ZEN

Zukünftige Entwicklung der Raumkühlung durch Klimawandel bis 2050

PUBLIZIERBARER ENDBERICHT

Wien, Juni 2022

Kurzfassung

Auf Basis der Wetterbeobachtung der vergangenen Jahrzehnte und der Berechnungsergebnisse aktueller Klimamodelle sind deutliche Anstiege der jährlichen wie auch der saisonalen mittleren Temperaturen in Österreich zu erwarten. Bereits heute ist ein verstärkter Trend, Gebäude mit Klimageräten zur Raumkühlung auszustatten, zu beobachten. Es stellt sich daher die Frage, wie sich diese Trends auf den Kühlenergiebedarf auswirken und welche Folgen für Stromnetze hinsichtlich auftretender Spitzenlasten zu erwarten sind. Diese Frage ist in Zusammenhang mit dem für die Dekarbonisierung des Energiesystems erforderlichen und geplanten Rollouts der Photovoltaik (PV) zu sehen, der ebenfalls gewisse Anforderungen an die Stromnetze stellt.

Um diese durch Gebäudekühlung und zunehmende PV-Einspeisung zu erwartenden Auswirkungen und die Effektivität möglicher Maßnahmen zu untersuchen sowie um plausible Szenarien der Entwicklung des österreichischen Kühlenergiebedarfs bis 2050 darzustellen, wurde zwischen September 2020 und November 2021 das Projekt *Zukünftige Entwicklung der Raumkühlung durch Klimawandel bis 2050 (ZEN)* durchgeführt.

Zur angewendeten Methodik gehörten Berechnungen mit dem Gebäudebestandsmodell *Invert*, die Durchführung von dynamischen Gebäude- und Stromnetzsimulationen sowie eine begleitende Stakeholder-Beteiligung.

Bis 2050 weist der Kühlbedarf (Nutzenergie) über alle Szenarien eine Bandbreite von 6 TWh bis 28 TWh auf, je nachdem von welchem Klimadatensatz und welchen gebäudeseitigen Maßnahmen ausgegangen wird. Die Bedeutung von passiven Maßnahmen, wie Verschattung, Innenraum-Temperaturen und Nachtkühlung wird in den Ergebnissen sehr deutlich: In den optimistischen Szenarien können im Vergleich zu den pessimistischen über zwei Drittel des Kühlbedarfs eingespart werden.

Die Integration von Kühllasten verursacht in den untersuchten Zeiträumen bei wenigen Netztypen Überlastungen oder Spannungsverletzungen. Andere Technologien, beispielsweise die Elektromobilität aber auch die PV dürften einen stärkeren Ausbau der Stromnetze in Zukunft nötig machen.

Die Projektergebnisse zeigten auch, dass sich Förderprogramme im Gebäudebereich meist auf Maßnahmen beziehen, die in erster Linie zur Reduktion des Heizwärmebedarfs führen, aber den Kühlbedarf oftmals nicht ausreichend berücksichtigen. Bauvorschriften und Förderungen sollten daher künftig immer auch passive Maßnahmen (bevorzugt) und ggf. effiziente aktive Kühlsysteme betreffende Maßnahmen (nachgereiht) adressieren. Der Bauteilaktivierung wird aufgrund der erzielbaren Effizienz und des Speicherpotenzials ein hoher Stellenwert beigemessen.

Abstract

Based on the weather observations of the past decades and the results of current climate models, for Austria, significant increases in the mean ambient temperatures are expected. An increasing trend to equip buildings with active space cooling technology can be observed in the past years. Electrical load peaks due to building cooling in certain power grids have been considered as likely to occur more frequently. Furthermore, due to climate targets, a massive rollout of photovoltaics (PV) can be expected, which will have an impact on Austria's power grids too.

In order to investigate such impacts and the effectiveness of potential measures, as well as to present plausible scenarios concerning the development of the Austrian cooling energy demand until 2050, the project *Zukünftige Entwicklung der Raumkühlung durch Klimawandel bis 2050 (ZEN)* was conducted between September 2020 and November 2021.

The project's methodology includes calculations with the building stock model *Invert*, dynamic building simulations and power grid simulations, and stakeholder participation.

By 2050, the net useful cooling energy demand shows a range from 6 TWh to 28 TWh, depending on the climate dataset and assumed building-related measures. The results show the importance of passive measures, such as shading, indoor temperature adaptions, and night cooling unambiguously: in the optimistic scenarios, more than two-thirds of the cooling demand (net energy) can be saved compared to the pessimistic ones.

The integration of cooling loads causes overloads or voltage violations for a few grid types in the periods investigated. Other technologies, for example electromobility but also PV, are likely to require a stronger expansion of the power grids in the future.

The project results showed that subsidy programs in the building sector mostly relate to measures that primarily lead to a reduction in heating demand, but often do not properly consider cooling demand. In future, building regulations and subsidies should therefore always address passive measures (preferred) and, where appropriate, measures related to active cooling (ranked after). Due to its achievable efficiency and its storage potential, a high priority is seen in building component activation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 1
Abstract 2
Ausgangslage 4
Methodik 4
Definition der Untersuchungsfälle und Datensondierung 5
Ermittlung des Kühlbedarfs für Österreich 12
Untersuchung von Auswirkungen auf die Stromnetze 14
Stakeholder-Beteiligung 20
Projektergebnisse 23
Prognose der Kühlbedarfs-Entwicklung in Österreich 23
Resultierender Strombedarf für Gebäudekühlung 24
Auswirkungen von Gebäudekühlung auf die Stromnetze 26
Stakeholder-Interviews 43
Schlussfolgerungen und Ausblick 59
Literaturverzeichnis 64
Anhang 67
Schätzkoeffizienten Haushaltsstrom-Lastprofile 67
Modellannahmen Gebäudesimulation 68
Szenarien für die Zuordnung von Kühllastprofilen 70

Ausgangslage

Auf Basis der Wetterbeobachtung der vergangenen Jahrzehnte und der Berechnungsergebnisse aktueller Klimamodelle sind deutliche Anstiege der jährlichen wie auch der saisonalen Mitteltemperatur in ganz Österreich zu erwarten. Für die nahe Zukunft ergibt sich in den gerechneten Szenarien eine verbreitete Zunahme von Hitze- und Sommertagen im österreichweiten Mittel um etwa 4 bzw. 10 Tage. D.h. insbesondere Wohn- und Bürogebäude im urbanen Raum werden zukunftsorientiert gebaut, wenn einerseits die Planung, die Errichtung und der Betrieb von Neubauten und anderseits die Sanierung von Bestandbauten, passive sowie aktive Kühlmaßnahmen berücksichtigen. Zu erwarten ist, dass Gebäude verstärkt mit Klimageräten zur Raumkühlung ausgestattet werden und elektrische Lastspitzen in bestimmten Stromnetzen auftreten werden. Weiters ist von einem massiven Rollout der Photovoltaik auszugehen, da sich Österreich selbst das Ziel gesetzt hat, bis zum Jahr 2030 Strom in dem Ausmaß zu erzeugen, dass der nationale Gesamtstromverbrauch zu 100 Prozent (national bilanziell) aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt ist.

Methodik

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die im Projekt ZEN durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten und wie diese in Verbindung zueinander (Pfeile) stehen.

Am Beginn des Projekts stand die Sondierung vorhandener Daten zum Themenbereich Gebäudekühlung. Als direkte Folge wurden Hauptszenarien, auch Untersuchungsfälle genannt, definiert, die allen in ZEN durchgeführten Untersuchungen zugrunde liegen.

In weiterer Folge wurden in etwa parallel die erforderlichen Anforderungen an die für Simulationen und Berechnungen benötigten Klimadatensätze definiert, die entsprechenden Klimadatensätze durch gezielte Downloads beschafft, die für die Stromnetze benötigten Stromnetzmodelle beschafft und Referenzgebäude für die Gebäudesimulationen modelliert.

Unter Verwendung der Klimadatensätze wurden dann mit dem Gebäudebestandsmodell invert Prognosen zur künftigen Entwicklung des Energie- und Strombedarfs für Gebäudekühlung bis 2050 erstellt, vorhandene Haushaltsstrom-Lastprofile für die klimatischen Verhältnisse in den Betrachtungsjahren normalisiert sowie mittels dynamischer Gebäudesimulation und postsimulatorischer Prozesse elektrische Lastprofile für Gebäudekühlung und PV-Einspeiseprofile generiert.

Die generierten elektrischen Lastprofile wurden für die Stromnetzsimulationen den Netzanschlusspunkten nach einem definierten Schlüssel zugewiesen und damit die

Auswirkungen der Gebäudekühlung mit und ohne gezielte Deckung des Bedarfs durch am Gebäude befindliche PV-Anlagen untersucht.

Im Zuge der Stakeholder-Beteiligung, die in einem frühen Projektstadium begonnen wurde, wurde mittels semistrukturierter Interviews der aktuelle Wissensstand und die Experteneinschätzungen zu den Kernfragen des Projektes von wichtigen Stakeholdern eingeholt und die in ZEN erzielten Projektergebnisse unter den Stakeholdern disseminiert.

Die Ergebnisse aus den Stakeholder-Interviews flossen wie die Projektergebnisse aus den Simulationen und Berechnungen in die globale Interpretation der Projektergebnisse und somit in die Schlussfolgerungen und Empfehlungen ein.

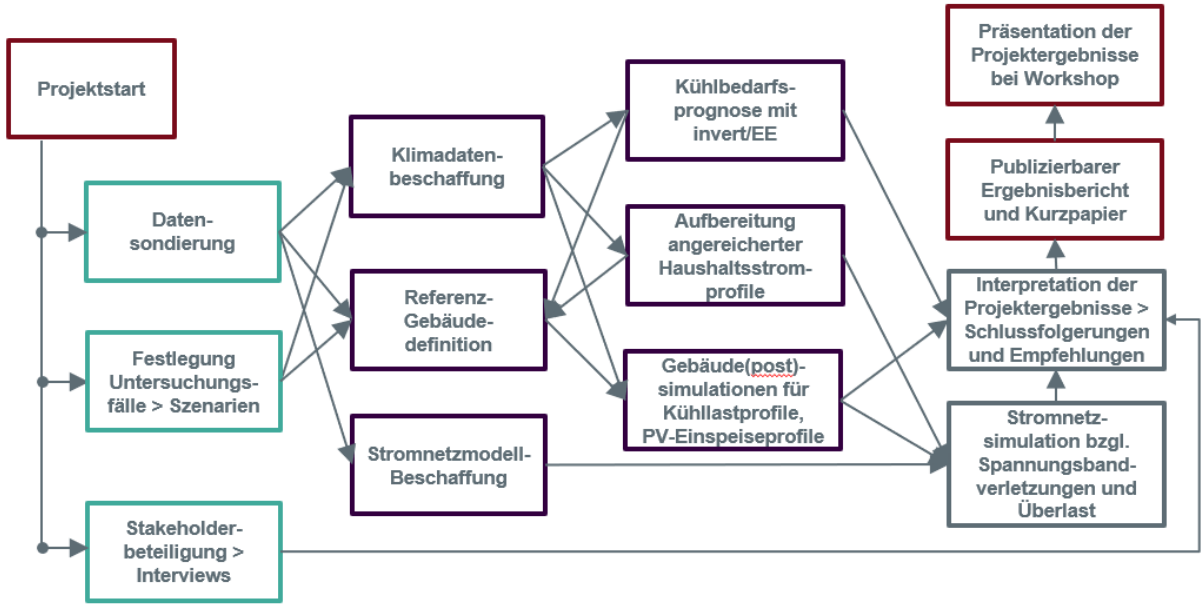


Abbildung 1: Projektstruktur mit den bearbeiteten Themenbereichen und den Interaktionen

In den folgenden Unterkapiteln wird die Methodik je Tätigkeitsbereich im Detail beschrieben.

Definition der Untersuchungsfälle und Datensondierung

Für die Prognose der Entwicklung des künftigen Kühlbedarfs für Österreich und für die Untersuchungen hinsichtlich der künftigen Auswirkungen der Gebäudekühlung auf die Stromnetze wurden Haupt- und Unterszenarien entwickelt. Für die Simulationen und Berechnungen wurde vorerst davon ausgegangen, dass in allen Gebäuden Raumklimata für optimale Arbeits- und Wohnbedingungen erzielt werden. In der Diskussion der Ergebnisse wurde aber auch darauf eingegangen, welche Energie- bzw. Strombedarfe zu erwarten sind, wenn die Diffusion von aktiver Gebäudekühlung unter 100 % liegen würde.

Hauptszenarien

Ein wichtiges Projektziel war es, mögliche Entwicklungspfade des österreichischen Energie- und Strombedarfs, sowie der Auswirkungen auf die Stromnetze aufgrund von Gebäudekühlung zu untersuchen. Des Weiteren sollten aus den Projektergebnissen Schlussfolgerungen und Empfehlungen beispielsweise für künftige Sanierungsprogramme ableitbar sein.

Bereits zu Beginn des Projektes wurden daher vier Hauptszenarien (Untersuchungsfälle, siehe Tabelle 1) festgelegt, welche mehrere aus heutiger Sicht realistische Entwicklungspfade repräsentieren. Die Definition der Hauptszenarien erfolgt anhand folgender Kriterien:

- Istzustand im Ausgangsjahr 2020 (Vergleichsbasis) oder Prognose für 2030 bzw. 2050
- Raumklima für optimale Arbeits- und Lebensbedingungen (Annahme für alle Hauptszenarien)
- Berücksichtigung spezifischer Strategien zur Deckung des elektrischen Strombedarfs der Kühlgeräte durch PV-Strom (Lastverschiebung zur Eigenverbrauchsoptimierung)
- Berücksichtigung einer signifikanten Reduktion des Kühlbedarfs durch passive Maßnahmen (z.B. Verschattung), möglich bei entsprechenden Anreizen

Tabelle 1: In ZEN definierte Hauptszenarien (Untersuchungsfälle)

Referenzszenario	OptEcon Pur	OptEcon PV	OptEcon Combi
Modellierung des Istzustands der Raumkühlung im Basisjahr (nicht für alle Untersuchungen relevant)	Raumklimata für optimale Arbeits- und Lebensbedingungen Keine Strategien zur Deckung des elektrischen Strombedarfs der aktiven Gebäudekühlung durch PV-Anlagen (Eigenverbrauchsoptimierung)	Raumklimata-Definition wie in OptEcon Pur Berücksichtigung spezifischer Strategien zur Deckung des elektrischen Strombedarfs der Gebäudekühlung durch PV-Anlagen (Eigenverbrauchsoptimierung)	Raumklimata- Definition wie in OptEcon Pur und Opt Econ PV Reduktion des Kühlbedarfs durch passive Maßnahmen (z.B. Verschattung) Strategien zur Eigenverbrauchsoptimierung wie in OptEcon PV

Im weiteren Projektverlauf ergaben sich zahlreiche Unterszenarien, von denen abhängig von der jeweiligen Natur der Aufgabenstellungen alle oder eine beschränkte Anzahl für die Untersuchungen herangezogen wurden. So wurden beispielsweise bei den Stromnetzsimulationen vorerst nur „Worst-Case"-Unterszenarien verwendet. Da sich herausstellte, dass die Auswirkungen selbst im „Worst-Case"-Fall gering ausfallen, wurde auf weitere Simulationen mit anderen Unterszenarien (z.B. „Best-Case") verzichtet. Die im Laufe des Projekts zusätzlich definierten Unterszenarien sind in weiterer Folge beschrieben.

Szenarien bezogen auf die Gebäudequalität und die Durchdringung

Für die Berechnungen zur Prognose des Kühlbedarfs (Nutzenergie) sowie des Kühlenergiebedarfs (Endenergie) bis 2050 wurden insgesamt drei Unterszenarien hinsichtlich der Gebäudequalität des Gebäudebestands (nachfolgend „Gebäudequalitäts-Szenarien" genannt) definiert:

- Niedrig
- Mittel
- Hoch

Diese Unterszenarien stehen mit den Hauptszenarien in folgendem Zusammenhang: Das Kühlbedarf-Szenario „hoch" ist den Hauptszenarien OptEcon Pur und OptEcon PV zuzuordnen, das Kühlbedarf-Szenario „niedrig" dem Szenario OptEcon Combi.

Die Grundannahme hinter allen drei Szenarien ambitionierte thermische Sanierungsmaßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs entsprechend den europäischen und nationalen Energiestrategien, den bisherigen und künftig zu erwartenden Bauvorschriften, Förderprogrammen, etc. So wurde angenommen, dass eine jährliche Sanierungsrate von 2,5 % erreicht wird, wobei 10 % dieser Sanierungsmaßnahmen lediglich zur Erhaltung und Wartung der Gebäudehülle durchgeführt werden, d.h. keinen thermischen Effekt erzielen. Weitere 10 % der Maßnahmen sind als geringfügige Verbesserungen einzustufen. 30 % der Sanierungsaktivitäten sind umfassende Maßnahmen, die die gesamte Gebäudehülle adressieren in einem Umfang adressieren, wie sie der derzeitigen Bauordnung entsprechen. Die verbleibenden 50 % der Maßnahmen, sind als ambitionierte Sanierungspakete einzustufen, die über die derzeit üblichen Sanierungsmaßnahmen hinausgehen. Das Verständnis zu diesen Maßnahmen ist deshalb relevant, weil die Verbesserung der Gebäudehülle zur Reduktion des Heizwärmebedarfs alleine nicht notwendiger Weise geeignet ist, auch den Kühlbedarf zu reduzieren, vielmehr in der Summe über den gesamten Gebäudebestand zu einer Erhöhung des Kühlbedarfs führt.

Die Kühlbedarf-Szenarien unterscheiden sich nun hinsichtlich der in Tabelle 2 dargestellten Parameter voneinander.

Während derzeit ein geringer Anteil des theoretischen Kühlbedarfs tatsächlich gedeckt wird, kann davon ausgegangen werden, dass – bei Klimawandel induziert sinkendem Sommerkomfort – ein höherer Anteil der Gebäude mit aktiven Kühltechnologien ausgestattet werden. Ein Anhaltspunkt, welche Diffusion mit aktiven Kühlsystemen in Zukunft in Österreich zu erwarten ist, ist der aktuelle Stand in südlicheren Ländern Europas. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Daten zur Diffusion von Kühltechnologien und zum Kühlenergieverbrauch in den meisten Staaten Europas mit großen Unsicherheiten behaftet sind (vgl. Pezzutto et al., 2017 und Kranzl et al., 2022). Unter Berücksichtigung all dieser Unsicherheiten besteht eine Möglichkeit der Abschätzung des Anteils des theoretischen Kühlbedarfs, der tatsächlich abgedeckt wird, darin, Abschätzung zum

theoretischen Kühlbedarf in Europa mit Abschätzungen des tatsächlichen gedeckten Kühlbedarfs (jeweils definiert als Nutzenergie) zu vergleichen. Für ersteren wurde der Hotmaps-Datensatz zum theoretischen Kühlbedarf herangezogen (Müller, 2019). Für zweiteren wurden folgende Quellen berücksichtigt: European Commission, 2021, Kranzl et al, 2022, Fleiter et al, 2017, Hartner et al, 2018, Eurostat, 2021. Der Vergleich zwischen diesen Datenquellen ergibt für Österreich als Anteil des theoretischen Kühlenergiebedarfs, der tatsächlich gedeckt wird Werte zwischen 22 % und 38 %, für Italien zwischen 55 % und 88 %, für Frankreich zwischen 67 % und 85 % und für Spanien zwischen 57 % und etwa 100 %.[1] Auch wenn die große Bandbreite als Beleg für die große Unsicherheit der Daten zu werten ist, können daraus doch Hinweise für mögliche zukünftige Deckungsgrade des Kühlenergiebedarfs abgeleitet werden.

