasst werden. Daher ist es unabdingbar, auf weitere Downscaling-Methoden zurückzugreifen, um diese Informationen auch auf einer lokaleren Skala gewinnen zu können. Mithilfe von urbanen Klimamodellen und unter Anwendung eines dynamisch-statistischen Downscaling-Verfahrens, der sogenannten Kuboid-Methode (Früh et al., 2011), ist es möglich, Änderungen der urbanen Hitzebelastung auf sehr lokalen Skalen (~100m) zu erfassen. Das urbane Klimamodell MUKLIMO_3 (3D Mikroskaliges Urbanes KLima Modell) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde verwendet, um den atmosphärischen Zustand in urbanen Gebieten zu simulieren. MUKLIMO_3 ist ein nicht-hydrostatisches mikroskaliges Modell mit z-Koordinaten, welches die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen löst, um die atmosphärische Strömung in Anwesenheit von Gebäuden zu simulieren (Sievers und Zdunkowski, 1985; Sievers, 1990; Sievers, 1995). Die thermodynamische Version des Modells enthält prognostische Gleichungen für atmosphärische Temperatur und relative Feuchte, eine Parametrisierung unaufgelöster Bebauung, kurz- und langwellige Strahlung, Wärme- und Feuchtebilanz am Boden (Sievers et al., 1983) sowie ein Vegetationsmodell basierend auf Siebert et al. (1992). Der numerische Ansatz für die Berechnung von kurzwelliger Strahlung am Boden, an den Wänden und an Gebäudedächern im Falle von unaufgelöster Bebauung wird von Sievers und Früh (2012) beschrieben. Die Strömung zwischen den Gebäuden wird parametrisiert, indem diese als poröses Medium betrachtet werden (Gross, 1989). Das Modell ist nicht in der Lage, Wolken- und Niederschlagsprozesse, Oberflächenabfluss oder anthropogene Wärmeemissionen zu simulieren. Aus diesem Grund werden für die Berechnung der zukünftigen städtischen Klimaszenarien nur Änderungen des regionalen Klimas berücksichtigt, nicht jedoch anthropogene Effekte, wie beispielsweise eine vermehrte Nutzung von Klimaanlageanlagen.

MUKLIMO_3 verwendet hochaufgelöste Orographie- und Landnutzungsdaten als Input und eignet sich für die Abschätzung der Wärmebelastung in Abhängigkeit von verschiedenen Gebäudetypen. Für jede Landnutzungsklasse werden Parameter definiert, die zur detaillierten Beschreibung der Landnutzungseigenschaften und der urbanen Strukturen dienen. Zu diesen

Parametern zählen unter anderem Gebäudeanteil, mittlere Gebäudehöhe, Wandflächenindex, Versiegelungsanteil nicht bebauter Gebiete, Anteil der Bäume und Anteil niedriger Vegetation, Blattflächenindex der Canopy-Schicht sowie mittlere Höhe und Blattflächenindex der Bäume, wobei hier zwischen Baumstamm und –krone unterschieden wird. Die Local Climate Zone (LCZ) Klassifizierung (Stewart and Oke, 2012) wird verwendet, um zwischen verschiedenen Landnutzungstypen zu unterscheiden. Der Vorteil dieser Methode liegt darin begründet, dass die Klassifizierung auf den thermischen Eigenschaften urbaner Gebiete beruht und daher in einer standardisierten Form für jede Stadt anwendbar ist. Es wurden bereits verschiedene Methoden zur Anwendung der LCZ-Klassifizierung präsentiert (vgl. Bechtel und Daneke, 2012; Lelovics et al., 2014; Lehnert et al. 2015; Bechtel et al. 2015). Abbildung 9 zeigt die räumliche Verteilung der LCZ für die Stadt Wien, die im Rahmen des International Visegrad Funding (IVF) Projekts „Urban climate in Central European cities and global climate change“ erarbeitet wurde (Bokwa et al., 2015).

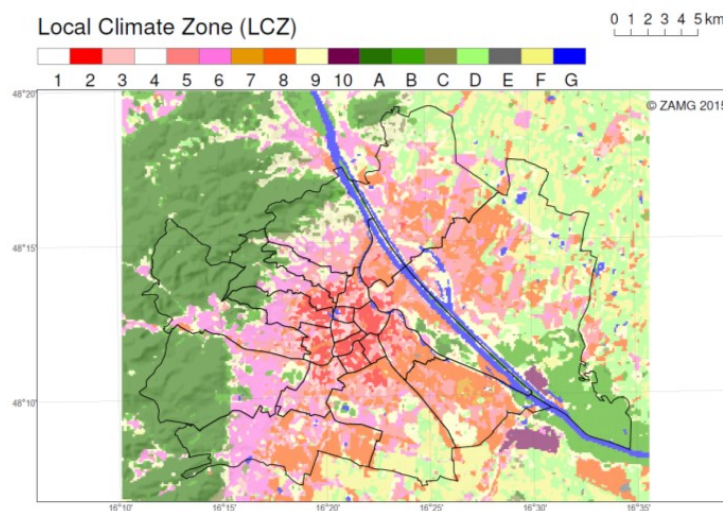


Abbildung 9: Landnutzungsverteilung in Wien basierend auf der Local Climate Zone (LCZ) Klassifizierung von Stewart and Oke (2012). (Quelle: Bokwa A. et al. (2015), Modelling the impact of climate change on heat load increase in Central European cities, ICUC9 - 9 th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment).

Die Berechnung der Klimaindizes, wie etwa der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen, erfolgt mithilfe der bereits erwähnten Kuboidmethode (Früh et al., 2011; Žuvela-Aloise et al., 2014). Die Kuboidmethode beschreibt eine trilineare Interpolation meteorologischer Felder, gewonnen aus Tagessimulationen eines urbanen Klimamodells und wird für jene Situationen angewendet, die zu einer potentiellen Hitzebelastung in urbanen Zentren führen. Acht Tagessimulationen, berechnet für je zwei vorherrschende Windrichtungen, entsprechen somit den Eckpunkten des Kuboids. Die Berechnung der Klimaindizes für dreißigjährige Klimanormalperioden erfolgt auf Grundlage der Temperaturmaxima, gewonnen aus den jeweils 8 Simulationen, und unter Berücksichtigung der Tagesmittelwerte von Lufttemperatur, relativer Feuchte und Windgeschwindigkeit sowie stündlicher Windrichtung.

In dieser Studie wurden die klimatologischen Daten entweder von einer Referenzstation außerhalb der Stadt oder von einem regionalen Klimamodell ermittelt. Konkret wurden die

regionalen Klimamodelldaten der EURO-CORDEX Initiative herangezogen: eine Simulation für RCP2.6 und jeweils sieben Simulationen für RCP4.5 und RCP8.5 für die EUR-11 Domäne (Tabelle 2). Die Analyse wurde für die vergangene Klimaperiode 1971-2000 und die zukünftige Klimaperiode 2021-2050 durchgeführt. Simulationen mit dem urbanen Klimamodell wurden im Rahmen des IVF Projekts realisiert (Bokwa et al., 2015).

Tabelle 2: EURO-CORDEX Modellsimulationen mit einem GCM-RCM Downscaling-Verfahren zur Erzeugung verschiedener Klimaprojektionen für urbane Gebiete in Zentraleuropa (Bokwa et al., 2015). Die ‘’ fungieren als Platzhalter für die verschiedenen Emissionsszenarien.**

| Model | RCP2.6 | RCP4.5 | RCP8.5 |
|--|--------|--------|--------|
| EUR-11_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4 | | ✓ | ✓ |
| EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_SMHI-RCA4 | ✓ | ✓ | ✓ |
| EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E | | ✓ | ✓ |
| EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5 | | ✓ | ✓ |
| EUR-11_IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4 | | ✓ | ✓ |
| EUR-11_MPI-M-MPI-ESM-LR_*_SMHI-RCA4 | | ✓ | ✓ |
| EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4 | | ✓ | ✓ |

Die vergangenen klimatischen Verhältnisse in der Stadt Wien wurden für die zwei Klimanormalperioden 1971-2000 und 1981-2010 mithilfe von Beobachtungszeitreihen analysiert. Auf dieselbe Art und Weise wurde die Berechnung der Klimaindizes auf Basis von historischen RCM-Simulationen für die Periode 1971-2000 vorgenommen. Diese Simulationen wurden mit den beobachteten Werten verglichen und als Referenz für die Evaluierung zukünftiger Klimasignale verwendet. Der Output von Klimamodellen beinhaltet oftmals systematische Fehler, was darauf zurückzuführen ist, dass komplexe Prozesse und Zusammenhänge nur in vereinfachter Form dargestellt werden können. Um diese Fehler zu minimieren, stehen verschiedene Korrekturmethode zur Verfügung, welche auf die RCM Daten angewendet werden, bevor diese für die Berechnung der Klimaindizes verwendet werden. In der Studie von Bokwa et al. (2015) wurde eine Bias-Korrektur der Lufttemperatur und eine Korrektur des Höhengradienten bezüglich der Temperatur (0,65°C/100 m) vorgenommen. Bei der Ermittlung der relativen Feuchte wurden diese korrigierten Temperaturdaten berücksichtigt. Des Weiteren wurde für die Analyse ein Ensemble an Modellläufen (mit Ausnahme des Szenarios RCP2.6) verwendet, um eventuell vorhandene Unsicherheiten weiter zu verringern.

1.3.1.2 Stromverbrauch und Treibhausgaseinsparungen (AP2)

Berechnung des elektrischen Energieverbrauches (Strombedarf) abhängig von Temperatur und dem Einsatz von Klimanlagen

Die hier angewandte Methodik zur Bestimmung des Stromverbrauchs von Klimaanlage in Abhängigkeit von Temperatur ist eine Erweiterung des Top-Down Ansatzes von Bachner et al. (2013), Blazquez et al. (2012), Damm et al. (2016), Giannakopoulos & Psiloglou (2006),

Töglhofer et al. (2012) und Wenz et al. (2017).

Der dabei zur Anwendung kommende Ansatz versucht eine klimaabhängige Beziehung zwischen der jetzigen täglichen Durchschnittstemperatur und dem aus dem Klimaanlagebetrieb stammenden Stromverbrauch für ein bestimmtes Land herzustellen. Der sich daraus ergebende Zusammenhang wird auf künftige Klimadaten (Temperatur) erweitert, um damit eine Abschätzung des zukünftig notwendigen Klimaanlagebedarfs geben zu können. Der hier zu Anwendung kommende (erweiterte) Ansatz versucht also die aus den jeweiligen Ländern zur Verfügung gestellte Information zwischen Temperatur- und Stromverlauf zu nutzen, um daraus einen klima- bzw. temperaturabhängigen Zusammenhang des zukünftig erwarteten jährlichen Stromverbrauches von Klimaanlage herzustellen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden dann für ein konkretes Beispiel, nämlich die Stadt Wien, abgeleitet.

Zusätzlich soll mittels dieses Zusammenhanges auch eine verbesserte Abschätzung über den, infolge der Klimaerwärmung, weiterhin steigenden Bedarf an Klimaanlage erfolgen. Des Weiteren soll neben dem erwarteten jährlichen Stromverbrauch auch eine Bestimmung der täglichen Spitzenwerte des Stromverbrauchs ermöglicht werden. Die oben angeführten vorangegangenen Arbeiten untersuchten zwar den Strombedarf sowohl im Sommer also auch im Winter, jedoch soll in dieser Arbeit nur der Strombedarf im Sommer, welcher einen Rückschluss für den benötigten Strombedarf zur Raumkühlung erlaubt, betrachtet werden.

Eto (1988) beschreibt ein relativ einfaches Model in Form einer Geradenfunktion um den Energiebedarf zu Kühlzwecken pro Nutzfläche (m^2) oberhalb einer spezifischen Temperatur T_o zu bestimmen:

$$E_C = a_o + a_l(T - T_o); \text{ für } T > T_o \quad (1)$$

Dieser Ansatz bildete ebenfalls den Ausgangspunkt für die weitere Analyse von Energieverbrauchsdaten in den Arbeiten von Christenson et al. (2006), De Rosa et al. (2014), Lam (1998), Le Comte & Warren (1981), Sailor & Muñoz (1997), Valor et al. (2001) bzw. Wenz et al. (2017). In einem erweiterten Ansatz betrachten De Rosa et al. (2014), Lam (1998) und Wenz et al. (2017) zusätzlich bestimmte Faktoren, die die Steigung der Geraden (a_l) beeinflussen. De Rosa et al. (2014) verwenden hier z.B. bei einzelnen Gebäuden die Effizienz der jeweiligen Kühlsysteme und die Gebäudedämmung. In der hier vorliegenden Studie verwenden wir die in (1) angeführte Gleichung in einer etwas abgeänderten Version, welche den bestehenden Marktdurchdringungsanteil von Klimaanlage berücksichtigt und sich auch auf einen Art durchschnittliche Gebäudetyp bezieht, da je nach Länderbasis jeweils eine Mischung bestehend aus verschiedenen Gebäudetypen, welche nur teilweise mit Klimaanlage ausgerüstet sind, existiert.

Daher muss eine Abänderung der in (1) dargestellten Gleichung erfolgen, indem der bestehende Marktdurchdringungsanteil von Klimaanlage für diese Mischung der Gebäudearten berücksichtigt wird.

Unter der Annahme dass der Marktdurchdringungsanteil von Klimaanlage PAC beträgt, dann ergibt sich der gesamte Energiebedarf zur Kühlung pro Nutzfläche (m^2) E_{tot} mit

$$E_{tot} = (1 - P_{AC})a_o + P_{AC}E_C$$

Zusammen mit Gleichung (1) ergibt sich nun als Ausdruck:

$$E_{tot} = a_o + PAC a_l(T - T_o); \text{ für } T > T_o \quad (2)$$

Demzufolge ist die Steigung der Energie/Temperaturkurve proportional zur Marktdurchdringungsrate von Klimaanlage PAC und dem Faktor a_l , der wiederum von der Effizienz der jeweiligen Kühlsysteme und der Gebäudedämmung abhängig ist. In der Regel werden zur Analyse des täglichen Energieverbrauchs die „Kühlgradtage“ (CDD – Cooling degree days) herangezogen, wobei sich der CDD durch $CDD = (T_{ave} - T_o)$ definiert und zwar für jeden Tag an dem $T > T_o$ ($T_o = 18,3^\circ$) gilt.

Um diese Gleichung auf nationaler Ebene anzuwenden, müssen zuerst allerdings noch die Durchschnittstemperaturen des jeweiligen Landes mit den Bevölkerungsdaten der jeweiligen Messstationen gewichtet werden (Valor et al., 2001). In weiterer Folge muss auch berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Personengruppen ihre bestehenden Klimaanlage auch bei unterschiedlichen Temperaturniveaus zum Einsatz bringen. Z.B. schalten Personen auf der nördlichen Hemisphäre, die in Gebäuden mit hauptsächlich südlich exponierten Fenstergruppen bzw. Glasflächen leben, ihre Klimaanlage schon bei etwas geringeren Temperaturniveaus ein, als jene Personen, die sich in Gebäuden aufhalten deren Glasflächen eher nördlich orientiert sind. Aus diesem Grund kommt folgende Gleichung zum Einsatz:

$$E_{cooling} = E_{tot} - \overline{E_{tot}} = Slope_{max} * \ln(1 + e^{a(T-T_o)}) \quad (3)$$

Wobei sich $E_{cooling}$ als die Kühlenergie oberhalb der Temperaturschwelle T_o definiert und $\overline{E_{tot}}$ als durchschnittlicher Stromverbrauch für $T > T_o$ für Gebäude die nicht mit einer Klimaanlage ausgestattet sind, bzw. in welchen der Strom nicht zu Heizzwecken verwendet wird. Gleichung (3) entspringt der Annahme, dass es sich bei der ergebenden Kurvencharakteristik um eine „smooth transition regression function“ nach Moral-Carcedo & Vicéns-Otero (2005) handelt, und zwar zwischen Steigung = 0, für den Fall dass keine Kühlung benötigt, und der maximalen Steigung = $Slope_{max}$, falls alle Klimaanlage in Verwendung sind. Eine solche Kurvencharakteristik ist in Abbildung 10 dargestellt:

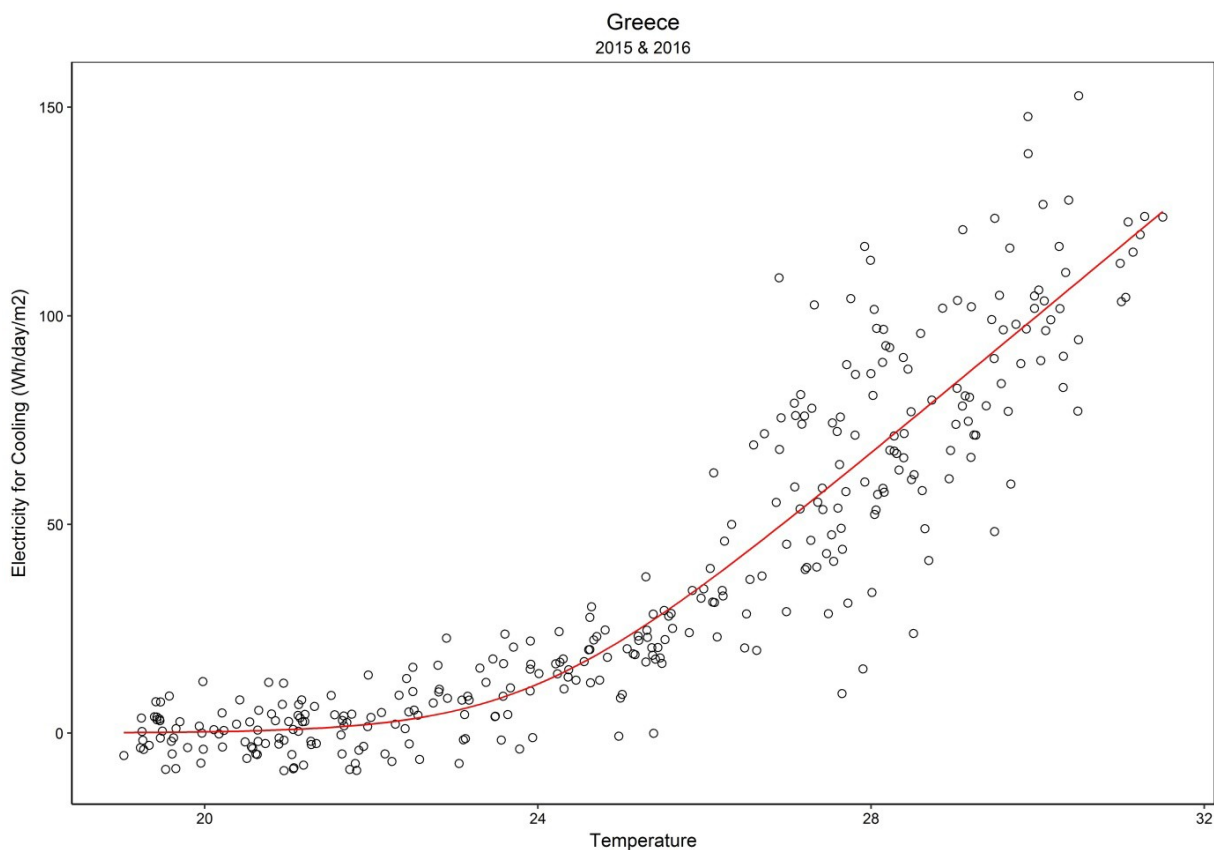


Abbildung 10: Energieverbrauch für Raumkühlung pro Flächeneinheit in Abhängigkeit von Temperatur am Beispiel Griechenlands für die Jahre 2015 und 2016; die Punkte repräsentieren aktuellen Werte, die durchgezogene Linie das Modellergebnis.

Abgeleitet von Gleichung (2) resultiert $Slope_{max}$ also wiederum als Funktion von Marktdurchdringungslevel sowie Gebädefaktoren. In der hier vorliegenden Studie, welche lediglich der Strombedarf zu Kühlzwecken in Europa berücksichtigt, wird in erster Näherung angenommen, dass die Relation zwischen der Steigung des Strombedarfs (pro Nutzungsflächeneinheit) und Temperatur nur vom Marktdurchdringungsgrad abhängig ist.

Wie Isaac & van Vuuren (2009) in ihrer Studie darstellten, ist das Ausmaß der Marktdurchdringungsrate von Klimaanlage einerseits von wirtschaftlichen und andererseits von klimatischen Faktoren abhängig. Auch Lam (1998) und Wenz et al. (2017) nennen hier ebenfalls ökonomische Faktoren als maßgebliche Abhängigkeitsgrößen der Kurvensteigung. Da sich weiters die hier angestellten Untersuchungen auf europäische Länder beschränken, wird in erster Näherung die Marktdurchdringungsrate in Abhängigkeit von rein klimatischen Faktoren betrachtet. Die Auswirkungen dieser hier vorgenommenen Annahme werden im Diskussionsteil dann noch im Detail erläutert.

Jakubcionis & Carlsson (2017) zeigen, dass für den Klimafaktor der Prozentsatz der Haushalte eine logarithmische Funktion der Kältegradtage darstellt. Davon unabhängig wird hier in weiterer Folge angenommen, dass der Klimafaktor ständig weiter ansteigt, da ein Abbau einer bereits installierten Klimaanlage als eher unwahrscheinlich, jedoch die Nutzung einer solchen bereits bestehenden Anlage als sehr wahrscheinlich angesehen wird.

Daher wird an dieser Stelle auch weiters angenommen, dass CDD_{max} , (d.h. das derzeitige Maximum der jährlichen Summe der $CDDs$, ermittelt für vergangene Jahre) besser als

Indikator des Klimafaktors geeignet ist.

Aus den bisher getroffenen Annahmen ergibt sich somit folgender Zusammenhang:

$$E_{cooling} = E_{tot} - \overline{E_{tot}} = f(CDD_{max}) * \ln(1 + e^{a(T-T_0)}) \quad (4)$$

Der Interpretation des Klimafaktors gestaltet sich im Detail aber etwas komplizierter, vor allem wenn man sich die Dynamik der Marktdurchdringung vor Augen führt. Bass (1969) etwa schlägt in seiner Studie vor, dass bei Markteinführung neuer Produkte, potentielle Käufer in „innovators“ und „imitators“ einteilen lassen. Folgt man dieser Argumentation so löst jedes neue, klimatisch bedingte, CDD_{max} eine Kaufwelle, ähnlich der Markteinführung eines interessanten und innovativen Produktes, aus. In diesem Sinne reagieren sogenannte „innovators“ sehr rasch auf diese klimatisch bedingte Situation (z.B wenig Wind, hohes Auftreten städtischer Hitzeinseln, südexponierte Lagen etc.) während sogenannte „imitators“ Klimaanlage erst ab jenem Zeitpunkt erwerben an dem sie die Vorteile von Klimaanlage auf Basis der von den „innovators“ gemachten ersten Erfahrungen erkennen können. Daher ist in erster Linie ein Anstieg der Marktdurchdringungsrate erst ab dem Zeitpunkt zu erwarten, an dem der letzte CDD_{max} aufgetreten ist, während aufgrund dem verzögernden Kaufverhalten der „imitators“ die Marktdurchdringungsrate ohne weiteres auch weiter ansteigen kann, obwohl kein CDD_{max} im betreffenden Jahr vorliegt. Bedingt durch den Klimawandel ist innerhalb eines absehbaren Zeitraumes das Auftreten eines neuen CDD_{max} zu erwarten, welcher wiederum als Auslöser für den Erwerb einer Klimaanlage, z.B. für Bewohner von anderen Städten, dient und somit zur Ausbildung eines dynamischen Zyklus beiträgt.

Die Analyse zur Installation neuer Klimaanlage bei sich ändernden Temperaturen muss demnach 1) jährlich erfolgen jedoch nicht über einen größeren Zeitraum und 2) Slope_{max} aus Gleichung (3) wird zur Beschreibung des Energiebedarfes zur Kühlung nur eine relativ unscharfe Funktion von CDD_{max} darstellen. Eine detaillierte Diskussion dieses Zusammenhanges erfolgt jedoch zu einem späteren Zeitpunkt.

Ist die beschreibende Funktion bzw. der Zusammenhang von $Slope_{max}$ und CDD_{max} erst einmal gefunden, so lässt sich diese Funktion mit sich ändernden Klimafunktionen und Variabilitäten leicht extrapolieren womit der Strombedarf zu Kühlzwecken für ein zukünftiges Klimaszenario auch erhoben werden kann.

Ausweitung der Berechnung des Spitzenstrombedarfs zu Kühlzwecken

Politische Stakeholder, Stromanbieter etc. sind in der Regel nicht nur am durchschnittlichen Tagesstromverbrauch interessiert, sondern vor allem am Spitzenverbrauch.

Um diesen maximalen Verbrauch zu berechnen wird angenommen, dass die Spitze des Energieverbrauchs zu Kühlzwecken um ca. 17.00 Uhr erfolgt, da hier laut generellen Erfahrungen die höchsten Temperaturen auftreten. Der niedrigste Verbrauch wird hingegen um 03.00 Uhr angenommen. Die Differenz des Energiebedarfs für diese beiden Zeiten ($E_{17}-E_{03}$) wird dafür herangezogen, um einen Indikator für den Spitzenstromverbrauch zu Kühlzwecken zu entwickeln. Obwohl es neben der Temperatur auch noch weitere Einflussfaktoren gibt, liegt der Hauptaugenmerk dennoch auf der Temperatur und in Gleichung (4) E_{tot} durch den korrigierten Spitzenverbrauch $E_{17}-E_{03}$ ersetzt. Um eine möglichst realistische Berechnung des korrigierten Spitzenverbrauches zu ermöglichen wurde der

durchschnittliche Strombedarf bei 16:00, 17:00 und 18:00 Uhr für E_{17} bzw. der Strombedarf bei 03:00 und 04:00 Uhr für E_{03} verwendet.

Datenbasis und Berechnung

Die folgenden Datenquellen wurden für die Erhebung verwendet:

- 1) Strombedarf pro Stunde und Tag (ENTSO-E, 2017)
- 2) Durchschnittliche Tagestemperatur für Städte in unterschiedlichen Ländern (NOAA, 2017)
- 3) Einwohnerzahlen der gewählten Städte (Wikipedia, 2017)
- 4) Wohn- und Geschäftsraumfläche pro Einwohner, hier für das Jahr 2008 (Entranze, 2017)
- 5) Bevölkerungszahlen der ausgewählten Länder (eurostat, 2017)
- 6) Zukünftige Klimadaten der Städte und Länder für die diese Vorhersagen getroffen werden sollten. In dieser Studie wurden sieben Klimamodelle für die Stadt Wien verwendet (EURO-CORDEX, 2017 in Jakob et al., 2013)
 - a. EC-EARTH_SMHI-RCA4;
 - b. EC-EARTH_KNMI-RACMO22E;
 - c. EC-EARTH_DMI-HIRHAM5;
 - d. CNRM_SMHI-RCA4;
 - e. MPI_SMHI-RCA4;
 - f. IPSL_SMHI-RCA4; and
 - g. HadGEM2_SMHI-RCA4.
- 7) Entwicklung der Bevölkerungszahlen der Städte und Länder (Statistik Austria, 2017)

Bei der Aufbereitung der Daten für diese Studie waren die nationalen Stromdaten in täglicher Auflösung vorhanden, wobei Brückentage erhoben und herausgerechnet wurden. Darüber hinaus wurden die Schwankungen zwischen den Wochentagen ebenfalls ausgeglichen, offensichtliche Datenfehler (d.h Ausreißer) entfernt, bzw. Sommer- und Wintermonate getrennt betrachtet.

In Abbildung 11 entspricht der grau unterlegte Bereich, dem reinen Strombedarf der für die Raumkühlung benötigt wird. Dazu wurden zuerst nur jene Tage mit Durchschnittstemperaturen über 15° C in den weiteren Betrachtung berücksichtigt und im Anschluss der durchschnittliche Strombedarf an Tagen mit Temperaturen zwischen 15° und 20°C abgezogen, da in diesem Zeitraum der Strombedarf laut Annahme weder zur Kühlung noch zum Heizen benötigt wird. Dieser korrigierte Strombedarf wird in weiterer Folge durch die Wohn- und Geschäftsraumfläche dividiert.

Greece - 2015

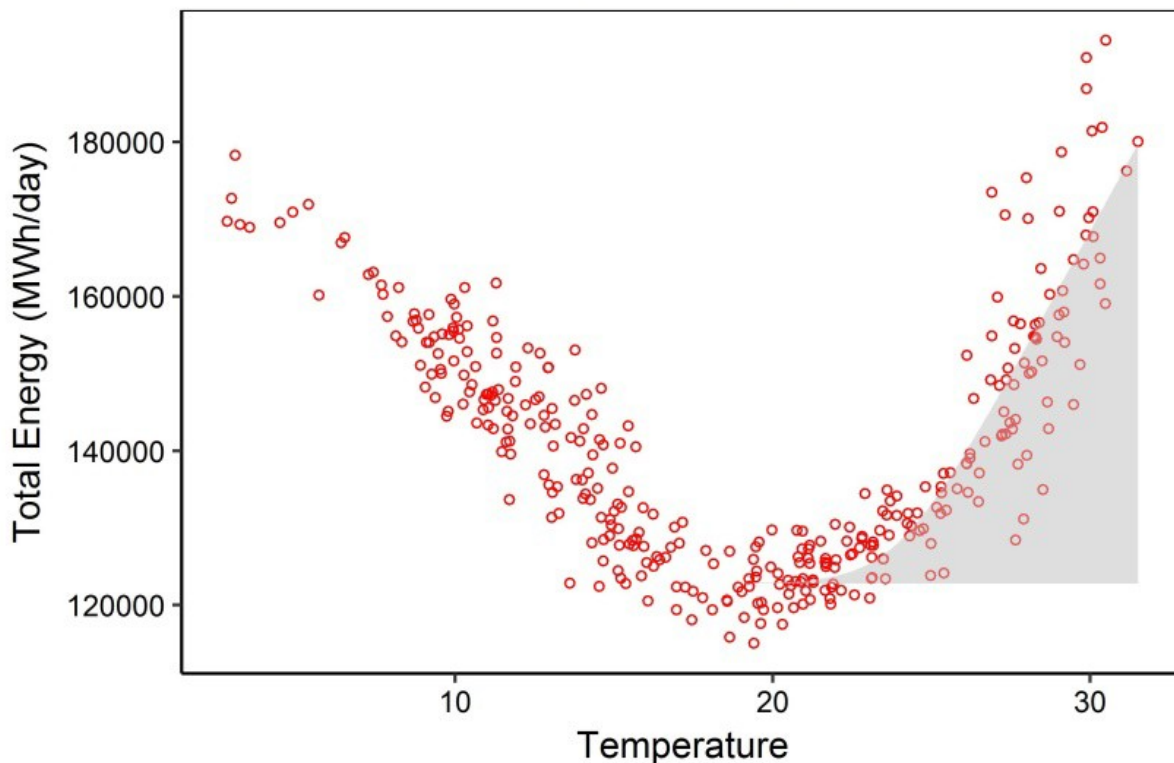


Abbildung 11: Gesamtenergieverbrauch abhängig von der Temperatur in Griechenland 2015 und Darstellung jenes Bereichs (in grau) der den reinen Strombedarf für die Raumkühlung (abzüglich des durchschnittlichen Strombedarf für Tage zwischen 15° und 20°C) abdeckt.

Nach diesem Berechnungsverfahren werden die Daten für jedes betrachtete Land für jeweils zwei aufeinanderfolgende Jahre (z.B. 2011-12, 2013-14 usw.) kombiniert und die Parameter gemäß einer abgewandelten Version der Gleichung (4) mittels der Methode der kleinsten Quadrate nicht linearer Funktionen abgeschätzt. In der modifizierten Gleichung (4) ist $a=1$ gesetzt worden. Dies wurde deswegen durchgeführt, um einerseits eine Lösung mit weniger unsicheren Daten herzuleiten und um andererseits die Datenstabilität zu erhöhen. Zur Interpretation der in allen Diagrammen vorkommenden Datenpunkte wurde das „ggplot package“ verwendet, welches auch im Programm „R“ implementiert ist.

1.3.1.3 Urbaner Temperaturanstieg verursacht durch anthropogene Wärmeabgabe aus Klimaanlagen (AP2)

Neben der regionalen Klimaänderung sind es auch anthropogene Wärmeemissionen, die zu einer Intensivierung des UHI führen können. Abwärme, welche von Gebäuden aufgrund des Wärme- oder Kühlbedarfs frei wird, verursacht mit 89% - 96% den größten Anteil am anthropogenen Wärmefluss, während Fahrzeuge und metabolische Prozesse den Rest ausmachen (Allen et al., 2010). Um den Einfluss der Gebäudestrukturen und anthropogener Wärmeemissionen auf die atmosphärische Zirkulation sowie auf die Hitzebelastung zu analysieren, wurden verschiedene Parametrisierungen entwickelt, die dazu dienen, Wärmeaustauschprozesse zu beschreiben und diese mit Regionalmodellen zu koppeln. Im aktuellen Projekt wird der Zusammenhang zwischen Energieverbrauch durch Klimaanlagen

(welcher in direktem Zusammenhang mit den anthropogenen Wärmeemissionen steht) und urbanem Temperaturanstieg basierend auf einer Literaturstudie untersucht.