Tabelle 2: Zur Ermittlung des Kühlbedarfs relevante Parameter in verschiedenen Szenarien

Stellgröße Kühlbedarfsermittlung	Hoch	Mittel	Niedrig
Verschattung (%)[2]	40 %	50 %	80 %
Nachtlüftung Wohngebäude (1/h)	0,5	1,5	2,5
Nachtlüftung Nichtwohngebäude (1/h)	1,2	1,5	2
Innenraum-Sollwerttemperatur (°C)	24	25	26

Tabelle 3 enthält die in ZEN herangezogenen Annahmen für die Auswertungen hinsichtlich des möglichen Endenergiebedarfs bei geringerer Diffusion aktiver Gebäudekühlung.

Tabelle 3: Zur Ermittlung des Endenergiebedarfs aus dem Kühlbedarf relevante Parameter in verschiedenen Szenarien

Stellgröße Endenergiebedarfsermittlung	Hoch	Mittel	Niedrig
SEER - Seasonal Energy Efficiency Ratio (1)	3,6-3,7	4,1-4,2	5,2-5,3
Anteil des tatsächlich gedeckten Kühlbedarfs im Jahr 2050[3] (%)	88 %	60 %	40 %
Nachtlüftung Nichtwohngebäude (1/h)	1,2	1,5	2
Innenraum-Sollwerttemperatur (°C)	24	25	26

[1] Der Ansatz liefert für manche Quellen und manchen, v.a. südlichen Ländern auch Werte über 100%, was auf die Unsicherheit bzgl. der Datenlage hinweist.

[2] Die Angaben zur Verschattung beziehen sich auf die Grundannahme, dass bei der thermischen Sanierung von Gebäuden auch Verschattungsmaßnahmen durchgeführt werden, allerdings in unterschiedlicher Intensität je nach Szenario.

[3] (b) Neben den Ergebnissen bei vollständiger Deckung des Kühlbedarfs werden auch Ergebnisse für den Kühlenergiebedarf dargestellt, unter der Annahme, dass nur ein Teil des Kühlbedarfs tatsächlich gedeckt wird, d.h. bei einer Diffusion von Sommer-Konditionierung unter 100 %.

Sofern relevant, kamen diese Definitionen so oder in ähnlicher Weise auch bei der Untersuchung der Auswirkungen auf die Stromnetze (insbesondere bei den thermischen Gebäudesimulationen) zur Anwendung.

Szenarien bezogen auf Klimadaten

Einen großen Einfluss auf die Entwicklung des Kühlbedarfs (nicht nur in Österreich) hat ohne Zweifel die anthropogene Klimaerwärmung. Mittels geeigneter Klimamodelle erstellte Klimadaten sind eine wesentliche Eingangsgröße für die, in ZEN durchgeführten, Simulationen und Berechnungen.

Die Auswahl und die Beschaffung dieser Klimadaten stellte eine gewisse Herausforderung dar, da die Klimadaten unterschiedlichen Anforderungen, z.B. zeitliche Auflösung, entsprechen mussten. Die verwendeten Klimadaten und die Methodik zur Wahl geeigneter Betrachtungsjahre sind in weiterer Folge beschrieben.

Gewählte Klimamodelle, geographische und zeitliche Auflösung der Klimadatensätze

Numerische Klimamodelle werden verwendet, um die mögliche zukünftige Entwicklung des Klimasystems zu projizieren und das Klimasystem selbst zu verstehen. Sie beruhen auf mathematischen Beschreibungen der für das Klimasystem maßgeblichen physikalischen Prozesse (z. B. Impuls, Massen- und Energieerhaltung, usw.). Numerische Lösungen der zugrunde liegenden Gleichungen werden dann mit Hilfe numerischer Algorithmen ermittelt.

Allgemeine Zirkulationsmodelle (General Circulation Models GCMs) sind globale numerische Klimamodelle, die das Klimasystem auf globaler Ebene untersuchen. Sie beschreiben verschiedene Komponenten des Erdsystems und die nichtlinearen Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen ihnen. Für die Simulation des vergangenen Klimas, werden Messwerte als Antriebsdaten verwendet, während für zukünftige Projektionen Werte aus bestimmten Emissionsszenarien (siehe unten) verwendet werden.

Aufgrund der großen Anzahl von Datenpunkten und der hohen Komplexität der GCMs erfordert ihre Integration eine große Menge an Rechenressourcen. Die Auflösung ihres horizontalen Netzes reicht derzeit von 50-100 km und sie liefern Ergebnisse mit einer 6-stündigen zeitlichen Frequenz. Aufgrund dieser relativ groben horizontalen und zeitlichen Skala sind die GCMs für viele Aspekte regionaler und lokaler Schätzungen der Klimavariabilität und -veränderung unzureichend. Daher ist ein Downscaling erforderlich, um die lokalen Folgen des globalen Wandels zu beschreiben: entweder empirisch-statistisches Downscaling (ESD) oder dynamisches Downscaling mittels regionaler Klimamodelle (regional climate models RCMs), oder auch Modelle für begrenzte Gebiete (limited area models LAMs) genannt. LAMs werden seit den 1970er Jahren mit großem Erfolg in der Wettervorhersage eingesetzt.

Ihre Anwendung für Klimazwecke begann in den 1990er Jahren. RCM Integrationen, unter Verwendung der GCM-Ausgangsdaten als seitliche Randbedingungen (Abbildung 2), werden in der Regel mit einer horizontalen Auflösung von 10-50 km über eine bestimmte Region von Interesse (z. B. über Europa im Falle von EURO-CORDEX) simuliert. Durch eine Kombination aus expliziter Auflösung wichtiger Prozesse (z. B. Gebirgszirkulationen, Land-Ozean-Kontraste) und an höhere Auflösungen angepasste Parametrisierungen sind RCMs in der Lage detailliertere Merkmale des regionalen bis lokalen Klimas liefern.

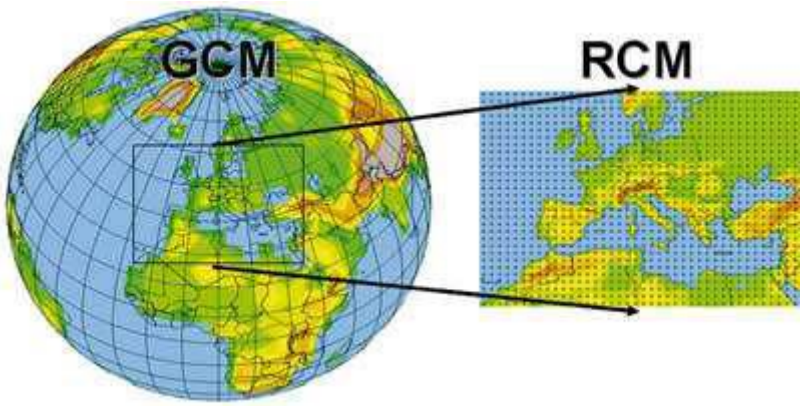


Abbildung 2: Beispiel für eine RCM Simulation für die Europa-Domäne[4]

Klimaszenarien (oder Klimaprojektionen) sind Darstellungen von verschiedenen möglichen zukünftigen Zuständen des Klimasystems, die auf numerischen Modellsimulationen beruhen. Verschiedene Faktoren anthropogener wie sozioökonomische, technologische, demographische und ökologische Entwicklung werden in Klimamodellen als äquivalente Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen sowie Änderungen der Landnutzung und Landbedeckung charakterisiert. Da die künftige Entwicklung der anthropogenen Faktoren stark von unserem Verhalten und politischen Entscheidungen abhängt, werden ihre potenziellen Auswirkungen anhand verschiedener Szenarien untersucht, die mehrere mögliche Emissionspfade (und damit Treibhausgaskonzentrationen) beschreiben.

Der **Repräsentative Konzentrationspfad RCP4.5** ist ein Szenario für langfristige, globale Emissionen von Treibhausgasen, kurzlebigen Arten, Landnutzung und -bedeckung, das den Strahlungsantrieb bei 4,5 Watt pro Quadratmeter (W m^{-2}, etwa 650 ppm CO_2-Äquivalent) im Jahr 2100 stabilisiert, ohne diesen Wert jemals zu überschreiten. Die entscheidenden Merkmale dieses Szenarios sind in Moss et al. (2008, 2010), sowie in Clark et al., (2007) aufgeführt, mit zusätzlichen Details zu den Nicht-CO2- und Verschmutzungskontrollannahmen in Smith und Wigley (2006) und unter Einbeziehung aktualisierter

[4] https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6933

Landnutzungsmodelle und Annahmen für terrestrische Kohlenstoff-Emissionspreisen, wie in Wise et al. (2009a,b) berichtet.

RCP 4.5 geht davon aus, dass Klimapolitik (z.B. globale Treibhausgas Emissionspreise) eingesetzt werden, um das Ziel der Emissionsbegrenzung, Konzentrationen und des Strahlungsantriebs zu erreichen.

Der **Repräsentative Konzentrationspfad RCP8.5** kombiniert Annahmen über ein hohes Bevölkerungs- und relativ langsames Einkommenswachstum mit bescheidenen Raten des technologischen Wandels und Verbesserungen der Energieintensität, was langfristig zu einer hohen Energienachfrage und hohen Treibhausgasemissionen führt, wenn keine Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. Verglichen mit der Gesamtheit der repräsentativen Konzentrationspfade (RCPs) entspricht der RCP8.5 somit dem Pfad mit den höchsten Treibhausgasemissionen (Riahi et al., 2011).

Für die Abschätzung des zukünftigen Klimazustands (2030/2050) wurden die **EURO-CORDEX Daten** (Jacob et al., 2014) für die Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 verwendet. Dabei ist zu beachten, dass bei dem Vergleich von Beobachtungs- mit Modelldaten mehrere Faktoren relevant sind. Beobachtungsdaten repräsentieren instantane Punktdaten, wobei die verwendeten EURO-CORDEX Klimadaten einen Wert für eine Gitterzelle von 12x12 km (= Modellauflösung) entsprechen. Das bedeutet, dass die Eigenschaften dieser Gitterzelle (z.B. Oberfläche, Landnutzung, Topographie) gemittelt zu dem Modellwert führen. Gerade bei den modellierten maximalen Intensitäten des Niederschlags kann es dadurch zu höheren Abweichungen führen, da starke Intensitäten meist sehr kleinräumig auftreten und aufgrund der räumlichen Auflösung der verfügbaren RCMs meist unterschätzt werden, die gemittelte Niederschlagsmenge meist jedoch die beobachteten Werte genügend genau widerspiegelt.

Darüber hinaus wurden für die Lufttemperatur und die Strahlung die Bias-korrigierten Daten[5] verwendet. Das bedeutet, dass die Modellergebnisse mit Beobachtungen der Periode 1971-2005 verglichen und anhand dieser Ergebnisse um den mittleren Modellfehler korrigiert wurden (Vrac et al., 2012,). Da nur die täglichen bias-korrigierten Niederschlagswerte zur Verfügung stehen, wurden die direkten 3h Modellwerte verwendet.

Die in ZEN verwendeten Bezugsjahre sind 2030 und 2050, weil sich darauf wichtige EU-Klimaziele beziehen. Das Jahr 2050 ist des Weiteren durch den Ausschreibungsschwerpunkt, dem dieses Projekt zugrunde liegt, festgelegt. Für die Prognose des österreichischen Kühlenergiebedarfs wurde wegen dem österreichischen Ziel „Klimaneutralität bis 2040" zusätzlich das Jahr 2040 näher betrachtet.

[5] https://cse.ipsl.fr/attachments/article/128/BCCORDEX.pdf

Da ein Klimamodelljahr nicht explizit dem Kalenderjahr entspricht, sondern einen klimatischen Zustand repräsentativ für diese Rahmenbedingungen (Sonnenstand, CO_2-Emissionen etc.) widerspiegelt, wurde für die Auswahl der möglichst repräsentativen tatsächlich verwendeten Klimadaten (Betrachtungsjahre) der Zeitbereich Bezugsjahr ±5 Jahre (z.B. 2020 = 2016 – 2025) herangezogen.

In erster Linie für die Prognose der Entwicklung des österreichischen Kühlenergiebedarfs wurde für jedes Bezugsjahr (z.B. 2050) jenes Jahr als Betrachtungsjahr gewählt, dessen Kühlgradtage laut Klimadatensatz den Median der jährlichen Kühlgradtage dieses zehnjährigen Zeitbereichs darstellt.

Für die Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Stromnetze sind „Worst-Case"-Bedingungen aussagekräftiger. Daher wurde für jedes Bezugsjahr jenes Jahr als zusätzliches Betrachtungsjahr gewählt, dessen Klimadatensatz bei den Kühlgradtagen den höchsten Wochenwert („heißeste Sommerwoche") aufweist.

Die in ZEN untersuchten Unterszenarien bezogen auf die Klimadaten wurden als Kombinationen aus den beiden Konzentrationspfaden sowie den Unterscheidungen zwischen Median-Jahr (median) und „Worst-Case"-Jahr (hot) wie folgt festgelegt:

1. RCP4.5-median
2. RCP4.5-hot
3. RCP8.5-median
4. RCP8.5-hot

Ermittlung des Kühlbedarfs für Österreich

Die Methodik basiert auf folgenden Komponenten: (1) Gebäudebestandsmodellierung, (2) Szenariodefinition hinsichtlich der thermisch relevanten Maßnahmen am Gebäudebestand, (3) Szenariodefinition hinsichtlich der Klimadaten und (4) Diskussion des tatsächlich gedeckten Kühlbedarfs.

Gebäudebestandsmodellierung

Zur modellhaften Abbildung des Gebäudebestands in Österreich wurde das Modell Invert (Müller, 2015; Müller et al. 2017; Kranzl et al. 2018a; Kranzl et al.,2018b) eingesetzt.[6] Das wesentliche Ziel dabei ist, die Entwicklung des Gebäudebestands hinsichtlich des Anstiegs von Gebäudeflächen in verschiedenen Gebäudekategorien sowie der Umsetzung und Auswirkung von thermischen Gebäudesanierungen zu berücksichtigen.

Invert ist ein dynamisches Bottom-up-Gebäudebestandsmodell, das die Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen (insbesondere unterschiedlicher wirtschaftlicher und regulatorischer Anreize) auf den

[6] www.invert.at

Gesamtenergiebedarf, den Energieträgermix, die CO_2-Reduktion und die Kosten für Raumheizung, Kühlung und Warmwasserbereitung in Gebäuden bewertet. Das Modell beschreibt den Gebäudebestand, die Heizungs-, Kühlungs- und Warmwassersysteme auf stark disaggregierter Ebene, berechnet den damit verbundenen Energiebedarf und die Endenergienachfrage, ermittelt Reinvestitionszyklen und Neuinvestitionen von Gebäudekomponenten und -technologien und simuliert die Entscheidungen verschiedener Agenten (d.h. Eigentümer) für den Fall, dass eine Investitionsentscheidung für ein bestimmtes Gebäudesegment ansteht.

Im gegenständlichen Projekt kam eine vereinfachte Version des Modells (Abbildung 3) zum Einsatz, die die Umsetzung von thermischen Sanierungsmaßnahmen exogen vorgibt und nicht endogen auf Basis von Akteurs-Entscheidungen modelliert.

Daten zum Gebäudebestand, dessen regionaler Auflösung sowie wesentliche Annahmen zu Sanierungsmaßnahmen beruhen auf Kranzl et al 2018 und sind dort dokumentiert.

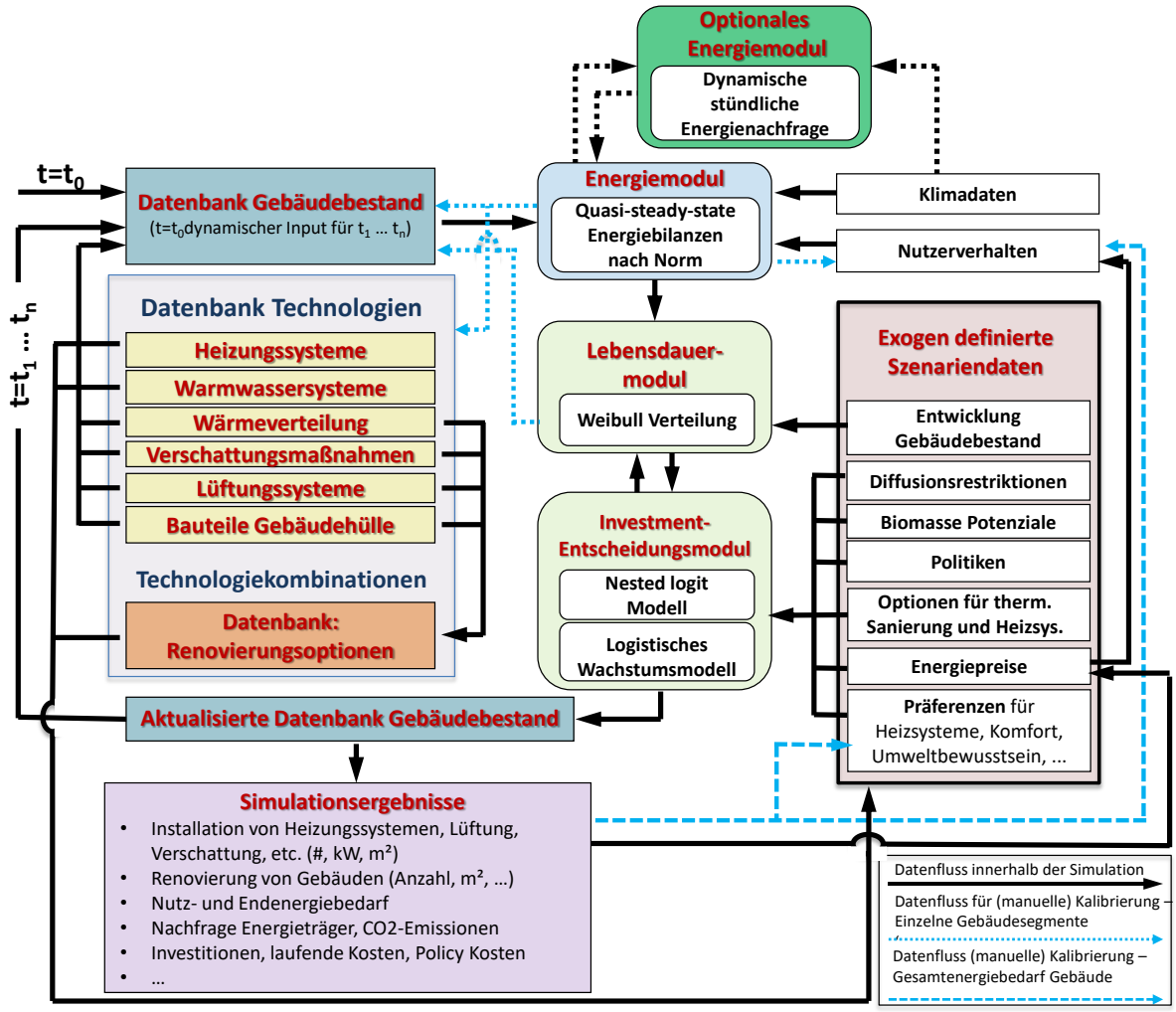


Abbildung 3: Flussbild des Gebäudebestandsmodells Invert

Kühlbedarfsberechnung mit Klimadatensätzen

Die Berechnungen zur Prognose des österreichischen Kühlbedarfs erfolgte mittels des oben beschriebenen Gebäudebestandsmodell unter Verwendung von Klimadatensätzen für die Bezugsjahre 2030, 2040 und 2050, sowohl für das jeweilige „Median"- als auch für das jeweilige „Hot"-Betrachtungsjahr. Dies erfolgte für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Die Berechnungen wurden also in Summe für vier Klimadatensätze durchgeführt (siehe Kapitel „Szenarien bezogen auf Klimadaten")

Unter Berücksichtigung der drei Unterszenarien hinsichtlich der thermischen Gebäudequalität (hoch, mittel und niedrig) wurde die Entwicklung des österreichischen Kühlbedarfs für insgesamt zwölf Szenariokombinationen berechnet.

Untersuchung von Auswirkungen auf die Stromnetze

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Gebäudekühlung auf die Stromnetze, wurden stündlich aufgelöste elektrische Lastprofile verschiedener Gebäudetypen in unterschiedlichen Varianten hinsichtlich der thermischen Gebäudequalität für alle festgelegten Klimaszenarien generiert. Diese elektrischen Lastprofile setzen sich aus den elektrischen Lastprofilen des Haushaltsstroms, jenen aufgrund von Gebäudekühlung und (in bestimmten Unterszenarien) den PV-Einspeiseprofilen zusammen. Für die Stromnetzsimulationen wurden die elektrischen Lastprofile nach einem definierten Schlüssel den Netzanschlusspunkten zugewiesen.

In den folgenden Unterkapiteln ist die Methodik zur Ermittlung dieser Lastprofile, dem sich ergebenden Summen-Lastprofil und der Stromnetzsimulationen dargestellt.

Aufbereitung von Haushaltsstrom-Lastprofilen

Im Rahmen des Projekts ZEN wurden exemplarische Lastprofile von Haushalten entwickelt, um den aggregierten Stromverbrauch in simulierten Netzabschnitten mit unterschiedlichen Kühlbedarfen abschätzen zu können. Die verwendeten Verbrauchsprofile der Haushalte stammen aus dem Datensatz des Horizon 2020-Projekts PEAKapp. Diese Haushalte wurden anhand ihres ungefähren geografischen Standorts mit der nächstgelegenen Wetterstation oder dem nächstgelegenen prognostizierten Wetterdatenknoten verknüpft. Um aus diesen Verbrauchsprofilen, die in den Jahren 2017 bis 2018 gemessen wurden, generische Lastprofile für die in ZEN verwendeten Klimaszenarien zu generieren, wurde zunächst mittels eines ökonometrischen Schätzmodells der Einfluss des Klimas auf den Stromverbrauch der Haushalte im Sample bestimmt. Für die Vorhersage der Verbrauchsprofile ist der Verbrauch eine Funktion der vorhergesagten stündlichen Wettervariablen: Temperatur in Form von Kühl- und Heizgradtagen, Niederschlag und Sonneneinstrahlung.

Generierung elektrischer Lastprofile aufgrund von Gebäudekühlung

Zeitlich aufgelöste thermische Kühllasten wurden mittels **dynamischer Gebäudesimulation** mit dem Simulationskern EnergyPlus[7] (Crawley et al., 2001) berechnet. Es wurde eine Vielzahl an Fällen gerechnet, die sich hinsichtlich den in Tabelle 4 angeführten Dimensionen unterscheiden.

Tabelle 4: Dimensionen der Variationen

Dimension	**Anzahl an Varianten**	**Beschreibung**
Gebäudekategorie und Geometrie	3	Einfamilienhaus, Reihenhaus, Mehrparteienhaus
Baujahr/Gebäudestandard	4	Vier Ausprägungen
Verschattungseinrichtungen	2	Keine Verschattung, außenliegende Verschattung
Interne Lasten	3	Interne Lasten durch Geräte + Personenanwesenheit
Sollwert Raumlufttemperatur	3	24, 25, 26 °C
Klimadaten-Gitterzelle	3	3 „Cluster": niedrigere, mittlere und höhere Werte an Kühlgradtagen
Bezugsjahr (kombiniert mit Klimaszenario)	3	2020 (RCP4.5-median), 2030 (RCP8.5-median), 2050 (RCP8.5-hot)
Kühltechnologie	3	Split Luft/Luft, Luft/Wasser mit Flächenkühlung, Free Cooling mit Flächenkühlung

Die mit EnergyPlus durchgeführten Simulationen liefern Zeitreihen der thermischen Kühllast. Diese Zeitreihen wurden entsprechend unterschiedlicher Kühltechnologien nachverarbeitet, um durch aktive Gebäudekühlung verursachte elektrischen Lastprofile der simulierten Gebäude zu generieren.

Für die Gebäudesimulationen wurden die Klimadaten von drei repräsentativen Gitterzellen (12x12 km) der in ZEN verwendeten, ganz Österreich umfassenden Klimadatensätze herangezogen. Die Gitterzellen repräsentieren geographische Gebiete (weiter unten auch „Temperaturzonen" genannt) mit für den Gebäudekühlbedarf günstigeren (Temperaturzone „niedrig"), neutralen (Temperaturzone „mittel") und weniger günstigeren (Temperaturzone „hoch") Randbedingungen. Als Indikator für die Wahl der drei repräsentativen Gitterzellen wurde die maximale wöchentliche Summe der Kühlgradstunden für das Bezugsjahr

[7] https://energyplus.net/

2050 im Klimaszenario RCP 8.5-hot herangezogen. Die Grenzen wurden so gewählt, dass die Anzahl der für die Netzsimulation berücksichtigten Haushalte in jeder Gruppe gleich groß ist (siehe Tabelle 17 im Anhang).

Entsprechend den im Datensatz des Projekts PEAKapp (siehe Kapitel „Aufbereitung von Haushaltsstrom-Lastprofilen“) angeführten Gebäudekategorien und entsprechend der Darstellungen im Gebäude- und Wohnungsregister der Statistik Austria wurden folgende Gebäudekategorien modelliert:

- Einfamilienhaus (EFH)
- Doppelhaus (DH)
- Mehrfamilienhaus (MFH) (klein, mittel, groß)

Hinsichtlich des Baujahres und des energetischen Gebäudestandards wurden folgende Ausprägungen modelliert:

- 1) große Masse, kleine Fenster, undicht, ungedämmt (Altbau)
- 2) mittlere Masse, kleine Fenster, undicht, ungedämmt (1950-1970 unsaniert)
- 3) mittlere Masse, kleine Fenster, dicht, gedämmt (< 1970 saniert oder >1970 Neubau)
- 4) kleine Masse, große Fenster, gedämmt (moderner, hochverglaster Neubau), nur bei den Gebäudekategorien EFH und DH

Für jede Gebäudekategorie wurde eine typische Geometrie angenommen, wie in Abbildung 4 dargestellt und im Anhang näher beschrieben.

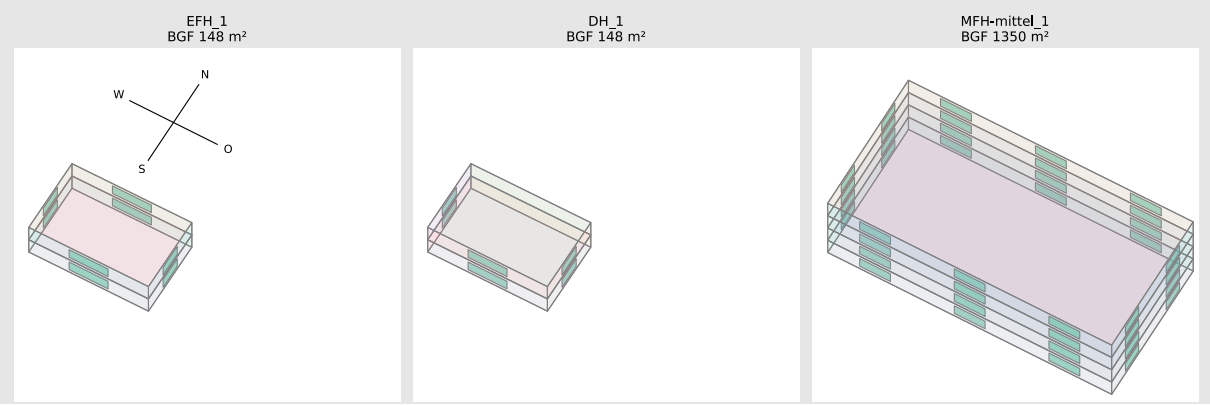


Abbildung 4: Gebäudegeometrien für die thermische Simulation. Links: Einfamilienhaus. Mittig: Doppelhaushälfte. Rechts: Mehrfamilienhaus

Bei den internen Lasten wurden drei Gruppen definiert, indem die mittleren flächenspezifischen Haushaltsstromverbräuche aus dem Datensatz des PEAKapp (siehe Kapitel „Aufbereitung von Haushaltsstrom-Lastprofilen“) in drei Drittel unterteilt wurden. Für jede Gruppe wurde ein mittleres Wochenprofil berechnet (siehe Abbildung 29 im Anhang) und in der EnergyPlus-Simulation verwendet.

Um **elektrische Lasten** aus den thermischen Kühllasten abzuleiten, wurden vereinfachte Berechnungen auf der Basis von Carnot-Wirkungsgraden durchgeführt.

Ein Gütegrad ν wurde angenommen, der das Verhältnis der Leistungszahl der Wärmepumpe EER zur höchsten theoretisch möglichen Arbeitszahl $\mathrm{EER}_{\mathrm{Carnot}} = \frac{T_k}{T_h - T_k}$ (mit T_k der kalten Abnehmertemperatur und T_h der warmen Quellentemperatur, in K) angibt. T_k wurde als Vorlauftemperatur minus eine Temperaturdifferenz von 8 K berechnet. T_h wurde als die Quellentemperatur (in den meisten Fällen die Außentemperatur) plus eine Temperaturdifferenz von 8 K berechnet. Um unplausible Werte bei niedrigeren Außentemperaturen zu vermeiden wurde auch eine maximale Leistungszahl festgelegt. Für Free-Cooling-Systeme wurde eine konstante Leistungszahl von 10 angenommen. Die sich ergebenden Leistungszahlen sind in Abbildung 5 dargestellt.

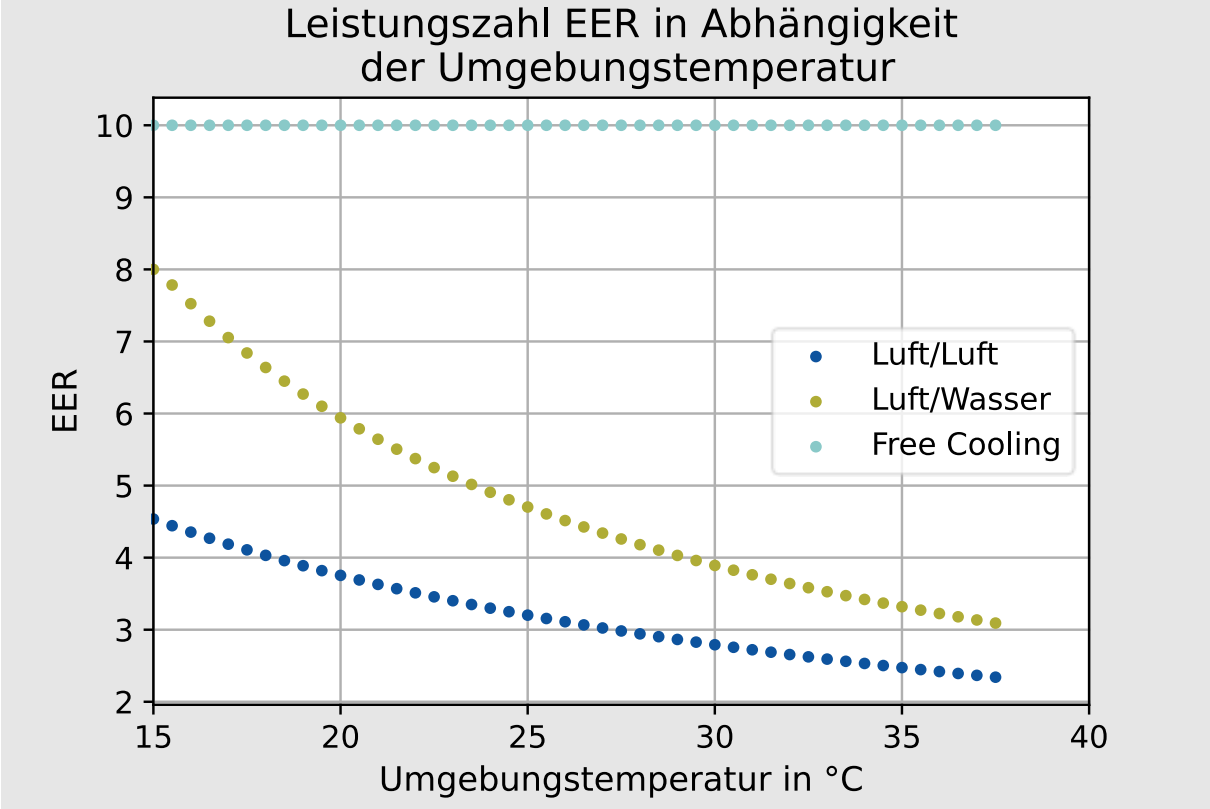


Abbildung 5: Leistungszahl in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für die 3 Kühlsystemtypen

Photovoltaik-Einspeiseprofile

Die Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaik-Anlagen wurde mit der Python-Bibliothek PVLib (J.S. Steing et al. 2016) modelliert. Für diese Berechnungen wurden dieselben Strahlungsdaten verwendet wie für die Gebäudesimulationen. Für jedes Bezugsjahr wurden neun Profile modelliert (für

drei Ausrichtungen Südost, Süd und Südwest sowie drei Neigungen von 15, 30 und 45 °C) und gleichverteilt den unterschiedlichen Haushalten zugeordnet.

Abschätzung des Lastverschiebungspotenzials

Für die Szenarien OptEcon PV und OptEcon Combi wurde als spezifische Strategie zur Deckung der elektrischen Kühllasten durch Photovoltaik ein Lastverschiebungspotenzial vereinfacht modelliert. Die Lastverschiebung wurde als Ergebnis eines linearen Optimierungsproblems modelliert. In dieser Optimierung wurde die Gebäudespeichermasse vereinfachend als Speicher abgebildet, der zwischen dem Bedarf (theoretische Kühllast aus der Gebäudesimulation durch eine für die Optimierung konstant angenommene Leistungszahl) und dem zu optimierenden Verbrauch zwischengeschaltet wurde. Eine Speicherkapazität von 6 kWh (thermisch) wurde angenommen. Dies entspricht ungefähr 3 cm Estrich (mit einer Dichte von 2300 kg/m³) auf 140 m² mit einer Temperaturdifferenz von 3 K. Dieses Lastverschiebungspotenzial wurde nur für die Gebäude mit Flächenkühlung modelliert, da angenommen wurde, dass luftgeführte Kühlung kein signifikantes Lastverschiebungspotenzial bietet.

Stromnetzsimulation

Die Auswirkungen der Zukunftsszenarien für Kühlung und PV auf die Stromnetze wurden anhand von Stromnetzsimulationen untersucht, welche über ein ganzes Jahr in einer Zeitlichen Auflösung von einer Stunde gerechnet wurden.

Um die Auswirkungen des Kühlbedarfs auf das Stromnetz zu bewerten, wurden verschiedene Klimaszenarien und Netzbedingungen berücksichtigt. Für die Zwecke dieser Studie wurden nur die Worst-Case-Bedingungen für jedes der Szenarien (Referenz, OptEcon Pur, OptEcon PV und OptEcon Combi) implementiert und analysiert. Die Worst-Case-Szenarien basieren auf dem Klimadatenset RCP8.5-hot für 2030 und 2050. Dabei wurden lediglich Summenlastprofile von Haushalten, die der wärmsten der drei definierten Zonen zuzuordnen sind, berücksichtigt. Die Bewertung erfolgte auf der Grundlage der Berücksichtigung von vier Netzparametern, die für die Verteilnetzbetreiber von vorrangigem Interesse sind. Dazu gehören die Leitungsbelastung, die Transformatorbelastung, die maximale und die minimale Spannung an allen Anschlusspunkten (=Netzknoten wo Kunden angeschlossen sind). Eine Übersicht über diese Parameter mit ihren Schwellenwerten ist in

Tabelle 5 dargestellt. Die maximale und minimale erlaubte Spannung ist niedriger als die in der Norm EN50160 (CENELEC, 2010) definierten +/-10 % der Nennspannung, weil in der Netzberechnung die Mittelspannung nicht mitgerechnet wurde. Das ist ein üblicher und vollkommen zulässiger Ansatz, allerdings muss berücksichtigt werden, dass das erlaubte Spannungsband „enger" angesetzt werden muss, da die üblicherweise auftretenden Spannungsschwankungen in der Mittelspannung auf einen einzigen Spannungswert (Slackspannung) reduziert werden.

Tabelle 5 Übersicht über die analysierten Parameter und ihre Grenzwerte

Parameter	Grenzwerte
Maximale Leitungsauslastung	90 %
Maximale Transformatorauslastung	100 %
Maximale Spannung	1.065 p.u
Minimale Spannung	0.955 p.u

Mittels Normierung der Haushaltsstrom-Lastprofile, Gebäudesimulation und postsimulatorischer Prozesse wurden elektrische (Gesamt-)Lastprofile von 427 Haushalten generiert.

Die vier Szenarien wurden mit unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Verteilungen von Gebäudestandards, Verschattungseinrichtungen und Anlagentypen (siehe Anhang, Modellannahmen Gebäudesimulation) simuliert. Hinsichtlich des Kühlbedarfs sind die Annahmen für das Referenz-Szenario am ungünstigsten (weil hier keine PV der Kühllast entgegenwirkt), und die Annahmen für das Szenario OptEcon Combi am günstigsten (weil hier der elektrische Kühlbedarf durch Nutzung von Alternativ-Maßnahmen minimiert wurde). Die Annahmen für die Szenarien OptEcon Pur und OptEcon PV unterscheiden sich nur in der Berücksichtigung von Photovoltaik.