Im Speziellen werden die Ergebnisse von de Munck et al. (2013), Salamanca et al. (2011) und Salamanca et al. (2014) betrachtet. De Munck et al. (2013) verwendete das ‚Town Energy Balance‘ (TEB) Parametrisierungsverfahren, welches im MESO-NH Modell integriert ist, um die Auswirkung anthropogener Wärmeemissionen, verursacht durch den Gebrauch von Klimaanlage, auf die Temperaturen in der Stadt Paris während der Hitzewelle 2003 zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden reale Klimaanlage-Daten und das TEB Modell verwendet. Eine schematische Darstellung dieser Methode ist Abbildung 12 zu entnehmen. Salamanca et al. (2011, 2014) verwendete das ‚Building Effect Parameterization‘ (BEP) Verfahren zusammen mit dem ‚Building Energy Model‘ (Martilli et al., 2002; Salamanca et al., 2010), welches im Weather Research and Forecast (WRF) Model integriert ist. In der Studie aus dem Jahr 2011 wurde der Energieverbrauch durch den Einsatz von Klimaanlage als Resultat von meteorologischen Bedingungen sowie der Einfluss von Wärmeemissionen aus Klimaanlage auf die städtische Lufttemperatur für die Stadt Houston (TX) für den 25. und 31. August 2000 simuliert. In der Publikation aus dem Jahr 2014 wurde die gleiche Vorgangsweise für die Stadt Phoenix (AZ) während einer extremen Hitzeperiode im Juli 2009 angewendet.

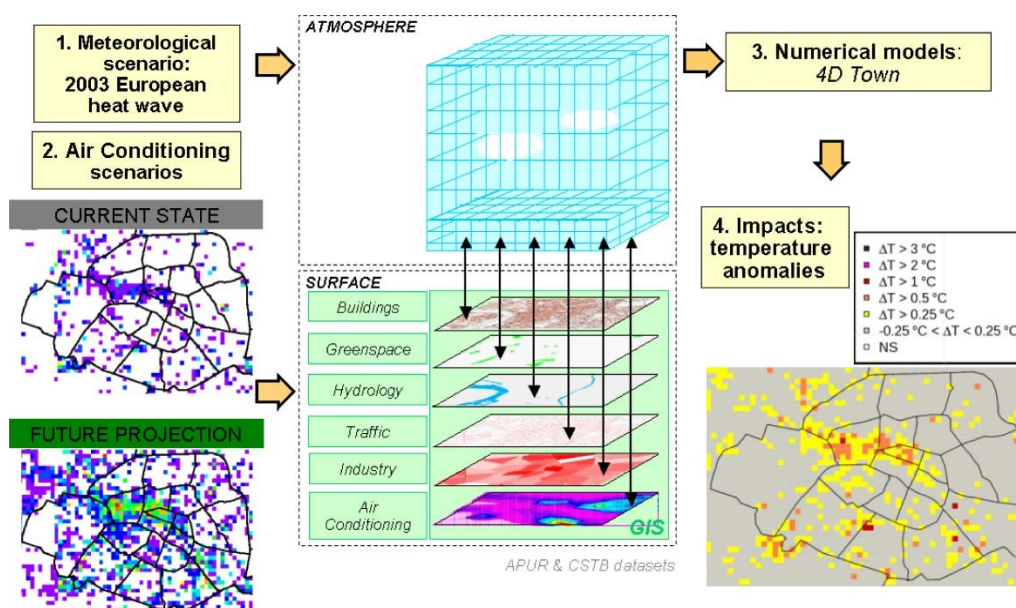


Abbildung 12: Schematischer Überblick über die verwendete Methode zur Analyse des Einflusses von Klimaanlage auf das urbane Klima anhand eines Beispiels für Paris (Quelle: de Munck C. et al. (2013), How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?, Int. J. Climatol. 33, 210–227).

Aufgrund des breiten Spektrums an meteorologischen Bedingungen sowie den unterschiedlichen urbanen Strukturen, die im Rahmen der angeführten Studien abgedeckt werden, stellt sich eine Verallgemeinerung der Resultate hinsichtlich ihrer Anwendung auf andere Städte als nicht trivial heraus. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Wärmeemissionen aus Klimaanlage pro urbaner Flächeneinheit und der Maximaltemperatur

abgeleitet, um im Allgemeinen den Einfluss der Verwendung von Klimaanlage auf die Entwicklung städtischer Temperaturen zu bestimmen. Obwohl dieser Zusammenhang in allen Studien zu erkennen ist, erfolgt die Darstellungsweise von Energieverbrauch und abgegebener Wärme keinem einheitlichen Schema. De Munck et al., (2013), beispielsweise, berücksichtigte in ihrer Studie die anthropogene Wärmefreisetzung, während Salamanca et al. (2011) den Fokus auf den Energieverbrauch von Klimaanlage legte. Energieverbrauch, Kühllast und anthropogene Wärmefreisetzung sind durch Gleichung (5) und (6) miteinander verknüpft.

$$Q_{anth} = EC + CL \quad (5)$$

$$EC = CL/COP \quad (6)$$

Q_{anth} entspricht hierbei der anthropogenen Wärmefreisetzung, EC dem Energieverbrauch (engl. energy consumption), CL der Kühllast (engl. cooling load) und COP dem Performance-Koeffizienten des Systems (engl. coefficient of performance of the system). Unter Verwendung der in den Studien angeführten COPs, kann die anthropogene Wärmeabfuhr nun in den Energieverbrauch umgewandelt werden und umgekehrt. Durch die Berücksichtigung des Spitzenwertes der anthropogenen Wärmeabfuhr sowie der in den Studien berücksichtigten maximalen lokalen Temperatureffekte, kann ein Zusammenhang zwischen den beiden Variablen bestimmt werden. Eine Beschreibung der für dieses Projekt relevanten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 2.

1.3.2 Photonic Cooling Technologie

Im Rahmen von AP3 wurden unterschiedliche Ansätze zur kostengünstigen und effizienten Realisierung von Photonic Cooling untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil für die Photonic Cooling Technologie sind die optischen Eigenschaften der Strahleroberfläche. Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche Low-Tech Ansätze untersucht:

- Beschichtungen basierend auf TiO_2 Nanopartikeln (Snow Globe) stellten sich als wenig geeignet heraus. Die damit erzielten Abkühlereffekte betragen maximal 1 K.
- Deutlich bessere Ergebnisse wurden mit dielektrischen Reflektorfolien erzielt (z.B. Daylightning Film DF 2000PE, 3M, USA). Diese Folien bestehen aus einem Vielschichtsystem von Polymer-Einzelschichten und weisen eine Reflexionsgrad von > 99% in einem Wellenlängenintervall von 400 bis 1000 nm auf. Deren Emissivität im Spektralbereich zwischen 8 und 14 μm ist wie für die meisten Polymere relativ hoch. Die Folien wurden für die Versuche auf metallische Substrate (meist Aluminiumfolie) geklebt, um die Reflexion auf den Spektralbereich > 1000 nm zu erweitern.

Ein weiteres wichtiges Design-Element für die Photonic Cooling Technologie ist das Strahlungsfenster. Konkrete Aufgabe dieses Strahlungsfensters ist, möglichst transparent für Wärmestrahlung mit einer Wellenlänge zwischen 8 und 13 μm zu sein. Zusätzlich soll dieses Fenster den Wärmeaustausch mit der Umgebung über Wärmeleitung und Konvektion möglichst unterbinden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche potentiell kostengünstige Materialien getestet und unterschiedliche Varianten von PE Folien stellten sich zur Erfüllung dieser Anforderungen als tauglich heraus. Speziell effizient war die

Anwendung von konventioneller Luft-Blasen-Folie, die zusätzlich eine gute thermische Isolierung aufwies.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde auch ein weiteres wichtiges Design-Element in der Anwendung der Photonic Cooling Technologie identifiziert. Konkret führt der Einsatz von metallischen Reflektoren zu einer substantiellen Steigerung der Effizienz. Diese Reflektoren schränken das „Sichtfeld“ der strahlenden Oberfläche ein und bewirken bei korrekter Orientierung, dass die strahlende Oberfläche mehr vom kalten Himmel „sieht“ und weniger von der wärmeren Umgebung.

Eine zentrale Aktivität im Rahmen von AP3 war die Realisierung eines Messaufbaus zur Qualifizierung von Photonic Cooling Technologieansätzen. Der Messaufbau besteht aus den drei Hauptkomponenten Strahler & Strahlungsfenster, Reflektor und Mess- und Steuereinheit und ist in der Abbildung 13 schematisch dargestellt.

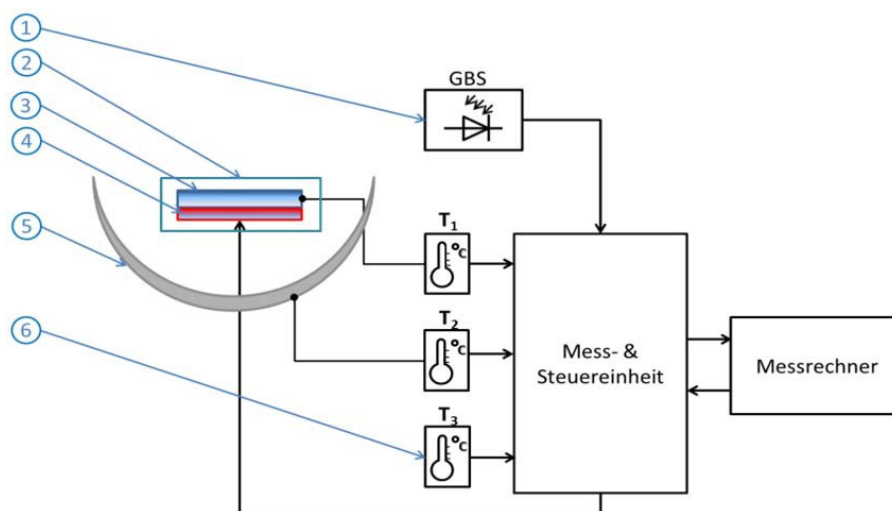


Abbildung 13: Konzeptskizze des verwendeten Messaufbaus. 1 ... Strahlungssensor, 2 ... Strahlungsfenster, 3 ... Strahler, 4 ... Peltierelement, 5 ... Reflektor, 6 Temperatursensor (T1 und T2).

Zur Bestimmung der abgestrahlten Leistung im IR-Bereich wird ein Peltier-Modul in direkten Kontakt mit dem Strahler gebracht. Strahler und Peltier-Modul sind vom Strahlungsfenster luftdicht umschlossen, wodurch ein Wärmeübertrag vom Strahler bzw. des Peltier-Modul an die Umgebung durch Luftströmungen (Konvektion) unterbunden werden soll. Die solare Einstrahlleistung soll im UV-VIS Bereich und im relevanten IR/FIR komplett durch das Fenster transmittiert werden. Strahler und Strahlungsfenster wiederum sind von einem Reflektor halbseitig umgeben, wodurch eine allseitige Abstrahlung vom Strahler zur Wärmesenke (Himmel) erreicht werden soll. In der Mess- & Steuereinheit befindet sich der Temperaturregler (TC-XX-PR-59, Laird PLC, UK) welcher eine zeitaufgelöste Aufzeichnung der Temperatur am Strahler (T_1), der Temperatur des Messaufbaus (T_2) und der Lufttemperatur unter Einbeziehung der Sonneneinstrahlung (T_3) ermöglicht. Das Peltier-Modul wird ebenfalls durch den Temperaturregler angesteuert, wodurch die Temperatur des Strahlers auf ein bestimmtes Niveau gebracht und dort auch durch den Regler gehalten werden soll. Die Intensität der solaren Einstrahlleistung wird durch den globalen Strahlungssensor (GBS01, Technische Alternative GmbH, Österreich) ermittelt. Die

Mess- und Steuereinheit ist zur Datenaufzeichnung sowie zur Ansteuerung der Temperaturregeleinheit über eine Schnittstelle mit einem Messcomputer verbunden.

Im Rahmen der Sondierung wurde eine Reihe an unterschiedlichen Experimenten unter Außenbedingungen mit dem oben beschriebenen Messaufbau durchgeführt (siehe Abbildung 14). Dabei wurde mit unterschiedlichen Aufbauten und Anordnungen experimentiert (mit/ohne Reflektor, unterschiedliche Strahler, ...). Weiters wurden Messungen unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt, um ein besseres Verständnis zum Einsatz der Photonic Cooling Technologie unter realen Einsatzbedingungen zu erhalten.

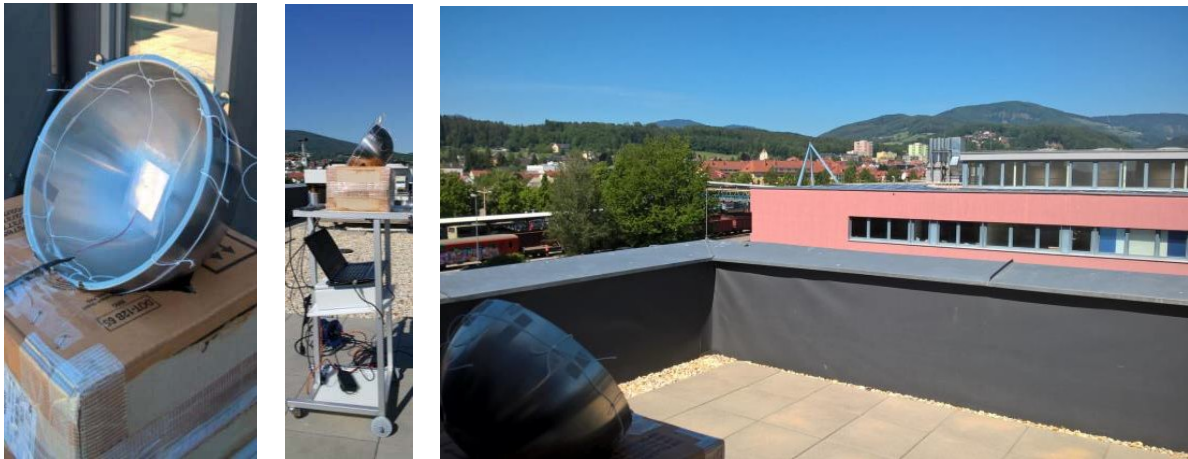


Abbildung 14: Der verwendete Außenmessstand mit der Reflektor-Probe-Peltier Einheit im Detail (links), den gesamten Messaufbau im Überblick (Mitte) und der näheren Umgebung um den Messaufbau (rechts). Aufnahme vom 17.05.2017, Weiz.

Besonders wichtig waren hier die Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Abstrahlungsleistung. Dabei wurde die Strahlertemperatur mit dem Peltier-Modul auf eine konstante Temperatur geregelt und die dafür benötigte elektrische Leistung bestimmt.

1.3.2.1 Standardprozedere für Messungen unter realen Einsatzbedingungen

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Versuchsaufbauten zu gewährleisten erfolgt die Durchführung nach folgendem Standardprozedere:

1. Akklimatisierung (Acc.): In diesem Schritt erfolgt der Abgleich der unterschiedlich positionierten Temperatursensoren T_1 am Strahler und T_2 , der Temperatur am Messaufbau. Dieser Schritt dauert in etwa eine Stunde, danach sollte die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Sensoren weniger als $0,5^\circ\text{C}$ betragen. Beide Temperatursensoren werden abgedeckt, um die Auskühlung des Strahlers durch Strahlungsemission und die des Bereiches in der sich der Temperatursensor zur Überwachung des Messaufbaues befindet, durch Konvektion zu verhindern.
2. Sonneneinstrahlung (Exposure Sun): Die Abdeckung wird entfernt und der Strahler kann ungehindert in den Himmel abstrahlen. Im Gegenzug wird teilweise Sonnenlicht in den Reflektor bzw. auf den Strahler eingestrahlt, was bei ungünstiger Positionierung des Reflektors zu einer Temperaturerhöhung des Strahlers führt bzw. die Abkühlung des Strahlers gegenüber seiner Umgebung vermindert.

3. Strahlblocker (Cover): In diesem Schritt wird eine im UV/VIS Wellenlängenbereich transparente Platte zwischen Strahler und Himmel eingeschoben. Die verwendete Abdeckung besteht aus dem Polymer Polystyrene (PS) und weist im IR/FIR eine hohe Absorptionscharakteristik auf. Die vom Strahler abgegebene Infrarotstrahlung wird von der Platte absorbiert und teilweise auf den Strahler zurückgeworfen, was sich in Form einer Temperaturzunahme des Strahlers auswirkt.
4. Verringerte Sonneneinstrahlung (Low Exposure Sun): Der Strahler strahlt wie in Punkt 2 beschrieben ungehindert in den Himmel ab. Die Intensität der Sonneneinstrahlung ist durch die spätere Tageszeit (Nachmittag) vermindert. Bei beiden Temperatursensoren wird im Allgemeinen ein Rückgang der Temperatur beobachtet.

1.3.3 Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energieeinsparung im Gebäude

Zu Beginn wurden auf Grundlage von Randbedingungen für den Einsatz von Photonic Cooling im urbanen Raum typische zum Einsatz kommende Kühlsysteme für unterschiedliche Gebäudetypen identifiziert. Die Randbedingungen für die Bewertung des Einsatzes von Photonic Cooling sind:

- Dicht bebauter (Innen-) Stadtbereich als örtlicher Schwerpunkt für Photonic Cooling für Gebäudekühlung (Motivation: erwartete zukünftige Zunahme der Urban Heat Islands und des Gebäudekühlbedarfs)
- Eingrenzung der Gebäudetypen
 - Gebäudenutzung: Geschoßwohnbau, Büro-, Verwaltungsgebäude
 - Altbestand (thermisch saniert / nicht saniert); Neubau
 - Bauweise (Speichermassen-Trägheit-Lastverschiebungspotential)
 - Bauliche Voraussetzungen für Positionierung Photonic Cooling Element (Dach, Fassade)
- Eingrenzung der untersuchten Kälte-Erzeugersysteme
 - Altbestand: Nachrüstsysteme für Einzelwohnungen (bzw. Räume) oder Gesamtgebäude
 - Neubau: Verfügbare Kältequellen, Wärmesenken, Abwärmequellen im Innenstadtbereich

In einer Zusammenschau von Gebäudetypen und Kühlsystemen ergaben sich folgende typische Kombinationen.

Wohngebäude-Bestand:

- Bauseitig vorgesehene Kühlsysteme im Bestand eher selten
- Meist dezentrale Nachrüstung einzelner überhitzter Räume mit Raumklimagerät
 - (Multi-) Splitgerät
 - Kompaktklimagerät

Wohngebäude-Neubau / Bestandsanierung:

- (Multi)-Splitgerät
- Kühlen mit Wärmepumpe in Verbindung mit Fußbodenheizung / Bauteilaktivierung, Radiatoren
 - Dezentrale Luft-Wasser Wärmepumpe
 - Zentrale Wasser bzw. Sole / Wasser umkehrbare Wärmepumpe

Büro- und Verwaltungsgebäude-Bestand:

Hauptunterschied zu Wohnbau: Höhere innere thermische Lasten, oft höherer solarer Eintrag aufgrund von Stahl-Glas-Fassaden, Arbeitsstättenverordnung

- Dezentrale Kompakt und Splitgeräte als Nachrüstungen einzelner Räume (Besprechungszimmer, Serverraum...) (< 70-er Jahre)
- Multisplitgeräte (70- bis 80-er Jahre)
- Zentrale Kompressionskältemaschine in Verbindung mit Flächenkühlsystem (Kühldecken ab 60-ger, Bauteilaktivierung seit 90-er Jahren)

Büro-, Verwaltungsgebäude Neubau / Bestandsanierung:

- Zentrale Kompressionskältemaschine in Verbindung mit Flächenkühlsystem (Kühldecken, Bauteilaktivierung, Klimaboxen)
- Kühlen mit zentraler Wärmepumpe Wärmepumpe (Grundwasser bzw. Sole / Wasser) in Verbindung mit Fußbodenheizung / Bauteilaktivierung, Radiatoren
- Solares Kühlen mit Absorptionswärmepumpe
- Free Cooling (Grundwasser, Erdkälte)

In Hinblick auf die Modellierungen des Stadtklimas und der Urban Heat Islands wurden als Einsatzfälle zwei am häufigsten eingesetzte kommerzielle Kühlsysteme, eine unkonventionelle Anlage sowie ein Konzept einer direkten Kühlung mit Photonic Cooling ausgewählt:

- Splitgerät für Einzelraumkühlung
- zentrale Komfortklimaanlage mit Kompressionskältemaschine für eine Bürohaus
- Desiccant-Klimaanlage für ein Bürogebäude
- Photonic-Kühlfläche zur Kühlung eines Bürocontainers

Die Berechnung der Wirkung von Photonic Cooling auf die Energieeffizienz der untersuchten Kühlsysteme erfolgt aufgrund der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten der Kältetechnik und sind in Kapitel 2.4 ausführlich dargestellt.

2 Ergebnisse

2.1 Überblick

Im Projekt wurden, wie bereits in Kapitel 1.1.2 beschrieben, 3 Ziele definiert, die weitgehend erreicht wurden. In den folgenden Tabellen (Tabelle 3 - Tabelle 6) sind die einzelnen Ziele beschrieben und die erreichten Projektergebnisse sind den jeweiligen „Zielelementen“ gegenübergestellt. Darüber hinaus wird der Erreichungsgrad für jedes der Ziele einzeln diskutiert.

Tabelle 3: Ziel 1 - Quantifizierung des Einflusses von Klimaanlageabwärme auf städtisches Mikroklima und des Strombedarfs unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen

| Detail / Beschreibung | Projektergebnis | Ziel-Erreichung |
|--|--|-----------------|
| Wien als untersuchte Stadt | Die Szenario Rechnungen wurden für das Stadtklima von Wien durchgeführt | ✓ |
| Untersuchungszeitraum 2021-2050 | Szenario Rechnungen wurden für einen Zeitraum bis 2050 durchgeführt. Zusätzlich wurden Rechnungen bis 2100 angestellt. | ✓ |
| Untersuchung des Effekts von Klimaanlageanlagen auf städtische Wärmeinseln bzw. Zunahme der Hitzebelastung | <ul style="list-style-type: none"> • Der Einfluss von Klimaanlageanlagen auf das städtische Klima von Wien, bedingt nur durch die erwartete Klimaerwärmung, wird bis 2050 eher gering sein. Für das extremste Szenario das in diesem Projekt berücksichtigt wurde wird die Maximale Lokale Temperatur (MLT) durch den Einsatz von Klimaanlageanlagen um etwa 0,8 °C steigen. • Der Strombedarf für Kühlung wird in Wien dadurch von aktuell etwa 17 GWh/Jahr auf 95 (33 – 189) GWh/Jahr in 2050 steigen. • In einem längerfristigen Szenario bis 2100 würde sich der Effekt jedoch durch die erwartete Klimaerwärmung deutlich verschärfen. | ✓ |

Ziel 1 des Projekts wurde vollständig erreicht.

Tabelle 4: Ziel 2 - Kostengünstigere Photonic Cooling Technologien.

| Detail / Beschreibung | Projektergebnis | Ziel-Erreichung |
|---|--|-----------------|
| Identifikation und Test von kostengünstigen Materialien für Photonic Cooling | <ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedliche Materialien und Materialkonfigurationen für Strahler, IR transparente Abdeckung und Reflektor wurden getestet. • Geeignete Materialien und Materialkonfigurationen wurden identifiziert. | ✓ |
| Experimenteller Nachweis eines Abkühleffektes von 7 K unter Umgebungstemperatur mit kostengünstigen Materialien | <ul style="list-style-type: none"> • Ein Messplatz zur experimentellen Charakterisierung von Photonic Cooling Aufbauten unter Außenbedingungen wurde realisiert und eine Vielzahl an Messserien wurde durchgeführt. • Eine Abkühlung von mehr als 7 K unter die Umgebungstemperatur wurde für günstige Konfigurationen (3M Spiegel folie mit metallischem Reflektor) gemessen. | ✓ |
| Experimenteller Nachweis einer Abstrahlungsleistung mind. 60 W/m ² mit kostengünstigen Materialien. | <ul style="list-style-type: none"> • Ein Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Abstrahlungsleistung in den Himmel wurde erfolgreich entwickelt und eingesetzt. • Eine Abstrahlungsleistung von 60 W/m² wurde gemessen wenn die Strahlertemperatur etwa 10 K über der Umgebungstemperatur lag | ✓ |
| Herstellungskosten (Materialien) von funktionalem Photonic Cooling Konzept liegen unter 50 €/m ² | <ul style="list-style-type: none"> • Zumindest für ein Photonic Cooling Konzept (Rohr mit Parabolrinne) konnte gezeigt werden, dass die Materialkosten bei unter 50 €/m² liegen | ✓ |

Ziel 2 wurde vollständig erreicht. Die erzielten Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Leistungsfähigkeit von Photonic Cooling eingeschränkt ist.

Tabelle 5: Ziel 3a - Analyse von Optionen zur Implementierung von Photonic Cooling zur Gebäudekühlung und Evaluierung der möglichen Effizienzsteigerung eines Kälteprozesses durch Senkung der Rückkühltemperatur über Photonic Cooling.

| Detail / Beschreibung | Projektergebnis | Ziel-Erreichung |
|--|---|-----------------|
| Evaluierung der Effizienzsteigerung von Kühlsystemen durch Senkung der Rückkühltemperatur mittels Photonic Cooling | <ul style="list-style-type: none"> 4 Kühlsystemvarianten wurden untersucht und die potentiell effizienzsteigernde Wirkung von Photonic Cooling wurde auf Basis von experimentell ermittelten Kenngrößen bestimmt. Limitierend für den Einsatz von Photonic Cooling wirkt die begrenzte Abstrahlintensität und die typischerweise zur Verfügung stehende Fläche. | ✓ |
| Energetische Betrachtung der Effizienzsteigernden Wirkung von Photonic Cooling auf Kühlsysteme | <ul style="list-style-type: none"> Für 3 der 4 untersuchten Kühlsysteme wurde keine signifikante Energieeinsparung durch den Einsatz von Photonic Cooling festgestellt Identifikation eines Kühlsystems (Dessicant) bei dem Photonic Cooling sinnvoll eingesetzt werden kann. | ✓ |

Ziel 3a wurde vollständig erreicht. Die Ergebnisse zeigen, jedoch dass für die am weitest verbreiteten Kühlsysteme, die speziell in der Stadt eingesetzt werden, aktuell kein sinnvoller Use-case für Photonic Cooling vorzuliegen scheint.

Tabelle 6: Ziel 3.b - Aufbauend auf die potentiell am besten geeigneten Konzepte: Quantifizierung des potentiellen Einflusses auf das Mikroklima in Städten.

| Detail / Beschreibung | Projektergebnis | Ziel-Erreichung |
|---|--|-----------------|
| Schätzung des Potentials zur Reduktion der Abwärme von Klimasystemen im städtischen Gebiet durch Photonic Cooling | <ul style="list-style-type: none"> Es wurde kein realistischer bzw. sinnvoller Use-Case identifiziert, der den breiten Einsatz von Photonic Cooling in einer Stadt hätte rechtfertigen können. Ohne realistisches Einsatzszenario war es auch nicht möglich eine Schätzung des Einflusses auf die (reduzierte) Abwärme durch Photonic Cooling vorzunehmen. | ✗ |

Ziel 3b wurde nicht erreicht, bzw. konnte keine sinnvolle Quantifizierung des Einflusses von Photonic Cooling auf die (reduzierte) Abwärme durchgeführt werden.

Highlights:

- Erstmals wurde der Einfluss von Abwärme von Klimaanlage auf das Stadtklima von Wien berechnet bzw. eine Prognose für die Situation im Jahr 2050 vorgenommen.
- Sozio-ökonomische Modelle zur Prognose des Energieverbrauchs durch Klimaanlage in Städten wurden weiterentwickelt.
- Erstmals wurde gezeigt, dass effizientes Photonic Cooling mit kostengünstigen, kommerziell verfügbaren Materialien möglich ist. Darüber hinaus wurde erstmals die Abstrahlungsleistung von Photonic Cooling experimentell bestimmt.
- Günstige Ausführungsformen von Photonic Cooling wurden entwickelt und zum Patent angemeldet
- Erstmals wurden Einsatzszenarien von Photonic Cooling in Gebäudetechnik analysiert und die potentielle Energieersparnis bestimmt.

Lowlights:

- Die Leistungsfähigkeit von Photonic Cooling lässt aus aktueller Perspektive nur wenig sinnvolle Anwendungsfälle zur Gebäudekühlung zu.
- Photonic Cooling ist aus aktueller Perspektive keine sinnvolle Lösung zur Reduktion von Wärmeinseln in Wien.

2.2 Mikroklimamodellierung, Stromverbrauch und THG-Emissionseinsparungen

2.2.1 Bewertung des urbanen Klimas von Wien und zukünftige Klimaänderung

Die urbane Hitzebelastung in Wien hat in den vergangenen Jahrzehnten eine Zunahme erfahren, wie aus Abbildung 15 zu erkennen ist. Basierend auf homogenisierten Temperaturzeitreihen konnte festgestellt werden, dass die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen an der Station HW von einem mittleren Wert von 56,4 für die Klimanormalperiode 1971-2000 auf einen Wert von 64,1 Sommertagen pro Jahr, berechnet für die Periode 1981-2010, angestiegen ist. In außergewöhnlich warmen Jahren, wie beispielsweise im Sommer 2003, wurden mehr als 100 Sommertage registriert. Dieser positive Trend wurde einerseits der beobachteten Erwärmung des regionalen Klimas (Auer et al., 2007) und andererseits den Veränderungen in urbanen Gebieten, wie z.B. Landnutzungsänderungen oder Änderungen des Energieverbrauchs (Böhm, 1979; Böhm, 1998), zugeschrieben.

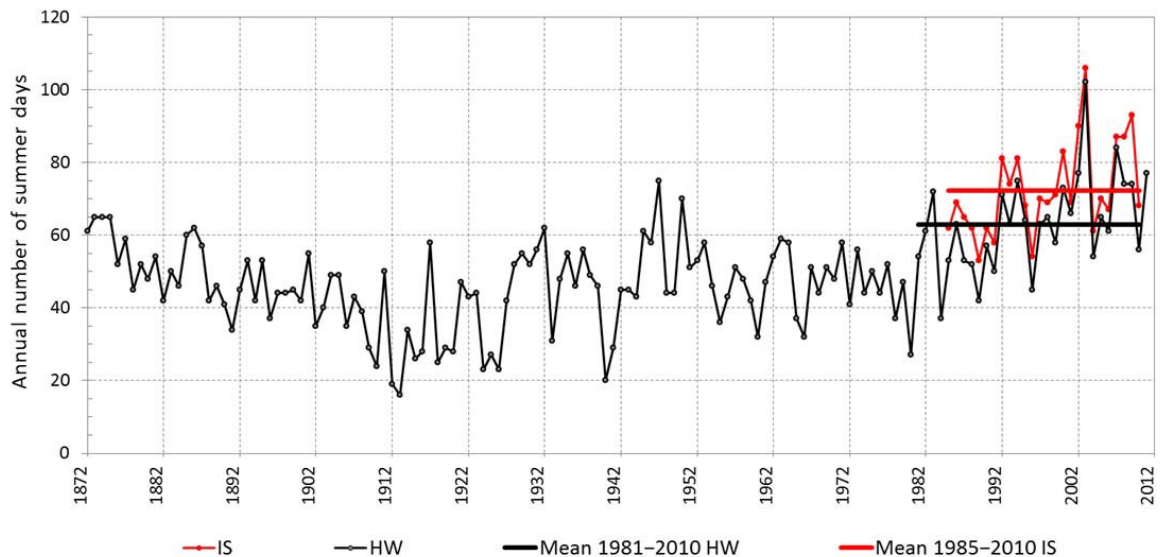


Abbildung 15: Jährliche Anzahl an Sommertagen (engl. summer days, SU: $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) berechnet aus homogenisierten Temperaturmaxima der Station Wien Hohe Warte (HW) für die Periode 1872-2011 und der Station Wien Innere Stadt (IS) für die Periode 1986-2011. Mittlere Werte für 30-jährige Perioden sind durch dicke Linien gekennzeichnet. (Adaptiert von Zuvela-Aloise et al. (2014), Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period, Urban Climate, 490 – 508).

In dicht bebauten Gebieten wird die Hitzebelastung durch den UHI-Effekt weitgehend verstärkt (Oke, 1984). Die Energiebilanz in urbanen Gebieten wird durch eine Reihe unterschiedlicher Parameter modifiziert. Dazu zählen unter anderem fehlende Vegetation, verstärkte Absorption kurzwelliger Strahlung von asphaltierten Flächen, Wärmespeicherung von Gebäuden, Abfangen langwelliger Strahlung durch Straßenschluchten, reduzierte Luftzirkulation und erhöhte Abgabe anthropogener Wärme (Oke et al. 1991). Der mittlere jährliche Temperaturüberschuss im Stadtzentrum Wiens verglichen mit der ländlichen Umgebung betrug für die Periode 1951-1980 $1,0\text{-}1,5^{\circ}\text{C}$ (Auer et al., 1989). Des Weiteren konnte ein progressiver Trend des urbanen Temperaturüberschusses von bis zu $0,6^{\circ}\text{C}$ für die Periode 1951-1995 an einzelnen Stationen in Wien beobachtet werden (Böhm, 1998).

Temperaturzeitreihen der Messstation IS im dicht bebauten Stadtzentrum deuten im Allgemeinen auf eine höhere Hitzebelastung hin als Stationen in Wohngebieten. Die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen an der Station IS betrug 72,3 Tage für die Periode 1985-2010. Auch die mittlere jährliche Anzahl an heißen Tagen (Tage mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) ist höher (21,2 Tage verglichen mit 15,2 an der Station HW) wie auch die Anzahl an Tropennächten (Tage mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$), mit 16,0 Tagen im Vergleich zu 4,0 an der Station HW.