Für jedes Szenario und jeden Haushalt wurden die Merkmale Verschattung, Kühlsystem und Gebäudestandard auf Basis der in Abbildung 6 dargestellten und im Anhang beschriebenen Verteilungen stochastisch ausgewählt. Die internen Lasten und die Temperaturzone wurden auf Basis der Profildaten für den jeweiligen Haushalt festgelegt.

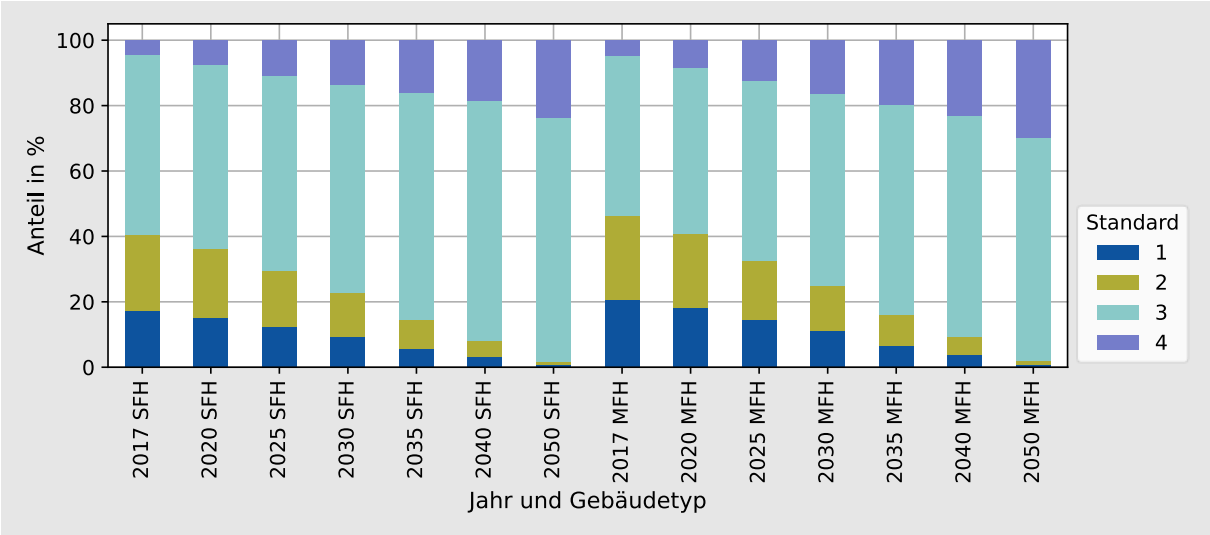


Abbildung 6: Anteile unterschiedlicher Gebäudestandards in Abhängigkeit von Jahr und Gebäudetyp

Die **Stromnetzsimulationen** wurden auf Basis einer repräsentativen Auswahl von Niederspannungsnetzen, die für typische Netze in Österreich repräsentativ sind, durchgeführt. In diesem Schritt wurden automatisierte Plausibilitätsprüfungen durchgeführt, um die Netzdaten zu validieren und eventuelle Unregelmäßigkeiten zu identifizieren. Im Rahmen dieses iterativen Prozesses werden bei Unstimmigkeiten die notwendigen Verbesserungen und Anpassungen vorgenommen, je nach Bedarf automatisch oder in Zusammenarbeit mit dem Netzbetreiber. Nachdem die insgesamt 500 Netzmodelle in einem automatisierten Prozess vorbereitet wurden, wurden verschiedene Last- und Erzeugungsprofile entsprechend der in den Netzdaten vorhandenen Zählpunkts-Informationen integriert. Wie im Kapitel bereits erwähnt, wurden die PV-Einspeiseprofile auf der Grundlage verschiedener Kombinationen von Wetterdaten, Azimut und Neigung mit PVlib (J. S. Stein et al, 2016) erstellt. Standardlastprofile (SLP) aus (APS Power Clearing and Settlement AG, 2021) wurden verwendet, um Profile entsprechend der Art und des Jahresverbrauchs der Last zu erstellen. Haushaltsprofile (H0) wurden verwendet, um den Haushaltsverbrauch entsprechend zu modellieren. Für jedes Szenario wurden dann jährliche Simulationen mit dem Netzberechnungsprogramm DIgSILENT PowerFactory (DIgSILENT GmbH, DIgSilent Power System Solutions, 2021) durchgeführt. Die Ergebnisse der so genannten „quasi-dynamischen Simulation" wurden dann anhand verschiedener Leistungskriterien bewertet, um festzustellen, ob Auslastungs- oder Spannungsverletzungen auftreten. Im Falle von Netzverletzungen werden (falls erforderlich) iterativ Netzverstärkungsberechnungen durchgeführt, um die erforderlichen Abhilfemaßnahmen zu ermitteln. Ein vereinfachter Überblick über die Methodik ist in Abbildung 7 dargestellt.

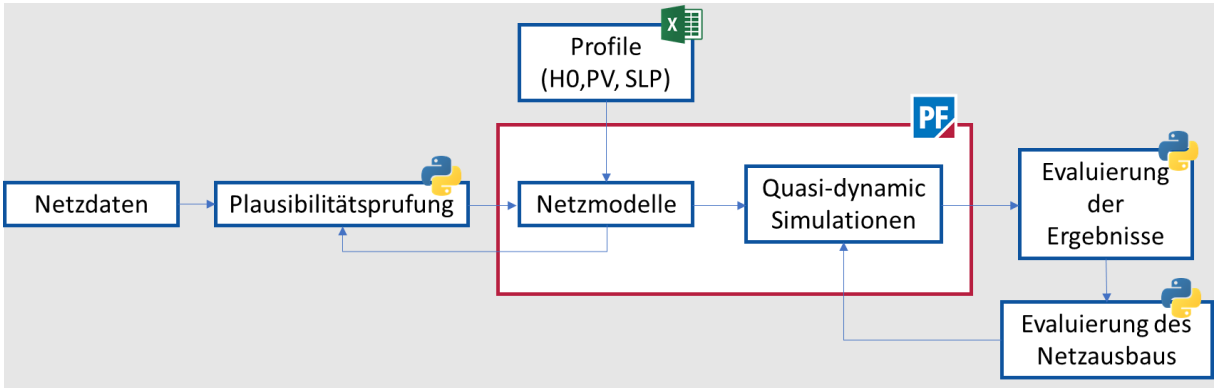


Abbildung 7: Überblick über den Prozess der Netzsimulation

Stakeholder-Beteiligung

In diesem Kapitel werden die für die qualitative Stakeholder-Beteiligung verwendeten Methoden dargestellt. Kern ist die Anwendung von semistrukturierten Interviews.

Semistrukturierte Interviews

Experteninterviews sind semistrukturiert, um Flexibilität beim Ablauf zuzulassen, gleichzeitig aber ermöglichen sie eine Vergleichbarkeit der Aussagen bei der Auswertung. Eine statistische Auswertung ist nicht möglich, die Häufigkeit einer Aussage ist nicht relevant. Essenziell ist die Begründung von Zusammenhängen.

Befragte Experten und Expertinnen

Die Experten und Expertinnen wurden auf Basis ihrer Tätigkeit sowie wissenschaftlichen Arbeiten und auf Basis von Empfehlungen gewählt. Sie wurden via E-Mail oder telefonisch rekrutiert. Die Durchführung erfolgte via Webkonferenz. Die Auswertung erfolgte in den gleichen Kategorien wie im Fragenkatalog eingeteilt.

Während die Experten und Expertinnen im Folgenden angeführt werden (siehe Tabelle 6), erfolgt in den Auswertungen keine Zuordnung der einzelnen Aussagen zu den Experten bzw. Expertinnen. Wenngleich es sich hier um kein politisches Thema handelt, wird diese Vorgangsweise meist angewandt, weil den Experten und Expertinnen dadurch ermöglicht wird, offener über ihren Fachbereich zu sprechen, ohne dabei berufs- oder verbandsspezifische Erwartungen erfüllen zu müssen. Entstammt ein Inhalt dieser Arbeit einem Experteninterview, so wird dies am Ende des Satzes bzw. Absatzes sichtbar gemacht.

Tabelle 6: Im Rahmen des Projekts „ZEN" durchgeführte Experteninterviews

Name	Institution	Datum
Christian Kaltenegger	DECA Dienstleister Energieeffizienz Contracting Austria	24.02.2021
Claudia Dankl	Verband der Österreichischen Zementindustrie	26.02.2021
Ewald Traxler	Netz Oberösterreich GmbH	29.01.2021
Gerfried Berger	Linz Strom-Gas-Wärme GmbH, für Fernkälte	24.02.2021
Heinz Höfler	KT-H Kälte und Klimatechnik, für WKO-FB Kältetechnik	15.02.2021
Hubert Fechner	Österreichische Technologieplattform Photovoltaik	17.02.2021
Johannes Kathan, Barbara Herndler	AIT, Projektteam, für den Bereich Stromnetze	13.01.2021
Johannes Reichl	Energieinstitut an der JKU, Projektteam, für Komfort	14.01.2021
Johannes Zimmerberger	LINZ NETZ GmbH	29.01.2021
Klaus Koller, Alexander Springler	Daikin Airconditioning Central Europe HandelsgmbH	25.02.2021
Lukas Kranzl	TU Wien EEG, Projektteam, für den Bereich Gebäude	12.01.2021
Peter Genser	Gerlich Dr & Co Gebäude- und Facilitymanagement	22.02.2021
Siegfried Kopatsch	Wärmepumpe Austria	23.02.2021
Thomas Kreitmayer	Stadt Wien, MA20	22.02.2021
Tim Selke	AIT, Projektteam, für den Bereich Kühlung	14.01.2021
Vera Immitzer, Nikolas Fussenegger	Bundesverband Photovoltaic Austria	17.02.2021

Fragenkatalog

Vorbereitend wurden auf Basis der einschlägigen Literatur Hypothesen abgeleitet. Der resultierende Fragenkatalog wurde für die Experten individuell zusammengesetzt, um den unterschiedlichen fachlichen Hintergründen gerecht zu

werden. D.h. die Schwerpunkte der Cluster & Fragen werden Stakeholder-spezifisch ausgelegt. Stakeholder sollen ihren Bereich der Expertise argumentieren, nicht über Bereiche außerhalb ihrer Expertise mutmaßen.

Der Fragenkatalog basiert im Wesentlichen auf den Arbeitshypothesen bzw. Fragestellungen. Dazu zählen die Entwicklung des Kühlbedarfs, sowie die Auswirkungen der Kühltechnologien in Interaktion mit PV-Ausbau bzw. -erzeugung und dem Stromnetz. Die Themenblöcke für die Experten und Expertinnen-Interviews sind in Tabelle 7 gelistet.

Tabelle 7: Themenblöcke für die Befragung der Experten und Expertinnen

Rahmenbedingungen Klimawandel, Temperatur, Hitzeperioden Komfortansprüche
Gebäude Effekte von Fensterflächen und Isolierung Unterschiede Neubau und Sanierung Ausstattung mit Kühlsystemen Öffentliche Anforderungen und Förderungen
Kühltechnologien Aktive und passive Systeme Verbreitung und Kosten Speichertechnologien
Photovoltaik Technische Interaktion/Interaktionsmöglichkeiten mit der Kühlung Interaktion aus wirtschaftlicher und Kunden und Kundinnen-Sicht
Stromnetz Erhöhter Kühlbedarf als Treiber des Stromnetzausbaus Interaktion mit anderen Technologien Gleichzeitigkeit des Kühlbedarfs
Stadt-Land-Unterschiede Kühlbedarf Gebäude-Charakteristika PV-Angebot Stromnetz-Charakteristika

Projektergebnisse

In diesem Kapitel werden die Projektergebnisse aus den unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen präsentiert.

Prognose der Kühlbedarfs-Entwicklung in Österreich

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse in einer aggregierten Darstellung für alle Klimadaten-Sets und gebäudeseitigen Annahmen. Bis 2050 weist der Nutzenergiebedarf über alle Szenarien eine Bandbreite von 6 TWh bis 28 TWh auf, je nachdem von welchem Klimadatensatz und welche gebäudeseitigen Maßnahmen ausgegangen wird. Die Bedeutung von Verschattung, Innenraum-Temperaturen und Nachtkühlung wird in den Ergebnissen sehr deutlich: Über zwei Drittel des Kühlbedarfs (Nutzenergie) können im Jahr 2050 je nach Klimadaten-Set durch die Annahmen im „niedrig"-Szenario (OptEcon Combi) im Vergleich zum hohen Kühlbedarf (OptEcon Pur und OptEcon PV) eingespart werden.[8]

Während Abbildung 8 sowohl das Median-Jahr als auch das Maximal-Jahr zeigt, ist davon auszugehen, dass sich die Auslegung der Systeme – auch hinsichtlich der Periode nach 2050 an den „hot"-Werten orientieren sollte.

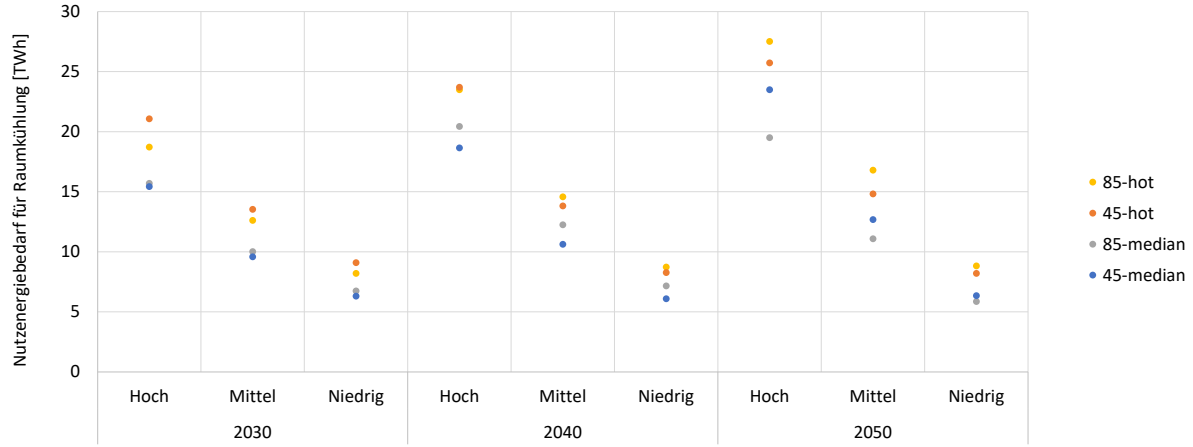


Abbildung 8: Kühlbedarf - Szenarienüberblick Österreich 2030 bis 2050

[8] Es zeigt sich überdies, dass die Werte „85 median" in der 10-Jahresperiode 2040 über dem Wert der 10-Jahresperiode 2050 liegen. Das resultiert daraus, dass in dem Auswahlalgorithmus der "median" - Jahre die Ergebnisse der RCP8.5-Szenarien die Klimadaten für das Jahr 2040 und 2050 nicht sehr weit auseinanderliegen. Gepaart mit der Tatsache, dass aufgrund fortschreitender Sanierung zunehmende Verschattung und bessere g-Werte der Fenster unterstellt sind führt das zu leicht sinkendem Bedarf. Es liegt in der Natur der Klimaszenarien, dass diese gewissen Schwankungen über der Zeit aufweisen und keinen rein linearen Verlauf, woraus auch erklärbar ist, dass im Jahr 2050 die Werte für 85-median unter jenen von 45 median liegen.

Beispielhaft zeigt Abbildung 9 die Verteilung des theoretischen Kühlenergiebedarfs auf die einzelnen Gebäudekategorien. Während aktuell der tatsächlich gedeckte Kühlenergiebedarf vor allem durch Nichtwohngebäude generiert wird, zeigen die Ergebnisse, dass der theoretische Kühlenergiebedarf stark durch Wohngebäude dominiert werden könnte: Etwa 60 % des Bedarfs bezieht sich auf Wohngebäude. Die Tatsache, dass die Ergebnisse vor allem Effizienzsteigerungen in Mehrfamilienhäusern erzielt werden könnte, ergibt sich aus unterschiedlichen Sanierungsaktivitäten, Geometrie-Aspekten sowie unterschiedlicher Diffusion mit Verschattung im Basisjahr. Allerdings ignoriert dieses Ergebnis städtische Hitzeinseln, die Mehrfamilienhäuser deutlich stärker treffen würden als Einfamilienhäuser. Diese Effekte wurden in der Analyse nicht explizit berücksichtigt.

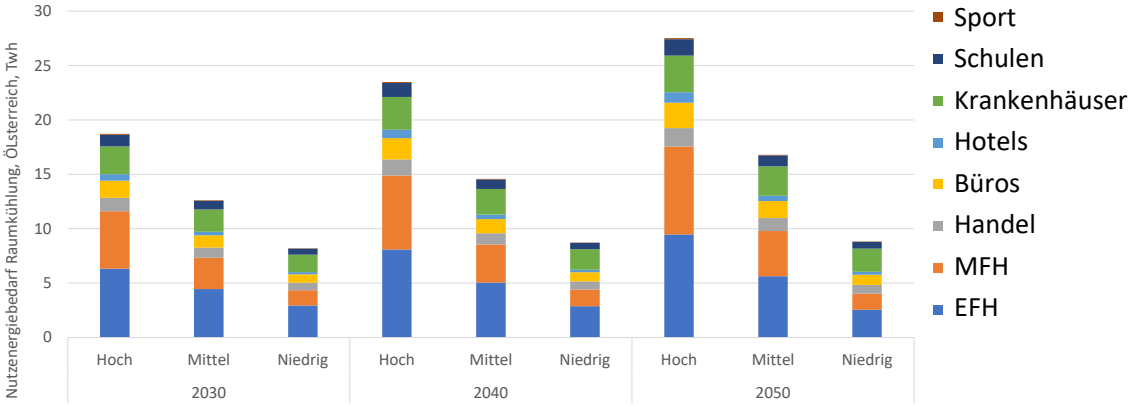


Abbildung 9: Kühlbedarf nach Gebäudekategorien unter den Klima-Annahmen von RCP8.5-hot, Österreich 2030 bis 2050

Resultierender Strombedarf für Gebäudekühlung

In den detaillierten Gebäudesimulationen (siehe unten) wurde für die analysierten Gebäudetypen eine resultierende saisonale Arbeitszahl der Kühlsysteme ermittelt. Diese wurde im Folgenden dafür angesetzt, um den resultierenden Kühlenergie- (Endenergie-), d.h. im Wesentlichen Strombedarf abzuschätzen. Abbildung 10 zeigt, dass die Bandbreite zwischen „hoch" (bzw. OptEcon Pur und OptEcon PV) und „nieder" (OptEcon Combi) noch weiter aufgeht als für den Kühlbedarf. Das liegt daran, dass aktive Kühlsysteme in den „nieder"-Szenarien mit höherer Arbeitszahl betrieben werden können als bei Gebäuden, die passive Maßnahmen in geringerem Umfang einsetzen. Es zeigt sich somit, dass der Effekt der passiven Maßnahmen auch auf den Betrieb aktiver Kühlsysteme positive, d.h. Effizienz-steigernde Wirkung hat. Die Differenz, d.h. die End-Energieeinsparungen, zwischen „hoch" und „nieder"-Szenarien liegen nun bei etwa 80 %.

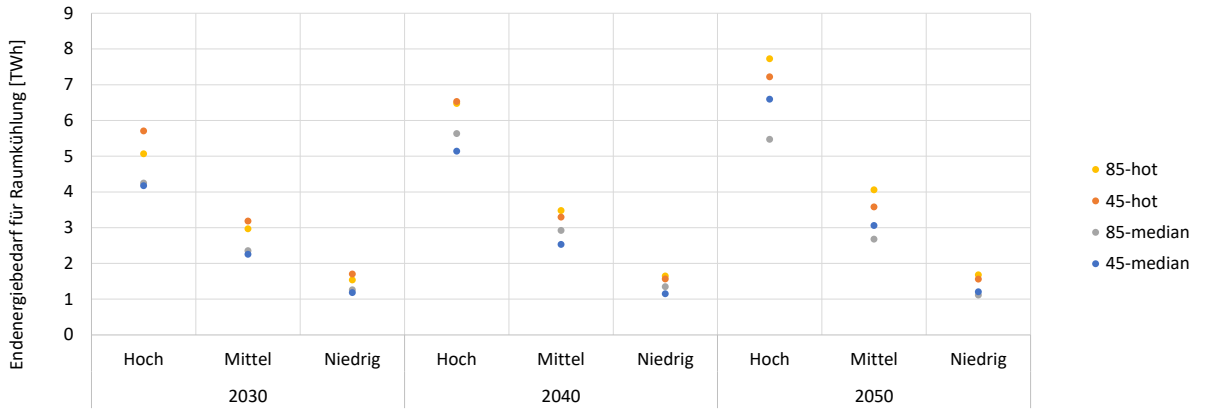


Abbildung 10: Kühlenergiebedarf (Endenergie) bei vollständiger Deckung des Kühlenergiebedarfs - Szenarienüberblick Österreich 2030 bis 2050

Wird also – wie in Abbildung 11 – unterstellt, dass im „nieder"-Szenario der geringere Kühlbedarf auch zu einer geringeren Deckung des Kühlbedarfs führt und dass auch im Hoch-Szenario keine vollständige Deckung erfolgt, ergibt sich eine noch deutlichere Reduktion des Endenergiebedarfs für Kühlung im Ausmaß von etwa 90 %. Im Nieder-Szenario kann somit erreicht werden, dass der Energiebedarf in nur geringfügigem Ausmaß (ca. 1/3) von 2030 bis 2050 steigt.

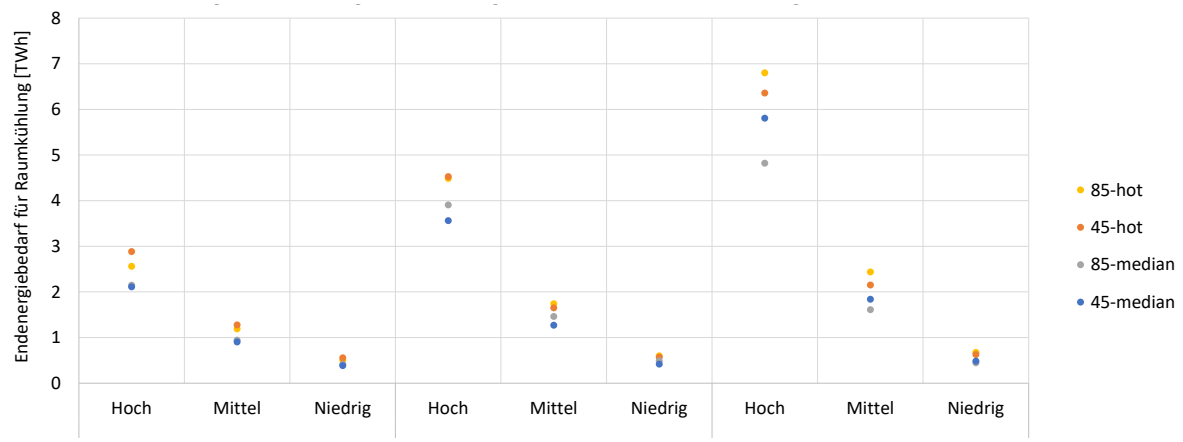


Abbildung 11: Kühlenergiebedarf (Endenergie) für Raumkühlung bei nur teilweiser Deckung des Kühlenergiebedarfs - Szenarienüberblick Österreich 2030 bis 2050

Für die weiteren Modellierungen und Analysen im Projekt wurde gemäß Grundannahme des Projekts von einer vollständigen Deckung des Kühlbedarfs ausgegangen.

Auswirkungen von Gebäudekühlung auf die Stromnetze

Die Ergebnisse aus den einzelnen Tätigkeiten, die für die Untersuchung der Auswirkungen von Gebäudekühlung auf die Stromnetze erforderlich waren (Normalisierung der Haushaltsstrom-Lastprofile, dynamische thermische Gebäudesimulationen, postsimulatorische Prozesse und Netzsimulationen), werden in den folgenden Unterkapiteln präsentiert.

Haushaltsstrom-Lastprofile

Die Stromlasten der Haushalte werden als stündlicher Wert des Stromverbrauchs der Hauptstromzähler der Haushalte angegeben. Die Daten enthalten Lastprofile von 561 Haushalte für einen Kalenderjahreszeitraum vom 1. August 2017 bis Ende Juli 2018. Keine der Haushalte besitzt eine Kühleinrichtung oder eine elektrische Heizung. Wenn Beobachtungen mit fehlenden Werten entfernt werden, enthält der Schätzdatensatz 3.215.939 stündliche Beobachtungen. Wir modellieren den Verbrauch mit dem folgenden ökonometrischen Paneldatenmodell:

$$y_{it} = \alpha + \beta_1 Strompreis_{it} + \beta_2 CDD_{it} + \beta_3 HDD_{it} + \beta_4 Niederschlag_{it} + \beta_5 Globalstrahlung_{it} + h_t + error_{it} \quad (1)$$

Die abhängige Variable y bezieht sich auf den stündlichen Stromverbrauchswert in kWh des Haushalts i zum Zeitpunkt t. Sie ist eine Funktion des Strompreises pro kWh, der Kühl- und Heizgradtage (CDD und HDD), der Niederschlagsmenge in mm, der Sonneneinstrahlung in W/m², mit festen Effekten für die Stunden des Tages (0-23) und einem normalverteilten Fehlerterm. Durch die Verwendung von CDD und HDD anstelle der expliziten Temperaturwerte im ökonometrischen Modell kann das Modell die nichtlineare Wirkung der Temperatur berücksichtigen. Nämlich, dass der Verbrauch bei extremen Temperaturen höher ist. Die aus diesem Modell geschätzten Koeffizienten sind im Anhang aufgeführt.

Das Prognosemodell ergibt sich dann aus Gleichung (2), in die alle Preise, CDD, HDD, Niederschlagsmengen und Globalstrahlungswerte für eine bestimmte Stunde eingesetzt werden können, um eine Vorhersage des Haushaltsverbrauchs in dieser Stunde zu erhalten. Die Werte von h werden als die stündlichen Koeffizienten mit festen Effekten angegeben (siehe Anhang), die zur Konstante addiert werden, wobei h0 gleich 0.378 ist, die Schätzung der Konstante α.

$$Stromverbrauch_{it} = 0.378 + 1.069\, Strompreis_{it} + 0.00119\, CDD_{it} + 0.00317\, HDD_{it} + 0.00283\, Niederschlag_{it} + 0.000111\, Globalstrahlung_{it} + h_t \quad (2)$$

Die vorhergesagten Wetterprofile werden auf Stundenbasis mit den folgenden Variablen angegeben: Niederschlag in mm, Globalstrahlung in W/m² und Temperatur in °C. Die prognostizierte, mittlere Tagestemperaturkurve für alle Tage eines Halbjahres (April bis Oktober) ist in den nachstehenden Abbildungen,

zusammen mit der in unserem Sample beobachteten, durchschnittlichen, täglichen Verbrauchslastkurve, dargestellt. Aus den Abbildungen geht klar hervor, dass der Stromverbrauch der Haushalte nicht strikt von der Tagestemperatur abhängt, da ein geringerer Verbrauch sowohl mit den Tiefst- als auch mit den Höchstwerten der Tagesverlaufstemperatur verbunden ist. Abbildung 12 zeigt links den Tagestemperaturverlauf (April-Oktober) im Szenario RCP4.5-median und rechts für jenen im Szenario RCP8.5-hot. In beiden Szenarien ist ein genereller Temperaturanstieg von 2020 bis 2050 zu erkennen.

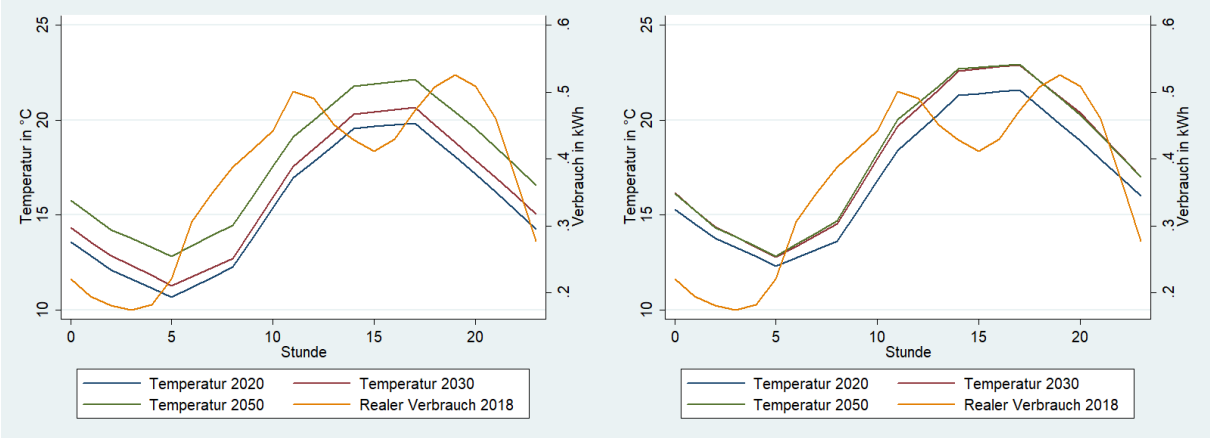


Abbildung 12: Temperaturverläufe in Szenario RCP4.5-median (links) und RCP8.5-hot (rechts)

Um die Temperatur als nichtlinearen Faktor des Stromverbrauchs zu berücksichtigen, werden die stündlichen Temperaturen, sowohl die beobachteten als auch die vorhergesagten, in stündliche Heiz- und Kühlgradtagswerte (HDD bzw. CDD) umgerechnet. Dabei werden HDD und CDD für die Stunde t mit der Temperatur Ct in Grad Celsius wie folgt berechnet9.

Wenn $T_m \leq 15°$, dann $HDD_t = 18 - C_t$

Wenn $T_m \geq 24°$, dann $CDD_t = C_t - 21$

Das bedeutet, dass HDD in einer bestimmten Stunde größer als Null ist, wenn die Außentemperatur in dieser Stunde weniger als 18 Grad beträgt. Wenn die Temperatur gleich oder größer als 18 Grad ist, ist HDD gleich Null. HDD kann nur an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur (Tm) von bis zu 15°C größer null sein. CDD ist in einer bestimmten Stunde größer null, wenn die Temperatur in dieser Stunde mehr als 21 Grad beträgt. Wenn die Temperatur gleich oder kleiner als 21 Grad ist, ist CDD gleich Null. CDD kann nur an Tagen mit einer

[9] Stündliche Definition der CDD und HDD abgeleitet von der täglichen Definition nach https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/nrg_chdd_esms.htm

Tagesmitteltemperatur (Tm) von mindestens 24°C größer null sein. Tabelle 8 veranschaulicht dieses Konzept anhand von fiktiven Beispielen.

Tabelle 8: Beispiele für CDD und HDD

Variable	01.08.2017 15:00	11.12.2017 07:00	06.04.2018 17:00
Temperatur	28°C	-2°C	16°C
HDD	0	20	0
CDD	7	0	0

Tabelle 9 zeigt die Samplestatistiken für alle Beobachtungen, wenn die beobachteten CDD und HDD Werte vorhanden sind. Die prognostizierten CDD Werte für 2020, 2030 und 2050 sind im Szenario RCP4.5 im Durchschnitt niedriger und im Szenario RCP8.5 höher als die beobachteten CDD Werte, die HDD Werte sind dagegen vergleichbar. Die prognostizierten CDD Werte steigen in beiden Szenarien von 2020 bis 2050, die HDD Werte sinken im RCP4.5 und steigen im RCP8.5 von 2020 bis 2050.

Tabelle 9: CDD und HDD

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standard-abweichung	Min	Max
CDD/h 2017/2018	4328462	.1039072	.9051006	0	15.4
HDD/h 2017/2018	4328462	8.338022	7.811263	0	37.6
RCP4.5-median					
CDD 2020	4328462	.0751264	.827459	0	14.02
CDD 2030	4328462	.098992	.9093994	0	14.52
CDD 2050	4328462	.0882092	.91185	0	19.98
HDD 2020	4328462	9.722159	8.577173	0	36.92
HDD 2030	4328462	7.362849	6.801649	0	33.82
HDD 2050	4328462	7.221892	7.370594	0	36.24
RCP8.5-hot					
CDD 2020	4328462	.2758214	1.725572	0	22.16
CDD 2030	4328462	.3778687	1.882685	0	18.67
CDD 2050	4328462	.3365088	1.746486	0	17.25
HDD 2020	4328462	7.189854	7.342344	0	37.56
HDD 2030	4328462	7.891253	8.025451	0	37.07
HDD 2050	4328462	8.479166	8.241338	0	38.3

Tabelle 10 zeigt die beobachteten und prognostizierten, stündlichen Niederschlagswerte. Je nach Szenario sinken bzw. steigt der prognostizierte Niederschlag von 2020 bis 2050.

Tabelle 10: Niederschlag

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standard-abweichung	Min	Max
Beobachteter Niederschlag 2017/18	4223298	.0962581	.5440707	0	39.4
RCP4.5-median					
2020	4223298	.1158778	.3153331	0	8.114
2030	4223298	.1270009	.4476308	0	21.936
2050	4223298	.0950223	.2998875	0	17.129
RCP8.5-hot					
2020	4223298	.1030657	.2743377	0	5.304
2030	4223298	.1308541	.3442956	0	28.946
2050	4223298	.1062313	.2899179	0	8.897

Die Sonneneinstrahlungsprognosen (nach Umwandlung) in kW/m² wurden mit 0.18 multipliziert, um die zu erwartende Solarproduktion in kW pro m² für jede Stunde des Tages in den Jahren 2020, 2030 und 2050 zu erhalten. Die meteorologischen Vorhersagen implizieren in beiden Szenarien eine etwas höhere PV-Produktion aufgrund von erhöhtem Sonnenschein im Jahr 2050 als im Jahr 2020 (Abbildung 13).

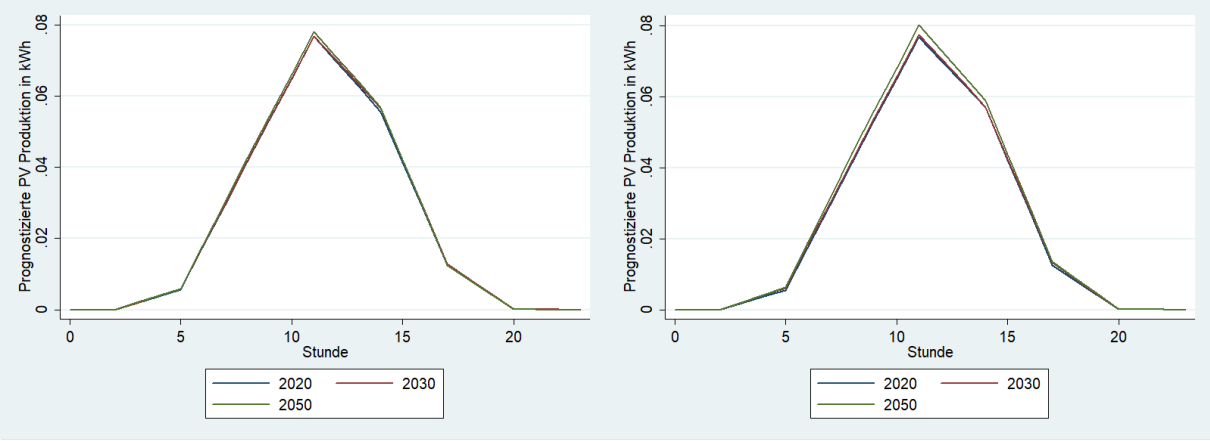


Abbildung 13: Solarstromproduktion in Szenario RCP4.5-median (links) und RCP8.5-hot (rechts)

Die stündlich vorhergesagten Werten für 2020, 2030 und 2050 für CDD, HDD, Niederschlag und Sonneneinstrahlung werden schließlich in die geschätzte ökonometrische Gleichung (2) für jede Beobachtung eingefügt, um die Lastprofile

für 2020, 2030 und 2050 für das Sample zu schätzen. Die zusammenfassenden Statistiken der Vorhersagen sind in Tabelle 11 aufgeführt. Wir stellen fest, dass das Modell den mittleren stündlichen Verbrauch sehr gut vorhersagt, aber, ähnlich wie bei einigen meteorologischen Vorhersagen, die Extreme der Verteilung (Minimum und Maximum) weniger berücksichtigt.

Tabelle 11: Prognose der Haushaltsstrom-Lastprofile

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standard-abweichung	Min	Max
Beobachteter Verbrauch	3215939	.3961185	.4834126	0	13.156
Prognostizierter Verbrauch 2017/18	3215939	.3961185	.1347956	.1223926	.6908639
RCP4.5-median					
2020	3215939	.4004192	.1357265	.1195537	.7004015
2030	3215939	.3928047	.1339664	.1193639	.670482
2050	3215939	.3921337	.1344185	.1195038	.6846951
RCP4.5-hot					
2020	3215939	.3930267	.135004	.117964	.6822724
2030	3215939	.3948252	.1355108	.1157373	.6958556
2050	3215939	.4009408	.1366246	.1139274	.6874787
RCP8.5-median					
2020	3215939	.3950149	.1351249	.1191861	.7022344
2030	3215939	.3942836	.1357328	.1197047	.6878819
2050	3215939	.3974544	.135343	.1196303	.6816037
RCP8.5-hot					
2020	3215939	.3919659	.1344981	.1180592	.6995881
2030	3215939	.3939722	.1368096	.1171369	.6860614
2050	3215939	.395358	.1359468	.115751	.681824

Abbildung 14 veranschaulicht den vorhergesagten, durchschnittlichen Stundenverbrauch für 2020, 2030 und 2050 für die Szenarien RCP4.5-median (links) und RCP8.5-hot (rechts).