Basierend auf den IPCC Klimaprojektionen (Christensen et al., 2007, 2013), ist ein Anstieg der Maximaltemperaturen während der Sommerperiode bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in Süd- und Zentraleuropa sehr wahrscheinlich. Die Analyse der Klimaszenarien von regionalen Multi-Modell-Ensembles (Schär et al., 2004; Fischer und Schär, 2010) zeigt einen Anstieg sowohl bezüglich Intensität als auch Häufigkeit von Hitzewellen in Europa. In früheren Studien, die sich mit zukünftigen Klimaprojektionen für die Stadt Wien unter Anwendung statistischer Downscaling-Verfahren beschäftigten, wurde ein Anstieg der Sommertage um 46% - 69% und ein Anstieg der heißen Tage von 10% - 24%

bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 berechnet. In derselben Analyse für die Station HW und basierend auf dem regionalen Klimamodell REMO-UBA (Jacob et al., 2008), wurde ein mäßiger Anstieg der Extremtemperaturen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts, gefolgt von einem starken Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts prognostiziert. Mögliche urbane Erweiterungen und anthropogene Wärmeemissionen würden darüber hinaus zu einer Verstärkung des UHI-Effekts in Wien beitragen (APCC, 2014).

Abbildung 16 zeigt Ergebnisse der Simulationen basierend auf Beobachtungsdaten für die Perioden 1971-2000 und 1981-2010 sowie Zukunftsszenarien für die Periode 2021-2050. Die Referenzsimulationen zeigen eine typische räumliche Verteilung der Hitzebelastung mit einem Maximum im dicht bebauten Stadtzentrum und in Wohngebieten in flachem Terrain nördlich und östlich der Donau. Sowohl Orographie als auch Landnutzung beeinflussen die thermischen Gegebenheiten. Bedingt durch die Orographie und die vorherrschenden Windrichtungen (NW und SE) ist die Hitzebelastung in den Wohngebieten auf den Hügeln im Westen der Stadt bei gleicher Bebauung geringer als im flachen Terrain südöstlich und östlich des Stadtzentrums. Die Ergebnisse der Simulationen für die beiden Perioden 1971-2000 und 1981-2010 sind ähnlich. Allerdings zeigt sich in der Periode 1981-2010 ein Erwärmungstrend, wie dieser auch in den Beobachtungszeitreihen zu erkennen ist. Die Simulationen, die für die Periode 1971-2000 einerseits auf Beobachtungs- und andererseits auch auf Modelldaten basierend durchgeführt wurden (zweite Variante hier nicht gezeigt), weisen eine große Ähnlichkeit auf.

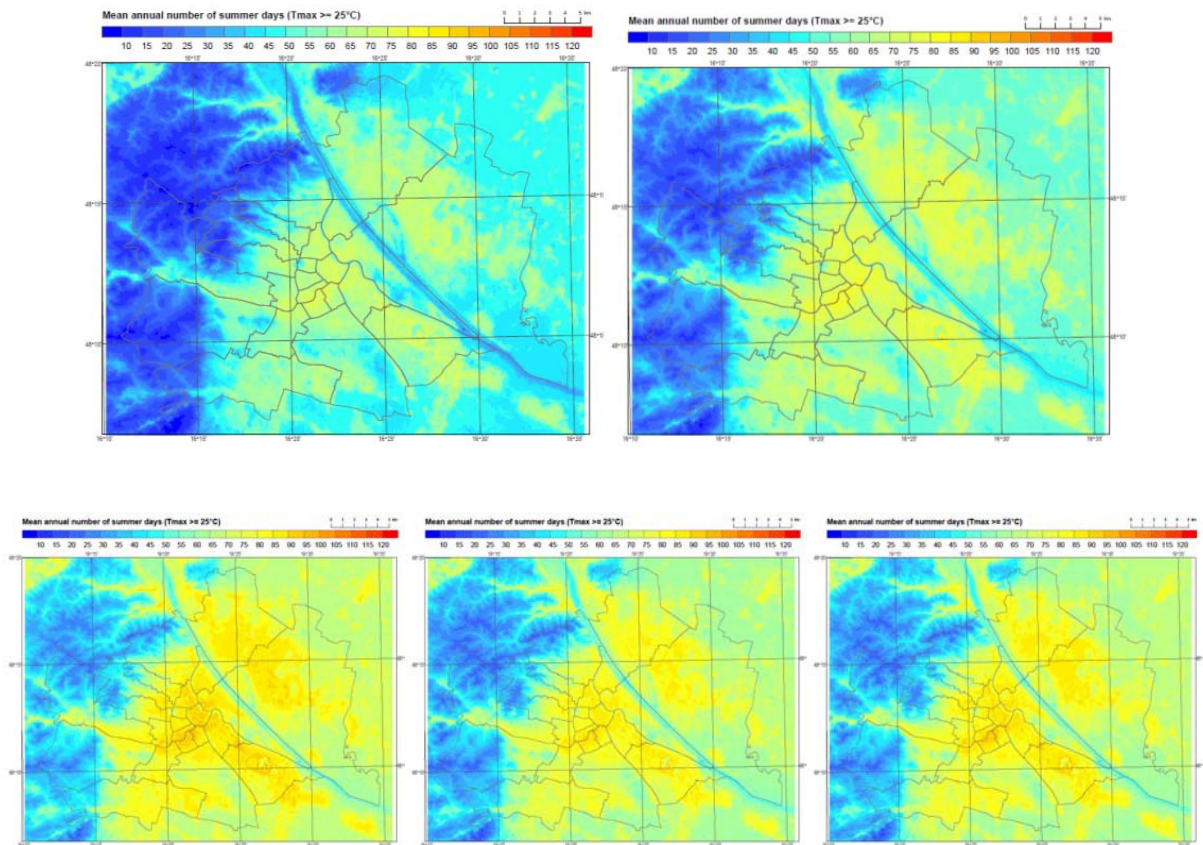


Abbildung 16: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen in Wien, berechnet mit dem urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 und unter Anwendung der Kuboidmethode, basierend auf Beobachtungszeitreihen für die Periode 1971-2000 (oben links) und 1981-2010 (oben rechts) und den IPCC-Szenarien RCP2.6 (unten links), RCP4.5 (unten Mitte), und RCP8.5 (unten rechts) für die Periode 2021-2050 unter Verwendung eines Ensembles von EURO-CORDEX RCM Modellsimulationen (Quelle: adaptiert von Bokwa et al. (2015), IVF Projekt, Urban climate in Central European cities and global climate change).

Die Modellergebnisse für die Periode 2021-2050 zeigen einen moderaten Anstieg der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen verglichen mit der Referenzsimulation (Abbildung 17). Die Intensität der Erwärmung und die räumlichen Verteilung unterscheiden sich nicht grundlegend innerhalb der verschiedenen Klimaszenarien für diese Periode. Für die Periode 2071-2100 variiert die Zunahme der Anzahl an Sommertagen jedoch beträchtlich zwischen den unterschiedlichen RCP Szenarien (Bokwa et al., 2015). In Tabelle 7 wird die Änderung der Hitzebelastung als Differenz der mittleren jährlichen Anzahl von Sommertagen für verschiedene IPCC Szenarien angegeben. Die Analyse wurde für die Stationen HW und IS, für dicht bebaute Gebiete (LU_2: Landnutzungsklassen mit ‚compact midrise‘), für alle bebauten Gebiete (LU_b: Landnutzungsklassen 1 bis 10) und für den gesamten Modellausschnitt (LU_all: alle Landnutzungsklassen) separat durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine unterschiedliche Hitzebelastung im Stadtzentrum (IS) verglichen mit den Wohngebieten (HW) sowie eine deutlich höhere Hitzebelastung in dicht bebauten Gebieten verglichen mit der mittleren Hitzebelastung in bebauten Gebieten und in Gebieten mit natürlicher Umgebung. Ein Vergleich der Klimaperiode 2021-2050 mit der Periode 1971-2010 zeigt für die zukünftigen Klimaprojektionen einen Anstieg in der Hitzebelastung von etwa 20 Sommertagen im jährlichen Mittel für alle Fallstudien. Die Abweichung zwischen verschiedenen IPCC Szenarien ist verhältnismäßig klein (> 5 Sommertage im jährlichen Mittel).

Tabelle 7: Auswertung der MUKLIMO_3 urbanen Klimasimulationen für Wien für vergangene und zukünftige klimatische Bedingungen. Die Simulationen wurden im Rahmen des IVF Projekts „Urban climate in Central European cities and global climate change“ (Bokwa et al., 2015) basierend auf verschiedenen IPCC Szenarien mit EURO-CORDEX RCM Modellsimulationen als Input durchgeführt. Beobachtungsdaten für die Berechnung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen werden von den Stationen HW und IS gewonnen. Die Analyse der Modellergebnisse erfolgt für die Landnutzungsklassen ‚compact midrise‘ (dicht bebaute Gebiete, LU_2), für Landnutzungsklassen mit bebauten Gebieten (LU_b) und für alle Landnutzungsklassen in der gesamten Domäne (LU_all).

| SU (days) | Time period | Model | HW | IS | LU_2 | LU_b | LU_all |
|-----------|-------------|---------------------------------------|------|------|----------|----------|-----------|
| Obs. | 1971-2000 | | 56,4 | 67,6 | - | - | - |
| | 1981-2010 | | 64,1 | 72,3 | - | - | - |
| Ref. | 1971-2000 | Ensemble average | 53,1 | 71,0 | 67,1±3,6 | 57,2±9,2 | 45,4±15,7 |
| RCP2.6 | 2021-2050 | EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_rcp26_SMHI-RCA4 | 75,0 | 91,7 | 88,1±3,2 | 78,6±9,4 | 66,1±17,3 |
| RCP4.5 | 2021-2050 | Ensemble average | 70,7 | 87,8 | 84,1±3,5 | 74,3±9,4 | 61,6±17,2 |
| RCP8.5 | 2021-2050 | Ensemble average | 72,4 | 90,0 | 86,2±3,7 | 76,0±9,7 | 63,0±17,5 |

2.2.1 Stromverbrauch und Treibhausgaseinsparungen

Die Darstellung $Slope_{max}$ im Vergleich zu CDD_{max} für den täglichen Strombedarf in 2015-2016 ist in Abbildung 17 (links) dargestellt. Die Beziehung ist dabei streng linear. Die Ergebnisse eines Landes (hier die Niederlande) stellen hier allerdings gemäß der ‘Cook’s distance’-Methode Ausreißer dar. Bleiben diese unberücksichtigt, hat die lineare Regressionsgleichung die Form

$$Daily\ Total: Slope_{max} = -3,22 + 0,0109 CDD_{max} (r^2 = 0,824) \quad (5)$$

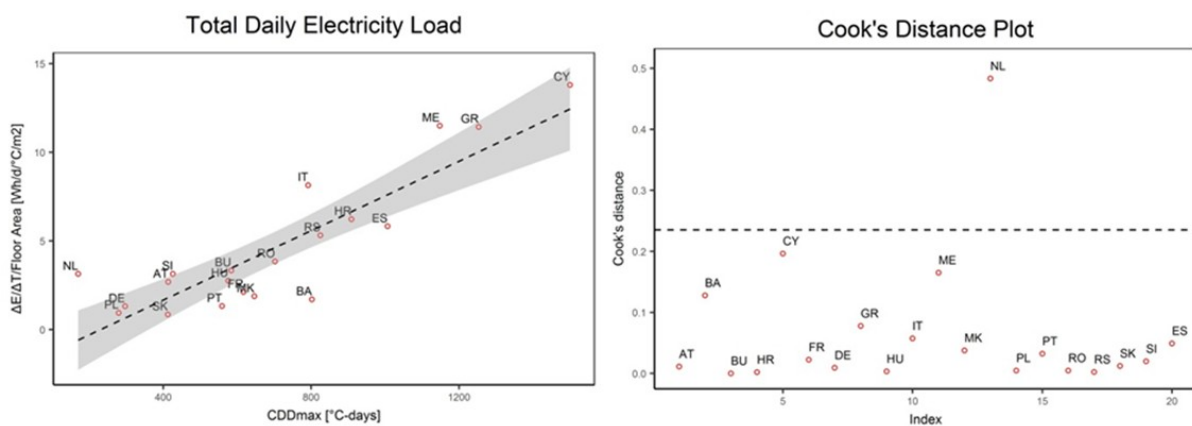


Abbildung 17: Darstellung $Slope_{max}$ im Vergleich zu CDD_{max} für den täglichen Strombedarf in 2015 und 2016.

Abbildung 18 zeigt den Zusammenhang der Beziehung von $Slope_{max}$ zu CDD_{max} für den täglichen Spitzenstrombedarf aller Länder für den Zeitraum 2015-2016, wobei der Zusammenhang hier nicht so deutlich erscheint als in Abbildung 19. Auch hier gibt es mit Zypern und Montenegro wieder zwei Ausreißer die in den weiteren Betrachtungen ignoriert wurden. Somit ergibt sich hier die lineare Regression

$$\text{Daily Peak: } Slope_{max} = -8,16e-04 + 1,42e-04 CDD_{max} \quad (r^2 = 0,603) \quad (6)$$

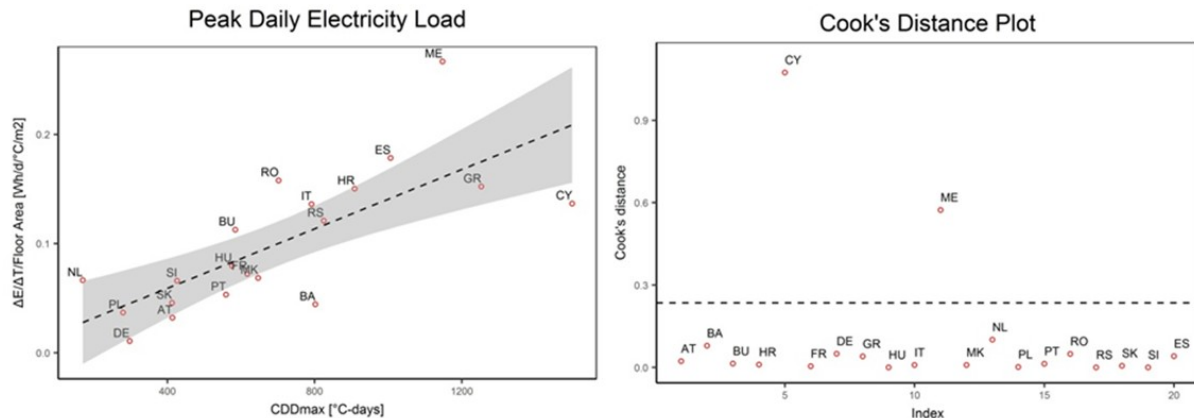


Abbildung 18: Zusammenhang der Beziehung von $Slope_{max}$ zu CDD_{max} für den täglichen Spitzenstrombedarf aller Länder in 2015-2016.

CDD und CDD_{max} für Wien sind gemäß der heruntergerechneten Klimamodelle für die Szenarien RCP4.5 und RCP 8.5 zwischen 2020 und 2050 in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt. Wie ersichtlich, existiert ein kleiner Unterschied zwischen den beiden Szenarios über diese Zeitspanne. In beiden Fällen steigt das CDD_{max} von derzeit 414 Tagen bis auf ca. 580 ± 40 -Tage im Jahre 2050, was wiederum eine Erhöhung um 40% darstellt. In beiden Fällen wird sich das Klima in Wien an das derzeitig vorherrschende Klima in Ländern wie Bulgarien oder Ungarn angleichen. Auch die Wohn- und Nutzfläche in Wien wird von derzeit 145 Mio. m² auf 173 ± 12 Mio. m² ansteigen, da die Bevölkerung von derzeit 1.857.000 auf schätzungsweise 2.173.000 (0,4% Wachstum pro Jahr) zunehmen wird.

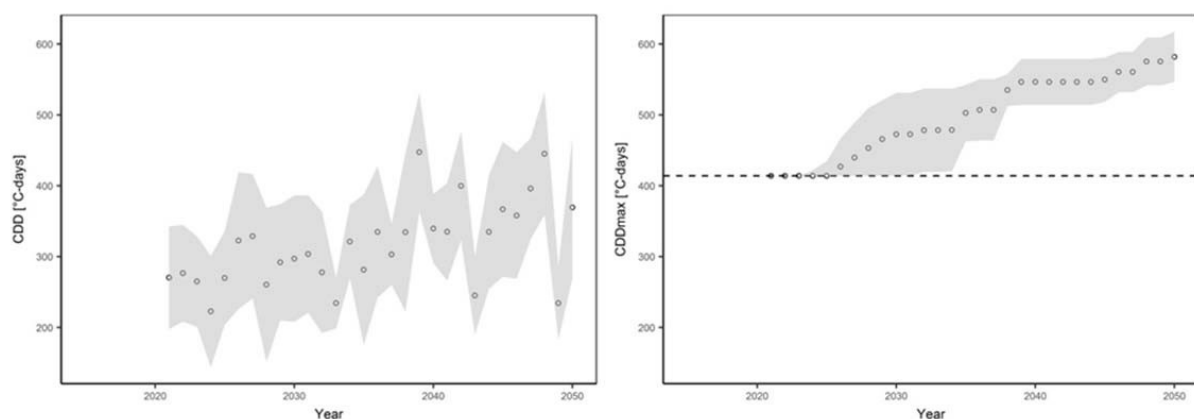


Abbildung 19: Kühlgradtage (CDD) Maximale Kühlgradtage (CDD_{max}) für Wien sind gemäß der Klimamodelle für das Szenario RCP 4.5 zwischen 2020 und 2050. Die Punkte repräsentieren die Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert von CDD_{max} in 2016.

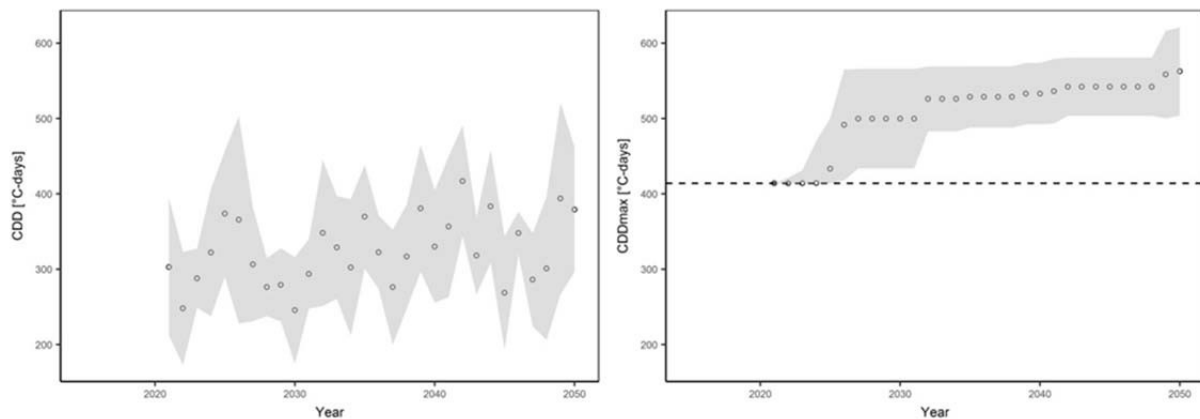


Abbildung 20: Kühlgradtage (CDD) Maximale Kühlgradtage (CDD_{max}) für Wien sind gemäß der Klimamodelle für das Szenario RCP 8.5 zwischen 2020 und 2050. Die Punkte repräsentieren die Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert von CDD_{max} in 2016.

Wenn alle diese Faktoren kombiniert werden, wird im Anschluß für die Stadt Wien der Strombedarf zu Kühlzwecken modelliert, der von derzeit 22 GWh/Jahr auf 95 (33 – 189) GWh/Jahr in 2050 ansteigen wird. Auch hier gibt es eine leichte Differenz zwischen den beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 (Abbildung 21)

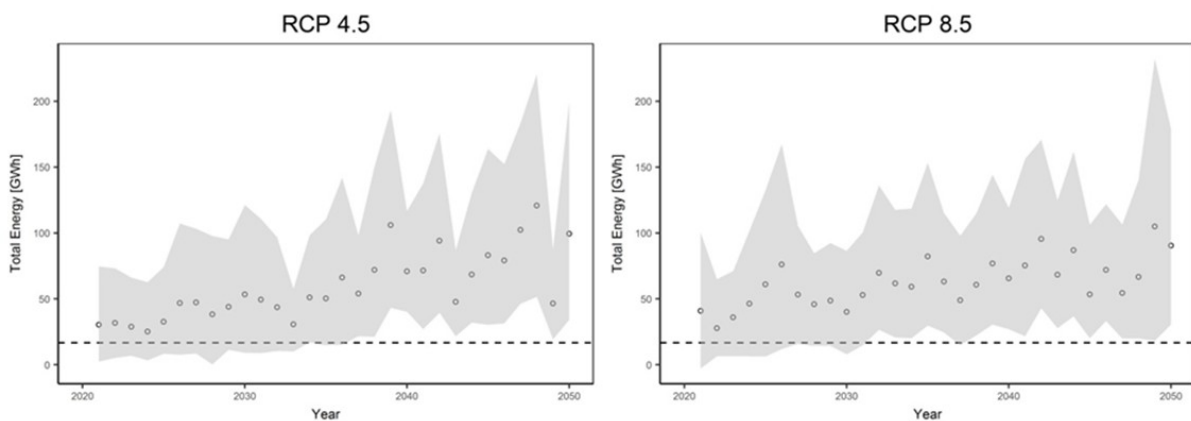


Abbildung 21: Abgeschätzter Gesamtenergieverbrauch pro Jahr für Raumkühlung in Wien für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 (links) und RCP8.5 (rechts) in GWh. Die Punkte repräsentieren die Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert für das Jahr 2016.

Hinsichtlich des jährlichen Spitzenstromverbrauchs zu Kühlzwecken wird ein Anstieg von ca. 65,5 MWh/Tag auf 117 (64 – 191) MWh/Tag im Jahr 2050 erwartet, was umgerechnet ca. einem Faktor von 1,8 entspricht (Abbildung 22).

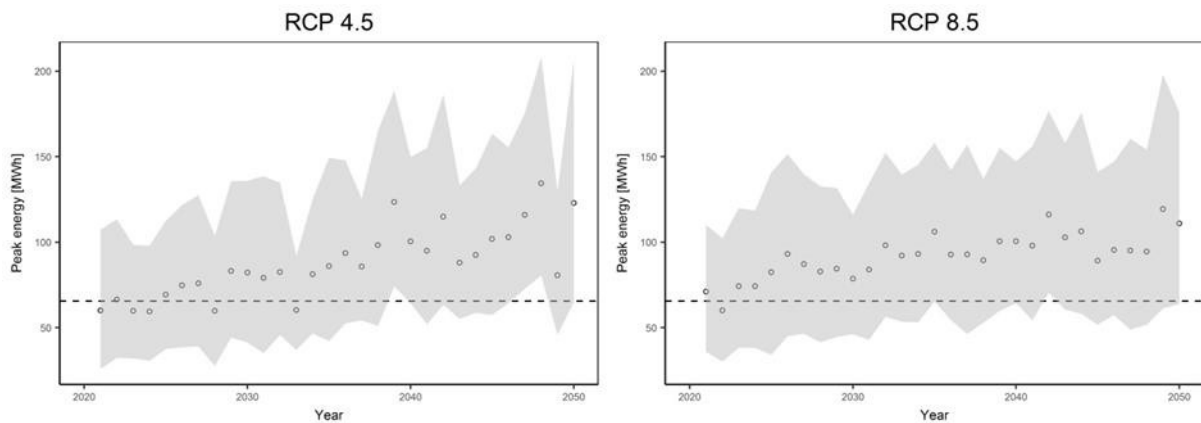


Abbildung 22: Abgeschätzter Spitzenstrombedarf pro Jahr in MWh für Raumkühlung in Wien für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 (links) und RCP8.5 (rechts) in GWh. Die Punkte repräsentieren Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert für das Jahr 2016.

2.2.3 Urbaner Temperaturanstieg verursacht durch anthropogene Wärmefreisetzung aus Klimaanlage

Im Rahmen zahlreicher Studien wurde der Einfluss von Abwärme aus Klimaanlage auf städtische Lufttemperaturen untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien werden im Folgenden diskutiert, wobei die wichtigsten Erkenntnisse in Tabelle 8 zusammengefasst sind. Für Europa untersuchten de Munck et al. (2013) den Temperatureffekt anthropogener Wärmeemissionen aus Klimaanlage in Paris während der Hitzewelle 2003 unter Verwendung von realen Daten aus Klimaanlage und eines TEB Modells. Die Auswahl dieser Zeitperiode kann dadurch erklärt werden, dass globale Klimamodellprojektionen darauf hindeuten, dass die Temperaturen während solcher Hitzewellen repräsentativ für die mittleren Temperaturen während einer Sommerperiode in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sind. Unter der gegenwärtig vorherrschenden Kühllast von Klimaanlage, mit einer freiwerdenden Wärmeenergie von 5,16 GW und unter der Annahme, dass die Abwärme sowohl als fühlbare als auch latente Wärme freigesetzt wird, wurde ein maximaler lokaler Temperaturanstieg von 0,25°C-1°C und eine Intensivierung des UHI-Effektes (+ 0,3°C) festgestellt. Geht man nun von der gleichen Menge an freigesetzter Wärme wie im vorherigen Beispiel aus, jedoch unter der Annahme, dass die gesamte latente Wärme in fühlbare Wärme umgewandelt wird, führt dies zu einem maximalen lokalen Temperaturanstieg von 0,25 – 2°C und zu einer Intensivierung des UHI-Effektes um 0,8°C. In einem Zukunftsszenario, welches von einer Verdoppelung der abgegebenen Wärme ausgeht, und unter der Annahme dass die Wärme zur Gänze als trockene (fühlbare) Wärme emittiert wird, kommt es zu einem maximalen lokalen Temperaturanstieg von 0,25 – 3°C und einer Intensivierung des UHI-Effektes um knapp 2°C.

Jenes Szenario, welches davon ausgeht, dass es zu keiner anthropogenen Wärmefreisetzung aus Klimaanlage kommt, ist auch für das „Photonic Cooling“-Projekt relevant. Simulationen, durchgeführt von de Munck et al. (2013), haben gezeigt, dass unter solchen Bedingungen und unter der Voraussetzung, dass die Kühlleistung im Inneren der

Gebäude auf einem Wert von 10,32 GW gehalten wird (entspricht dem Zukunftsszenario), eine leichte Verringerung des UHI-Effekts auftreten würde (Szenario DRY ACx2¹) verglichen mit dem Referenzszenario, das keine Klimaanlage berücksichtigt. De Munck et al. (2013) stellten fest, dass trotz des Kühlpotentials dieses Szenarios eine Inbetriebnahme der Klimaanlage in den Gebäuden die urbanen Lufttemperaturen tagsüber um nicht mehr als 0,2 °C reduzieren könnte. Aus diesem Grund wird auf eine weitere Diskussion dieser Ergebnisse verzichtet und das Augenmerk auf jene Fälle gelegt, bei der Abwärme aus Klimaanlage frei wird.

Zusätzlich zu einer Veränderung der Intensität der UHI, hat die freigesetzte Wärme auch Auswirkungen auf die räumlichen Strukturen der Wärmeinsel. Eine sukzessive Ausweitung der urbanen Wärmeinsel wird für alle Szenarien (herkömmliche Verwendung von Klimaanlage, Klimaanlage mit Freisetzung von ausschließlich fühlbarer Wärme, Zukunftsszenario) beobachtet. Interessant ist, dass die maximalen Temperatureffekte nachts zu beobachten sind, auch wenn die Wärmeemissionen zu diesem Zeitpunkt auf ein Minimum gesunken sind. Dies kann durch eine flachere nächtliche Grenzschicht und einem damit verbundenen reduzierten turbulenten Austausch erklärt werden, sowie durch thermische Abstrahlung von bzw. zwischen den Gebäuden (urban canyon trapping).

Ein weiterer Fall im europäischen Raum wurde von Salamanca et al. (2012) untersucht, die einen Anstieg der Lufttemperatur bedingt durch die freigesetzte Wärme aus Klimaanlage für Madrid, Spanien simulierten. Unter Berücksichtigung des BEP-BEM Parametrisierungsansatzes, welcher im WRF Modell integriert ist, wurden meteorologische Bedingungen für den 20. Juni und den 1. Juli 2008 simuliert. An beiden Tagen war eine stark ausgeprägte urbane Wärmeinsel vorhanden, was zur Folge hatte, dass die Temperaturen im Inneren der Stadt 5 – 6°C höher waren als jene in der Umgebung. Unter der Annahme einer Zieltemperatur von 25±1°C im Gebäudeinneren und einem Performance-Koeffizienten (COP) der Klimaanlage von 3,5, war der Beitrag der anthropogenen Wärmeemissionen, die von den Klimaanlage freigesetzt wurden, mit 1,5 – 2°C in den dichtesten urbanen Gebieten zu beziffern.

Weitere Studien, durchgeführt für die USA, zeigten ähnliche Resultate. Simulationen des Energieverbrauchs von Klimaanlage als Resultat meteorologischer Bedingungen sowie der Auswirkungen von abgegebener Wärme aus Klimaanlage auf städtische Temperaturen für die Stadt Houston (TX) für 25. und 31. August 2000 zeigten einen maximalen lokalen Temperaturanstieg von 2,0°C für die dicht bebautesten Stadtteile während der Nacht (Salamanca et al., 2011). Der mittlere Gesamtenergieverbrauch der Klimaanlage für Houston betrug 21076 MW h am 25. August und 262607 MW h am 31. August. Die rund 20% Abweichung konnten damit begründet werden, dass die Temperaturen am 31. August (Maximaltemperatur 41°C) im Vergleich zum Monatsmittel

¹ A future projection of AC usage assuming a doubling of the overall power of the heat released over the simulation domain covered only by dry air conditioners. This increase would be mainly due to an increase in usage in the office district. The overall power of the sensible heat released (10.32 GW) is distributed with two thirds in central Paris and one third outside. The distribution is carried out by increasing the power of the grid cells up to what the floor area can allow

(mittleres Temperaturmaximum: 33°C) signifikant höher waren, was wiederum den Einfluss meteorologischer Bedingungen auf den Energieverbrauch von Klimaanlage bestätigt. Für die Stadt Phoenix (AZ) (Salamanca et al., 2014), wurde der Effekt, den die freigesetzte Wärme aus Klimaanlage auf die Temperaturen während des Tages im Zuge einer extremen Hitzeperiode im Juli 2009 hatte, als vernachlässigbar eingestuft. Während der Nacht allerdings, war ein Anstieg der städtischen Temperaturen in Zusammenhang mit emittierter Wärme aus Klimaanlage um mehr als 1°C für gewisse Stadtteile zu verzeichnen. Simulationen für Tokyo (Japan) stehen in Einklang mit diesen Ergebnissen und zeigen einen Anstieg der Lufttemperaturen von 1,0°C – 2,0°C bedingt durch Abwärme aus Klimaanlage (Kikegawa et al., 2003; Ohashi et al., 2007).

Tabelle 8: Überblick über jene Studien, die den Effekt der Wärmeemissionen aus Klimaanlage auf den lokalen Temperaturanstieg (und, sofern vorhanden, auf den UHI-Effekt), schätzten.

| City (study) | AC scenario | Maximum local temperature effect |
|---|---|----------------------------------|
| Paris (de Munck et al., 2013) | Current AC conditions, mix of latent and sensible heat release | +1,0°C (+0,3°C UHI effect) |
| | Same energy consumption as above, only sensible heat release | +2,0°C (+0,8°C UHI effect) |
| | Doubling of energy consumption, only sensible heat release | +3,0°C (+1,9°C UHI effect) |
| Madrid (Salamanca et al., 2012) | Current AC conditions, mix of latent and sensible heat release | +1,5-2,0°C |
| Houston, TX (Salamanca et al., 2011) | Current AC and climatic conditions, only sensible heat release | +2,0°C |
| Phoenix, AZ (Salamanca et al., 2014) | Current AC conditions, only sensible heat release | +1,0°C |
| Tokyo, Ootemachi business district (Kikegawa et al., 2003) | Current AC conditions for office building, ratio of sensible to latent heat 1,0:2,2 | +1,0°C |
| Tokyo, Ootemachi business district (Ohashi et al., 2007) | Current AC conditions | +1,0-2,0°C |

Obwohl in der vorangegangenen Diskussion der Fokus hauptsächlich auf den Auswirkungen der freigesetzten Wärme aus Klimaanlage auf städtische Temperaturen lag, ist erwähnenswert, dass anthropogene Wärmeemissionen auch einen Effekt auf die städtische Luftqualität haben. Ryu et al. (2013) haben gezeigt, dass bedingt durch anthropogene Wärmeemissionen eine Vertiefung der nächtlichen städtischen Grenzschicht und damit verbunden eine Abschwächung der NO_x – Konzentrationen (welche hauptverantwortlich für den Ozonabbau sind) auftritt, wodurch

der chemische Ozonabbau über der Metropole Seoul abnimmt. Das bedeutet in weiterer Folge, dass anthropogene Wärmeemissionen für einen Anstieg der (hauptsächlich nächtlichen) Ozonkonzentrationen und damit verbunden für eine verstärkte Luftverschmutzung in der Stadt verantwortlich sind (Ryu et al., 2013; Jacob, 1999).