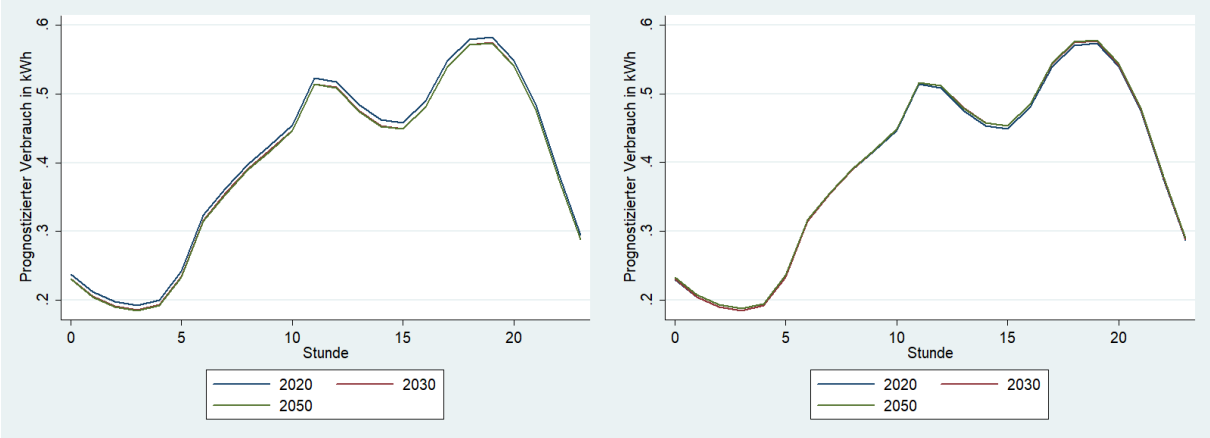


Abbildung 14: Durchschnittlicher Stundenverbrauch in Szenario RCP4.5-median (links) und RCP8.5-hot (rechts)

Thermische Gebäudekühllasten und resultierende elektrische Lastprofile

Thermische Gebäudekühllasten wurden mittels dynamischer thermischer Gebäudesimulation ermittelt. Die ermittelten Zeitreihen der Kühllast werden einerseits als Input für Stromnetzsimulationen verwendet, andererseits dienen sie der Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Parameter und Maßnahmen auf die zukünftige Entwicklung der durch die Gebäudekühlung verursachte elektrische Lastprofile. Die im Kapitel „Methodik" beschriebenen Parametervariationen ergaben eine Gesamtzahl von 1782 Gebäudesimulationen, deren Ergebnisse im Folgenden beschrieben werden.

In Tabelle 12 werden Mittelwerte von Kühlbedarf und maximaler Kühllast für alle Simulationen, die mit den jeweiligen Parameterwerten durchgeführt wurden, zusammengefasst. Daraus wird ersichtlich, dass jeder der aufgeführten Parameter einen signifikanten Einfluss auf die zwei Indikatoren hat. Innere Lasten, Temperaturzone, Sollwert und Verschattung wirken sich wie erwartet monoton auf den Kühlbedarf aus. Das Einfamilienhaus hat von den drei Wohngebäudetypen den höchsten Kühlbedarf. Dies lässt sich auf den höheren angenommenen Verglasungsanteil zurückführen. Der Kühlbedarf sinkt zwischen Gebäudestandard 1 und 3 mit verbesserter Wärmedämmung, aber steigt mit Gebäudestandard 4 – auch hier aufgrund des höheren Verglasungsanteils – stark an.

Tabelle 12: Mittelwerte von Kühlbedarf und max. Kühllast (flächenspezifisch) nach Parametern

Variation	Kühlbedarf in kWh/(m².a)	Max. Kühllast in W/m²
Gebäudetyp=DH	12,8	20,9
Gebäudetyp=EFH	20,8	28,3
Gebäudetyp=MFH-mittel	14,0	17,1
Gebäudestandard=1	14,8	27,4
Gebäudestandard=2	11,7	23,1

Variation	Kühlbedarf in kWh/(m².a)	Max. Kühllast in W/m²
Gebäudestandard=3	8,6	14,2
Gebäudestandard=4	35,5	27,1
Innere Lasten=hoch	20,5	25,0
Innere Lasten=mittel	15,4	22,4
Innere Lasten=niedrig	12,3	20,2
Verschattung=außenliegend	9,7	16,0
Verschattung=unverschattet	22,4	29,1
Temperaturzone=hoch	20,4	24,8
Temperaturzone=mittel	15,1	22,2
Temperaturzone=niedrig	12,7	20,7
Sollwert=24 °C	19,6	24,7
Sollwert=25 °C	15,8	22,6
Sollwert=26 °C	12,7	20,4
Bezugsjahr=RCP4.5-2020	13,9	21,6
Bezugsjahr=RCP8.5-2030	15,2	22,6
Bezugsjahr=RCP8.5-2050	19,0	23,4

Wie in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt, ergeben sich aus den unterschiedlichen Parameterkombinationen breite Wertebereiche für den Kühlbedarf (von 0 bis 80 kWh/(m²a)) und für die Spitzenlasten (von 0 bis 50 W/m²). Eine außenliegende Verschattung erscheint als Voraussetzung für eine rein passive Kühlung bzw. für niedrige Werte des Kühlbedarfs. Aus Abbildung 15 geht hervor, dass die höchsten Werte des Kühlbedarfs alle mit dem hohen Verglasungsanteil von Gebäudestandard 4 auftreten. Hinsichtlich der Spitzenlasten hingegen, geht aus Abbildung 16 hervor, dass Gebäudestandard 1 (Altbau mit hohen Transmissionskoeffizienten) besonders ungünstig ist.

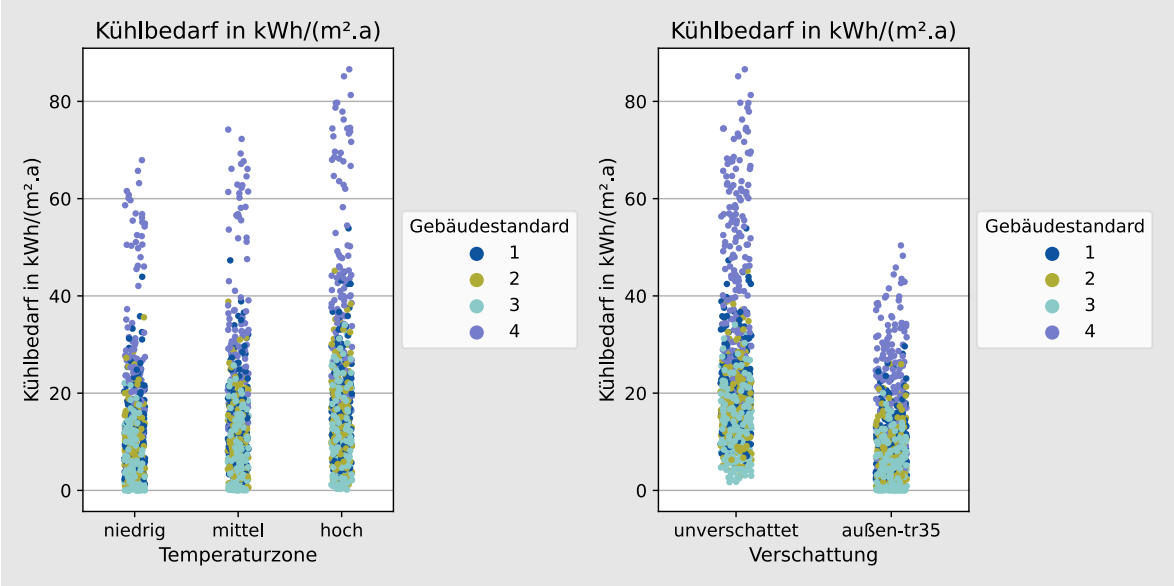


Abbildung 15: Kühlbedarf für alle Gebäudesimulationen in Abhängigkeit von der Temperaturzone (links) und Verschattung (rechts)

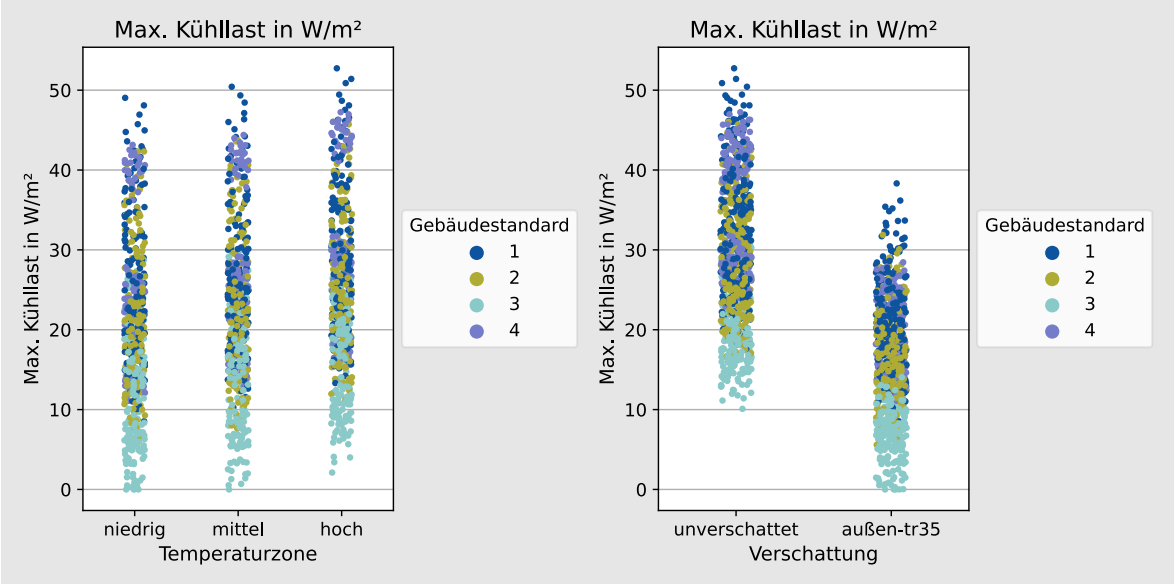


Abbildung 16: Max. Kühllast in Abhängigkeit von Temperaturzone (links) und Verschattung (rechts)

Elektrische Lastprofile aufgrund von Gebäudekühlung

Die durch Gebäudekühlung hervorgerufene elektrischen Lastprofile werden für jeden simulierten Gebäudetyp aus den simulierten thermischen Kühllasten und aus den vereinfachten Berechnungen der Leistungszahl abgeleitet. Grundsätzlich ist die Leistungszahl bei höheren Außentemperaturen – also zu Zeiten mit hoher Kühllast – niedriger. Wie aus Abbildung 17 hervorgeht, führt dies dazu, dass die durch Gebäudekühlung verursachte elektrische Leistungsaufnahme schärfere Spitzen aufweist als die thermische Kühllast

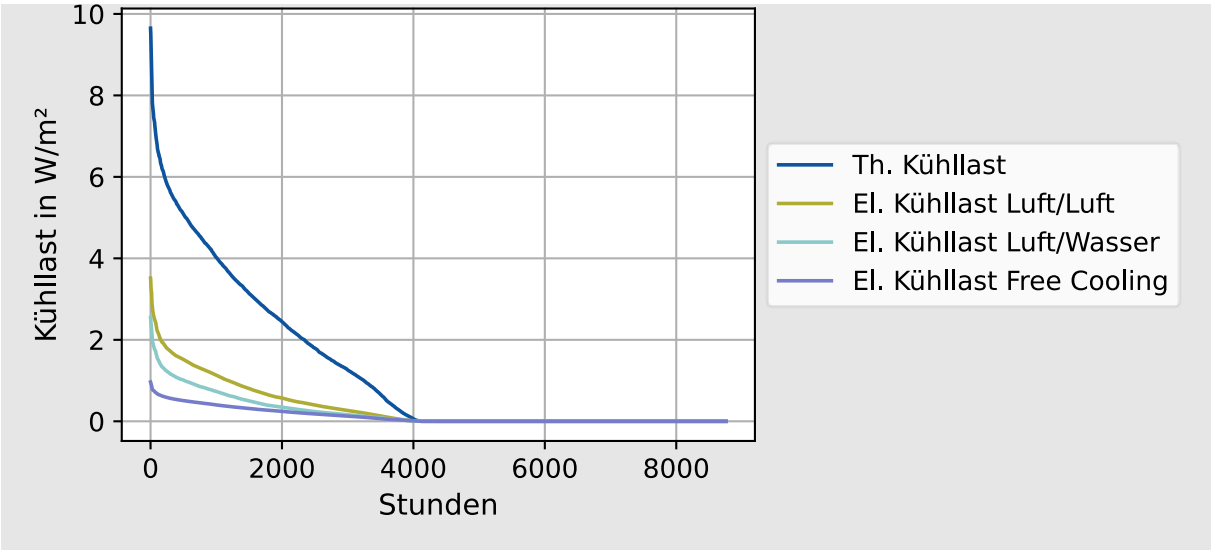


Abbildung 17: Jahresdauerlinie der thermischen und der elektrischen („El. Kühllast") Last aufgrund von Gebäudekühlung für eine Simulation (Mehrfamilienhaus, Bezugsjahr 2050 RCP8.5, niedrige innere Wärmegewinne, außenliegender Sonnenschutz, Kühl-Sollwert 25 °C)

Die resultierenden Zeitreihen der elektrischen Lasten aufgrund von Gebäudekühlung für vier Szenarien sind in Abbildung 18 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Kühllast hauptsächlich an Sommernachmittagen konzentriert ist. Im pessimistischen Referenzszenario tritt die Kühllast auch vermehrt am Abend auf. Die unterschiedlichen Maßnahmen in den sukzessiven OptEcon-Szenarien führen zu einer Reduzierung der Kühllast. Zwischen OptEcon Pur und OptEcon PV bleibt die Kühllast in Summe gleich, aber sie wird hin zu den Mittagsstunden verschoben.

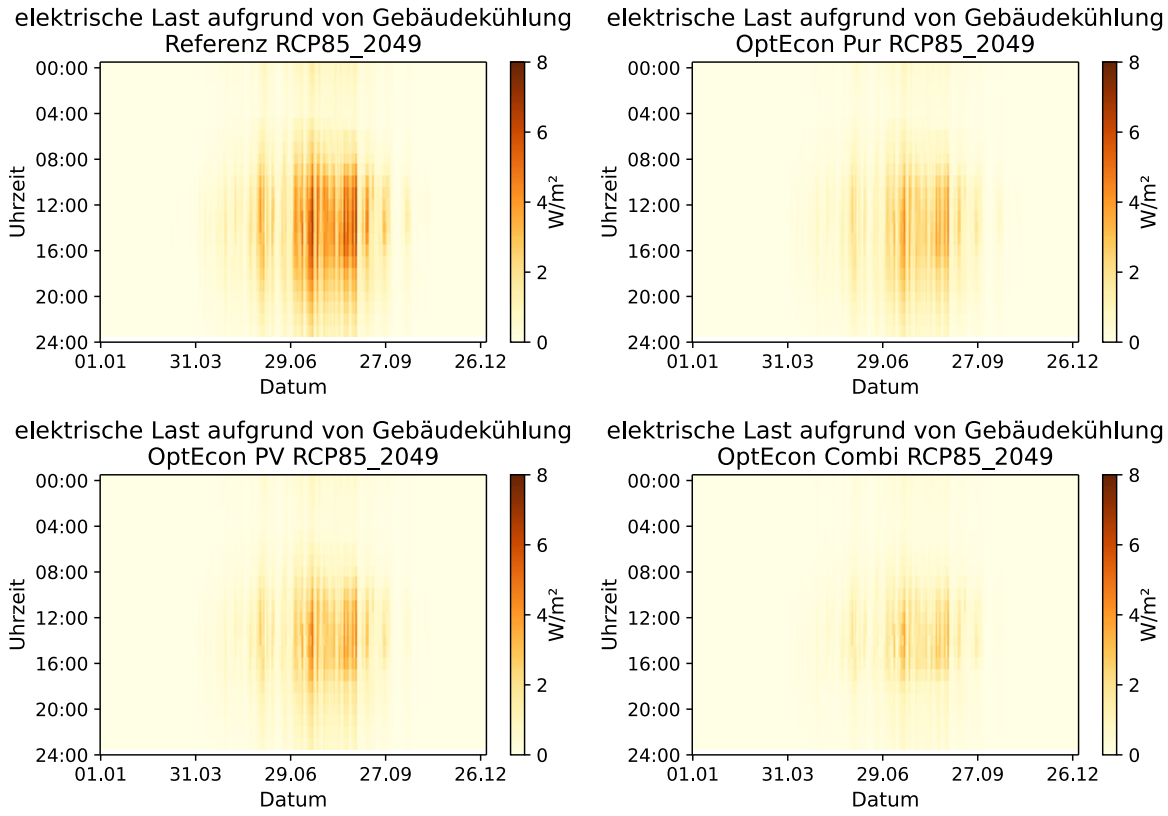


Abbildung 18: Rasterdiagramme der mittleren elektrischen Last aufgrund von Gebäudekühlung für die vier untersuchten Szenarien, für das Bezugsjahr 2050 (entspricht Betrachtungsjahr 2049) im Klimaszenario RCP8.5-hot

In Abbildung 19 und Abbildung 20 sind diese Auswirkung der Lastverschiebung deutlicher erkennbar, da in dieser Darstellung nur Gebäude mit Lastverschiebungspotenzial berücksichtigt werden. Durch die Lastverschiebung nähert sich das elektrische Lastprofil aufgrund von Gebäudekühlung an typische PV-Einspeiseprofile an.