Wie bereits in Kapitel 2 diskutiert, ist eine Verallgemeinerung dieser Resultate in Hinblick auf andere Städte nicht trivial. Um dennoch eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurde der Spitzenwert der anthropogenen Wärmeemissionen aus Klimaanlageanlagen (peak Q_{anth}) für alle Fallstudien berücksichtigt. Falls dieser Parameter in der betrachteten Studie nicht angegeben war, wurde er, basierend auf den COPs und dem Energieverbrauch bzw. der Kühllast, unter Anwendung der Gleichungen 4 und 5 berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind Tabelle 9 zu entnehmen, wobei Werte, die mithilfe von Gleichung 4 und 5 gewonnen wurden, grau markiert sind (jene Werte, die direkt aus der Literatur entnommen wurden sind nicht markiert). Aus Konsistenzgründen werden nur Resultate im Zusammenhang mit der Freisetzung reiner fühlbarer Wärme betrachtet, des Weiteren werden nur die maximalen lokalen Temperatureffekte berücksichtigt, da mögliche Effekte auf die UHI nur in der Studie von de Munk et al. (2013) behandelt wurden. Für Tokyo sind keine Ergebnisse verfügbar, da Ohashi et al. (2007) zwar die Hauptannahmen des BEM-Ansatzes präsentierten, jedoch keine entsprechenden Werte für Wärmeflüsse oder EC angaben, und Kikegawa et al. (2003) in ihrer Studie ihren Fokus auf sehr kleine Bereiche legten, die nicht repräsentativ für das gesamte Stadtgebiet waren. Ergebnisse aus Madrid werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da Salamanca et al. (2012) nur die maximale Kühllast für ein einzelnes Gebiet angaben, und zu wenig zusätzliche Informationen vorhanden waren, um daraus eine sinnvolle Bestimmung der Mittelwerte zu ermöglichen.

Tabelle 9: Überblick über die Spitzenwerte anthropogener Wärmeemissionen bedingt durch Klimaanlageanlagen (Peak Q_{anth}), entweder direkt aus den Studien entnommen oder aus den Gleichungen 4 und 5 abgeleitet, unter Berücksichtigung der angegebenen COPs-Werte, der Kühllast (engl. cooling load, CL), des Energieverbrauchs (engl. energy consumption, EC) und des maximalen lokalen Temperatur (MLT) Effekts.

| Study | Peak Q_{anth} (W/m ²) | COP | CL (W/m ²) | EC (W/m ²) | MLT (°C) |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|------------------------|------------------------|----------|
| de Munck (2013), Paris | 18,4* | 2,5 | 13,1 | 5,3 | +2,0 |
| de Munck (2013), Paris | 36,8* | 2,5 | 26,3 | 10,5 | +3,0 |
| Salamanca (2014), Phoenix | 13,7** | 3,5 | 10,6 | 3,0 | +1,0 |
| Salamanca (2011), Houston | 27,0 | 3,5 | 21,0 | 6,0*** | +2,0 |

* Wert wurde anhand des angegebenen Spitzenwerts der anthropogenen Wärmeabgabe (5,16 GW und 10,32 GW für gegenwärtige und zukünftige Klimaanlageanlagen-Szenarien) mittels Division durch die halbe Fläche der Modelldomäne (repräsentativ für jenen Teil der Domäne, in dem Q_{anth} verteilt ist; siehe Abb. 4 in de Muck et al., 2013)

** Wert wurde mittels Q_{anth} (siehe Abb. 10-12) für verschiedene Landnutzungskategorien (low-intensity residential; high-intensity-residential; commercial or industrial) bestimmt und mit Landnutzungsparametern (0,78; 0,21; 0,01) gewichtet. Der COP-Wert wurde in dieser Studie mit 3,5 beziffert, basierend auf früheren Studien desselben Autors.

*** Wert wurde anhand des Mittelwerts von Q_{anth} von zwei Parametrisierungen und 2 Tagessimulationen gewonnen. Das bedeutet, dass der Wert für Q_{anth} in dieser Studie eher einem Mittelwert als einem Spitzenwert entspricht. Um den Wert auf eine Einheitsfläche zu beziehen, wurde das ländliche Stadtgebiet Houston verwendet.

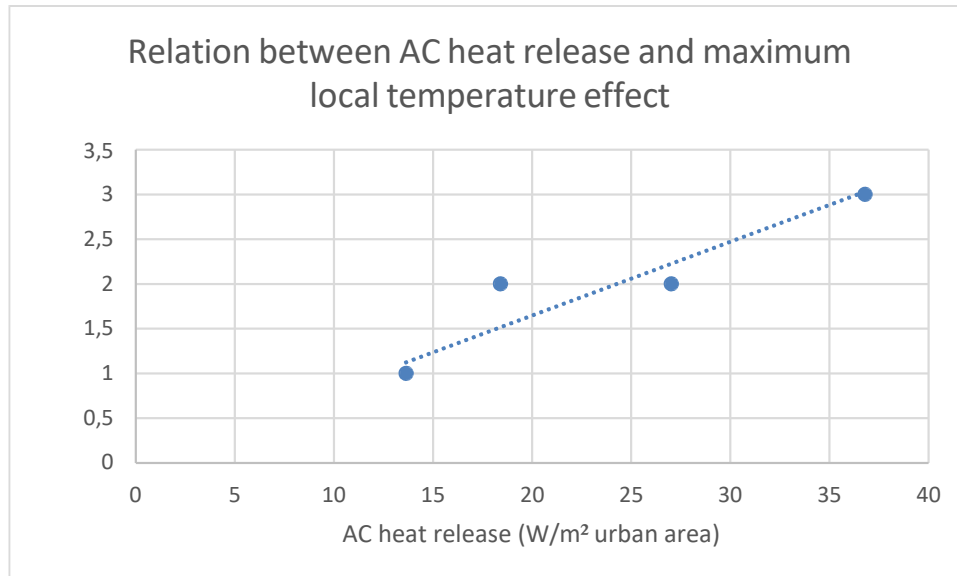


Abbildung 23: Der maximale lokale Temperatureffekt als Funktion der Abwärme aus Klimaanlage für die in Tabelle 9 beschriebenen Studien (Punkte) sowie eine durch den Ursprung verlaufende lineare Trendlinie. Der Zusammenhang zwischen Q_{anth} und MLT wird durch folgenden Ansatz beschrieben: $MLT = 0,08 \cdot Q_{anth}$.

Basierend auf den Informationen aus Tabelle 9 ist es nun möglich, einen Zusammenhang zwischen dem Spitzenwert der anthropogenen Wärmeemissionen von Klimaanlage und dem maximalen lokalen Temperatureffekt herzustellen (siehe Abbildung 23). Wie erwartet, steigt der Temperatureffekt mit steigender Wärmeabgabe und es ist daher – trotz der limitierten Anzahl an Datensätzen – ein linearer Zusammenhang erkennbar. Die Trendlinie, die durch den Ursprung verläuft (basierend auf der Annahme, dass im Falle einer nicht- vorhandenen Wärmeabgabe aus Klimaanlage der Temperatureffekt ebenfalls Null sein muss), wird durch eine gepunktete Linie angezeigt. Damit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen maximaler lokaler Temperatur (MLT) und Wärmefreisetzung durch Klimaanlage (Q_{anth}):

$$MLT(Q_{anth}) = 0.08 \cdot Q_{anth} \quad (7)$$

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass dieses Ergebnis auf der Annahme basiert, dass Q_{anth} ausschließlich als fühlbare Wärme freigesetzt wird. Mit Verweis auf die Ergebnisse von de Munck et al. (2013), kann dieser Zusammenhang als ein oberes Limit betrachtet werden. In dieser Studie wurde gezeigt, dass der MLT-Effekt im Falle eines gemischten Wärmeflusses (latent + fühlbar) geringer war als bei ausschließlicher Betrachtung des fühlbaren Wärmeflusses (siehe dazu auch Tabelle 9).

Eine weitere Einschränkung ist, dass die Spitzenwerte der Wärmeemissionen, die untertags auftreten, mit dem maximalen Temperaturanstieg, der nachts beobachtet wird, verglichen werden. Im Idealfall sollten beide nächtlichen Werte miteinander verglichen werden, um einen direkten Zusammenhang zu gewährleisten. Die nächtliche Freisetzung der Abwärme von Klimaanlage konnte jedoch nicht in allen Studien bestimmt werden. Nichtsdestotrotz ist es wichtig, anzumerken, dass auch ein Anstieg der nächtlichen Temperatur wesentlich dazu beiträgt, das urbane Mikroklima zu beschreiben. So kann eine verringerte nächtliche Abkühlung große gesundheitliche Probleme mit sich bringen und wird daher als Gefahr für die öffentliche Gesundheit betrachtet

(siehe u.a. Souch und Grimmond, 2004).

Basierend auf Zukunftsprojektionen des Spitzen-Energieverbrauchs von Klimaanlagen pro m² (Teil 1.3.1.2), ist es nun möglich, den zukünftigen MLT-Effekt mithilfe von Gleichung 6 abzuschätzen. Unter der Annahme eines COPs von 3,5 und der Bedingung, dass die Wärme ausschließlich als fühlbare Wärme freigesetzt wird, können die Werte in anthropogene Wärmeabgabe pro m² umgewandelt werden und in weiterer Folge als Input für Gleichung 6 verwendet werden. Für die folgende Analyse wurden die Projektionen basierend auf einem maximalen Wachstumsszenario (E_range_m2_max) für ein Ensemble von sieben Modellen (Tabelle 2) für die Periode 2021-2050 herangezogen.

Bevor weitere Untersuchungen durchgeführt werden können, sollte auf eine weitere Einschränkung hingewiesen werden. Um Gleichung 6 herzuleiten, wurde der Spitzenwert der freigesetzten Wärme pro m² Erdgeschossfläche betrachtet, da dieser Wert in der Literatur angegeben war. Um mithilfe der Gleichung die MLT zu berechnen, wurde der Spitzenwert der Wärmeemissionen pro m² gekühlter Bodenfläche als Näherung verwendet. Dies hat zur Folge, dass die in dieser Weise berechnete freigesetzte Wärme unterschätzt werden könnte, was wiederum zu einer Unterschätzung der MLT führen könnte. Diese Differenz kann anhand des folgenden Beispiels verstanden werden, welches die aus Klimaanlagen freigesetzte Wärme eines Gebäudes mit drei Etagen berücksichtigt. In der ersten Etage, die jene Situation abbildet, aus der Gleichung 6 hergeleitet wird, werden die Wärmeemissionen aller drei Etagen der Erdgeschossfläche des Gebäudes zugeschrieben. Im zweiten Fall, allerdings, ist die Erwärmung auf die dreifache Fläche verteilt, was bei der Berechnung der MLT in einer Abschwächung der Wärmespitzen resultiert. Natürlich könnte eine Korrektur vorgenommen werden, beispielsweise durch zusätzliche Annahmen bezüglich der mittleren Anzahl an Etagen der Gebäude in Wien. Unter der Berücksichtigung der großen Anzahl an Annahmen, die im Vorfeld bereits getroffen wurden (z.B. die Schätzung der Erdgeschossflächen aus Literaturangaben oder Annahmen bei der Herleitung von zukünftigen Spitzenwerten von Wärmeemissionen aus Klimaanlagen für die Schätzung der zukünftigen MLT), wurde bewusst auf die Verwendung weiterer Annahmen verzichtet und daher bloß die Möglichkeit einer Unterschätzung der MLT bedacht.

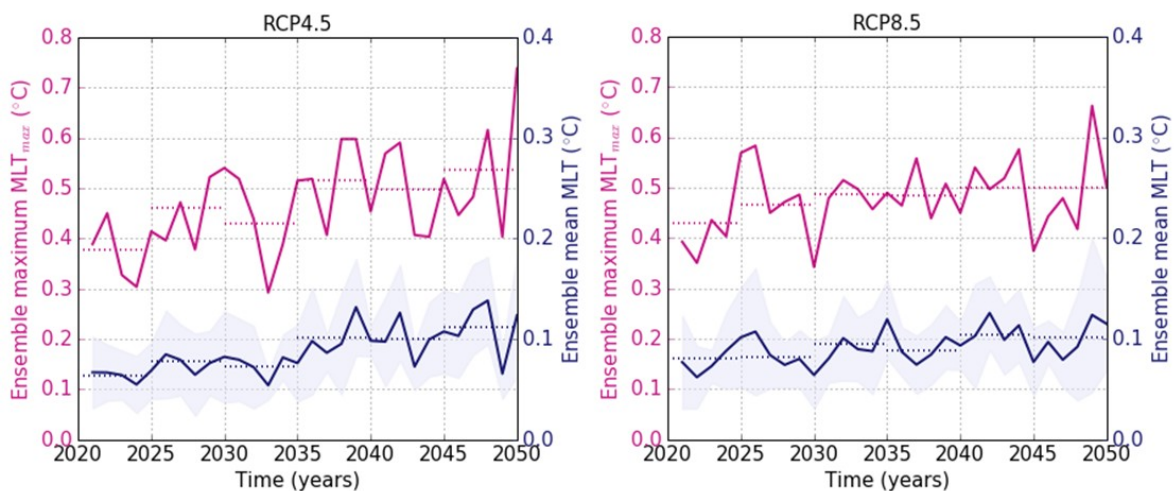


Abbildung 24: Zeitreihen des Ensemblemaximums der jährlichen maximalen MLT (violett, linke Achse) und des Ensemblemittels der jährlichen mittleren MLT sowie der Standardabweichung (dunkelblau, rechte Achse) für RCP4.5 (links) und RCP8.5 (rechts). Die gepunkteten Linien zeigen die über fünf Jahre gemittelten Werte der jeweiligen Kurven.

Die zeitliche Entwicklung der MLT, basierend auf dem Ansatz für die Berechnung des Spitzenwertes der Wärmeemissionen (Teil 1.3.1.2), ist für die Perioden 2021-2050 auf Basis der Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 in Abbildung 24 dargestellt. Die violette Linie zeigt das Klimamodell-Ensemblemaximum der jährlichen maximalen MLT, während die dunkelblaue Linie den Ensemblemittelwert der jährlichen mittleren MLT angibt. Bis zur Mitte des Jahrhunderts zeigen die Kurven für beide Szenarien einen ähnlichen Verlauf, und sowohl bezüglich der jährlichen Mittelwerte als auch der Maximalwerte ist ein steigender Trend zu beobachten. Der größte Anstieg des Ensemblemittels ist für das Szenario RCP4.5 zu verzeichnen, bei dem es zu einer Verdopplung der MLT für die Periode 2046-2050 im Vergleich zur Periode 2021-2025 kommt. Auch die maximale MLT ist für dieses Szenario am größten, mit einem Peak von etwa 0,75°C im Jahr 2050.

Auffallend ist die Ähnlichkeit beider Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für die betrachtete Periode. Diese kann damit erklärt werden, dass im Allgemeinen bis zur Mitte des Jahrhunderts die Entwicklung der beiden Szenarien sehr ähnlich ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts kommt es allerdings zu einem weiteren Anstieg des Strahlungsantriebs für das Szenario RCP8.5, während dieser für das Szenario RCP4.5 weitgehend abflacht. Daher variiert die Intensität der Erwärmung nicht erheblich zwischen den verschiedenen Klimaszenarien für die betrachtete Periode, wie bereits anhand der MUKLIMO-Simulationen in Abbildung 16 zu sehen ist.

Um den Zusammenhang zwischen Hitzebelastung und MLT weiter zu untersuchen, wird die projizierte maximale MLT für die Sommerperiode während der Periode 2021-2050 als Funktion der täglichen mittleren Temperatur für RCP4.5 und RCP8.5 angegeben (siehe Abbildung 25). Kein Temperaturanstieg als Resultat eines erhöhten Gebrauchs von Klimaanlage ist für mittlere Temperaturen unterhalb von rund 18°C zu erwarten. Oberhalb dieses Wertes, erfolgt ein nahezu linearer Anstieg der maximalen MLT bis hin zu mittleren Temperaturen von 32°C. Obwohl beide Projektionen ein ähnliches Verhalten zeigen, wird der Anstieg der urbanen Temperaturen als Folge des Einsatzes von Klimaanlage unter dem RCP8.5 Szenario am höchsten erwartet, mit einer maximalen Temperaturerhöhung von 0,65°C. Im Vergleich mit dem RCP4.5 Szenario ist dieser Wert für mittlere Temperaturen von 32°C, um rund 0,1°C höher.

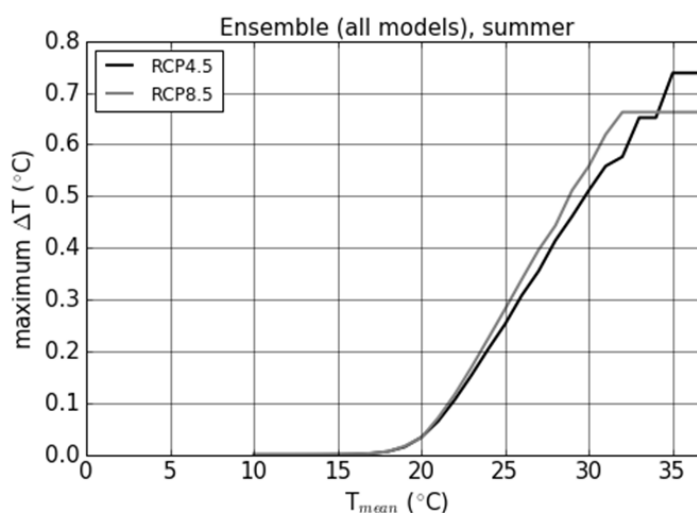


Abbildung 25: Ensemblemaximum der maximalen MLT als Funktion der täglichen mittleren Temperaturen für die Sommerperioden 2021-2050.

Oberhalb dieser Temperaturen gilt der lineare Zusammenhang nicht mehr. Die maximale lokale Temperaturerhöhung als Konsequenz von Wärmeemissionen im Zusammenhang mit Klimaanlage liegt bei ungefähr $0,75^{\circ}\text{C}$ (RCP4.5). Der Zusammenbruch des linearen Trends bei solch hohen mittleren Temperaturen kann damit erklärt werden, dass solche extremen mittleren Temperaturen bis zum Jahr 2050 kaum projiziert werden (angesichts der Tatsache, dass es sich hierbei um tägliche Temperaturmittelwerte handelt, die Maximaltemperaturen daher viel höher sein können), und damit die Statistik verzerren.

Der lineare Zusammenhang zwischen Temperatur-Tagesmittelwerten und maximaler MLT hat zur Folge, dass es während geringer oder mäßiger Hitzetage, nur zu einer mäßigen zusätzlichen Erwärmung der urbanen Canopy-Schicht durch die Verwendung von Klimaanlage kommt. An Tagen mit extremer Hitzebelastung sind die durch Klimaanlage bedingten Wärmeemissionen allerdings erheblich. Daraus lässt sich schließen, dass bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts, unter Berücksichtigung der verwendeten Klimaszenarien und Klimamodelle sowie Klimaanlage-Marktdurchdringungsraten, das Potential von Photonic Cooling für Tage mit hoher Hitzebelastung am stärksten ausgeprägt ist.

Um das Potential von Photonic Cooling weiter zu untersuchen, wird der Effekt einer Verdreifachung der projizierten Klimaanlage-Nutzung unter gegenwärtigen klimatischen Bedingungen (wobei „gegenwärtig“ der Periode 2021-2050 entspricht), bestimmt. In Abbildung 26 erfolgt ein Vergleich mit der Klimaanlage-Nutzung für die Periode 2021-2050. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die maximale MLT unter dem ‚AC usage x3‘-Szenario (Verdreifachung der Klimaanlage-Nutzung) ebenfalls verdreifacht, mit projiziertem Temperaturanstieg als Folge der freigesetzten Wärmeemissionen von mehr als $1,5^{\circ}\text{C}$ für das RCP8.5 Szenario.

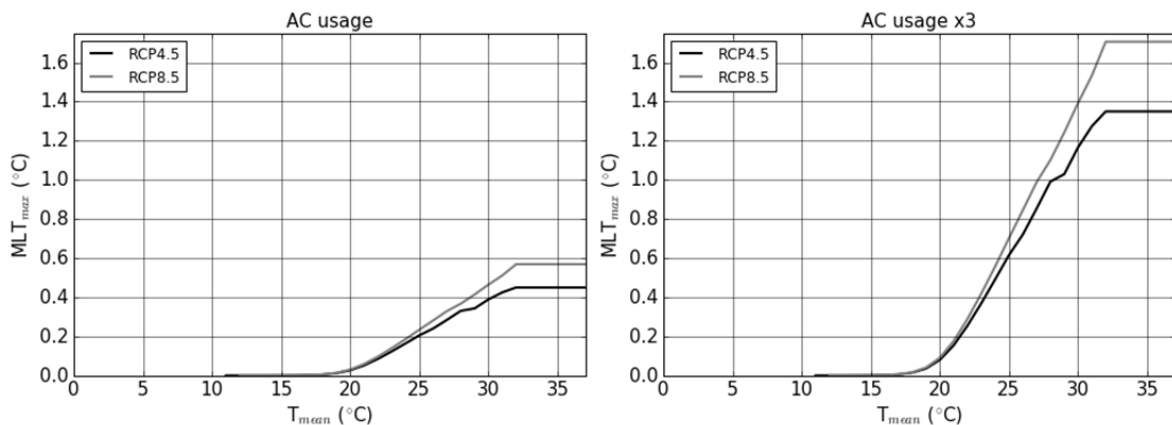


Abbildung 26: Wie in Abbildung 25, jedoch für aktuelle klimatische Bedingungen und Klimaanlagen-Durchdringungsraten (2021-2050) (links) und mit einer verdreifachten Nutzung von Klimaanlagen (rechts).

Neben dem Effekt eines steigenden Bedarfs an Klimaanlagen unter aktuellen klimatischen Bedingungen, ist es interessant, den Effekt des Klimawandels auch nach der Mitte des 21. Jahrhunderts zu betrachten. Obwohl die Marktdurchdringungsrate von Klimaanlagen für diese Periode nicht analysiert wurde, kann das in Abbildung 25 gezeigte Verhalten (die maximale MLT ist höher unter erhöhter Hitzebelastung) zusammen mit der Hitzebelastung in Wien, berechnet für die Periode 2071-2100, für eine qualitative Analyse verwendet werden.

Anhand von Abbildung 27 kann die projizierte Änderung in der Hitzebelastung vom Ende des

20. Jahrhunderts bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für das RCP8.5-Szenario nachvollzogen werden. Wie bereits erwähnt, zeigen die Modellergebnisse für die Periode 2021-2050 nur einen moderaten Anstieg der Anzahl an Sommertagen verglichen mit der Referenzsimulation (1971-2000). Allerdings zeigen die Projektionen für die Periode 2071-2100 verglichen mit 1971-2000 an vielen Orten beinahe eine Verdopplung der Anzahl an Sommertagen, was auf einen bemerkenswerten Anstieg in der Anzahl von Tagen mit großer Hitzebelastung hindeutet.

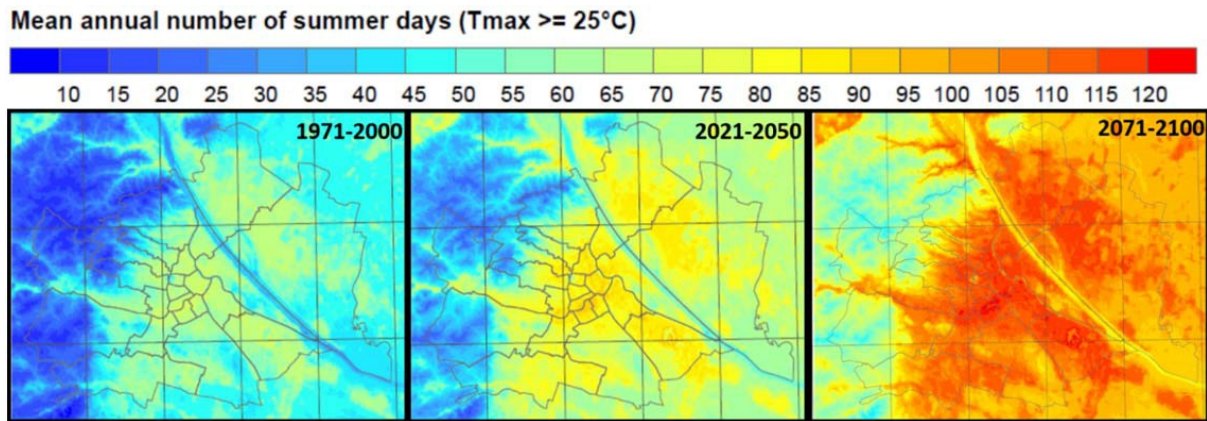


Abbildung 27: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen in Wien, berechnet mit dem urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 und der Kuboidmethode, basierend auf Beobachtungsdaten für die Klimaperiode 1971-2000 (links) und Klimaprojektionen, basierend auf dem RCP8.5-Szenario für die Periode 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (rechts), unter Verwendung eines Ensembles an EURO-CORDEX RCM Modellsimulationen als Input (Quelle: adaptiert von Bokwa et al. (2015), IVF Projekt , Urban climate in Central European cities and global climate change).

Natürlich ist zu erwarten, dass dieser Anstieg in der Hitzebelastung in einer erhöhten Nutzung von Klimaanlage und damit in einer höheren maximalen MLT, verglichen mit der Periode 2021-2050, für dieselben Tagesmitteltemperaturen (entspricht einer Verschiebung der Kurve in Abbildung 26 nach oben) resultiert. Nichtsdestotrotz kann auch ohne Berücksichtigung des Effekts auf die Entwicklung der Durchdringungsrate von Klimaanlage darauf geschlossen werden, dass, sobald die Anzahl an Tagen mit erhöhter Hitzebelastung steigt, auch mit einer Zunahme jener Tage, an denen eine wesentliche zusätzlichen Erwärmung durch die Abwärme von Klimaanlage auftritt, zu rechnen ist.

Basierend auf der Information aus Abbildung 25 und Abbildung 26, als auch der vorangegangenen Diskussion, ist zu erwarten, dass die Erwärmung der städtischen Straßenschluchten als Konsequenz der Wärmeemissionen aus Klimaanlage während der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts weiter zunehmen wird – sowohl hinsichtlich eines Anstiegs der Maximaltemperatur als auch der Anzahl an Tagen, an denen mit zusätzlicher Erwärmung gerechnet werden muss.

2.3 Photonic Cooling

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Abstrahlungsleistung beschrieben. Als Vergleichsgröße diente dafür in erster Linie die elektrische Leistung welche benötigt wurde um den Strahler auf einer vorgegebenen temperatur zu halten. In Tabelle 10 ist eine Übersicht über die wichtigsten Versuche mit dem in Kapitel 1.3.2. beschriebenen Außenmesstand gezeigt:

Tabelle 10: Übersicht über Versuche die mit Testaufbau durchgeführt wurden.

| Datum | Testaufbau (Kurzbeschreibung) | Messzeitraum | Wetterlage (Himmelstemperatur) |
|--------------|--|---------------------|---------------------------------------|
| 29.11.2016 | LowTech-Radiator DA50 in Foil8 | 11:00 – 18:00 | Sunny |
| 30.11.2016 | LowTech- Radiator DA50 in Foil 8 | 11:15 – 17:00 | Sunny (-50 - 60 °C) |
| 05.12.2016 | LowTech- Foil DA50 in bubble wrap | 10:20 – 17:00 | Sunny (-60 °C) |
| 06.12.2016 | LowTech-ParaBowl Setup; Radiator DA50 in bubble wrap | 11:15 – 17:30 | Sunny (-60°C) |
| 09.01.2017 | LowTech-Glasscapillary& reflector; Radiator DA50 BubbleWrap, Foil 8 | 10:15 – 16:30 | Sunny |
| 11.01.2017 | LowTech-Glasscapillary& Reflektor; Radiator DA50 BubbleWrap, Foil 8 | 11:15 – 17:30 | Sunny |
| 19.01.2017 | LowTech- Glasscapillary & reflector; Radiator DA50 BubbleWrap. Changed to Foil 9 & Test influence of direction (North-South) | 09:30 – 16:30 | Sunny |
| 20.01.2017 | LowTech- Glasscapillary & reflector; Radiator DA50 BubbleWrap. Changed to Foil 9 & Test influence of direction (East-West) | 10:00 – 16:30 | Sunny |
| 23.01.2017 | LowTech- Glasscapillary & reflector; Radiator DA50 BubbleWrap. & Test influence of direction (North- South). Tilting of whole set-up → limit contribution of solar irradiance | 11:15 – 16:30 | Sunny |

| | | | |
|------------|---|---------------|---|
| 27.01.2017 | LowTech- Glasscapillary & reflector; Radiator DA50, BubbleWrap. NO FOIL. Test influence of direction (North-South).Tilting of whole set-up → limit contribution of solar irradiance | 10:15 – 16:30 | Sunny |
| 16.02.2017 | LowTech- Glasscapillary & reflector; BubbleWrap. Radiator FOIL 3M (DF 2000M) wrapped around glass capillary. Test influence of direction (North-South).Tilting of whole set-up. | 09:45 – 17:45 | Sunny |
| 18.05.2017 | ThermoBowl, not tilted, DA50, no foil | 11:00 – 17:30 | Sunny, cloudy at noon |
| 19.05.2017 | ThermoBowl, tilted, DA50, Foil 9 | 10:45 – 17:30 | Cloudy |
| 22.05.2017 | ThermoBowl, tilted, DA50, Foil 9; Measurement repeated | 10:15 – 17:45 | Cloudy (-15°C @ 17:00) |
| 29.05.2017 | ThermoBowl, tilted, DA50, Foil 9; | 11:15 – 17:30 | Thin layer of cirrus-clouds (-25°C @ 14:00 -20 °C @ 15:00 -10°C @ 17:30) |
| 30.05.2017 | ThermoBowl, tilted, DA50, Foil 9, directed to NORTH; | 10:30 – 16:30 | In the morning cirrus-like clouds, later more dense clouds (-10°C @ 11:15 -15°C @ 12:45 -15°C @ 14:00 - 5°C @ 15:30 -15°C @ 16:30) |
| 07.07.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DA50, Foil 9, NORTH direction | 10:45 – 14:30 | Humid, cloudy (-26°C @ 10:15 -20°C @ 10:45 11°C @ 12:45 (cloud) ~0°C in the afternoon; thunderstorms all around) |
| 10.07.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DA50, Foil 9, NORTH direction | 12:30 – 16:00 | Cloudy (-12°C @ 12:15 -6°C @ 16:00) |
| 12.07.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DA50, Foil 9, NORTH direction | 11:00 – 17:45 | Cirrus Clouds (-26°C @ 11:15) |
| 20.07.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, NORTH direction | 12:00 – 17:00 | Humid, Cloudy (-10°C @ 12:30 -16°C @ 16:00) |
| 21.07.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction | 11:00 – 16:30 | Humid, Cloudy (-20°C @ 11:00 -17°C @ 12:30 -17°C @ 14:00 -17°C @ 15:00 -6°C @ 16:00) |
| 17.08.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction. Estimation of radiative cooling power | 11:15 - 18:00 | Humid, Cloudy (-24°C @ 12:15 -21°C @ 13:00 -20°C @ 14:00 -23°C @ 15:30 -18°C @ 18:00) |
| 18.08.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction. Estimation of radiative cooling power | 11:00 – 17:45 | Humid (-16°C @ 11:00 -16°C @ 12:15 -15°C @ 13:45 -18°C @ 15:15 -18°C @ 17:00) |

| | | | |
|------------|--|---------------|---|
| 22.08.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction. Estimation of radiative cooling power | 11:30– 18:15 | Sunny, some clouds in the afternoon (-43°C @ 12:40 -40°C @ 14:15 -26°C @ 16:15 -38°C @ 17:30) |
| 23.08.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction. Estimation of radiative cooling power | 11:30 – 16:15 | Sunny (-37°C @ 12:20 -36°C @ 13:30 -34°C @ 14:30 -32°C @ 16:15) |
| 24.08.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction. Estimation of radiative cooling power | 11:30 – 17:00 | Sunny (-21°C @ 13:40 -23°C @ 15:00 -20°C @ 16:15) |
| 25.08.2017 | ThermoBowl, tilted, Peltier implemented, DF2000M, Foil 9, NORTH direction. Estimation of radiative cooling power | 11:30 – 17:00 | Sunny, occasional clouds (-21°C @ 13:40 -20°C @ 15:30 -20°C @ 17:00) |
| 31.08.2017 | Functional Model, DF2000M, located at plateau behind parking lot (WEIZ2). Feasibility study | 14:50 – 17:30 | Sunny (-24°C @ 15:30) |
| 04.09.2017 | Functional Model, DF2000M, located behind WEIZ1. Feasibility study | 11:15 – 17:15 | Sunny |

In Abbildung 28 wird als Beispiel ein Messergebnis vom 30. Mai 2017 gezeigt.