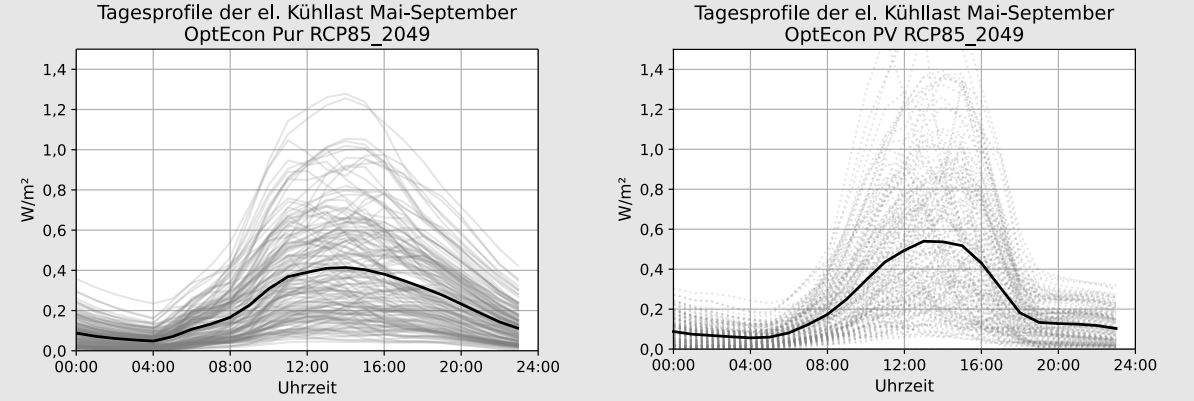


Abbildung 19: Tagesprofile der mittleren elektrischen Last aufgrund von Gebäudekühlung („el. Kühllast") für die Szenarien OptEcon Pur (links) und OptEcon PV (rechts). Das mittlere Tagesprofil für die Periode Mai-September ist fett dargestellt

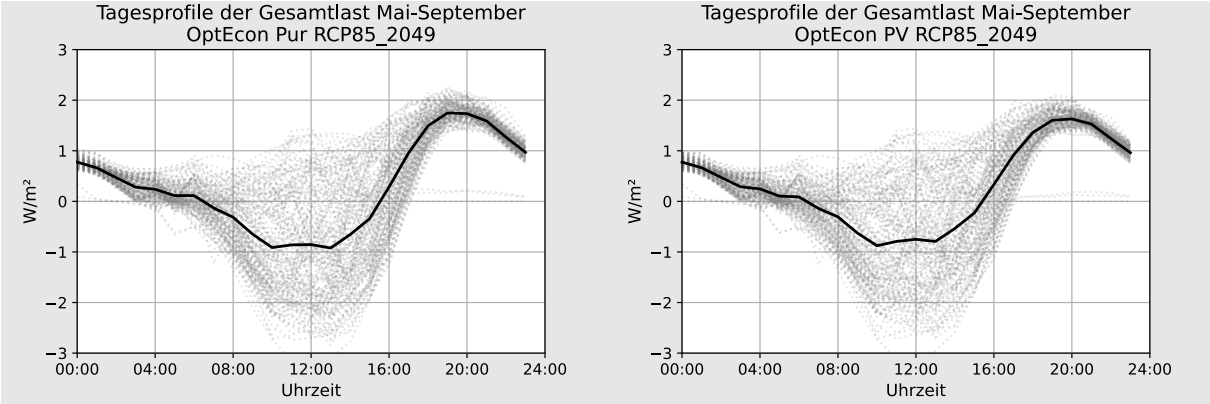


Abbildung 20: Tagesprofile der mittleren Gesamtlast für die Szenarien OptEcon Pur und OptEcon PV, für die Gebäude die im Szenario OptEcon PV Lastverschiebung modelliert wird. Das mittlere Tagesprofil für die Periode Mai-September ist fett dargestellt

Netzbelastungen und Auswirkungen auf das Spannungsband

Der Einfluss von Kühlung, PV, und deren Kombination auf die Stromnetze wurde anhand von Jahressimulationen in Stundenauflösung für 500 repräsentative Niederspannungsnetze für unterschiedliche Szenarien und unterschiedliche Jahre durchgeführt:

2030 Szenarien

Die Ergebnisse der Netzsimulationen für jedes der Szenarien für das Jahr 2030 sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt. Es werden alle vier Szenarien im Verhältnis zum Basisszenario (kein Kühlbedarf, keine PV) betrachtet wird. In diesen Diagrammen ist zu beachten, dass nur der Maximalwert pro Parameter pro Netz pro Jahr gezeigt wird, da er den extremen Zustand im Netz innerhalb der

Jahressimulation angibt und nicht die Werte jedes Netzanschlusses oder -zweiges zu jeder Zeit enthält.

In diesen Diagrammen ist erkennbar, wie sich die erhöhten Belastungen durch Kühlung und PV auswirken, da sich die Werte im Vergleich zum Basisszenario weiter von ihrer linearen Kurve entfernen. Es ist generell zu erkennen, dass die Umsetzung der Kühlungsanforderungen und die Integration von PV in Haushalten die Belastung der Netze durchaus erhöhen können, allerdings keine signifikanten Grenzwertverletzungen auftreten.

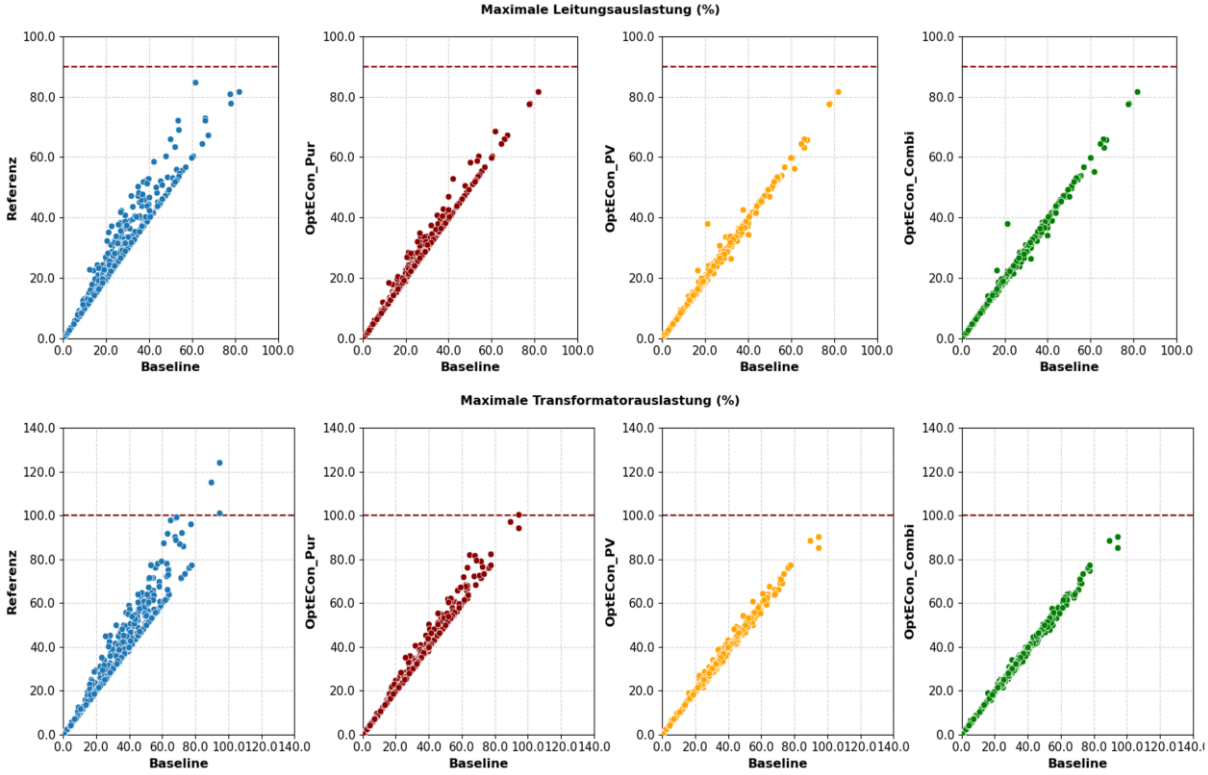


Abbildung 21: Ergebnisse der Simulationen für die maximale Leitungsbelastung (oben) und die maximale Transformatorauslastung (unten) für alle Netze für das Jahr 2030

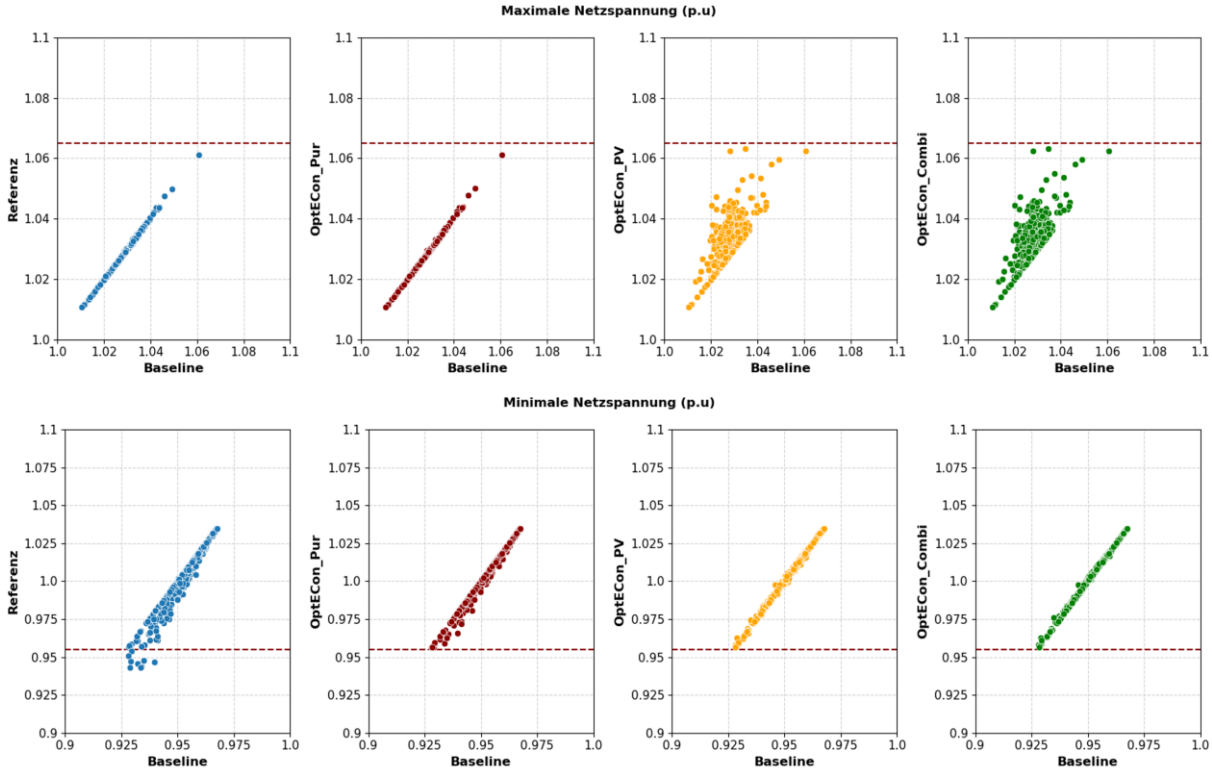


Abbildung 22: Ergebnisse der Simulationen für die maximale Netzspannung (oben) und die minimale Netzspannung (unten) für alle Netze für das Jahr 2030

Bei der Betrachtung der maximalen Leitungsbelastung für jedes der Szenarien sind keine Verstöße festzustellen, was darauf hindeutet, dass die Netzkabel gut ausgerüstet sind, um die erhöhte Belastung durch die Kühlung zu bewältigen. Bei der Betrachtung der maximalen Trafobelastung wird jedoch eine Überlastung (bis zu 124 %) im Referenzszenario deutlich. Diese Überlastungen scheinen insofern nicht sehr problematisch, da sie in Netzen auftreten, wo die Auslastungen schon im Baseline-Szenario nah an den Betriebsgrenzen sind. Es handelt sich hierbei also offensichtlich um Netze, wo in naher Zukunft ohnehin eine Netzverstärkung durchgeführt werden muss, um bei einer angenommenen allgemeinen Laststeigerung keine Netzprobleme zu bekommen. Wie die Szenarien OptEcon Pur, OptEcon PV und OptEcon Combi zeigen, werden diese Überlastungen durch die Berücksichtigung von Abschattungs- und Abschwächungstechniken (z. B. PV) vermieden. Ähnlich verhält es sich mit der maximalen Netzspannung, die im nur Referenzszenario und in keinem der anderen Szenarien überschritten wird. Daher sollte der Netzbetreiber im Jahr 2030 keine signifikanten Anforderungen an die Netzverstärkung im Zusammenhang mit dem Anstieg des Kühlungsbedarfs erwarten, wenn die Abschwächungsmethoden, d. h. Beschattung und PV-Integration in Haushalten, umgesetzt werden. Aufgrund der "minimalen" Auswirkungen auf das Netz wurden diese Szenarien nicht weiter untersucht.

2050 Szenarien

Abbildung 23 und Abbildung 24 geben einen Überblick über die Ergebnisse der Simulationen für alle Netze. Es werden alle vier Szenarien im Verhältnis zum Basisszenario für das Jahr 2050 betrachtet.

Wie in den 2030-Szenarien gibt es auch im Jahr 2050 in keinem der Szenarien Netze, die eine Überlastung der Leitungen aufweisen. In Bezug auf die maximale Belastung der Transformatoren führt die Einführung einer erhöhten Last aufgrund der Kühlung zu einer Überlastung der Transformatoren in zwei Netzen im Szenario Referenz (bis zu 123 %). Die Integration von PV in die Haushalte führt in einigen Netzen zu Überspannungsbedingungen, bei denen der Schwellenwert in 6 Netzen (1,2 % aller analysierten Netze) überschritten wird, wie im Fall von OptEcon PV und OptEcon Combi, was darauf hindeutet, dass diese Netze in erster Linie von der Integration von PV betroffen sind, die zu Überspannungsverletzungen führt. Im Gegensatz dazu sind die Verletzungen der Spannungsuntergrenze in 9 Netzen (1,8 % aller analysierten Netze) aufgrund der erhöhten Belastung durch die Kühlung zu beobachten, wie im Referenzszenario gezeigt. Dies wird jedoch in den nachfolgenden Szenarien, die die Integration von PV beinhalten, abgeschwächt.

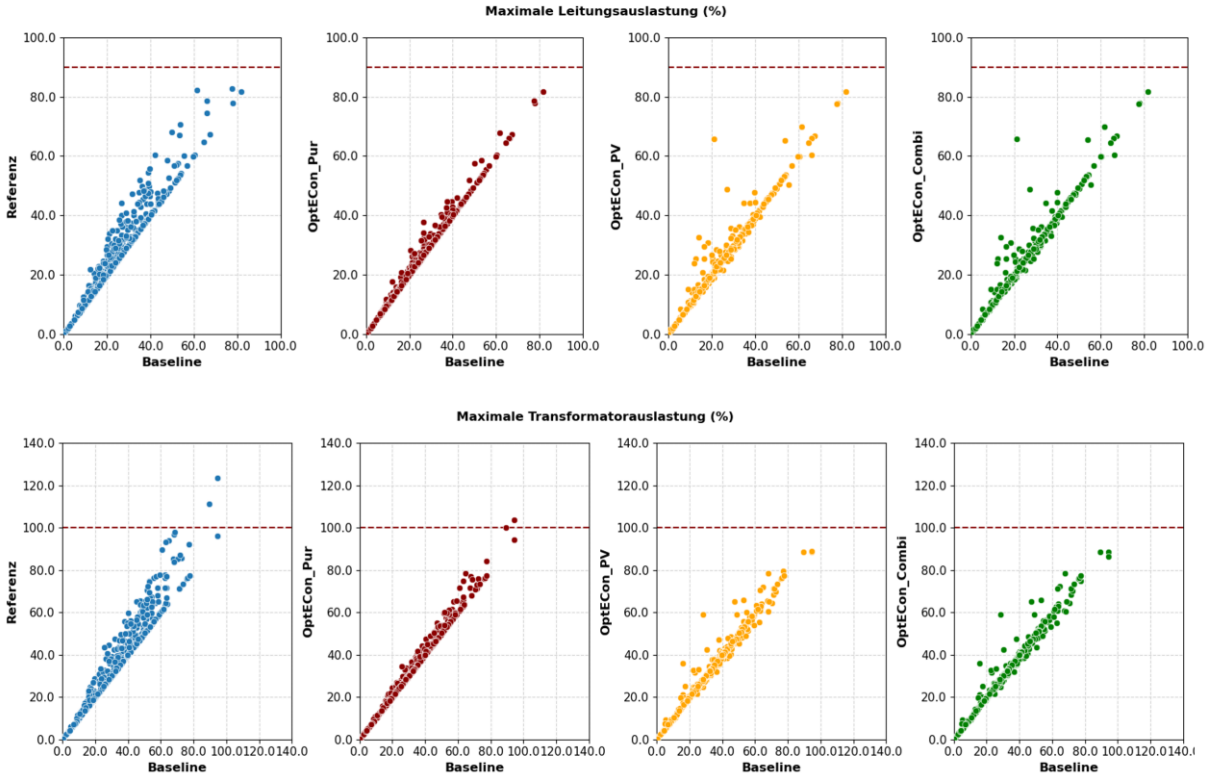


Abbildung 23: Ergebnisse der Simulationen für die maximale Leitungsbelastung (oben) und die maximale Transformatorauslastung (unten) für alle Netze für Jahr 2050

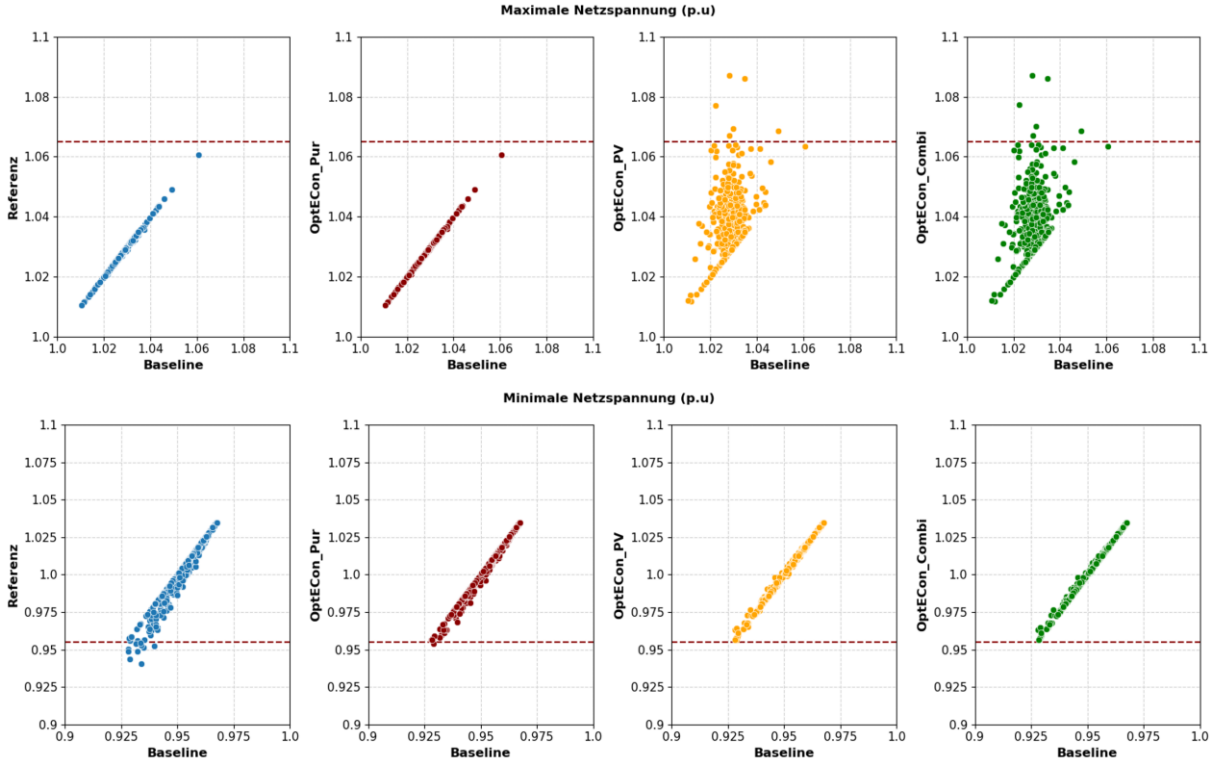


Abbildung 24: Ergebnisse der Simulationen für die maximale Netzspannung (oben) und die minimale Netzspannung (unten) für alle Netze für Jahr 2050

Weil in den Netzberechnungen eine homogene Integration von PV-Anlagen in Wohngebäuden angenommen wurde, und in den Bestandsnetzen noch viel Reserven vorhanden sind, zeigten die Netzberechnungen eine fast problemlose Integration von PV-Anlagen bis 2050. Die Berechnung realistischer PV-Verteilungen konnte Aufgrund eines erheblichen Mehraufwandes nicht durchgeführt werden - es ist generell nicht davon auszugehen, dass die unter realen Bedingungen entstehende PV-Verteilung bis 2050 ohne nennenswerte Netzverstärkung integriert werden kann.