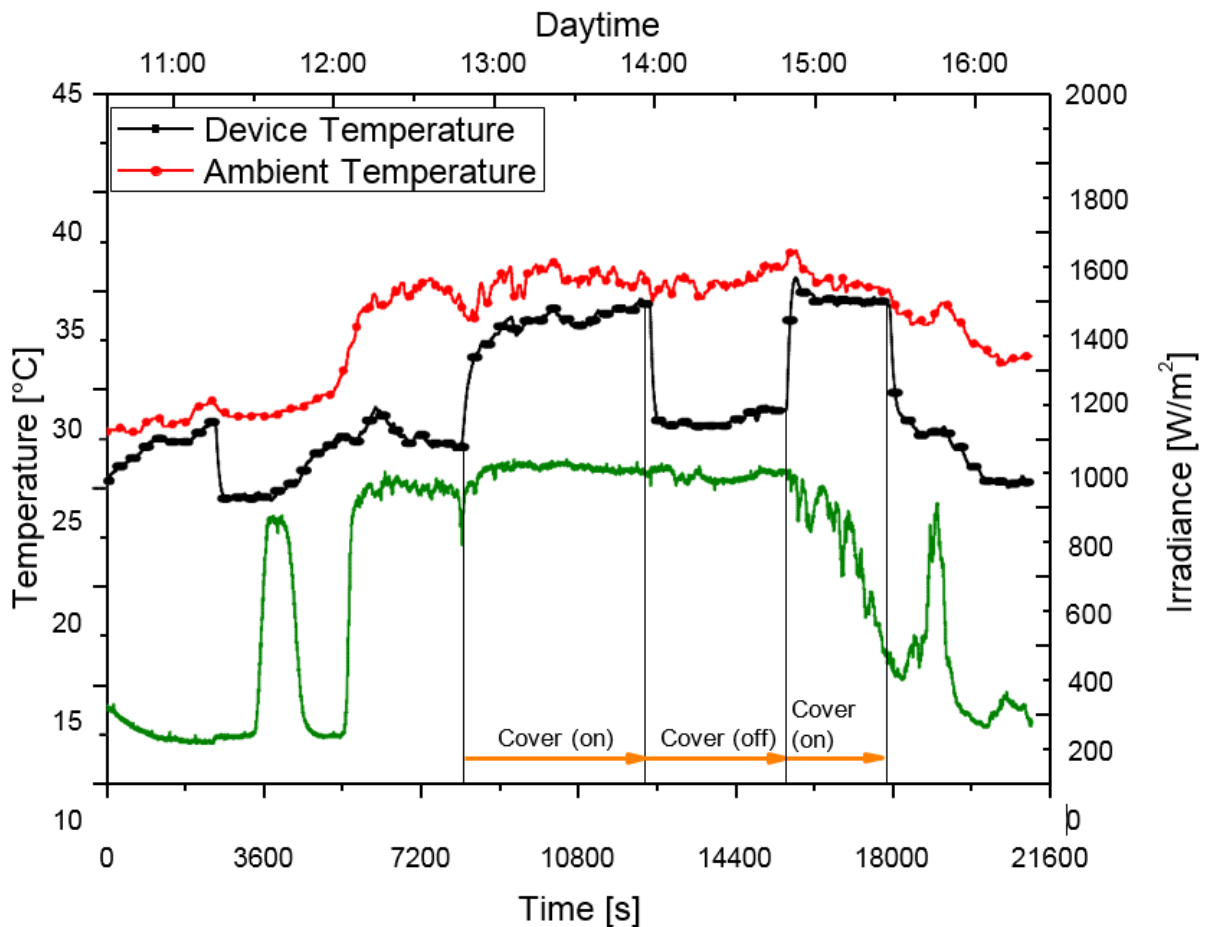


Abbildung 28: Ein Messergebnis generiert mit dem Außenmessstand (siehe Abbildung 14) am 30. Mai 2017 ist gezeigt. Man erkennt, dass die Strahlertemperatur zeitweise um bis zu 10 K unter der Umgebungstemperatur liegt. Wird die Abstrahlung gegen den Himmel durch eine Abdeckung unterbunden steigt die Strahlertemperatur um 5 bis 7 K an.

Dabei handelte es sich um einen klaren sonnigen Tag an dem die Umgebungstemperatur am Ort der Messung auf über 35 °C stieg und für die global horizontale Einstrahlung Werte von über 800 W/m² gemessen wurden. Die Strahlertemperatur des Photonic Cooling Messaufbaus lag zeitweise um bis zu 10 K unter der Umgebungstemperatur. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Messung der Umgebungstemperatur anhand eines Temperaturfühlers erfolgte, der sich neben dem Messaufbau im Schatten befand. Der Vergleich von Temperaturmessungen mit Fühlern an zwei Stellen ist zwar zulässig, jedoch können eine Reihe von Einflüssen die Messergebnisse beeinflussen (z.B. lokale Konvektion). Daher wurde bei den Außenmessungen zusätzlich untersucht, welchen Einfluss das Unterbinden der Abstrahlung in Richtung Himmel (mit einer Abdeckung) auf die Strahlertemperatur hat. In Abbildung 28 erkennt man, dass diese Strahlertemperatur um 5 - 7 K steigt, wenn die Abstrahlung in Richtung Himmel durch einen Strahlblocker (Abdeckung) unterbunden wird.

Ein Beispiel für eine Messung bei der die Strahlertemperatur aktiv mit einem Peltier-Element geregelt wurde, ist in Abbildung 29 gezeigt. Konkret ist ein Fall gezeigt, bei dem die Strahlertemperatur auf 35 °C geregelt wurde und ein weiterer, bei dem die Soll-Temperatur des Strahlers auf 65 °C geregelt wurde. Die elektrische Energie die aufgewendet werden musste, um die Strahlertemperatur auf dem Sollwert zu halten, wurde ermittelt. In den ersten 20 bis 30 Minuten wurde das System ohne Abdeckung betrieben und die eingebrachte thermische Leistung von dem Peltier-Element über Strahlung gegen den Himmel als auch über Leitung und Konvektion an die lokale Umgebung abgegeben. Nachdem der Strahlblocker die Abgabe der Wärmestrahlung gegen den Himmel unterbindet, wird weniger elektrische Energie benötigt, um die Temperatur konstant zu halten.

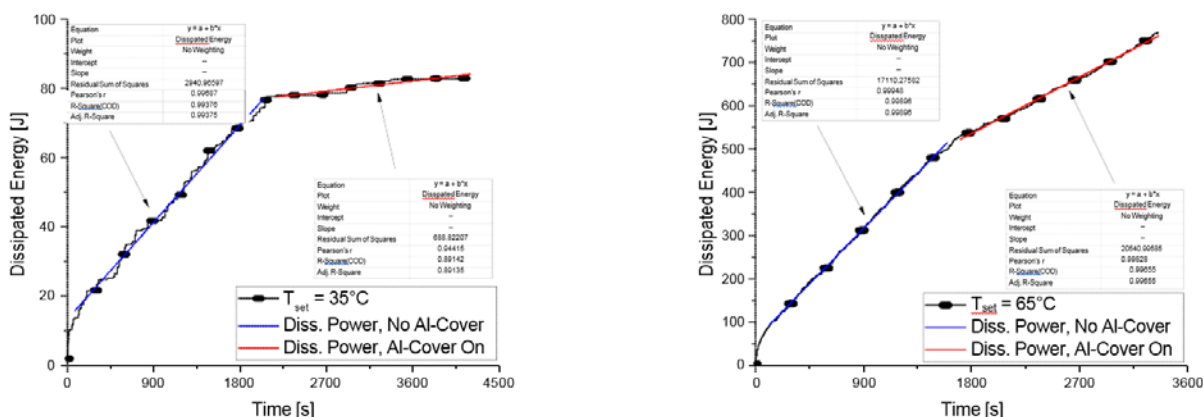


Abbildung 29: Messergebnisse der Außenmessungen, bei denen die Temperatur des Strahlers aktiv mit einem Peltier-Element geregelt wurde. Links ist die kumulativ aufgewandte Energie gegenüber der Messzeit für eine Soll-Temperatur von 35°C gezeigt. Rechts ist dieselbe Konfiguration für eine Soll-Temperatur von 65°C zu sehen.

Der Zeitpunkt an dem eine Abdeckung auf den Strahler platziert wurde, ist als Knick in den Messergebnissen in Abbildung 29 zu sehen. Konkret nimmt die Steigung der kumulativ aufgewandten Energie gegenüber der Zeit ab, wenn eine Abdeckung aufgebracht wird. Diese Steigung entspricht der aufgewandten mittleren Leistung. In Abbildung 30 wird die vom Strahler abgegebene Strahlungsintensität pro Flächeneinheit in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Strahlertemperatur und Umgebungstemperatur gezeigt. Ein Vergleich der

abgegebenen Wärme-Intensität mit und ohne Abdeckung ermöglicht die experimentelle Bestimmung der in den Himmel abgestrahlten Intensität.

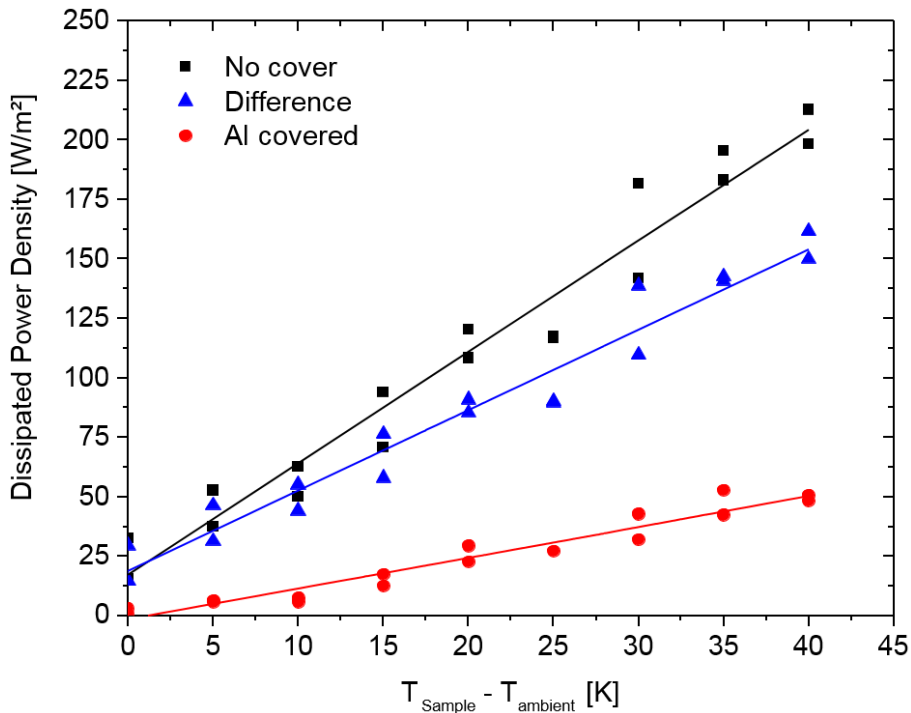


Abbildung 30: Die abgegebene Wärme-Leistungs-Intensität ist für unterschiedliche Soll-Temperaturen (bezogen auf Werte über der Umgebungstemperatur) angegeben. Wenn keine Abdeckung verwendet wird gibt das Peltier-Element die Leistung über Strahlung, Leitung und Konvektion an die Umgebung ab. Mittels der Abdeckung wird die Strahlung gegen den Himmel unterbunden. Die Differenz aus der abgegebenen Intensität (mit/ohne Abdeckung) gibt an wieviel Intensität in den Himmel abgestrahlt wird.

Man erkennt, dass mit dem verwendeten Photonic Cooling Aufbau zwischen 20 und 150 W/m² in den Himmel abgestrahlt wurden. Konkret nimmt die abgestrahlte Leistung linear mit der Strahlertemperatur zu (Zunahme ca. 3 W/m² pro K Temperaturdifferenz). Für eine Abstrahlungsintensität von 60 W/m² müsste also die Strahlertemperatur etwa 15 K über der Umgebungstemperatur liegen.

Die durchgeführten Versuchsreihen und Experimente in AP 3 ermöglichten weiters günstige Ausführungsformen für ein kommerziell nutzbares „Photonic Cooling Gerät“ zu definieren. Dabei spielt der metallische Reflektor eine überaus wichtige Rolle und die interessanteste Ausführungsform basiert auf einem Rohr, welches mit einem zu kühlenden Medium durchströmt wird und das mit einer spektral selektiven Beschichtung (wie z.B. der oben beschriebenen Spiegelfolie) versehen ist (siehe Abbildung 31). Dieses beschichtete Rohr befindet sich wiederum in einem Rohr aus transparentem PE Material, welches durchlässig für Wärmestrahlung ist bzw. den Wärmeaustausch mit der unmittelbaren Umgebung über Leitung bzw. Konvektion behindert. Die Rohre befinden sich in einem parabolisch geformten metallischen Reflektor, wodurch ein strahlender Wärmeaustausch zwischen und dem kalten Nachthimmel gewährleistet wird.

IR transparente Abdeckung (optional)
(Polyethylen, IR transparentes Glas)

gerichtete Abgabe der
Wärmestrahlung

(Metallischer) Reflektor
Parabolische Form
hohe Reflexion im IR

IR transparentes Rohr
(Polyethylen, IR
transparentes Glas)

Rohr mit hoher
Emissivität für
Wärmestrahlung/
optional mit selektiver
Beschichtung

Vorlauf (warm)
Wärmetransportmedium
(Luft, Wasser, Glykol, ...)

Zwischenraum
idealerweise evakuiert

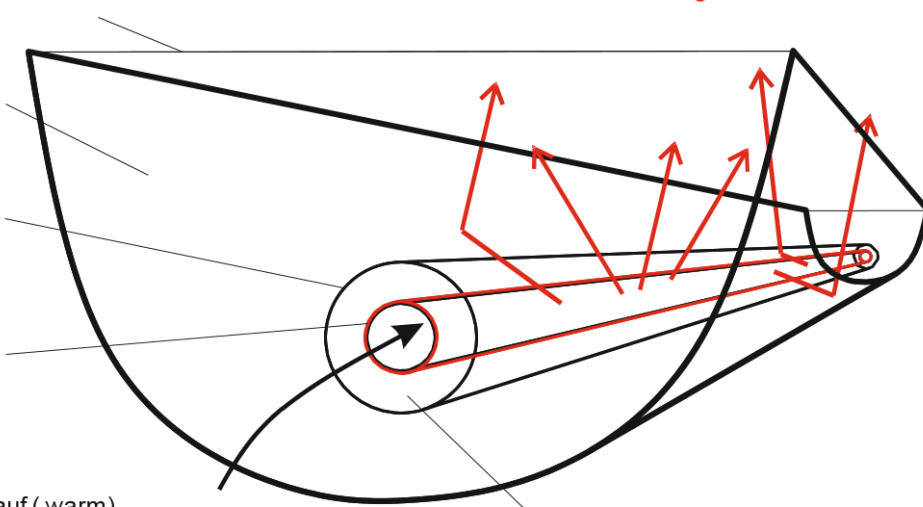


Abbildung 31: Eine auch in kommerzieller Hinsicht vielversprechende Ausführungsform eines „Photonic Cooling“ Aufbaues.

Eine Kostenanalyse für den in Abbildung 31 vorgestellten Photonic Cooling Aufbau wird nun im Folgenden durchgeführt. Konkret wurde zunächst eine Materialliste der dafür benötigten Materialien erstellt und auf Basis einer konservativen Materialkostenschätzung die Höhe der Produktionsgrenzkosten pro m² abgeschätzt. In Tabelle 11 sind die zu berücksichtigenden Materialien und die daraus resultierenden Kosten aufgelistet. Die wesentliche Schlussfolgerung hierbei ist, dass die Herstellung eines Photonic Cooling Gerätes, wie es in Abbildung 31 skizziert ist, zu Kosten von weniger als 50 €/m² prinzipiell möglich ist.

Tabelle 11: Übersicht über die Annahmen und Ergebnisse der Kostenschätzung für einen m² eines Photonic Cooling Aufbaues wie in Abbildung 31 skizziert.

| Material | Menge | Kosten / Menge | Kosten |
|------------------------|--------------------|----------------------|---------------|
| PE Folie | 1 m ² | 0,3 €/m ² | 0,3 € |
| Metallischer Reflektor | 1,5 m ² | 10 €/m ² | 15 € |
| PE Rohr | 2 m | 3 €/m | 6 € |
| Spiegelfolie | 0,3 m | 50 €/m ² | 15 € |
| Anschlüsse | 2 Stück | 3 €/Stück | 6 € |
| Mechanische Halterung | 1 Stück | 7 €/Stück | 7 € |
| Summe | | | 49,3 € |

Abschließend wurde in AP3 ebenfalls versucht ein erstes Funktionsmuster herzustellen, welches auf den im Projekt als wichtig identifizierten Designprinzipien basiert. Dazu wurde die in vorangegangenen Versuchen erfolgreich verwendete dielektrische Spiegelfolie auf ein Stahlblech geklebt und in eine Holzkonstruktion eingelegt, die innen mit Aluminiumfolie ausgelegt wurde um einen Reflektor zu bilden. Die Holzkonstruktion wurde in weitere Folge außen mit Dämmplatten thermisch von ihrer Umgebung isoliert bzw. mit einer weiteren Stahlblechkonstruktion verkleidet. Das Foto des hergestellten Funktionsmusters, mit dem die Außenmessungen durchgeführt wurden, ist in Abbildung 32 zu sehen.



Abbildung 32: Eines im Rahmen des Projektes erstelltes Photonic Cooling Funktionsmuster beim Außentest. Aufnahme vom 04.09.2017, Weiz.

In Außenmessungen mit dem Funktionsmuster konnte zwar eine Abkühlung gemessen werden, jedoch lag die mit nur ca. 1 K deutlich unter den Erwartungen. Der Grund für diese mangelhafte Leistungsfähigkeit konnte in einer nachträglichen Analyse der Ergebnisse und den eingesetzten Materialien identifiziert werden. In Abbildung 33 sind gemessene Reflexionsspektren von Spiegelfolien auf Aluminiumfolie bzw. Stahlblech gezeigt. Offenbar weist das verwendete verzinkte Stahlblech eine deutlich geringere Reflexion im nahen Infrarot Bereich auf als die in den früheren Versuchen verwendete Aluminiumfolie. Das bedeutet, dass die im Funktionsmuster verwendete Strahleroberfläche (Spiegelfolie/verzinktes Stahlblech) die solare Strahlung im Spektralbereich zwischen 1000 und 1700 nm deutlich besser absorbiert als bei einer Strahleroberfläche bestehend aus einer Kombination von Spiegelfolie und Aluminiumfolie.

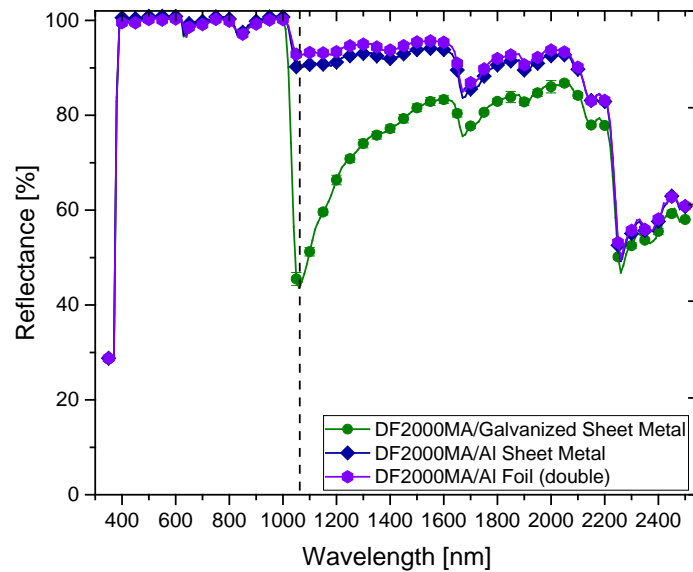


Abbildung 33: Vergleich der ermittelten Reflexionsspektren von Spiegelfolie aufgebracht auf Aluminiumfolie, Aluminiumblech bzw. verzinkten Stahlblech.

2.4 Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energieeinsparung im Gebäude

Für die Analyse der Einsatzmöglichkeiten zur Gebäudekühlung wurde basierend auf Ergebnissen aus Kapitel 2.3 davon ausgegangen, dass das Trägermaterial um 5 K abkühlt bzw. eine Kühlleistung von 50 W/m² erreicht werden kann. Konkret wurden die Möglichkeiten einer sinnvollen Anwendung der Photonic Cooling Technologie in der kommerziellen Klimatechnik untersucht. Diese Untersuchungen betreffen den Einsatz von Photonic-Kühlfläche zur Kühlung eines Bürocontainers als Unterstützung kommerziell verfügbarer Klimaanlage mit dem Zweck, deren Effizienz zu verbessern. Dazu wurde ein Bürocontainer mit einem Photonic-Kühlsystem am Dach geplant und die erreichte Abkühlung und Entfeuchtung des Innenraumes simuliert. Weitere quantitative Untersuchungen betreffen Splitgeräte, eine zentrale Komfortklimaanlage mittlerer Größe für ein Bürohaus, sowie eine Desiccant-Klimaanlage für ein Bürogebäude.

2.4.1 Einsatzfall 1: Einfach-Splitanlage für Einzelraumklimatisierung

Beschreibung Einsatzfall

Einsatzfall 1 bezieht sich auf ein Einfach-Splitgerät, wie es für die Klimatisierung von Einzelräumen verwendet wird (siehe Abbildung 34). Im Außengerät ist der luftgekühlte Kondensator mit dem Kompressor eingebaut, und im Innengerät der „luftgewärmte“ Verdampfer. Am Innengerät tritt die gekühlte Luft an der Vorderseite aus. Im Falle der Kühlung wird je nach Luftfeuchte und -Temperatur der Verdampferlamellen die Kondensationsgrenze unterschritten, sodass eine nicht geregelte, jedoch wirksame Luftentfeuchtung stattfinden kann. Dazu ist für das Abfließen des Kondensates aus dem Innengerät durch geeignete Maßnahmen zu sorgen. Die nachfolgende Tabelle listet die technischen Daten eines typischen Einfach-Splitklimagerätes auf.

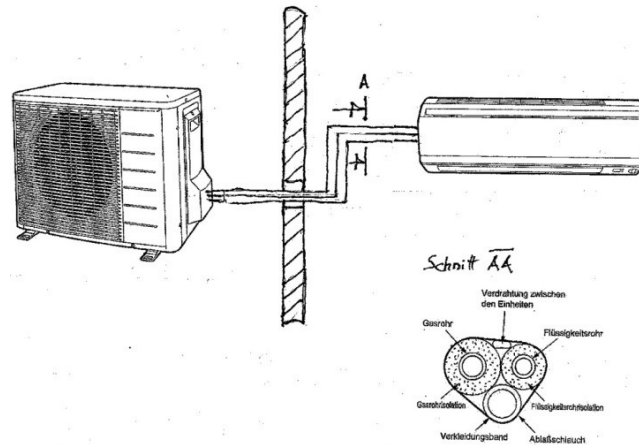


Abbildung 34: Prinzipskizze einer Einfach – Splitanlage 2,5 kW, mit Außen- und Innengerät.

Tabelle 12: Technische Daten eines typischen Einfach-Splitklimagerätes

| Gerät | Preis | SEER/SCOP | Kälteleistung | Heizleistung | Raumgösse | Luftleistung |
|----------|--------------|-------------|---------------|--------------|-----------------|-------------------|
| | | | | | | außen/innen |
| | € | | kW | kW | m ³ | m ³ /h |
| Typ 1 | 1.090 | 6,9/4,0 | 1,3 - 3,3 | 0,8 - 3,7 | 80 | 1800/430 |
| Gerät | Entfeuchtung | Schallpegel | El. Leistung | El. Strom | Netz | Verbindung |
| Inverter | | außen/innen | cool/heat | max | Außengerät | außen/innen |
| | L/h | dBA | W | | mm ² | mm ² |
| Typ 1 | 1 | 49/40 - 28 | 820/810 | 9,5 | 3x1,5 | 5x1,5 |

SEER...Seasonal Energy Efficiency Ratio,
 SCOP ... Seasonal Coefficient of Performance

Ansatz für Photonic Cooling

Der Ansatz für die Nutzung des Photonic Cooling Effekts ist für diesen Einsatzfall, dass die Außenluft, die zur Kühlung des Kondensators einer Splitanlage im Sommer durch einen Ventilator angesaugt wird, durch Photonic-Kühlflächen vorgekühlt wird, und damit unter der Umgebungstemperatur auf die Kondensatorlamellen trifft. Eine Erniedrigung der Kondensationstemperatur bewirkt, dass die EER (Energy Efficiency Ratio) ansteigt. Nachfolgend wird die mögliche Verbesserung der EER berechnet.

Die Kühlluft tritt auf der Rückseite und auf einer Schmalseite des Außengerätes in den Kondensatorraum ein und durchströmt die horizontal angeordneten Kondensatorlamellen, um die Kühlung zu bewirken. Es wird ein vorgegebener Volumenstrom von 1.800 m³/h Luft vom Ventilator durch den Kondensator gesaugt (siehe Tabelle 12).

Um diesen Luftstrom vorzukühlen, muss er unter einer Photonic-Kühlfläche geführt werden, damit Wärme vom Außenluftstrom auf die Platte übertragen und abgestrahlt werden kann. Dies ist über eine Luftführung durch einen Luftkanal unter der gesamten Photonic-Kühlfläche vorstellbar. Generell muss bei der Anordnung der vor dem Kondensator angeordneten

Luftrohrteile, besonders unter den Photonic-Kühlflächen, den Umlenkungen und dem Luftverteiler vor dem Eintritt in das Außengerät auf einen möglichst kleinen Druckverlust geachtet werden.

Für die weitere Berechnung werden die folgenden Annahmen getroffen.

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Photonic-Kühlfläche (5x1m ²) | 5 m ² | |
| Temperaturabsenkung | 5 K | |
| Kühlluftstrom: | 1.800 m ³ /h | |
| Höhe Luftkanal | 0,07 m | (erste Annahme) |
| Außenlufttemperatur | 32 °C | |
| SEER: | 6,9 | (Tabelle 10) |

Luftgeschwindigkeit v im Luftkanal an der Rückseite der Photonic-Kühlfläche aufgrund des vom Splitgerät vorgegebenen Luftvolumensstroms:

$$v = 1800 \text{ [m}^3\text{/h]} / (0,07 \text{ [m]} \times 1 \text{ [m]}) = 25.714 \text{ [m/h]} (= 7,1 \text{ m/s})$$

Mit der berechneten Luftgeschwindigkeit kann die Wärmeübertragungszahl α in [W/m².K], entnommen aus einschlägigen Tabellenbüchern (Dubbel, 1990), berechnet werden (erzwungene Strömung längs ebener Fläche, $v > 5 \text{ m/s}$):

$$\alpha = 6,47 \times v^{0,78} \text{ [m/s]} = 29,85 \text{ [kcal/m}^2\text{h]} \times 1,16 = 34,5 \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]} \text{ (mit } 1 \text{ kcal} = 1,16 \text{ Wh)}$$

Mit der Kenntnis des Wertes für die spezifische Wärmeübertragung bei der durch den Ventilator „erzwungenen“ Luftströmung kann nun die Abkühlung der Luft durch die unterkühlte Photonic-Kühlfläche bestimmt werden. Die auf die Luftströmung übertragene maximale Kühlleistung berechnet sich wie folgt:

$$Q_{\max} = 34,5 \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]} \times 5 \text{ [m}^2\text{]} \times 5 \text{ [K]} = 864 \text{ [W]}$$

Es zeigt sich nun, dass mit den oben gemachten Annahmen zum Luftkanal die durch die Luftströmung unter der Photonic-Kühlfläche mögliche Wärmeübertragungsleistung größer ist als die maximal abgestrahlte Infrarot – Strahlungsleistung von 250 W (50 W/m² bei einer Temperaturdifferenz von 5 K).

Für einen solchen Anwendungsfall müsste das thermodynamische Verhalten der Photonic-Kühlfläche bekannt sein. Man könnte nun annehmen, dass die Temperaturdifferenz von 5 K bei einer Wärmezufuhr aus der Kondensatorzuluft bis zu 250 W konstant bleibt und bei weiterer Leistungssteigerung die Temperaturdifferenz vermutlich sinkt, und sich ein neuer stabiler Arbeitspunkt bei kleinerer Temperaturdifferenz einstellt. Daraus sieht man bereits, dass das Verhalten der Infrarotabstrahlung und die sich daraus ergebende Temperaturdifferenz zur Umgebung, die für jede Anwendung dieser zukünftigen Technologie sehr wichtig ist, sehr wesentlich von der wärmetechnischen Belastung der Photonic-Kühlfläche abhängt. Arbeiten, die dieses thermodynamische Belastungsverhalten der Photonic-Kühlung beschreiben, sind derzeit nicht bekannt.

Um nun diesen Bereich der Unsicherheit für die gegenständliche Abschätzung zu umgehen, wird der Querschnitt des Zuluftkanals für die Kondensatorzuluft soweit erhöht, dass die

Luftgeschwindigkeit sinkt, und nur noch 250 W (50 W/m² bei 5 K) an Wärmeleistung auf die Photonic-Kühlfläche übertragen wird. Dies bedeutet, dass $\alpha = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ werden muss. Dies kann mit einem größer dimensionierten Luftströmungskanal unter der Photonic-Kühlfläche geschehen, wodurch sich die Strömungsgeschwindigkeit der Kanalluft erniedrigt. Die erforderliche Kanalluftgeschwindigkeit ist dann

$$v = (\alpha / (6,47 \times 1,16))^{1/0,78} = 1,44 \text{ m/s} = 5.184 \text{ [m/h]}$$

Bei einer Breite von 1 m beträgt die Kanalhöhe dann nicht wie oben angenommen 0,07 m, sondern 0,347 m. Dadurch sinkt die Luftgeschwindigkeit unter der aktiven Photonic-Kühlfläche von 7,1 m/s auf 1,44 m/s. Vorteilhaft ist dabei auch ein geringerer Druckverlust in den Strömungskanälen vor dem Kondensator.

Die auf den Kühlluftstrom übertragene Photonic-Vorkühlung beträgt nun 250 W. Der Luftstrom von 1.800 m³/h ergibt nun einen Luftmassenfluss von

$$1.800 \text{ [m}^3\text{/h]} \times 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 2.160 \text{ kg/h.}$$

Die Abkühlung dieses Luftstroms beträgt dann

$$\Delta T = 250 \text{ [W]} / (0,29 \text{ [Wh/(kg K)}] \times 2160 \text{ [kg/h]}) = 0,41 \text{ K}$$

Dies bedeutet, dass die durch die Photonic-Kühlfläche vorgekühlte Kühlluft den Kondensator mit ca. 31,6 °C durchströmt.

Mit Hilfe der kältetechnischen Daten nach (Recknagel 2001) kann nun festgestellt werden, dass die Erniedrigung der Kondensationstemperatur um 10 K eine Erhöhung von SEER um ca.1,7 ergibt. Eine Erniedrigung der Kondensationstemperatur von 0,4 K ergibt somit rechnerisch eine Verbesserung des SEER von ca. 0,06.

Das heißt im vorliegenden Beispiel, dass der in Tabelle 10 angegebene SEER von 6,9 für den Typ 1 durch die Photonic –Vorkühlung der Luft von 6,9 auf 6,96 gesteigert werden kann.

Unter Annahme einer Betriebszeit von 8h täglich an 120 Tagen/Jahr und bei Nennkälteleistung von 2,5 kW (Tabelle 10) sind 348 kWh Stromeinsatz erforderlich bei einem EER von 6,9 bzw. 345 kWh Strom bei einem EER von 6,96. Das bedeutet ein Stromeinsparungspotential von 3 kWh oder etwas weniger als 1% pro Jahr.

2.4.2 Einsatzfall 2: Kompressionskältemaschine Bürogebäude

Beschreibung Einsatzfall

Einsatzfall 2 stellt eine konventionelle Komfort-Klimaanlage eines typischen Bürohauses dar. Das Bürohaus hat 1600 m² Nutzfläche und kann 80 Personen inklusive der notwendigen Büroinfrastruktur aufnehmen. Es sind sowohl eine Kühlung als auch eine Entfeuchtung vorgesehen.

Die Kälte wird von einer Kompressionskälteanlage bereitgestellt und auf eine Kühllast von 60 W/m² Nutzfläche ausgelegt (Erfahrungswert). Die gesamte Kühllast ergibt sich somit zu 96 kW. Die Luftaufbereitung sieht die Entfeuchtung von 6.000 m³/h Frischluft mit Eingangsbedingungen von 32°C und 40% rLF (12 g/kg trockener Luft) vor. Die Entfeuchtung

der Frischluft erfolgt an einem Enthalpierotor und durch Abkühlung mit einem Kaltwasser-Kühler im Lüftungsgerät, der ebenfalls von der Kompressionskälteanlage versorgt wird. Die Frischluft wird im ersten Schritt mit einem Enthalpie-Rotor vorkonditioniert. Der Rotor findet im Abluft- und Zuluftkanal folgende Luftzustände vor: Abluftkanal: 26°C/50% (10,5 g/kg); Zuluftkanal: 32°C/40% (12 g/kg). Der Enthalpierotor erreicht erfahrungsgemäß ca. 70 % des Enthalpieunterschiedes, das ist dann 28°C/47% (10,9 g/kg) als Luftzustand der Zuluft nach dem Rotor. Der Rest der Entfeuchtung wird mit einem Kaltwasser-Kühler der Kompressionskälteanlage bis auf 13°C und 90 % rLF (8 g/kg) abgekühlt und das Kondensat abgeführt. Bei diesem Vorgang ist laut Mollierdiagramm eine Enthalpiedifferenz von 24 kJ/kg Luft aufzubringen, was eine Kühlleistung von zusätzlich 48 kW am Kompressionskaltwassersatz erfordert. Die entfeuchtete Zuluft wird dann mit der Überhitzungswärme des komprimierten Kältemittels wieder von 13 °C auf 24 °C angewärmt und als Zuluft in den Zwischenboden gedrückt.

Die gesamte Kälteleistung beträgt somit $96 + 48 \text{ kW} = 144 \text{ kW}$. Die Anlage wird auf 150 kW Kälteleistung ausgelegt.

Die Abbildung 35 zeigt, wo die Komponenten der Klimaanlage in einem Bürogebäude eingebaut sind und miteinander in Verbindung stehen. Die Kältezentrale wird meist im Keller in einem Technikraum untergebracht. Die Kühlmaschine hat im vorliegenden Einsatzfall eine Kälteleistung von 150 kW und liefert einen Kaltwasservor-/Rücklauf von planungsgemäß 6/12°C für Luftaufbereitung und 16/20°C für die Deckenkühlung. Eine Steigleitung im Gebäude aus dem Technikkeller in die zu klimatisierenden Büros versorgt im dargestellten Fall die Kühldecken, die die Kühllast des Gebäudes abdecken. Die Großraumbüros haben eine Zwischendecke, auf die Kühlmatten gelegt sind und einen Zwischenboden, der mit dem Zuluftkanal verbunden ist.

Die Kondensationswärme, das ist die aus den Räumen zu deren Kühlung und Entfeuchtung abgeführte Wärme und die in Wärme umgewandelte Antriebsenergie der Kompressoren, beträgt im vorliegenden Fall 196 kW, und wird über die Rückkühlanlage am Dach des Gebäudes an die Umgebung abgeführt. Dazu sind am Dach Vorrichtungen zur trockenen Rückkühlung vorgesehen. In den Rückkühlleitungen fließt ein Wasser/Glykolegemisch, das den Betrieb ganzjährig, also auch bei Minustemperaturen, ermöglicht.

Im nächsten Berechnungsschritt wird der Luftmengenfluss durch den Rückkühler bestimmt, der vor dem Eintritt in den Rückkühler über Photonic Cooling vorgekühlt werden soll. Aufgrund der technischen Auslegung der Kälteanlage kühlt bei einer Außentemperatur von 32 °C die Rückkühlanlage das Wasser/Glykologemisch von der Eintrittstemperatur von 42 °C auf die Austrittstemperatur von 35 °C ab. Bei der Rückkühlleistung von 196 kW ist dazu ein Rückkühl-Flüssigkeitsmassenfluss von

$$M_{\text{RK},f} = 196.000 \text{ [W]} / (1,16 \text{ [Wh/kg K]} \times 7 \text{ [\Delta K]}) = 24.137 \text{ kg/h}$$

(spezifische Wärmekapazität Wasser 1,16 [Wh/kg K])

Wird nun die stündliche Wärmemenge von 196 kWh auf den kühlenden Luftstrom übertragen, so sind dazu die Eintrittstemperatur der Luft in den Rückkühler und auch die gewünschte Luftaustrittstemperatur festzulegen, um den Rückkühler in seiner technischen Ausführung festzulegen. Bei einer Umgebungs- und Eintrittstemperatur von 32°C ist der Rückkühler so ausgelegt, dass die Luft den Rückkühler mit der Austrittstemperatur von 38°C verlässt. Der notwendige Luftmassenfluss ergibt sich dann wie folgt zu

$$M_{\text{RK},L} = 196.000 \text{ [W]} / (0,28 \text{ [Wh/(kg K)}] \times 6 \text{ [\Delta K]}) = 116.666 \text{ [kg/h] Luft}$$

(spezifische Wärmekapazität Luft 0,28 [Wh/kg K])

Zur Vorkühlung des Rückkühlluftstromes können ca. 14,4 kW Kühlleistung bereitgestellt werden. Die Umgebungsluft kann damit vor dem Eintritt in den Rückkühler beim vorgegebenen Luftvolumensstrom um

$$\Delta T_{\text{ph}} = 14400 \text{ [W]} / (0,28 \text{ [Wh/(kg K)}] \times 116.666 \text{ [kg/h]}) = 0,44 \text{ [K]}$$

Abgekühlt werden. Nach (Rechnagel 2001) kann nun die mögliche Verbesserung des EER berechnet werden mit

$$\Delta \text{EER} = 1,7 \times 0,44 / 10 = 0,075$$

Der EER steigt somit von 2,7 auf 2,775.

Unter Annahme einer Betriebszeit von 8h täglich an 120 Tagen/Jahr und bei Nennkälteleistung von 150 kW sind 53.333 kWh Stromeinsatz erforderlich bei einem EER von 2,7 bzw. 51.891 kWh Strom bei einem EER von 2,775. Das bedeutet ein theoretisches Stromeinsparungspotential aufgrund der erhöhten EER von 1.441 kWh oder 2,7% pro Jahr. Diese Steigerung des EER muss vor einer eventuellen Realisierung der Photonic – Vorkühlung noch den Kosten für die Photonic-Kühlfläche, den Kosten der Luftkanäle und der sturmsicheren Installation, sowie dem erhöhten elektrischen Energieverbrauch durch den Ventilator (erhöhte Druckverluste) gegenübergestellt werden. Eine weitere Berechnung der Luftkanalabmessungen und der Druckverluste in den Kanälen wurde aus Gründen der zu erwartenden geringen Effizienz dieser Anwendung nicht durchgeführt.

2.4.3 Einsatzfall 3: Dessicant-Kühlung

Beschreibung Einsatzfall

Einsatzfall 3 basiert auf einem Bürogebäude mit einer sorptionsgestützten Klimatisierung

(auch Desiccant Evaporative Cooling, DEC). Im Gegensatz zu kaltwassergestützten Klimatisierungssystemen in konventionellen Kompressionskälteanlagen, bei denen die Entfeuchtung durch die Unterschreitung des Taupunktes der Luft realisiert wird, erfolgt bei sorptionsgestützten Klimatisierungssystemen eine Trennung der Prozesse Entfeuchtung und Kühlung. In einem ersten Prozessschritt wird unter Nutzung von Sorptionsvorgängen zunächst die Feuchte der einströmenden Außenluft verringert, im darauf folgenden Schritt erfolgt die Kühlung der Luft, indem Wärme auf die Abluft übertragen wird. Um einen kontinuierlichen Prozessverlauf von sorptionsgestützten System zu gewährleisten, muss eine Regeneration der verwendeten Sorptionsmittel erfolgen. Sowohl die Ab- als auch die Adsorption sind thermisch reversible Vorgänge. Dies ermöglicht die Desorption der beladenen Sorbentien durch die Zufuhr von Wärme (solare Wärme, Biomassewärme oder Abwärme). Den größten Teil der für die sorptive Luftentfeuchtung notwendigen Energie stellt die Desorptionswärme dar. Die dafür notwendige Wärme kann auf einem verhältnismäßig niedrigen Temperaturniveau, in Abhängigkeit der jeweiligen Technologie, im Bereich zwischen 50°C und 80°C genutzt werden.

Die nachfolgende Abbildung 36 beschreibt eine Dessiccant Anlage.

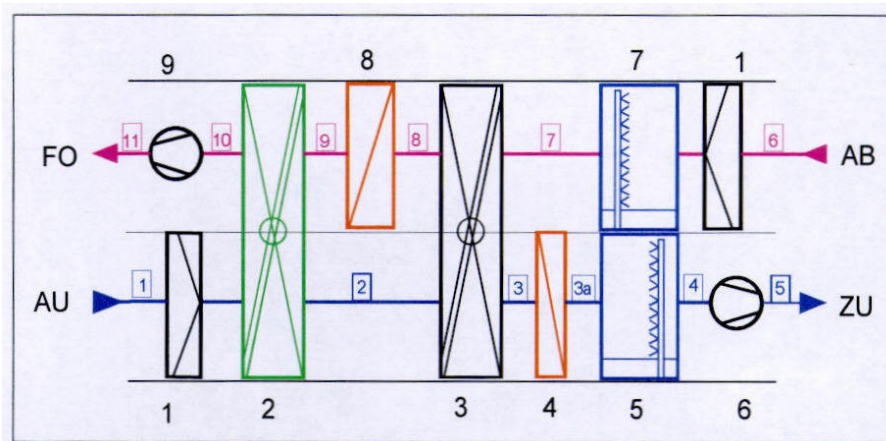


Abbildung 36: Komponenten eines Desiccant-Klimagerätes.

Zuluftseite: 1 ... Luftfilter EU7, 2 ... Sorptionsrad, 3 ... Wärmerückgewinnungsrads (rotierender Rekuperator), 4 ... Nacherhitzer für Heizen im Winter, 5 ... Verdunstungsbefeuchter Zuluft, 6 ... Zuluftventilator, AU ... Außenluft, ZU ... Zuluft.

Abluftseite: 7 ... Verdunstungsbefeuchter Abluft, 8 ... Lufterhitzer zur Trocknung des Sorptionsrades, 9... Abluftventilator, AB ... Abluft, FO ... Fortluft. (Quelle: Endbericht, EU-Projekt ASODECO Funding Nr. FP5-EESD)

Das angenommene Bürogebäude hat eine zu kühlende Fläche von 281 m². Der Einsatzfall basiert auf der Dessiccant Klimaanlage welche in einem Bürogebäude im Ökopark Hartberg verbaut ist (Abbildung 37).



Abbildung 37: Desiccant- Klimaanlage im ÖKOPARK Hartberg, Betrieb seit September 2000 (Quelle: Endbericht, EU-Projekt ASODECO Funding Nr. FP5-EESD).

Aus der Kühllastberechnung ergibt sich für das Gebäude eine abzuführende Kühllast von 20,8 kW. Das Klimagerät selbst hat eine Kühlleistung von 30,4 kW. Zu- und Abluftmassenfluss unterscheiden sich nur geringfügig, sodass der mittlere Luftstrom von 6.000 m³/h für die weitere Betrachtung für beide Kanäle genommen wird.

Für die Anbringung der Photonic-Kühlfläche kommen grundsätzlich sowohl das Gebäudedach als auch eine Überdachung des Desiccant-Klimagerätes in Frage. Am Dach könnten ca. 150 m² an Photonic-Kühlfläche mit einem darunter liegenden Luftkanal aufgebaut werden.

Entsprechend einer groben Abschätzung könnte man im richtigen Auslegungsfall mit einer Abkühlung der Außenluft von 5 K rechnen und eine Kühlleistung von

$$Q_{ph} = 150 \text{ m}^2 \times 50 \text{ [W/m}^2\text{]} = 7.500 \text{ [W]}$$

erwarten. Diese Photonic-Kühlleistung erreicht in vorliegenden Fall etwa 36 % der Gebäudekühllast und könnte somit Prozessgrößen signifikant beeinflussen. Die Luftvorkühlung erfolgt in einem Luftkanal unter den Photonic-Kühlfläche. Es wird die gesamte Breite der Dachfläche von 10 m einfach durchströmt. Die Höhe des Kanals wird so gewählt, dass die Luftgeschwindigkeit im Kanal unter der Photonic-Kühlfläche zu einer solchen Wärmeübergangszahl führt, die dem bekannten Gleichgewichtszustand (50 W bei 5 K) entspricht.

Die erforderliche Wärmeübergangszahl wird nach (Dubbel 1966) ermittelt.

$$\alpha_{ph} = 7500 \text{ [W]} / (5 \text{ [K]} * 150 \text{ [m}^2\text{]}) = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Um nun eine spezifische Wärmeübergangszahl von 10 W/m²K zu erreichen, muss die folgende Luftgeschwindigkeit bei einem vorgegebenen Luftmassenfluss von 6.000 m³/h eingestellt werden.

$$v = \alpha^{1/0,78} / (6,47 \times 1,16) = 10^{1,2821} / 7,5 = 1,6 \text{ [m/s]}$$

Die vergleichsweise niedrige Luftgeschwindigkeit hat auch zur Folge, dass der Druckverlust im Luftkanal niedrig bleibt und den gesamten Druckverlust nicht wesentlich negativ beeinflusst. Die Kanalhöhe ergibt sich dann zu

$$H_{\text{kanal}} = 0,104 \text{ [m]}$$

Erfahrungen mit der Desiccant (DEC) –Klimaanlagen zeigen, dass bei Außentemperaturen über 32 °C sowohl die Kühlleistung des DEC – Gerätes sinkt, als auch die Zulufttemperatur ansteigt. Beides führt dazu, dass die Anlage den Komfortbereich verlässt und sowohl die Raumtemperaturen als auch die relativen Luftfeuchten ansteigen. Mit der Photonic-Außenluftvorkühlung könnte somit der reguläre Einsatzbereich der DEC-Anlage zu höheren Außentemperaturen gehoben werden, oder die Anlage für einen gegebenen Auslegungspunkt verkleinert werden. Ebenso stößt die DEC – Klimatechnik an ihre Grenzen, wenn der erforderliche Luftwechsel aus Gründen zu hoher Luftgeschwindigkeiten in den Büros gesenkt werden muss. Bei solchen Einsatzfällen wird in das DEC - Klimagerät eine elektrisch betriebene Kompressionskühlmaschine eingebaut, um das Defizit an Kühlleistung zu kompensieren.

Bei Vorkühlung der Außenluft um ca. 5 K beginnt die Zustandsänderung der isentropen Lufttrocknung nicht bei 32 °C Außentemperatur, sondern bei 27 °C, und die Endtemperatur dieser Zustandsänderung endet nicht bei 52 °C sondern bei 47 °C. An der anschließenden Zustandsänderung im Wärmerückgewinnungsrad bleibt die rückgewonnene Wärmeleistung gleich, aber der Endzustand der Außenluft liegt nicht bei 27 °C, sondern bei 23 °C. Durch diese tiefere Lufttemperatur nach dem Wärmerückgewinnungsrad sinkt die Leistung des Verdunstungsbeefeuchters geringfügig, aber es wird schließlich auch eine signifikant tiefere

Zulufttemperatur durch den DEC – Prozess erreicht. Ganz grob gesprochen heißt das: Durch Photonic-Vorkühlung der Außenluft könnte der Einbau eines Kompressionskältegerätes in das DEC - Klimagerät in bestimmten Anwendungsfällen entfallen.

2.4.4 Einsatzfall 4: Bürocontainer

Einsatzfall 4 stellt einen Bürocontainer mit einer Bodenfläche von 16,2 m² dar. In die Decke des Containers ist über eine Fläche von 14,5 m² die Photonic-Kühlfläche integriert.

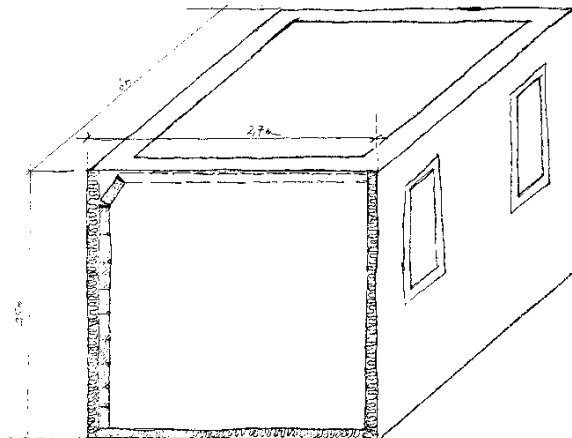


Abbildung 38: Skizze zu dem im Einsatzfall 4 diskutierten Bürocontainer.

Der Einfluss der zunehmenden Verschmutzung der Oberflächen beim Gebrauch der Anlage ist hier nicht berücksichtigt. Es wird weiters angenommen, dass eine vergleichsweise aufwendige doppelschichtige Deckenkonstruktion im Container mit einer abgehängten, wärmegeprägten Zwischendecke verwendet wird.

Für die Kühllastberechnung wird folgendes angenommen:

Die durch den Photonic-Kühleffekt um 5 K abgekühlte Platte ist gleichzeitig die Containerdecke und steht mit dem Innenraum in direkter Verbindung. Dadurch ergeben sich die im Folgenden angeführten Kühllasten.

| | | |
|---|--|-------|
| Transmission Wände | (55,7 [m ²] x 0,44 [W/m ² K] x 8 [ΔK]) | 197 W |
| Transmission Tür | (2 [m ²] x 1,8 [W/m ² K] x 8 [ΔK]) | 29 W |
| Transmission Fenster | (2 [m ²] x 1,8 [W/m ² K] x 8 [ΔK]) | 29 W |
| Luftwechsel (30 m ³ /Pers.h) | (60 [m ³ /h] x 1,2 (kg/m ³) x 0,28 [W/m ² K] x 8 [ΔK]) | 161 W |
| Personenwärme | (100 W/Pers.) | 200 W |
| Geräte | | 100 W |
| Sicherheitszuschlag | (ca. 10%) | 70 W |
| Summe Wärmeeintrag | | 786 W |

Daraus folgt eine spezifische Kühllast von 48,5 W/m². Eine Luftentfeuchtung ist mit dieser Technik nicht möglich. Ausgehend vom angenommenen Luftzustand (Pkt. 4.4.2.3) von 32°C und 40% rLF kann man erkennen, dass bei einer Abkühlung der Containerinnenluft an der Decke um 5 K – was im Idealfall angenommen werden kann – der Abstand zum Taupunkt ausreichen groß ist, sodass Kondensation an der Decke ausgeschlossen werden kann. Kondensation beim genannten Luftzustand tritt erst bei einer Abkühlung auf ca. 17 °C auf.

Die erreichbare Photonic-Kühlleistung lässt sich wie folgt berechnen:

$$Q_{ph} = 14,5 [m^2] \times 50 [W/m^2] = 725 [W]$$

Bei den getroffenen Annahmen befinden sich der Photonic-Kühleffekt und der Wärmeeintrag im akzeptablen Gleichgewicht. Es wird daher für die weitere Bearbeitung angenommen, dass die Unterseite der Photonic-Kühlplatte um 5 K kühler ist als die umgebende Luft. Der Abstand der wärmegeprägten Zwischendecke von der Photonic-Kühlplatte wird für die weitere Rechnung mit 0,1 m angenommen, wodurch die Auslegung des Ventilators für den Kühlluftstrom möglich wird. Bei einer Außentemperatur von 32 °C erreicht die Photonic-Kühlplatte entsprechend dem derzeitigen Entwicklungsstand 27 °C. Nimmt man nun weiter an, dass zur Wärmeübertragung im Mittel über die Länge der Photonic-Kühlplatte eine Temperaturdifferenz von 2,5 K zugelassen wird, so benötigt man eine spezifische Wärmeübergangszahl von

$$\alpha = 725 [W] / (2,5 [K] \times 14,2 [m^2]) = 20,4 [W/m^2K]$$

für die Wärmeübertragung von 725 W aus der vorbeiströmenden Luft auf die Photonic – Kühlplatte, die dann anschließend in den Büroraum über Öffnungen mit Klappen geführt

wird. Die an der Photonic-Platte abgekühlte Luft tritt somit mit 27 °C in den Containerbereich ein. Die errechnete Wärmeübergangszahl wird mit einer entsprechenden Luftgeschwindigkeit und einem Luftmassenstrom erreicht. Diese Luftgeschwindigkeit errechnet sich nach (Dubbel 1966) zu

$$v = (\alpha - 5,3) / 3,6 = 4,19 \text{ [m/s]}$$

(erzwungene Strömung längs ebener Flächen für Luftgeschwindigkeiten < 5m/s)

und der Luftmassenstrom bei einer Kanalhöhe von 0,1 m und Breite des Luftkanals von 2,7m:

$$m_L = 2,7 \text{ [m]} \times 0,1 \text{ [m]} \times 4,19 \text{ [m/s]} \times 3.600 \text{ [s/h]} \times 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 4.887 \text{ [kg/h]} (= 4.072 \text{ [m}^3\text{/h]})$$

Durch den Wärmeeintrag in dem Container erwärmt sich die Kühlluft auf dem Weg zu den Einlassöffnungen in die Zwischendecke wieder auf 32 °C. Im Container findet man nun abhängig vom gewählten Messpunkt Raumtemperaturen zwischen ca. 28°C und 31°C bei Luftfeuchten von mehr als 40 %, wenn die Feuchteabgabe der Menschen im Container berücksichtigt wird. Die fehlende Entfeuchtung dieser Kühltechnik führt zu absoluten Raumlufffeuchten von mehr als 12,5 g/kg trockener Raumluff, was bereits außerhalb des Komfortbereiches liegt und die Arbeit unter solchen klimatischen Bedingungen spürbar erschwert.

Der vergleichsweise hohe Luftmassenstrom von ca. 4.000 m³/h ist durch die niedrige Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung erforderlich. Bei weiteren Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit dieses Kühlverfahrens müssten des weiteren auch die Aufwendungen für diesen Luftmassenstrom bewertet werden.

2.5 Diskussion der Ergebnisse

2.5.1 Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien

Es gibt derzeit vielen Studien die sich mit dem Thema des zukünftigen Kühlbedarfs in Europa und Österreich bei sich verändernden Klimabedingungen beschäftigen. Diese sind entweder „bottom up“ geprägt und basieren auf Gebäudecharakteristika, AC- Penetrationsrate, Kühlgradtage etc., oder sind wie in dieser Studie „top down“ orientiert. Eine Übersicht zu den erzielten Ergebnissen der jeweiligen Ansätze liefert Tabelle 13.

In Bottom-up-Studien wird generell der spezifische Energiebedarf (kWh / m^2) für ein Gebäude modelliert und dieser Wert mit der Gesamtwohnfläche eines Landes und einer Schätzung der AC-Penetrationsrate multipliziert. In ihrer Österreich-spezifischen Studie verweisen Berger et al. (2014) in einer “bottom up” Studie mit Gebäudeinventurdaten für Wien auf einen Nettokühlbedarf im Jahr 2025 von $36,9 \text{ kWh/m}^2$, die Studie sagt aber nichts in Bezug auf die zu kühlende Fläche aus. Der Anstieg des Kühlbedarfs hat dabei einen Faktor 2,6 bzw. 1,7 gemessen am Spitzenstrombedarf. Allerdings wird wie bereits erwähnt nicht auf den zu erwartenden Anstieg der zu kühlenden Fläche eingegangen. Müller et al. (2014), ebenfalls eine “bottom-up” Studie, zeigt, dass der Strombedarf zu Kühlzwecken in Österreich und in Übereinstimmung mit anderen Studien $36,8 \text{ kWh/m}^2$ beträgt und eine Zunahme des zu kühlenden Flächenbedarf 25,6 Mio. m^2 (Kühlbedarf = $0,94 \text{ TWh/Jahr}$) erwarten lässt. Bei sich veränderndem Klimaverhältnissen steigt dieser Wert um 33-55% bis ins Jahr 2050 an, wobei dieser Ansatz Kühlung und ansteigende Kühlfläche beinhaltet.

In europaweiten Studien schätzen Persson und Werner (2015) sowie Werner (2016), dass im Jahr 2010 der durchschnittliche spezifische Kältebedarf in Österreich 49 kWh/m^2 mit 452 Mio. m^2 Nutzwohnfläche und einer durchschnittlichen AC-Durchdringung von 5% betrug, wobei insgesamt $1,6 \text{ TWh} / \text{Jahr}$ für die Kühlung notwendig waren. Daraus ergibt sich ein tatsächlicher Kühlbedarf von $3,6 \text{ kWh/m}^2$. Wie in Werner (2016) ausgeführt, verwendeten die Autoren Energieschätzungen aus Fernkälteanlagen zur Berechnung des spezifischen Kühlbedarfs im Dienstleistungssektor (kWh/m^2). Sie gingen in weiterer Folge davon aus, dass die wohnungsspezifische Kühlnachfrage 45% des Dienstleistungssektors ausmacht, und verwendeten eine AC-Penetrationsrate von 17% bzw. 6% für den Dienstleistungs- und Wohnbereichssektor. Odyssee (2017) schätzte für den privaten Sektor den Stromverbrauch für die Kühlung im Jahr 2015 auf $0,08 \text{ TWh}$ bei einer AC-Penetrationsrate von 0,88% ($0,2 \text{ kWh/m}^2$) ein.

Bei den „top down“ Studien zeigen Werner (2016) für 2010 einen durchschnittlichen Kühlbedarf in Österreich von 71 kWh/m^2 für 23 Mio. m^2 Kühlfläche und $1,6 \text{ TWh/Jahr}$ Energieaufwand. Jakubcionis and Carlsson (2017) berechnen, dass die Marktdurchdringen von Kühlgeräten und der Kühlbedarf um 58% und $3,4 \text{ TWh/Jahr}$ ansteigen könnte, allerdings ohne Einbeziehung des Klimawandels und unter der Annahme, dass sich Österreicher in ihrem Wohnverhalten hier wie US Amerikaner verhielten.

Die Ergebnisse hier beziehen sich auf einen Top-down Ansatz und spiegeln eher die Ergebnisse des derzeitigen Stromverbrauchs bei Temperaturen über 20°C dar. Gemäß unserer Methode erreichen wir Ergebnisse für den Gesamtenergiebedarf zur Raumkühlung in

Österreich von 0,20 kWh/m² zwischen 2010 und 2020 – also fast um das 10fache niedriger als der im „Bottom up“ Ansatz ermittelte Wert. Der Grund dafür liegt in folgenden Punkten begründet:

1. Derzeitiger Bestand der Klimaanlage beträgt ca 1/8 des Potentials (EURAC, 2014)
2. In unserer Studie bestimmen wir den Stromverbrauch über 20°C. Daher sind alle Kühlzwecke unterhalb dieser Temperaturen (Kühlschränke, Klimaanlage in Bürogebäuden mit Fenstern die nicht geöffnet werden können) nicht inkludiert.

Vergleichen wir unsere Ergebnisse mit den zwei Top-Down-Ergebnissen von Bachner et al. (2013) und Damn et al. (2016), so ist wenig überraschend unsere Schätzung des aktuellen Verbrauchs treffender.

Unsere Abschätzung für den Anstieg des Stromverbrauchs ist größer, weil wir ebenfalls den Klimawandel und somit einen zusätzlichen Anstieg mitberücksichtigt haben, der bei den beiden vorher erwähnten „top-down“ Ansätzen jeweils unberücksichtigt bleibt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Zusammenfassung der bottom-up Studien

| „Bottom-up“ Ansätze | | | |
|----------------------------------|--|--|--|
| Studie | Österreich (Jahr) | Auf Wien bezogene Werte | Anstieg bis 2050 |
| Berger et al. (2014) | Nicht spezifiziert | Nicht spezifiziert – Ergebnisse in m ² | 260% (ohne ansteigende Verbreitung durch den Klimawandel) |
| EC (2016) | 0,1 TWh (2012) | 0,020 TWh | Nicht spezifiziert |
| EURAC (2014) | Aktuell – 1,3 TWh (jahresunspezifisch) Potential – 8 TWh | 0,26 TWh | Nicht spezifiziert |
| Jakubcionis & Carlsson (2017) | 3,4 TWh - Potential (Annahme eines US Verhaltens) | 0,68 TWh | Nicht spezifiziert |
| Müller et al. (2014) | 0,94 TWh (2008) | 0,19 TWh | 33% - 55% 0,06 – 0,10 TWh (mit ansteigender Verbreitung durch den Klimawandel) |
| Odyssee (2017) | Wohnbereich 100 GWh (2015) (nur 1 signifikantes Ergebnis gegeben) | 20 GWh | Nicht spezifiziert |

| Persson et al. (2015) und Werner (2016) | 1,6 TWh (2010) 1) Annahme 15% AC-Penetration im Dienstleistungssektor 2) Annahme wohnungsspezifische Nachfrage 3) Abschätzung der AC-Penetration im Wohnsektor ist 2 x größer als die Schätzung von Odyssee (2017) | 0,33 TWh | Nicht spezifiziert |
|--|---|----------------------------|--|
| „Top-down“ Ansätze | | | |
| Studie | Österreich (Jahr) | Auf Wien bezogene Werte | Anstieg bis 2050 |
| Bachner et al. (2013) | 60 GWh (1960-90) 108 GWh (2011-30) 146 GWh (2030-2050) | 12 GWh 23 GWh 32 GWh | 15 GWh (ohne ansteigende Verbreitung durch den Klimawandel) |
| Damn et al. (2016) | 0,07 TWh (2010-2013) | 15 GWh | 133 GWh (95%) (ohne ansteigende Verbreitung durch den Klimawandel) |
| Diese Studie | 0,30 TWh (2015) | 59 GWh (2015) | 95 GWh im Durchschnitt 189 GWh (als Obergrenze bei 95%igem Vertrauensintervall) |

Die Ergebnisse dieser Studie basieren auf einer Top-Down-Methode, die mehr auf den tatsächlichen Stromverbrauch für Temperaturen jenseits der 20 ° C widerspiegelt. Dabei schätzen wir, dass die Gesamtenergie für die Kühlung in Österreich für 2010 und 2015 0,06 TWh bzw. 0,30 TWh (bzw. 0,1 und 0,4 kWh/m²) beträgt. Diese Werte sind fast um eine Größenordnung geringer als viele der in anderen Bottom-up Ansätzen erzielten Ergebnisse. Sie entsprechen aber dennoch den Ergebnissen von Odyssee (2017). Der Grund für die Diskrepanz wird im letzten Abschnitt näher beleuchtet.

2.5.2 Unsicherheitsquellen

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen, dass die Unsicherheiten in den Berechnungen mit einem 95%igen Vertrauensintervall recht hoch sind. Drei Hauptfaktoren bewirken diese Unsicherheiten

- 1) Die Raumnutzfläche in Wien
- 2) die Vorhersagen von $Slope_{max}$ infolge der Regression und
- 3) die Mittelwertbildung der Klimamodelle.

Die Berechnung der Raumnutzfläche in Wien erfolgt vereinfacht, nämlich als Konstante multipliziert mit der zukünftigen Bevölkerung was zu einen zugehörigen Fehler von $\pm 7\%$ führt.

Für die Gesamtenergie hat die Vorhersage von $Slope_{max}$ aufgrund der Regression einen Fehler von $\pm 28\%$, daher betragen die prognostizierten Energieschätzungen für jedes Klimamodell $\pm 35\%$. Hinzu kommen die Unsicherheiten der Klimamodelle. Indem wir einen Ensemblemittelwert nehmen, führen wir eine weitere Unsicherheit von 28% ein. Somit beträgt der Gesamtfehler in jeder Schätzung $\pm 63\%$. In Wirklichkeit ist die Unsicherheit nicht symmetrisch (Abbildung 21). Der Gesamtfehler für die jährliche maximale Spitzenenergie pro Tag ist außerdem etwas geringer ($\pm 56\%$).

2.5.3 Angemessenheit der Methode: ausgeschlossene Daten, Korrektur des Verbraucherverhaltens und ökonomische Einflüsse

Es ist sehr schwer, den Fehler, der durch die Schätzung der zukünftigen Bevölkerung von Wien oder durch die Mittelung der Klimamodelle verursacht wird, zu reduzieren, aber die große Unsicherheit bei der Abschätzung von $Slope_{max}$ stellt die Angemessenheit der Methode in Frage.

2.5.3.1 Ausgeschlossene Daten

Ein Problem der Datenqualität stellt der Umgang mit der Reduktion des Stromverbrauchs in den Sommermonaten während der Haupturlaubszeit dar. Abbildung 39 zeigt die tägliche Temperatur und den Stromverbrauch für zwei Länder (Österreich und Spanien). Beide Daten zeigen einen signifikanten Rückgang des Stromverbrauchs zwischen dem 15. Juli (Tag 197) und dem 29. August (Tag 242). Damm et al. (2016) haben in ihrer Studie die Daten geglättet, um diesen "Umstand" zu berücksichtigen. In der hier vorliegenden Untersuchung wurden diese Daten zwar nicht separat herausgerechnet bzw. geglättet, jedoch in weiterer Folge auch nicht in die Analysen einbezogen. Diese Daten treten jedoch auch ungefähr zur Zeit der maximalen jährlichen Temperatur auf, so dass eine Verwendung dieser Daten nach einer gewissen Form der Korrektur die Regression sogarverstärken können.

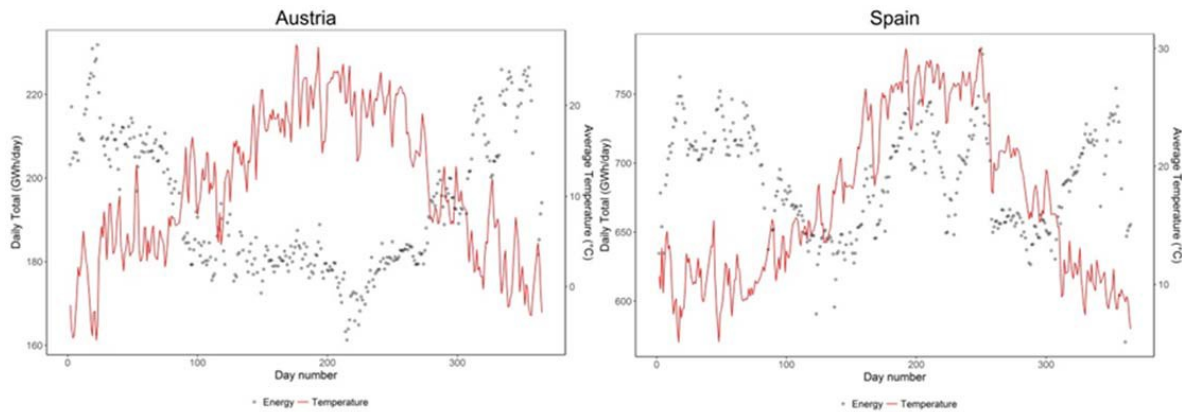


Abbildung 39: Täglicher Gesamtstromverbrauch und Durchschnittstemperatur 2016 für Österreich (links) und Spanien (rechts). Die Daten zeigen einen signifikanten Rückgang der Elektrizität von Tag 200 bis 250 aufgrund von Urlaubszeit in den Sommermonaten und der geringeren Wirtschaftsleistung.

2.5.3.2 Korrektur des Verbraucherverhaltens

Wie bereits zuvor erwähnt, verwenden „Bottom-up“- Ansätze im Allgemeinen zur Berechnung des Energiebedarfs, welcher zum Kühlen benötigt wird, eine Multiplikationsrechnung der folgenden drei Komponenten:

- a) der modellierte spezifische Energiebedarf (kWh/m^2) für ein Gebäude bzw. für mehrere Gebäude
- b) die Gesamtwohnnutzfläche in einem Land und
- c) die AC-Penetrationsrate

Die letzte Komponente wird oft als Besitzrate von AC-Anlagen herangezogen. Dies kann jedoch den Energiebedarf deutlich überschätzen, da zumeist eine Korrektur des Verbraucherverhaltens nicht erfolgt.

Es gibt räumliche und zeitliche Komplikationen, die sich auf das Verbraucherverhalten auswirken und möglicherweise nicht in Umfragen - insbesondere Umfragen im Wohnbausektor - erfasst werden. So wurde z.B. 2010 im österreichischen SBFI - Survey berichtet, dass 4% der Haushalte eine AC - Einheit besitzen, wobei es sich bei der Mehrheit allerdings um Einzelzimmeranlagen (S. Schwarzinger, persönliche Mitteilung) handelt, die allerdings nur zur Kühlung eines bestimmten Raumes verwendet werden (z.B. Schlafzimmer). Dies führt in weiterer Folge zu einer räumlichen Fehlinterpretation. Daher kann die Verwendung der Eigentumsquote als Indikator für die AC-Penetration und deren Multiplikation mit der Gesamtwohnnutzfläche des Landes den Energiebedarf deutlich übersteigen (z.B. um einen Faktor von 5 bis 10, je nach betrachteten Beispiel-Haushalt).

Zwei Arten zeitlicher Komplikationen können zusätzlich das Verbraucherverhalten beeinflussen: 1) eine verzögerte AC-Geräteverwendung und 2) eine zeitgemittelte AC-Verwendung. Im ersten Fall haben ältere Gebäude in Österreich tendenziell dicke Wände mit hoher thermischer Masse. Dieser Umstand kann sich insofern auf das Verbraucherverhalten auswirken, als dass es zu einer Verzögerung führen kann, bevor das Innere einer Wohnung genug erhitzt ist, um zu einer Inbetriebnahme der Klimaanlage zu führen. In manchen Fällen wird ein Wohnungsbesitzer oder Hauseigentümer seine AC-Anlage auch nicht nutzen (z.B.

wenn er sich auswärts an seiner Arbeitsstelle befindet oder während der Nachtruhe bzw. früh am Morgen, wenn die Aussentemperaturen ohnehin kühl sind), sodass eine scheinbare Penetration basierend auf dem Zeitdurchschnitt 25% der AC-Besitzquote betragen kann.

Aus den eben genannten Gründen sollte daher Gleichung 2 durch einen Verbrauchsverhaltensfaktor FCB verfeinert werden, sodass gilt:

$$E_{tot} = a_o + P_{AC}F_{CB}a_1(T - T_0) \quad (7)$$

2.5.3.3 Ökonomische Einflüsse

Das Verbraucherverhalten kann von vielen Faktoren beeinflusst werden, insbesondere von wirtschaftlichen Überlegungen und Faktoren. In erster Näherung ist die AC-Penetrationsrate allein von klimatischen Faktoren abhängig, jedoch haben einige Autoren zusätzlich auch Korrekturen für ökonomische Faktoren vorgenommen (z.B. Lam (1998), Isaac & van Vuuren (2009) und Wenz et al. (2017)). In dieser Studie testeten wir $Slope_{max}$ für jedes Jahr im Vergleich gegenüber drei verschiedenen Wirtschaftsindikatoren, nämlich a) verfügbares Einkommen pro Kopf, b) Konsum pro Kopf und c) BIP pro Kopf. Es ergab sich allerdings keine signifikante Korrelation, selbst unter Berücksichtigung von 21 Ländern. Dennoch ist qualitativ klar, dass die wirtschaftlichen Bedingungen $Slope_{max}$ in einigen Ländern beeinflussen kann. Abbildung 40 zeigt demnach $Slope_{max}$ im Vergleich zu CDD_{max} und CDD für eine Reihe von Jahren für die ersten acht Länder mit dem höchsten Kühlbedarf pro m². Die Gegenüberstellung von $Slope_{max}$ versus CDD ist schwer zu interpretieren, da sich CDD -Werte und F_{CB} Werte verändern. Das $Slope_{max}$ versus CDD_{max} Diagramm zeigt aber ein interessantes Muster:

- 1) Die Wirtschaft Serbiens (RS) blieb von 2009 - 2016 relativ stabil.
- 2) Italien (IT) verzeichnete 2013 einen starken Rückgang des BIP, was einem niedrigen $Slope_{max}$ entspricht.
- 3) Kroatien (HR) verzeichnete 2013 und 2014 einen leichten Rückgang des BIP;
- 4) Die spanische (ES) Finanzkrise trat in den Jahren 2012 - 2014 auf, was ebenfalls einem $Slope_{max}$ -Nadir entspricht. Bis 2016 trat eine Erholung der Wirtschaftsentwicklung ein.
- 5) Die montenegrinische Wirtschaft (ME) war von 2009 - 2012 relativ stabil, ab diesem Zeitpunkt stieg sie deutlich an (ca. 4% Wachstum p.a.), $Slope_{max}$ zeigt hier ein vergleichbares Verhalten.
- 6) Die Finanzkrise in Griechenland (GR) begann im Jahr 2010. Allerdings hat die Wirtschaft seitdem gelitten und ist nicht mehr auf ihr Niveau vor 2011 zurückgekehrt. Dennoch ist der $Slope_{max}$ im Jahr 2016 höher als im Jahr 2010, möglicherweise aufgrund eines Anstiegs von CDD_{max} .

Das speziell bei Montenegro auftretende Muster wird hier als ein Hinweis auf jenes erwartete Ergebnis gewertet falls die Dynamik der AC-Penetration in Abwesenheit anderer Faktoren (z.B. ökonomischer) betrachtet wird. Genauer gesagt verursacht ein Anstieg von CDD_{max} einen leichten Anstieg von $Slope_{max}$, da durch die steigende Anzahl an Hitztagen die Haus- und Wohnungsbesitzer beginnen AC-Anlagen zu kaufen. Dieser Umstand wird durch einen Anstieg von $Slope_{max}$ auch ohne eine Erhöhung der CDD_{max} weiterverfolgt, da wie weiter oben beschrieben, die Nachahmer („imitators“) erst nach einer bestimmten Zeit beginnen, die

Vorteile der Installation von AC-Anlagen zu erkennen und dann ebenfalls eine solche kaufen. Leider wirken die ökonomischen Umstände in vielen Ländern eher als verschleiern der hier postulierte Dynamik zur AC-Penetration.

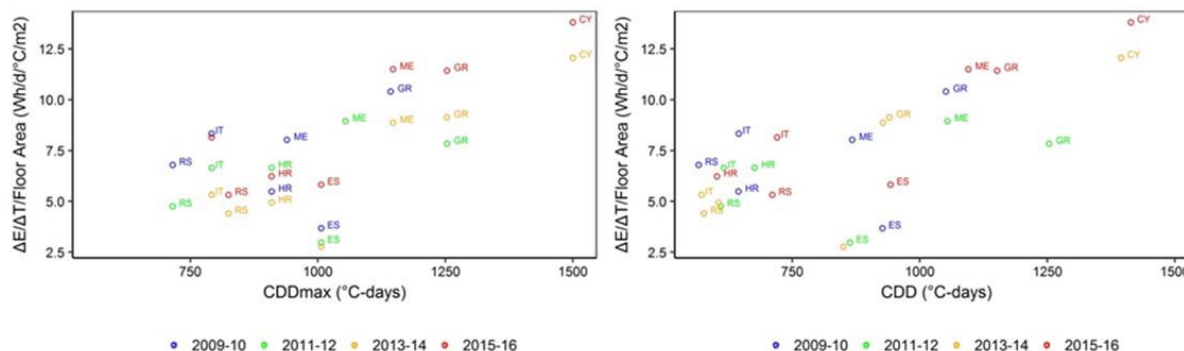


Abbildung 40: Gegenüberstellung von Slopemax und CDD_{max} (links) bzw. CDD (rechts) für bestimmte Länder nach Jahren farbcodiert.

2.5.4 Kritische Bemerkungen bezüglich der Einflusses von Klimaanlage auf das Stadtklima

Basierend auf der projizierten Änderung in den Spitzenwerten der Wärmeemissionen und einer damit verbundenen Erhöhung der MLT, wurde ein *maximaler* Anstieg der MLT von $0,8^{\circ}\text{C}$, bedingt durch den Gebrauch herkömmlicher Klimaanlage-Systeme, bis zur Mitte des gegenwärtigen Jahrhunderts abgeleitet. Dieses Ergebnis basiert auf einem Klimamodell-Ensemblemaximum der jährlichen maximalen MLT und kann als ein ‚Extremfall‘ in Bezug auf Tage mit extremer Hitzebelastung bewertet werden. Betrachtet man die mittlere MLT für die Sommerperiode, basierend auf dem Ensemblemittel der jährlichen mittleren MLT, liegen die Werte bei rund $0,1^{\circ}\text{C}$.

Sowohl bezüglich des Maximums als auch des Mittelwerts ist ein Anstieg der MLT zu verzeichnen, wobei eine maximale lokale Temperaturänderung als Folge aus der Nutzung herkömmlicher Klimaanlage-Systeme bewertet werden kann, unter der Annahme, dass die abgegebene Wärme ausschließlich als fühlbare Wärme frei wird. Daraus kann jedoch keinerlei Information über den genauen Ort dieses Maximums abgeleitet werden. Zudem ist keine Information über die Intensität der Erwärmung in anderen Bereichen verfügbar. Aus diesem Grund ist ein direkter Modellierungsansatz, der den Effekt der freigesetzten Wärme aus Klimaanlage berücksichtigt, zu empfehlen (siehe Kapitel 4 für eine umfangreichere Diskussion).

Unter der Annahme, dass der Effekt von Photonic Cooling zu einem völligen Stillstand der anthropogenen Wärmeemissionen in Hinblick auf Klimaanlage führen würde, würde das Potential von Photonic Cooling dem geschätzten lokalen Temperaturanstieg von $0,1^{\circ}\text{C}$ unter mittleren sommerlichen Bedingungen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts entgegenwirken. Unter der Berücksichtigung des prognostizierten Temperaturanstiegs sowie einer gesteigerten Nutzung von Klimaanlage in Wien bis zur Mitte des Jahrhunderts, wird ein Anstieg der MLT von $0,8^{\circ}\text{C}$ für Tage mit hoher Hitzebelastung abgeleitet, und dieser Effekt würde sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts noch einmal verstärken. Basierend auf dieser

Schätzung ist zu erwarten, dass das Potential für Photonic Cooling hinsichtlich einer Verbesserung des urbanen Mikroklimas für Tage mit hoher Hitzebelastung am größten ist, wobei der Effekt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts noch deutlich zunehmen würde.

2.5.5 Kritische Betrachtung der Photonic Cooling Technologie im Einsatz

Jeder im Rahmen des Projektes getestete Einsatzfall wurde einer kritischen Betrachtung unterzogen. Die Schlussfolgerungen sind im Folgenden zusammengefasst.

2.5.5.1 Einsatzfall 1: Einfach-Splitanlage für Einzelraumklimatisierung

- Die Montage der erforderlichen Photonic-Kühlflächen an Gebäudeaußenwänden wird durch die verschiedenen Widerstände kaum machbar sein (z. B. Ortsbildkommission, 100% - Zustimmung aller Eigentümer).
- Die Ergebnisse zeigen, dass neben den zu erwartenden Schwierigkeiten bei der Montage der Photonic-Kühlfläche an Gebäudeaußenwänden auch die berechnete Effizienzsteigerungen auf Basis der angenommenen Kühlleistung der Photonic-Kühlfläche sehr klein ist.
- Der Abstrahlraumwinkel beträgt bei einer Außenwandmontage nur 90 °.
- Die Rückstrahlung der warmen Gebäudewände vermindert die Wirkung und verteuert die Ausführung durch zusätzlich erforderliche Maßnahmen.
- Um eine spürbare Verbesserung des SEER eines kleinen Split - Klimagerätes zu erzielen, müssten nicht, wie im vorliegenden Fall angenommen, 5 m² Photonic-Kühlfläche installiert werden, sondern wesentlich mehr.
- In Tabelle 11 sind auch die Bruttopreise von derzeit marktgängigen Split - Klimageräten angegeben. Die Kosten der Photonic-Kühlfläche, die derzeit für diese Anwendung nicht ohne weiteres abgeschätzt werden können, müssten sich jedoch an diesen Preisvorgaben orientieren.

2.5.5.2 Einsatzfall 2: Kompressionskältemaschine Bürogebäude

- Das vorliegende Beispiel betrifft eine Komfort – Klimaanlage mittlerer Leistungsgröße, die in einem Bürogebäude mit einer Grundfläche von 30 x 12 m eingebaut ist. Am Dach des Gebäudes werden 80% der verfügbaren Dachfläche für die Photonic-Kühlung, also 288 m², genützt.
- Der Grundgedanke der vorliegenden Photonic-Anwendung betrifft die Vorkühlung der warmen Umgebungsluft, um damit die Kühlprozesskennzahlen zu verbessern und die Kosten zu senken.
- Die erreichte Verbesserung ist sehr gering und zeigt, dass die bisher erreichten Kenndaten der Photonic-Kühlung doch wesentlich weiter verbessert werden müssten, um eine sinnvolle Anwendung in der konventionellen Klimatechnik erwarten zu können.

2.5.5.3 Einsatzfall 3: Dessicant-Kühlung

- Die Integration der Photonic-Kühlung in Desiccant-Klimaanlagen erscheint am Beispiel einer 20 kW – DEC-Klimaanlage vorerst theoretisch sinnvoll.

- Die Senkung der Außenlufttemperatur um wenige Celsiusgrade hat bereits positiven Einfluss auf den DEC-Prozess und führt zu Investitionskosteneinsparungen bei der DEC – Anlage oder zu höheren Kühlleistungen.
- DEC – Anlagen sind mit Bezug auf Ihre Technik ausgereift, werden jedoch sehr selten gebaut. Die Kompressionskältetechnik beherrscht, trotz der bekannten umweltbezogenen Probleme bei den verwendeten Kältemitteln, den Markt der Klimatechnik zu mehr als 90%.
- Die ausgeführten technischen Abschätzungen wurden nur auf den angegebenen Belastungsfall der Photonic-Kühlfläche von 50 W bei einer Abkühlung von 5 K gemacht. Diese Angabe ist nur ein Punkt einer Kurvenschaar, die das dynamische Verhalten der Photonic-Kühlung beschreibt.

2.5.5.4 Einsatzfall 4: Büro-Container

- Die geringe Abkühlung der Photonic- Kühlplatten von 5 K und die niedrige spezifische Kühlleistung von 50 W/m² führen zu hohen Innentemperaturen und zu hohen Luftfeuchten. Die erreichbaren Luftzustände liegen außerhalb des gewünschten Komfortbereiches.
- Die große Konkurrenz für diese Anwendung sind die Einfach – Splitklimageräte, die alle Anforderungen an die Klimatechnik erfüllen.
- Derzeit bestehen noch keine klaren Vorstellungen, wie die Photonic – Kühlfunktion in eine technische Lösung für das Containerdach integriert werden kann. Ebenso ist das thermodynamische Verhalten einer Photonic - Kühlplatte (Temperaturabsenkung als Funktion vom Wärmezufuhr und Infrarotstrahlungsleistung) nicht bekannt. Dadurch kann auch nicht berechnet werden, wie sich die Temperatur der Photonic – Kühlplatte im Leerlauf (keine Wärmezufuhr), Schwachlast (z. B 30% der Nennlast) oder Überlast (z. B. 150% der Nennlast) einstellen wird. Der Begriff der wärmetechnischen Nennlast wird in den hier angestellten Untersuchungen mit den Angaben 50 W/m² bei einer Abkühlung von 5 K definiert.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Quantifizierung des Einflusses von Klimaanlageabwärme auf städtisches Mikroklima, Stromverbrauch und THG Emissionen

Mithilfe von städtischen Klimaszenarien für die Stadt Wien wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die urbane Hitzebelastung bewertet. Die Modellergebnisse für die Periode 2021-2050 zeigen einen moderaten Anstieg, für 2071-2100 sogar einen großen Anstieg, der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen verglichen mit der Periode 1971-2000. Dieser projizierte Temperaturanstieg als Folge des Klimawandels deutet darauf hin, dass ein Anstieg im Energieverbrauch zu Kühlzwecken annehmbar ist. Im nächsten Schritt ist diese zu erwartende Zunahme weiter quantifiziert.

In dieser Studie wurde ein Modell entwickelt und angewendet, um den gesamten Jahres- und Spitzenverbrauch an täglichem Energieverbrauch zu Kühlzwecken am Beispiel der Stadt Wien bis 2050 abschätzen zu können. Das Modell basiert auf Messungen des Stromverbrauchs und den maximalen Kühlgradtagen (CDD_{max}) für das Jahr 2009 - 2016. Das Modell ermöglicht auch eine Abschätzung des Anstiegs der AC-Penetration unter Berücksichtigung des Klimawandels (basierend auf dem Anstieg von CDD_{max}) und kombiniert dies mit zukünftigen täglichen Durchschnittstemperaturen. Das Modell wurde dann mittels der Kombination von sieben Klimamodellen für die Stadt Wien herangezogen, um die Berechnungen für zwei Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) durchzuführen. Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass die elektrische Energie für die Kühlung von derzeit 22 GWh/Jahr bis 2050 auf 95 (33 - 189) GWh/Jahr ansteigen wird - wobei der Unterschied zwischen den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 sehr gering ist. Im gleichen Zeitraum wird der Spitzenbedarf an elektrischer Energie von heute 65,5 MWh/Tag auf etwa 117 (64 - 191) MWh/Tag im Jahr 2050 zunehmen, wiederum ohne signifikanten Unterschied zwischen RCP4.5 und RCP8.5. Die Berechnungen unterliegen jedoch auch einer relativ großen Unsicherheit ($\pm 63\%$), hauptsächlich bedingt durch zwei Unsicherheitsquellen: a) die Klimamodelle ($\pm 35\%$) und das Modellierungsverfahren selbst ($\pm 28\%$).

Das Modellierungsverfahren könnte nun weiters verfeinert werden, indem weitere Faktoren berücksichtigt werden, die das Verbraucherverhalten (z. B. die Wirtschaftlichkeit) beeinflussen, womit auch eine Verringerung der Unsicherheiten erreicht werden könnte. Aufgrund der begrenzten Anzahl der untersuchten Jahre, der Unsicherheit in den $Slope_{max}$ -Abschätzungen und der fehlenden starken Korrelation wurde dies jedoch an dieser Stelle nicht durchgeführt.

Für die Abschätzung des Einflusses von Klimaanlageabwärme auf das urbane Mikroklima, ist der Zusammenhang zwischen Wärmeemissionen aus Klimaanlage und dem maximalen lokalen Temperaturanstieg, basierend auf existierende Modellstudien, untersucht worden. Ausgehend von dem abgeschätzten zukünftigen Energieverbrauch für Gebäudekühlung und der gefundenen Relation, ist bis 2050 im Extremfall mit einem maximalen lokalen Temperaturanstieg bis $0,8^{\circ}\text{C}$ für Wien zu rechnen.

3.2 Photonic Cooling

Im Bereich des Photonic Cooling Funktionsmusters ist eine wesentliche Schlussfolgerung aus den Ergebnissen, dass ein solches Muster relativ einfach mit geringen Materialkosten realisierbar ist. Für die weitere Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Musters müsste jedoch zunächst die Strahleroberfläche modifiziert werden und beispielsweise ein poliertes Aluminiumblech anstatt des hier verwendeten verzinkten Stahlbleches eingesetzt werden.

3.2.1 SWOT-Analyse

Wie geplant wurde als Basis für die weiterführenden Verwertungsaktivitäten eine SWOT Analyse durchgeführt. Eine Übersicht der wichtigsten Ergebnisse dieser Analyse ist in Tabelle 14 gezeigt.

Tabelle 14: Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der SWOT Analyse zur Photonic Cooling Technologie

| | |
|--|--|
| <p>Stärken:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfacher Aufbau • Low-Tech Ansatz • Relativ geringe Kosten | <p>Schwächen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringe Kühlperformance • Keine Erfahrungswerte • Keine unmittelbaren Use-Cases |
| <p>Chancen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • In Kombination mit innovativen Kühlkonzepten (Desiccant) könnten signifikante Energieeinsparungen bei Kühlbedarf erreicht werden • Bei steigender „Awareness“ der Abwärme-Problematik von Klimageräten → Alternative | <p>Bedrohungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marktpotential zu klein bzw. nicht vorhanden • Die allgemeine Einstellung zu Klimasystemen ändert sich nicht und es wird weiterhin nach minimalen Kosten installiert |

Aus der SWOT Analyse lässt sich unter anderem eine wesentliche Schlussfolgerung ziehen: Aus aktueller Perspektive bietet sich kein mittelfristiges kommerzielles Verwertungspotential für Photonic Cooling. Das ökonomische Potential von Photonic Cooling lässt sich nur langfristig in Kombination mit innovativen Kühlkonzepten erschließen. Eine Konsequenz aus dieser Schlussfolgerung ist, dass kein akuter Handlungsbedarf an weiterführenden Verwertungsaktivitäten besteht. Das Fehlen eines konkreten Use-Cases ist auch der ausschlaggebende Grund, warum im Rahmen des Projektes keine Gespräche über konkrete weiterführende Verwertungen geführt werden konnten.

Das Verwertungs-Potential von Photonic Cooling ist ein langfristiges bzw. kann die Technologie nur in Kombination mit Klimasystemen funktionieren, die sich von heutigen

Standardlösungen deutlich unterschieden. Weiter gibt es aktuell noch keine Awareness bzw. akute Problematik die durch die Abwärme von Klimaanlage entsteht. Die Ergebnisse aus AP2 zeigen, dass diese Problematik in Wien selbst bis zum Jahr 2050 von keiner besonderen Relevanz sein wird. Jedoch könnte das Problem in Städten mit höheren Temperaturen deutlich schneller relevant werden bzw. wäre die Photonic Cooling Technologie eine Antwort auf zukünftige Fragen einer Stadtgesellschaft nach Lösungen des Abwärmeproblems von Klimaanlagen.

3.3 Einsatz von Photonik Cooling zur Gebäudekühlung/Energieeinsparung im Gebäude

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der 4 Einsatzfälle zeigen, dass der Bürocontainer an heißen Sommertagen für Mitarbeiter unzumutbar hohe Innentemperaturen erreicht und auch keine Luftentfeuchtung stattfindet.

Bei Splitanlagen wurde die Photonic-Kühltechnik so eingesetzt, dass die Außenluft für die Kondensatorkühlung vorgekühlt wurde und der Einfluss auf das SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) simuliert wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass neben den zu erwartenden Schwierigkeiten bei der Montage, der großflächigen Photonic-Kühlfläche an Gebäudeaußenwänden die berechnete Effizienzsteigerungen sehr klein ist.

Auch bei der im Detail geplanten Komfortklimaanlage mittlerer Größe ist der Einfluss der Photonic-Kühltechnik, die in den Rückkühlteil der Klimaanlage am Dach des Gebäudes eingebaut werden könnte, auf die Anlageneffizienz äußerst gering.

Wesentlich positiver sind die Ergebnisse bei der Desiccant-Klimatechnik, falls eine Integration der Photonic-Kühltechnik in die Anlage erfolgt. Wenn die Außenluft vor dem Eintritt in das Desiccant Klimagerät um etwa 5 K abgekühlt wird, so hätte dies einen signifikant positiven Einfluss auf die Effizienz der Desiccant - Klimaanlage.

Die bemerkenswert positiven Eigenschaften der Photonic-Kühltechnik können grundsätzlich nur genutzt werden, wenn deren Einsatz in Gebieten stattfindet, die an den meisten Tagen des Jahres einen wolkenfreien Himmel haben und zudem die Luft trocken ist. Der erreichte Entwicklungsstand der Photonic-Kühlfläche müsste auch durch entsprechende Forschungsanstrengungen wesentlich gesteigert werden. Sowohl die derzeit erreichte Abkühlung als auch die spezifische Infrarotstrahlungsleistung müssten für einen sinnvollen Praxiseinsatz verbessert und das thermodynamische Verhalten der Photonic-Kühlplatten durch entsprechende Kennlinienfelder für eine Berechnung zugänglich gemacht werden.

4 Ausblick und Empfehlungen

In dieser Studie wurde das Potential von Photonic Cooling hinsichtlich einer Verbesserung des urbanen Mikroklimas abgeschätzt. Die Schätzung basiert auf dem Zusammenhang zwischen Energieverbrauch von Klimaanlage und erhöhten städtischen Temperaturen, abgeleitet von früheren Modellstudien und unter Verwendung von Zukunftsprojektionen des Energiebedarfs von Klimaanlage. Diese Methode ermöglichte eine erste Schätzung des Effekts von anthropogenen Wärmeemissionen auf städtische Temperaturen, wobei mögliche Feedback-Mechanismen (erhöhte Temperaturen beeinflussen wiederum den Gebrauch von Klimaanlage) außer Acht gelassen wurden (in Abbildung 8 wurde demnach der nach unten gerichtete Pfeil nicht berücksichtigt).

Dem konnte entgegengewirkt werden, indem die anthropogenen Wärmeemissionen als Funktion der Klimaanlage-Durchdringungsrate (hergeleitet mithilfe der in Kapitel 1 und 2 beschriebenen Methoden) und der urbanen Temperatur betrachtet wurden. Dies konnte beispielsweise mithilfe des im TEB-SURFEX-Schema des Wettervorhersagemodells AROME integrierten Building Energy Models (BEM) realisiert werden, welches den durch Klimaanlage verursachten anthropogenen Wärmefluss als Funktion der Außentemperatur für eine vordefinierte Innentemperatur angibt (Bueno et al.; 2011). Die daraus resultierende Änderung in der Energiebilanz beeinflusst wiederum die Außentemperatur und ein Feedback-Zyklus zwischen Außentemperatur und aus Klimaanlage abgegebener Wärme stellt sich ein.

Ein weiterer Vorteil der direkten Modellierung liegt darin, dass eine Bewertung der räumlichen Verteilung der anthropogenen Wärmeeffekte, verursacht durch die Verwendung von Klimaanlage, ermöglicht wird. Mit dem hier verwendeten Ansatz können nur die maximalen lokalen Temperatureffekte bestimmt werden. Aus diesem Grund konnten in der vorliegenden Studie weder Informationen bezüglich des Ortes, an dem das Maximum auftrat, noch über die räumliche Ausdehnung des Effektes, abgeleitet werden.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, konnte kein kurz- bzw. mittelfristiges kommerzielles Verwertungspotential von Photonic Cooling identifiziert werden. Jedoch werfen die Projektergebnisse eine Reihe von interessanten weiterführenden Fragestellungen auf, die in weiterführenden F&E Projekten untersucht werden sollen. Diese Fragestellungen umfassen einerseits die Untersuchung des lokalen Wärmeinseleffektes durch Klimaanlage auf einer kleineren Skala und alternative Städte (Bauweise). Weiters werden F&E Aktivitäten angestrebt, die die Realisierung und Charakterisierung von Photonic Cooling Funktionsmustern zum Ziel haben und gleichzeitig deren Integration in innovative Kühlsysteme vorantreiben.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftkonditionierung nach Funktionen zur Erreichung des Behaglichkeitsfeldes im h, x Diagramm (Quelle: Hans-Joachim Heinze, Lüftungs- und Klimatechnik für maximale Behaglichkeit. 2012. Online Artikel abgerufen am 11.10.2018 <http://www.ikz.de/nc/news/article/gute-raumluft-isterwuenschst-0051099.html> (linke Bildhälfte); Siemens Building Technologies. Das h,x -Diagramm, Aufbau und Anwendung. Broschüre. (rechte Bildhälfte))..... 18

Abbildung 2: Übersicht über Gebäudekühlsysteme. 19

Abbildung 3: Vereinfachtes Schema der thermischen Flüsse in der Ab- / Adsorption (Quelle: Wiemken E. et al. (2013), Planungsleitfaden für Solare Kühlung, Fraunhofer-Institut für Solare-Energiesysteme (ISE). Freiburg) 20

Abbildung 4: Verbrauchsanteile der elektrischen Energie in einem beispielhaften thermischen Kühlsystem (Quelle: Bericht zu Projekt InnoCool, siehe Kapitel 1.1.1)..... 21

Abbildung 5: Schemazeichnung des Kühlprinzips zur Nutzung der Strahlungskühlung während der Nacht. Damit werden in der Nacht Kühlleistungen zwischen 50 und 150 W/m² erreicht. (Quelle: ZAE Bayern). 22

Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl von Sommertagen in Wien, berechnet mit dem städtischen Klimamodell MUKLIMO_3 und der „cuboid method“ basierend auf der Beobachtungszeitreihe von 1981- 2010 (links) und IPCC Klimaszenario RCP 8.5 basierend auf EURO-CORDEX Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 (mitte) und Zeitraum 2021-2100 (rechts). (Quelle: IVF Projekt, Urban climate in Central European cities and global climate change.)..... 24

Abbildung 7: Zeitlicher Temperaturverlauf eines Siliziumwafers, welcher mit einer photonischen Struktur beschichtet und direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt wurde. Trotz direkter Sonneneinstrahlung ist deutlich die Temperaturdifferenz von 3 – 7 K zwischen Strahler (beschichteter Siliziumwafer) und Umgebungstemperatur zu erkennen. (Quelle: Raman A. P. et al., Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight, Nature, 2014, doi:10.1038/nature13883)..... 25

Abbildung 8: Schematische Darstellung des Feedback-Zyklus: Eine Verstärkung des urbanen Wärmeinseleffektes und damit ein Anstieg städtischer Temperaturen haben einen verstärkten Einsatz von Klimaanlage zur Folge, was wiederum zu einer Erhöhung der städtischen Temperaturen, bedingt durch erhöhte anthropogene Wärmeemissionen, führt. 27

Abbildung 9: Landnutzungsverteilung in Wien basierend auf der Local Climate Zone (LCZ) Klassifizierung von Stewart and Oke (2012). (Quelle: Bokwa A. et al. (2015), Modelling the impact of climate change on heat load increase in Central European cities, ICUC9 - 9 th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment)..... 29

Abbildung 10: Energieverbrauch für Raumkühlung pro Flächeneinheit in Abhängigkeit von Temperatur am Beispiel Griechenlands für die Jahre 2015 und 2016; die Punkte repräsentieren aktuellen Werte, die durchgezogene Linie das Modellergebnis. 33

Abbildung 11: Gesamtenergieverbrauch abhängig von der Temperatur in Griechenland 2015 und Darstellung jenes Bereichs (in grau) der den reinen Strombedarf für die Raumkühlung (abzüglich des durchschnittlichen Strombedarf für Tage zwischen 15° und 20°C) abdeckt. 36

Abbildung 12: Schematischer Überblick über die verwendete Methode zur Analyse des Einflusses von Klimaanlage auf das urbane Klima anhand eines Beispiels für Paris (Quelle: de Munck C. et al. (2013), How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?, Int. J. Climatol. 33, 210–227). 37

Abbildung 13: Konzeptskizze des verwendeten Messaufbaues. 1 ... Strahlungssensor, 2 ... Strahlungsfenster, 3 ... Strahler, 4 ... Peltierelement, 5 ... Reflektor, 6 Temperatursensor (T1 und T2)..... 39

Abbildung 14: Der verwendete Außenmesstand mit der Reflektor-Probe-Peltier Einheit im Detail

| | |
|---|----|
| (links), den gesamten Messaufbau im Überblick (Mitte) und der näheren Umgebung um den Messaufbau (rechts). Aufnahme vom 17.05.2017, Weiz..... | 40 |
| Abbildung 15: Jährliche Anzahl an Sommertagen (engl. summer days, SU: $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) berechnet aus homogenisierten Temperaturmaxima der Station Wien Hohe Warte (HW) für die Periode 1872-2011 und der Station Wien Innere Stadt (IS) für die Periode 1986-2011. Mittlere Werte für 30-jährige Perioden sind durch dicke Linien gekennzeichnet. (Adaptiert von Zuvela-Aloise et al. (2014), Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period, Urban Climate, 490 – 508)..... | 47 |
| Abbildung 16: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen in Wien, berechnet mit dem urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 und unter Anwendung der Kuboidmethode, basierend auf Beobachtungszeitreihen für die Periode 1971-2000 (oben links) und 1981-2010 (oben rechts) und den IPCC-Szenarien RCP2.6 (unten links), RCP4.5 (unten Mitte), und RCP8.5 (unten rechts) für die Periode 2021-2050 unter Verwendung eines Ensembles von EURO-CORDEX RCM Modellsimulationen (Quelle: adaptiert von Bokwa et al. (2015), IVF Projekt, Urban climate in Central European cities and global climate change)..... | 49 |
| Abbildung 17: Darstellung $Slope_{\max}$ im Vergleich zu CDD_{\max} für den täglichen Strombedarf in 2015 und 2016..... | 50 |
| Abbildung 18: Zusammenhang der Beziehung von $Slope_{\max}$ zu CDD_{\max} für den täglichen Spitzenstrombedarf aller Länder in 2015-2016. | 51 |
| Abbildung 19: Kühlgradtage (CDD) Maximale Kühlgradtage (CDD_{\max}) für Wien sind gemäß der Klimamodelle für das Szenario RCP 4.5 zwischen 2020 und 2050. Die Punkte repräsentieren die Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert von CDD_{\max} in 2016. | 51 |
| Abbildung 20: Kühlgradtage (CDD) Maximale Kühlgradtage (CDD_{\max}) für Wien sind gemäß der Klimamodelle für das Szenario RCP 8.5 zwischen 2020 und 2050. Die Punkte repräsentieren die Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert von CDD_{\max} in 2016. | 52 |
| Abbildung 21: Abgeschätzter Gesamtenergieverbrauch pro Jahr für Raumkühlung in Wien für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 (links) und RCP8.5 (rechts) in GWh. Die Punkte repräsentieren die Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert für das Jahr 2016. | 52 |
| Abbildung 22: Abgeschätzter Spitzenstrombedarf pro Jahr in MWh für Raumkühlung in Wien für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 (links) und RCP8.5 (rechts) in GWh. Die Punkte repräsentieren Durchschnittswerte, der Graubereich die Unsicherheiten mit 95%igem Vertrauensintervall und die gestrichelte Linie den Wert für das Jahr 2016. | 53 |
| Abbildung 23: Der maximale lokale Temperatureffekt als Funktion der Abwärme aus Klimaanlageanlagen für die in Tabelle 9 beschriebenen Studien (Punkte) sowie eine durch den Ursprung verlaufende lineare Trendlinie. Der Zusammenhang zwischen Qanth und MLT wird durch folgenden Ansatz beschrieben: $MLT = 0,08 \cdot Qanth$ | 57 |
| Abbildung 24: Zeitreihen des Ensemblemaximums der jährlichen maximalen MLT (violett, linke Achse) und des Ensemblemittels der jährlichen mittleren MLT sowie der Standardabweichung (dunkelblau, rechte Achse) für RCP4.5 (links) und RCP8.5 (rechts). Die gepunkteten Linien zeigen die über fünf Jahre gemittelten Werte der jeweiligen Kurven..... | 58 |
| Abbildung 25: Ensemblemaximum der maximalen MLT als Funktion der täglichen mittleren Temperaturen für die Sommerperioden 2021-2050. | 59 |
| Abbildung 26: Wie in Abbildung 25, jedoch für aktuelle klimatische Bedingungen und Klimaanlageanlagen- Durchdringungsraten (2021-2050) (links) und mit einer verdreifachten Nutzung von Klimaanlageanlagen (rechts)..... | 60 |
| Abbildung 27: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen in Wien, berechnet mit dem urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 und der Kuboidmethode, basierend auf Beobachtungsdaten für die Klimaperiode 1971-2000 (links) und Klimaprojektionen, basierend auf dem RCP8.5-Szenario für die Periode 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (rechts), unter Verwendung eines Ensembles an EURO-CORDEX RCM Modellsimulationen als Input (Quelle: adaptiert von Bokwa et al. (2015), IVF Projekt , Urban climate in Central European cities and global climate change). | 61 |
| Abbildung 28: Ein Messergebnis generiert mit dem Außenmessstand (siehe Abbildung 14) am 30. Mai 2017 ist gezeigt. Man erkennt, dass die Strahlertemperatur zeitweise um bis zu 10 K | |

| | |
|---|----|
| unter der Umgebungstemperatur liegt. Wird die Abstrahlung gegen den Himmel durch eine Abdeckung unterbunden steigt die Strahlertemperatur um 5 bis 7 K an..... | 64 |
| Abbildung 29: Messergebnisse der Außenmessungen, bei denen die Temperatur des Strahlers aktiv mit einem Peltier-Element geregelt wurde. Links ist die kumulativ aufgewandte Energie gegenüber der Messzeit für eine Soll-Temperatur von 35°C gezeigt. Rechts ist dieselbe Konfiguration für eine Soll-Temperatur von 65°C zu sehen..... | 65 |
| Abbildung 30: Die abgegebene Wärme-Leistungs-Intensität ist für unterschiedliche Soll-Temperaturen (bezogen auf Werte über der Umgebungstemperatur) angegeben. Wenn keine Abdeckung verwendet wird gibt das Peltier-Element die Leitung über Strahlung, Leitung und Konvektion an die Umgebung ab. Mittels der Abdeckung wird die Strahlung gegen den Himmel unterbunden. Die Differenz aus der abgegebenen Intensität (mit/ohne Abdeckung) gibt an wieviel Intensität in den Himmel abgestrahlt wird. | 66 |
| Abbildung 31: Eine auch in kommerzieller Hinsicht vielversprechende Ausführungsform eines „Photonic Cooling“ Aufbaues..... | 67 |
| Abbildung 32: Eines im Rahmen des Projektes erstelltes Photonic Cooling Funktionsmuster beim Außentest. Aufnahme vom 04.09.2017, Weiz. | 68 |
| Abbildung 33: Vergleich der ermittelten Reflexionsspektren von Spiegelfolie aufgebracht auf Aluminiumfolie, Aluminiumblech bzw. verzinkten Stahlblech..... | 69 |
| Abbildung 34: Prinzipskizze einer Einfach – Splitanlage 2,5 kW, mit Außen- und Innengerät. | 70 |
| Abbildung 35: Komfortklimaanlage 150 kW für ein Bürohaus (Prinzipbild). | 74 |
| Abbildung 36: Komponenten eines Desiccant-Klimagerätes. Zuluftseite: 1 ... Luftfilter EU7, 2 ... Sorptionsrad, 3 ... Wärmerückgewinnungsrads (rotierender Rekuperator), 4 ... Nacherhitzer für Heizen im Winter, 5 ... Verdunstungsbefeuchter Zuluft, 6 ... Zuluftventilator, AU ... Außenluft, ZU ... Zuluft. Abluftseite: 7 ... Verdunstungsbefeuchter Abluft, 8 ... Lufterhitzer zur Trocknung des Sorptionsrades, 9... Abluftventilator, AB ... Abluft, FO ... Fortluft. (Quelle: Endbericht, EU-Projekt ASODECO Funding Nr. FP5-EESD)..... | 76 |
| Abbildung 37: Desiccant- Klimaanlage im ÖKOPARK Hartberg, Betrieb seit September 2000 (Quelle: Endbericht, EU-Projekt ASODECO Funding Nr. FP5-EESD)..... | 77 |
| Abbildung 38: Skizze zu dem im Einsatzfall 4 diskutierten Bürocontainer..... | 78 |
| Abbildung 39: Täglicher Gesamtstromverbrauch und Durchschnittstemperatur 2016 für Österreich (links) und Spanien (rechts). Die Daten zeigen einen signifikanten Rückgang der Elektrizität von Tag 200 bis 250 aufgrund von Urlaubszeit in den Sommermonaten und der geringeren Wirtschaftsleistung..... | 84 |
| Abbildung 40: Gegenüberstellung von Slopemax und CDD_{max} (links) bzw. CDD (rechts) für bestimmte Länder nach Jahren farbcodiert. | 86 |

5.2 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Leistungszahlen verschiedener Kältemaschinen | 20 |
| Tabelle 2: EURO-CORDEX Modellsimulationen mit einem GCM-RCM Downscaling-Verfahren zur Erzeugung verschiedener Klimaprojektionen für urbane Gebiete in Zentraleuropa (Bokwa et al., 2015). Die ‘*’ fungieren als Platzhalter für die verschiedenen Emissionsszenarien..... | 30 |
| Tabelle 3: Ziel 1 - Quantifizierung des Einflusses von Klimaanlagenabwärme auf städtisches Mikroklima und des Strombedarfs unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen . | 43 |
| Tabelle 4: Ziel 2 - Kostengünstigere Photonic Cooling Technologien..... | 44 |
| Tabelle 5: Ziel 3a - Analyse von Optionen zur Implementierung von Photonic Cooling zur Gebäudekühlung und Evaluierung der möglichen Effizienzsteigerung eines Kälteprozesses durch Senkung der Rückkühltemperatur über Photonic Cooling..... | 45 |
| Tabelle 6: Ziel 3.b - Aufbauend auf die potentiell am besten geeigneten Konzepte: Quantifizierung des potentiellen Einflusses auf das Mikroklima in Städten..... | 45 |
| Tabelle 7: Auswertung der MUKLIMO_3 urbanen Klimasimulationen für Wien für vergangene und zukünftige klimatische Bedingungen. Die Simulationen wurden im Rahmen des IVF Projekts „Urban climate in Central European cities and global climate change“ (Bokwa et al., 2015) basierend auf verschiedenen IPCC Szenarien mit EURO-CORDEX RCM | |

| | |
|--|----|
| Modellsimulationen als Input durchgeführt. Beobachtungsdaten für die Berechnung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen werden von den Stationen HW und IS gewonnen. Die Analyse der Modellergebnisse erfolgt für die Landnutzungsklassen..... | 50 |
| Tabelle 8: Überblick über jene Studien, die den Effekt der Wärmeemissionen aus Klimaanlageanlagen auf den lokalen Temperaturanstieg (und, sofern vorhanden, auf den UHI-Effekt), schätzten. | 55 |
| Tabelle 9: Überblick über die Spitzenwerte anthropogener Wärmeemissionen bedingt durch Klimaanlageanlagen (Peak Qanth), entweder direkt aus den Studien entnommen oder aus den Gleichungen 4 und 5 abgeleitet, unter Berücksichtigung der angegebenen COPs-Werte, der Kühllast (engl. cooling load, CL), des Energieverbrauchs (engl. energy consumption, EC) und des maximalen lokalen Temperatur (MLT) Effekts. | 56 |
| Tabelle 10: Übersicht über Versuche die mit Testaufbau durchgeführt wurden..... | 62 |
| Tabelle 11: Übersicht über die Annahmen und Ergebnisse der Kostenschätzung für einen m ² eines Photonic Cooling Aufbaues wie in Abbildung 31 skizziert. | 67 |
| Tabelle 12: Technische Daten eines typischen Einfach-Splitklimagesätes..... | 70 |
| Tabelle 13: Zusammenfassung der bottom-up Studien..... | 82 |
| Tabelle 14: Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der SWOT Analyse zur Photonic Cooling Technologie..... | 90 |

5.3 Literaturverzeichnis

Allen, L., F. Lindberg, and C.S.B. Grimmond: Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *Int. J. Climatol.*, 2010. doi:10.1002/joc.2210.

Anderl, M., J. Burgstaller, M. Gössl, S. Haider, C. Heller, N. Ibesich, V. Kuschel, C. Lampert, H. Neier, K. Paydernik, S. Poupa, M. Purzner, E. Rigler, W. Schieder, J. Schneider, B. Schodl, S. Stix, A. Storch, G. Stranner, J. Vogel, H. Wiesenberger, R. Winter, and A. Zechmeister: *Klimaschutzbericht 2017*. Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2017. ISBN 978-3-99004-062-2.

APCC (2014): *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (APCC). ISBN 978-3-7001-7699-2. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna.

Auer et al., 1989 Auer, I., Böhm, R., Mohnl H. (1989) *Klima von Wien*. Beitr. z. Stadtforschung, Stadtentwicklung und Stadtgestaltung 20, Magistrat der Stadt Wien, p. 270.

Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P.D. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moissling, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Y. Majstorovic, E. Nieplova (2007): HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. In: *International Journal of Climatology*, Vol. 27, pp 17-46.

Bachner, G.; Bednar-Friedl, B.; Birk, S.; Feichtinger, G.; Gobiet, A.; Gutschi, C.; Heinrich, G.; Kulmer, V.; Leuprecht, A.; Prettenhaler, F. & others *Impacts of climate change and adaptation in the electricity sector--the case of Austria in a continental European context (EL-ADAPT)*. Wegener Center Scientific Report 51-2013 Wegener Center Verlag, Graz, 2013

Bass, F. M. A new product growth for model consumer durables *Management science*, INFORMS, 1969, 15, 215-227

Bechtel, B., Daneke, C. (2012): Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 5:1191 –1202.

Bechtel, B., Alexander, P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O., Feddema J., Mills G., See L., Stewart I. (2015): Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 4:199–219.

Berger, T., Amann, C., Formayer, H., Korjenic, A., Pospichal, B., Neururer, C., & Smutny, R.. Impacts of urban location and climate change upon energy demand of office buildings in Vienna, Austria. *Building and Environment*, 2014, 81, 258-269.

Bessec, M. & Fouquau, J. The non-linear link between electricity consumption and temperature in Europe: a threshold panel approach *Energy Economics*, 2008, 30, 2705-2721

Blazquez, L.; Boogen, N.; Filippini, M. & others Residential electricity demand for Spain: new empirical evidence using aggregated data CEPE Center for Energy Policy and Economics, ETH Zurich, CEPE Center for Energy Policy and Economics, ETH Zurich, 2012

Bokwa, A., P. Dobrovolny, T. Gal, J. Geletic, A. Gulyas, M. J. Hajto, B. Hollosi, R. Kielar, M. Lehnert, N. Skarbit, P. Stastny, M. Svec, J. Unger, M. Vysoudil, J.P. Walawender, M. Zuvela-Aloise, L. Burian (2015): Urban climate in Central European cities and global climate change. International Visegrad Fund, Standard Grant No. 21410222. 10.2014-09.2015. Final Report.

Bueno, B., L. Norford, G. Pigeon, R. Britter: Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2011. DOI 10.1007/s10546-011-9620-6.

Böhm, R., 1979. Stadtentwicklung und Trend der Wärmeinselintensität. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B 27, 31–46.

Böhm, R (1998): Urban bias in temperature time series: a case study for the city of Vienna, Austria. In: *Clim. Change*, Vol. 38, pp 113-128.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton (2007): Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Christensen, J.H., K. Krishna Kumar, E. Aldrian, S.-I. An, I.F.A. Cavalcanti, M. de Castro, W. Dong, P. Goswami, A. Hall, J.K. Kanyanga, A. Kitoh, J. Kossin, N.-C. Lau, J. Renwick, D.B. Stephenson, S.-P. Xie and T. Zhou (2013): Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*

Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Christenson, M.; Manz, H. & Gyalistras, D. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland Energy Conversion and Management, Elsevier, 2006, 47, 671-686

Clarke L.E., Edmonds J.A., Jacoby H.D., Pitcher H., Reilly J.M., Richels R. (2007): Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington DC.

de Munck, C., G. Pigeon, V. Masson, F. Meunier, P. Bousquet, B. Tréméac, M. Merchat, P. Poef, and C. Marchadier (2013): How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? Int. J. Climatol., 33: 210-227, doi:10.1002/joc.3415.

De Rosa, M.; Bianco, V.; Scarpa, F. & Tagliafico, L. A. Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach Applied energy, Elsevier, 2014, 128, 217-229

Dubbel – Taschenbuch für Maschinenbau. 12. Auflage. 1966

Entranze. Average floor area per capita. 2017. Available at <http://www.entranze.enerdata.eu/average-floor-area-per-capita.html> Accessed October 2017

ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity. Power statistics, 2017 Available at <https://www.entsoe.eu/data/statistics/Pages/default.aspx> Accessed: October 2017.

Eto, J. H. On using degree-days to account for the effects of weather on annual energy use in office buildings Energy and Buildings, 1988, 12, 113 – 127

EURAC, 2014. Potential and actual space heating and cooling consumption in Europe (Sparber, W. and Pezzutto, S.), RHC-Platform Annual Event, May 22, 2014. EURAC Research. Available at (2015-01-22): (http://www.rhc-platform.org/fileadmin/user_upload/members/Downloads/Pezzutto_.pdf)

EURO-CORDEX. Model citation eurostat. Population change - Demographic balance and crude rates at national level [demo_gind]. 2017. Available at http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo_gind&lang=en Accessed October 2017.

Fischer, E.M. and C. Schär (2010): Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. In: Nature Geoscience Letters, Vol. 3, pp 398-403.

Formayer, H., Matulla, C., Haas, P., Groll, N., (2009): Möglichkeiten statistischer Downscalingverfahren zur Ableitung von Extremereignissen in Österreich aus GCM-Feldern (Endbericht StartClim.5, November 2003) (BOKU-Met Report No. 3).

Früh et al B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J.

Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau, U. Wienert (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 167-184, doi:10.1175/2010JAMC2377.1.

Giannakopoulos, C. & Psiloglou, B. E. Trends in energy load demand for Athens, Greece: weather and non-weather related factors *Climate research*, 2006, 31, 97-108

Grimmond C. S. B. et al. (2010): The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First results from Phase 1, *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 49, 1268- 92, doi:10.1175/2010JAMC2354.1.

Grimmond C. S. B. et al. (2011), Initial Results from Phase 2 of the International Urban Energy Balance Comparison Project, *International Journal of Climatology*, 31, 244-272, doi:10.1002/joc.2227.

Gross, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beiträge zur Phys. Atmos.* 62, 57–72.

Isaac, M, & van Vuuren, D. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change *Energy Policy*, 2009, 37, 507-521

IPCC (2013): *Climate Change 2013: The physical science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and O.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacob, D.J. (1999): *An Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 266 pp.

Jacob et al. (2008): REMO climate of the 20th century run, UBA project, 0.088 degree resolution run no. 006210, 1h data. CERA-DB 'REMO_UBA_C20_1_R006210_1H'. World Data Center for Climate. (6) Determination of Precipitation Return Values in Complex Terrain and Their Evaluation.

Jacob, D.; Petersen, J.; Eggert, B.; Alias, A.; Christensen, O. B.; Bouwer, L.; Braun, A.; Colette, A.; Déqué, M.; Georgievski, G.; Georgopoulou, E.; Gobiet, A.; Menut, L.; Nikulin, G.; Haensler, A.; Hempelmann, N.; Jones, C.; Keuler, K.; Kovats, S.; Kröner, N.; Kotlarski, S.; Kriegsmann, A.; Martin, E.; Meijgaard, E.; Moseley, C.; Pfeifer, S.; Preuschmann, S.; Radermacher, C.; Radtke, K.; Rechid, D.; Rounsevell, M.; Samuelsson, P.; Somot, S.; Soussana, J.-F.; Teichmann, C.; Valentini, R.; Vautard, R.; Weber, B. & Yiou, P. (2013); EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research *Regional Environmental Change*, Springer Berlin Heidelberg, 1-16.

Jakubcionis, M. & Carlsson, J. Estimation of European Union residential sector space cooling potential *Energy Policy*, 2017, 101, 225-235

Kikegawa, Y., Y. Ghenchi, H. Yoshikado, and H. Kondo (2003): Development of a numerical

simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy*, 76:449-466, doi:10.1016/S0306-2619(03)00009-6.

Lam, J. C. Climatic and economic influences on residential electricity consumption *Energy Conversion and Management*, Elsevier, 1998, 39, 623-629

Lehnert, M., Geletič, J., Husák, J., Vysoudil, M. (2015): Urban field classification by “local climate zones” in a medium-sized Central European city: the case of Olomouc (Czech Republic), *Theor. Appl. Climatol.*, 122:531. doi.org/10.1007/s00704-014-1309-6.

Lelovics, E., J. Unger, T. Gál, C. Gal, (2014): Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling. *Climate Research*, 60(1):51-62, doi:10.3354/cr01220.

Le Comte, D. M. & Warren, H. E. Modeling the impact of summer temperatures on national electricity consumption *Journal of Applied Meteorology*, 1981, 20, 1415-1419

Martilli, A., A. Clappier, and M. W. Rotach, (2002): An urban surface exchange parameterization for mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 261-304, doi:10.1023/A:1016099921195.

Masson, V. (2000): A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94: 357-397.

Masson, V. (2006): Urban surface modelling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84: 35-45.

Moral-Carcedo, J., Vicéns-Otero, J. Modelling the non-linear response of Spanish electricity demand to temperature variations. *Energy Econ.* 2005, 27, 477–494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2005.01.003>.

Mueller, A., Kranzl, L., Hummel, M., Toleikyte, A., Neusser, M., Gladt, M., Bednar, T., Schicker, I., and Formayer H. (2014, März 2). Impact of climate change on heating and cooling demand in buildings: analysis of the Austrian case. Vienna: Austrian Climate Research Program.

NOAA: National Oceanographic and Atmospheric Administration. Climate Data Online. 2017. Available at <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/> Accessed October 2017.

Noilhan, J., and S. Planton (1989): A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 536-549, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2.

Ohashi, Y., Y. Genchi, H. Kondo, Y. Kikegawa, H. Yoshikado, and Y. Hirano (2006): Influence of Air-Conditioning Waste Heat on Air Temperature in Tokyo during Summer: Numerical Experiments Using an Urban Canopy Model Coupled with a Building Energy Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 66-81, doi:10.1175/JAM2441.1.

Oke, T.R. (1984): Methods in urban climatology. *Applied Climatology*. 18:19-29.

Oke, T.R., Johnson G.T., Steyn D.G., Watson I.D., (1991) Simulation of surface urban heat islands under "Ideal" conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56:339 – 358.

Recknagel, Sprenger, Schramek. 2001. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. S. 1787

Riahi, K., Grübler, A., Nakicenovic, N., (2007): Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, 74:887-935.

Ryu, Y.-H., J.-J. Baik, S.-H. Lee (2013): Effects of anthropogenic heat on ozone air quality in a megacity. *Atmospheric Environment*, 80, 20-30, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.053.

Sailor, D. J. & Muñoz, J. R. Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the USA—methodology and results for eight states *Energy*, Elsevier, 1997, 22, 987-998

Salamanca, F., and A. Martilli (2010): A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations — Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 345–356.

Salamanca, F., A. Martilli, M. Tewari, and F. Chen (2011): A Study of the Urban Boundary Layer Using Different Urban Parameterizations and High-Resolution Urban Canopy Parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1107-1128, doi:10.1175/2010JAMC2538.1.

Salamanca, F., A. Martilli, and C. Yagüe (2012): A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *Int. J. Climatol.*, 32, 2372-2386, doi:10.1002/joc.3398.

Salamanca, F., M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustou, and M. Wang (2014): Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 5949-5965, doi:10.1002/2013JD021225.

Schubert, S., S. Grossman-Clarke, and A. Martilli (2012): A Double-Canyon Radiation Scheme for Multi-Layer Urban Canopy Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 145, 439-468, doi:10.1007/s10546-012-9728-3.

Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger, C. Appenzeller (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. In: *Nature*, Vol. 427, pp 332-336.

Segal, M.; Shafir, H.; Mandel, M.; Alpert, P. & Balmor, Y. Climatic-related evaluations of the summer peak-hours' electric load in Israel *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31, 1492-1498

Siebert, J., Sievers, U., Zdunkowski, W. (1992): A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.* 59,

1–34.

Sievers U. (1990): Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. Umwelt-meteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf. S. 92–105.

Sievers U. (1995): Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. Meteorologische Zeitschrift 4, 3-15.

Sievers, U., Forkel, R., Zdunkowski, W. (1983): Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. Beiträge Physik der Atmosphäre 56, 58-83.

Sievers, U., Früh, B. (2012): A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings, Meteorologische Zeitschrift, 21, 4:349-364, doi:10.1127/0941-2948/2012/0331.

Sievers, U., W. Zdunkowski (1985): A microscale urban climate model. In: Beitr Phys Atmosph, Vol. 59, pp 13-40.

Smith, S.J., Wigley, T.M.L. (2006): MultiGas forcing stabilization with minicam. The Energy Journal Special issue 3:373-392.

Souch, C., and C. S. B. Grimmond (2004): Applied climatology: heatwaves. Prog. Phys. Geog., 28 (4), 599–606.

Statistics Austria. Beginning-of-the-year population from 1952 to 2076. STATcube – Statistical Database of STATISTICS AUSTRIA. 2017. Available at http://www.statistik.at/web_en/statistics/PeopleSociety/population/demographic_forecasts/index.html. Accessed October 2017

Stewart, I.D. and T.R. Oke (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 1879–1900, doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

Sändig, B., and E. Renner (2011): The urban impact on the regional climate of Dresden. D. G. Steyn and S. Trini Castelli (Ed.), In: Air pollution modeling and its application XXI : Proceedings of the 31th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application (Torino, Italy, 27 September - 1 October 2010). Springer, Dordrecht, 181-185. (NATO Science for Peace and Security Series - C : Environmental Security).

Töglhofer C., Habsburg-Lothringen C., Pretenthaler F., Rogler N., Themessl M., EL.ADAPT: Impacts of Climate Change on Electricity Demand, 2012. https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2012/files/pr/PR_Toeglhofner.pdf. Accessed November 2017.

Trusilova, K., B. Früh, S. Brienens, A. Walter, V. Masson, G. Pigeon, and P. Becker (2013): Implementation of an Urban Parameterization Scheme into the Regional Climate Model COSMO-CLM, J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 2296–2311, doi: 10.1175/JAMC-D-12-0209.1.

Van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, L. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith, S.K. Rose (2011): The representative concentration pathways: an overview. In: *Climate Change*, Issue 109, pp 5-31.

Valor, E.; Meneu, V. & Caselles, V. Daily air temperature and electricity load in Spain *Journal of applied Meteorology*, 2001, 40, 1413-1421

Wenz, L.; Levermann, A. & Auffhammer, M. North–south polarization of European electricity consumption under future warming *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114, E7910-E7918

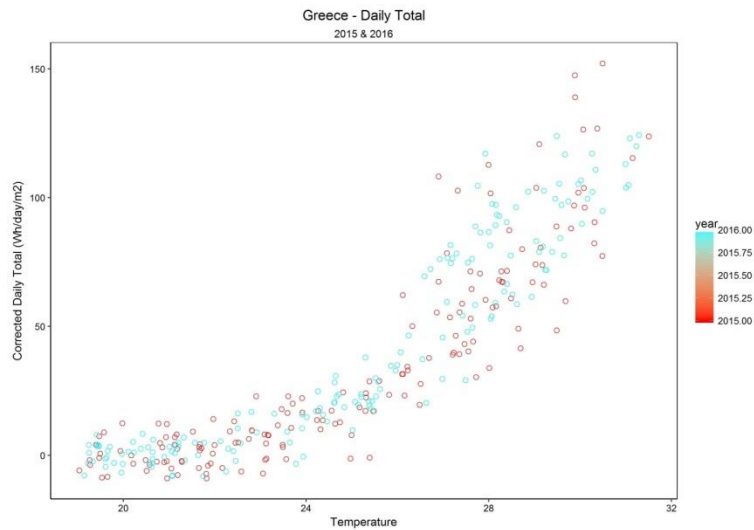
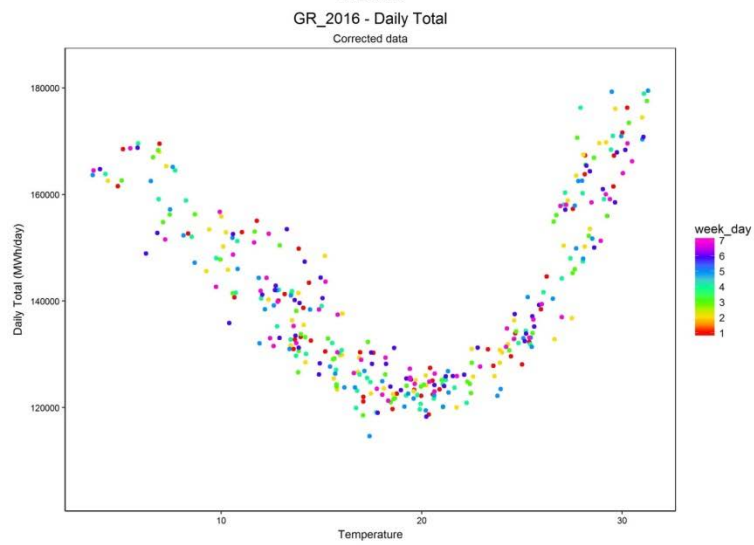
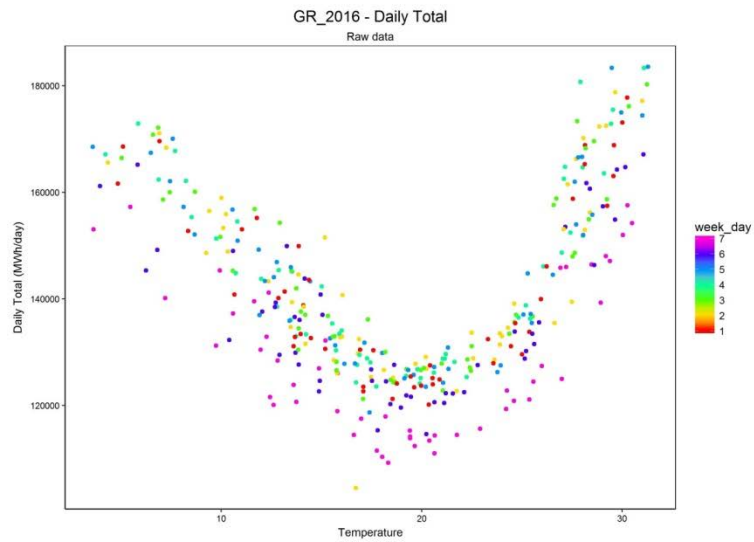
Wikipedia. 2017. Available at <https://www.wikipedia.org/> Accessed October 2017.

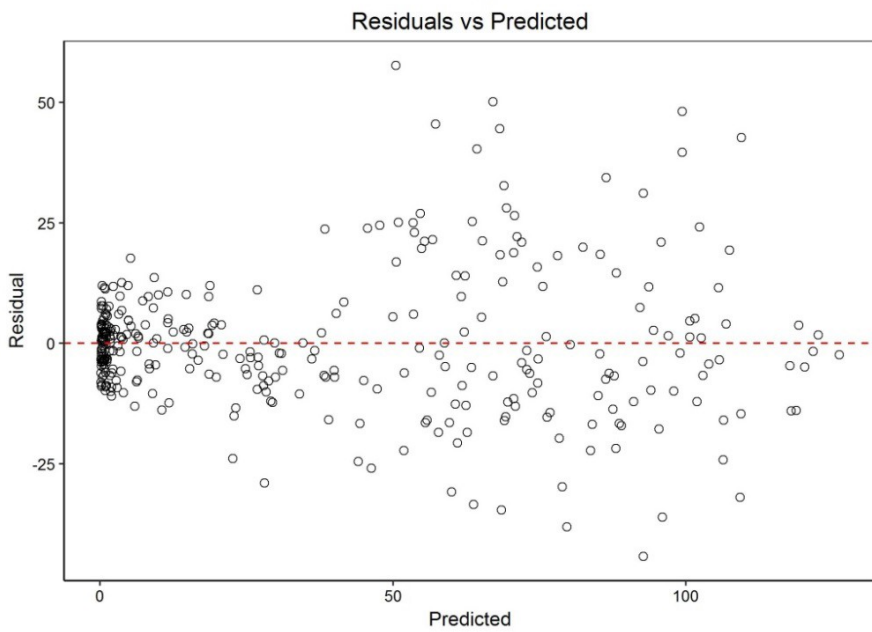
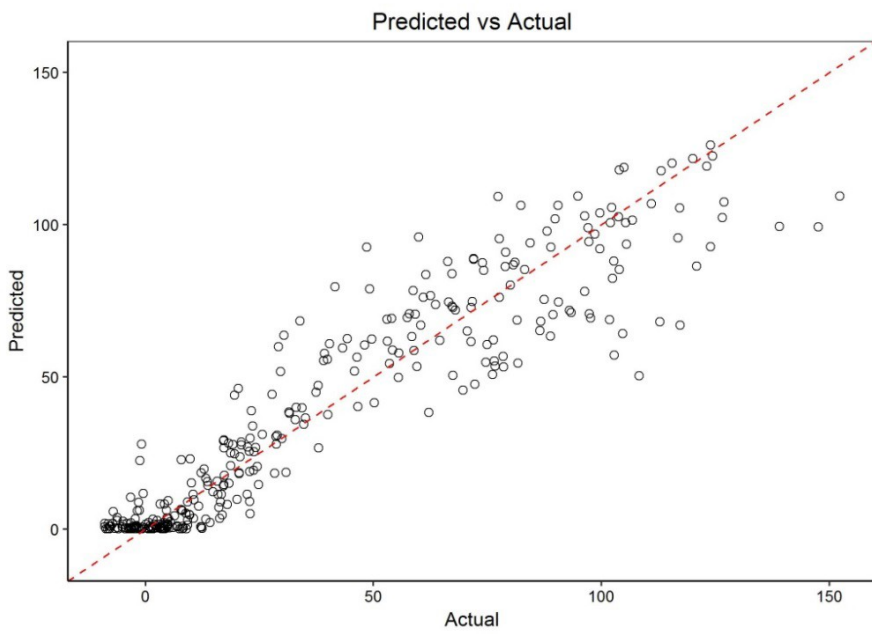
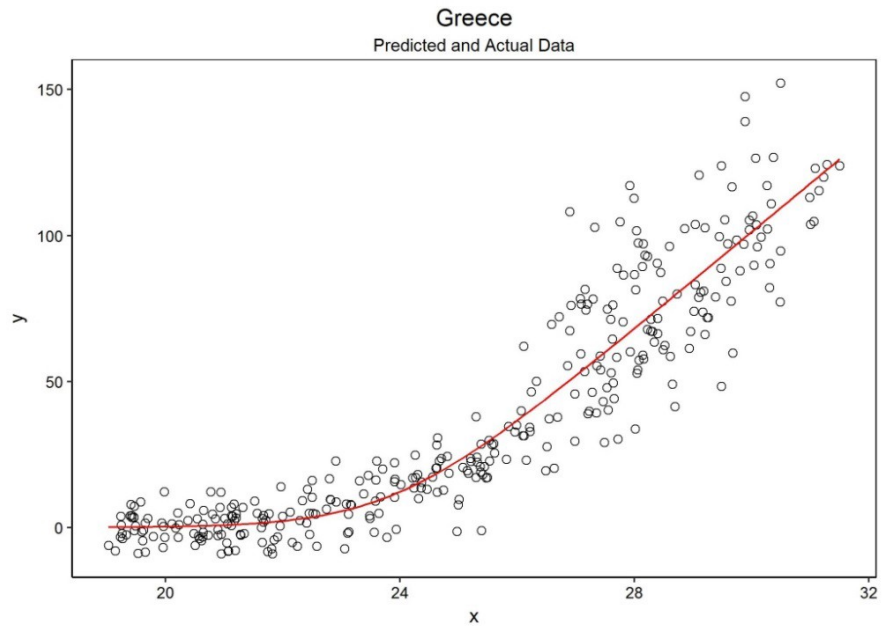
Wise, M., Calvin K., Thomson A., Clarke L., Bond-Lamberty B., Sands R., Smith S.J., Janetos A., Edmonds J., (2009): Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science* 324:1183-1186.


Žuvela-Aloise, M., R. Koch, A. Neureiter, R. Böhm, S. Buchholz (2014): Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period. In: *Urban Climate*, Vol. 10. 2014.

6 Anhang

6.1 Ergänzendes Datenmaterial







Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)