Die Auswirkungen des erhöhten Kühlbedarfs konnten durch den Einsatz von Beschattungstechnologien (OptEcon Pur) und die Integration von PV in Haushalten (OptEcon PV und OptEcon Combi) gemildert werden. Es kann aber weder die PV den erhöhten Kühlbedarf vollständig kompensieren, noch kann die durch den Kühlbedarf entstehende Last die PV-Einspeisung vollständig kompensieren – diese beiden Technologien zeigen eine hohe, aber keine 100 %ige Korrelation im Einspeise/Last-Verhalten.

Um den Grad der Auswirkung dieser Überspannungsverletzungen zu bewerten, wurde eine tiefergehende Analyse jener 6 Netze mit den höchsten Spannungsverletzungen durchgeführt.

Maximale Netzspannung

Abbildung 25 zeigt die Boxplots für jedes der Netze, die Überspannungsbedingungen aufweisen, basierend auf der Analyse des maximalen Spannungswerts, der innerhalb des gesamten Netzes über ein Jahr der Simulation beobachtet wurde. Der Vollständigkeit halber werden alle Szenarien dargestellt, um die Entwicklung der Überspannungsbedingungen durch den Zubau von PV-Anlagen in Haushalten zu zeigen.

Wie man sieht, treten Überspannungszustände meist als Ausreißer auf und werden daher als Ausnahmen betrachtet. Nichtsdestotrotz sind die Anzahl und die Dauer dieser Überschreitungen für das Verteilnetzbetreiber relevant, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten und die in der Norm EN50160 definierten Betriebsanforderungen bezüglich Spannungsqualität zu erfüllen. Da Netz 2 im Laufe des Jahres eine hohe Anzahl von Überspannungszuständen aufwies, werden die Ergebnisse der weiteren Analyse hier als Beispiel dargestellt, aber ein ähnlicher Ansatz mit ähnlichen Ergebnissen wurde für alle 6 Netze mit Überspannungsbedingungen durchgeführt.

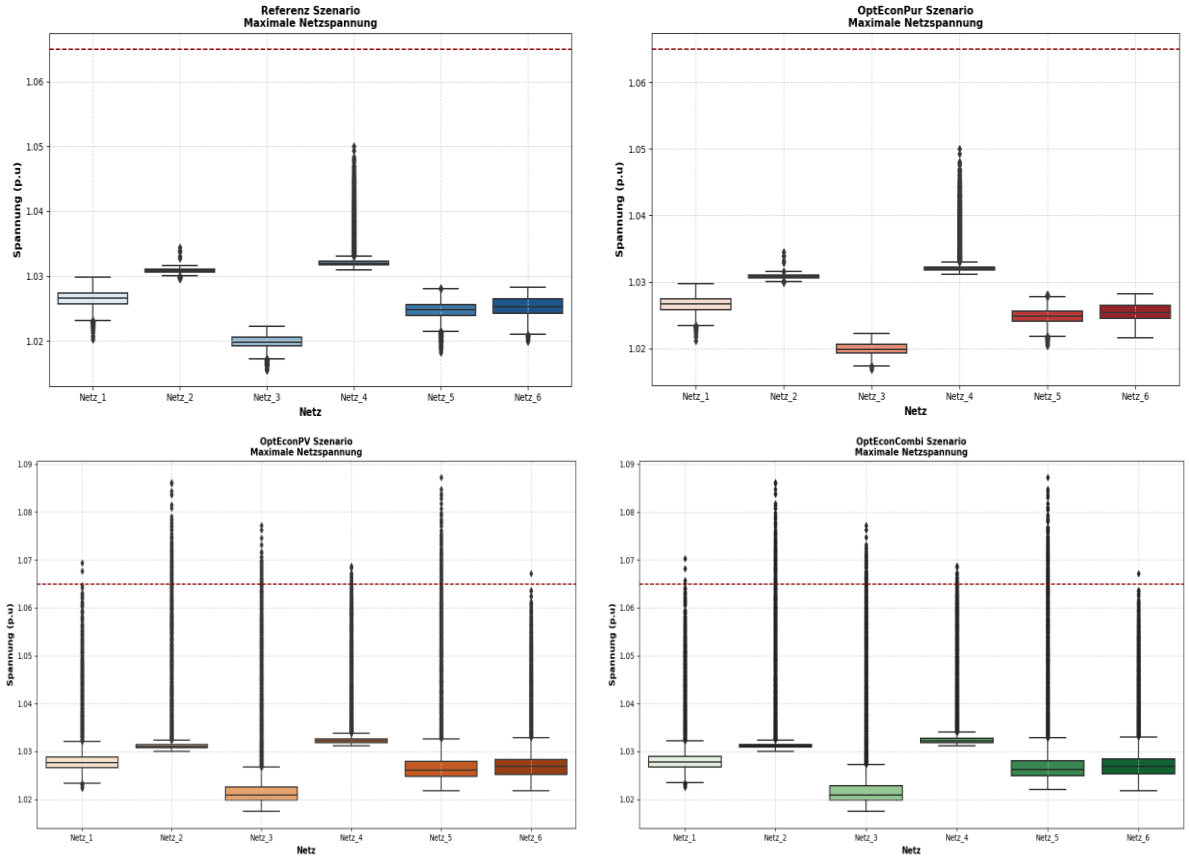


Abbildung 25 Übersicht über Netze mit Überspannungsbedingungen

Die Dauer der Überspannungszustände für jedes der Szenarien ist in Abbildung 26 dargestellt, die die Dauerline der höchsten Netzspannung über das gesamte Jahr

angibt. Im Falle der Szenarien OptEcon PV und OptEcon Combi beträgt die Gesamtdauer 144 bzw. 185 Stunden. Somit kommt es im Netz zu Überspannungszuständen von insgesamt bis zu 2,11 % des Jahres. Trotz dieses niedrigen Wertes sind diese Bedingungen unzulässig und einem Auftreten dieser Netzzustände muss vom Netzbetreiber gegengesteuert werden.

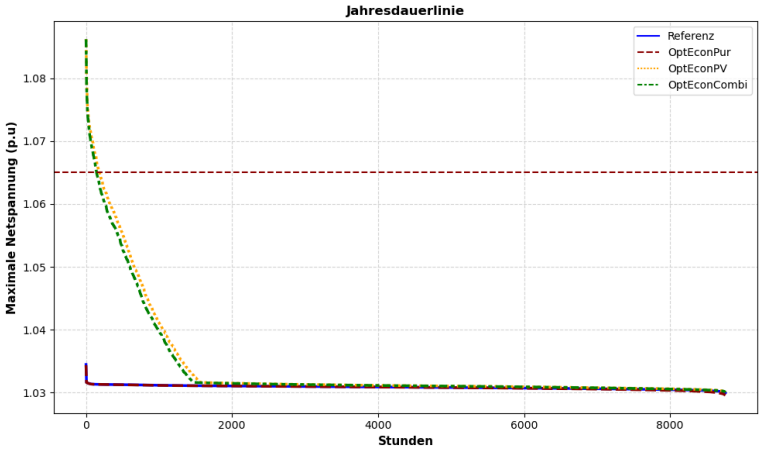


Abbildung 26 Jahresdauerlinie der maximalen Netzspannung für jedes Szenario (Referenz, OptEcon Pur, OptEcon PV, OptEcon Combi)

Um herauszufinden, zu welchen Zeiten im Jahr diese Überschreitungen auftreten, wurden weitere Analysen für jeden Tag des gesamten Jahres durchgeführt. Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Stunden der maximalen Überspannung pro Tag für die Szenarien OptEcon PV und OptEcon Combi.

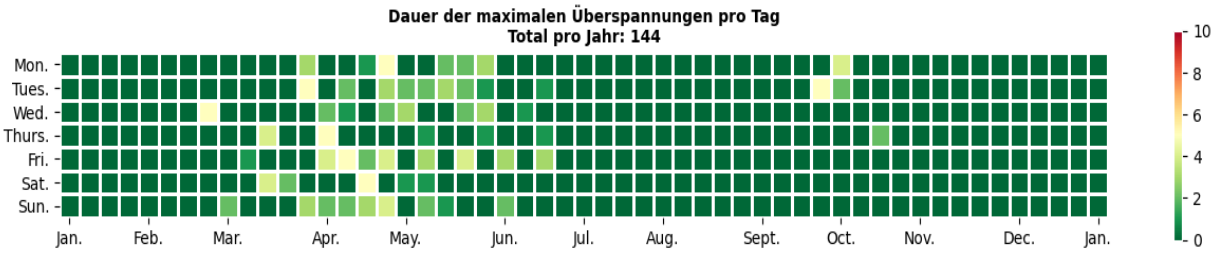


Abbildung 27 Stunden mit maximaler Überspannung pro Tag für das Szenario OptEcon PV

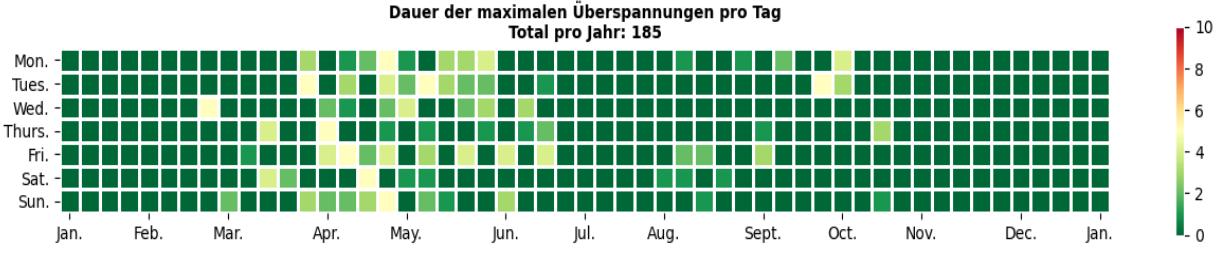


Abbildung 28 Stunden mit maximaler Überspannung pro Tag für das Szenario OptEcon Combi

In beiden Szenarien ist zu erkennen, dass die meisten dieser Überspannungszustände in der Frühjahrssaison in den Monaten März bis Juni auftreten, wobei das OptEcon Combi-Szenario eine höhere Gesamtzahl von Überschreitungen über das Jahr hinweg aufweist. In beiden Szenarien kann diese Überspannung auf die hohe Einspeisung von PV-Anlagen mit geringerem Kühlungsbedarf zurückgeführt werden (d.h. im Frühling ist die Sonne schon stark, aber die Außentemperaturen sind noch niedrig). Dies wird im Fall des OptEcon Combi-Szenarios noch verschärft, da es zusätzliche Abhilfemaßnahmen zur Verringerung des Kühlbedarfs in Kombination mit der PV-Integration vorsieht. Bei der Betrachtung der Eigenschaften und der Topologie des Netzes wurde festgestellt, dass es sich in dem Fall um einen Netzabschnitt mit verhältnismäßig niedrigen Leitungsquerschnitten handelt, was ein Hinweis darauf ist, dass in diesem Netzabschnitt die Betriebsmittel relativ alt sein dürften. Es daher davon auszugehen, dass der Netzbetreiber im Rahmen seiner laufend durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen diesen Netzabschnitt in sehr naher Zukunft ohnehin erneuert / verstärkt hätte. Um diese Verstöße zu beheben, müssten insgesamt 586 m Kabel innerhalb des Netzes erneuert werden.

Schlussfolgerung aus den Stromnetzsimulationen

Auf der Grundlage der Ergebnisse der verschiedenen Simulationen für jedes der Szenarien über 500 Niederspannungsnetze hinweg wird deutlich, dass die Durchdringung des Kühlbedarfs und die Integration von PV in Haushalten keine signifikanten Grenzwertverletzungen in den untersuchten Stromnetzen für 2030 und 2050 haben. Bei diesen Ergebnissen muss allerdings berücksichtigt werden, dass eine homogene Verteilung der PV-Anlagen modelliert wurde, was Bezüglich der Integrierbarkeit in die Stromnetze das Optimum darstellt, welches in der Praxis allerdings schwer realisierbar sein dürfte. Geht man in der Realität von einer weniger gleichmäßigen Integration von PV-Anlagen aus, kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die in der Berechnung angenommenen PV-Mengen ohne nennenswerte Netzverstärkungsmaßnahmen bis 2050 integriert werden können.

In den meisten Fällen können negative Auswirkungen des erhöhten Kühlbedarfs bereits durch den Einsatz von Beschattungstechnologien (OptEcon Pur) und die Integration von Haushalts-PV (OptEcon PV und OptEcon Combi) gemildert werden. Die Analyse der Szenarien mit den gegebenen Annahmen hat gezeigt, dass im Allgemeinen keine Netzverstärkung erforderlich ist. In Ausnahmefällen (0,6 %) wurde gezeigt, dass in einigen Netzen eine Netzverstärkung erforderlich ist, die jedoch verhältnismäßig gering ist. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Verteilernetzbetreiber alle 50 bis 60 Jahre ihre Netzbetriebsmittel ohnehin erneuern, werden bis zu 2 % der Netze pro Jahr im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen ohnehin verstärkt. Da in der Netzberechnung das Alter der Netzbetriebsmittel nicht mitberücksichtigt wurde, kann über die Notwendigkeit einer „Zusatzinvestition" zusätzlich zur den permanent

durchgeführten Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen der Netzbetreiber keine Aussage getroffen werden. Es wird jedoch vermutet, dass jene Netzabschnitte, in welchen in der Netzberechnung Probleme aufgetreten sind, von den Netzbetreibern im Rahmen ihrer Regelinvestitionen verstärkt werden. Somit sollten diese Netze rechtzeitig für die erwarteten Zukunftsszenarien 2030 und 2050 in einem angemessenen Zustand sein. Dies steht im Einklang mit dem strategischen Ausbauplan der Netzbetreiber, in dem Netzen mit höherem Handlungsbedarf in der Reihenfolge der Erneuerung Priorität eingeräumt wird. Darüber hinaus wurde diese Studie nur für ländliche/vorstädtische Netze durchgeführt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Auswirkungen auf städtische Netze noch geringer sind, da sie wesentlich robuster sind. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Integration von Kühllasten und Haushalts-PV in der Stadt leicht umgesetzt werden kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Integration von Kühllasten mit und ohne der Berücksichtigung von Haushalts-PV-Anlagen für die Jahre 2030 und 2050 keine nennenswerten Probleme innerhalb des Stromnetzes verursacht. Dies ist dadurch begründet, dass im Allgemeinen angenommen werden kann, dass die Summe aus Grundlast im Sommer (welche generell sehr nahe bei einem Schwachlastzustand liegt) und zusätzlicher Kühllast die Netze weniger belasten als die Starklast, welche im Allgemeinen in den Wintermonaten auftritt. Es kann aber weder die PV-Einspeisung die Kühllast vollständig kompensieren, noch kann die Kühllast die PV-Einspeisung vollständig kompensieren – diese beiden Technologien zeigen eine hohe, aber keine 100 %ige Korrelation im Last- und Einspeise-Verhalten. Eine flächendeckende PV-Integration wäre daher nur unter der Annahme einer sehr homogen verteilten PV mit niedriger Einzel-Leistung je Anlage problemlos möglich, da die Kühllast die PV-Einspeisung nicht permanent und dauerhaft kompensiert. Weiters ist bei der Gesamt-Bewertung zu berücksichtigen, dass in den Niederspannungsnetzen aktuell viel Reserven existieren, die ohne Netzverstärkungsmaßnahmen bis 2050 nahezu komplett aufgebraucht sein werden. Auch wenn die Netzsimulationen zeigen, dass bis 2050 kaum Grenzwertverletzungen auftreten, so ist es nicht erstrebenswert, dass die aktuell vorhandenen Netzreserven bis 2050 fast vollständig aufgebraucht werden, weil das ein Aufschieben und Anhäufen von Netzinvestitionen für die Jahre nach 2050 bedeuten würde. In jedem Fall wird die Integrierbarkeit von Kühllast und PV-Einspeisung stark erleichtert werden durch jene Netzverstärkungsmaßahmen, welche zur Integration von Elektromobilität und Wärmepumpen (als Ersatz für Heizsysteme auf Basis von fossilen Energieträgern) notwendig werden.

Stakeholder-Interviews

Argumentativ-kausale Zusammenhänge zur Interaktion von Gebäude, PV und Kühlung werden durch bilaterale Gespräche und Interviews mit relevanten Stakeholdern und Interessensvertreter:innen erhoben. Angestrebt sind qualitative Erkenntnisse (interne Validität) zu den Auswirkungen auf das österreichische

Stromnetz, die durch die Technologiekombination aus der wachsenden Verbreitung der Kühlgeräte/-anlagen und einem massiven Rollout von Photovoltaikanlagen verursacht werden könnten. Zu den generell zu testenden Aussagen gehören die *Hypothesen*, dass (i) PV und Kühlbedarf synchron verlaufen und damit die jeweiligen Netzwirkungen verringern und (ii) die thermische Gebäudesanierung dazu beiträgt, den Kühlbedarf zu verringern.

Die Betrachtung des Kühlbedarfs und seiner Veränderungen erweist sich als Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren. Zu diesen zählen die Rahmenbedingungen wie der Klimawandel oder wachsende Komfortbedürfnisse, die Gebäude, die Kühltechnologien, das Vorhandensein und die Effekte der Photovoltaik sowie die Interaktionen mit dem Stromnetz. Als markant erweisen sich auch die Unterschiede zwischen den stereotypisch betrachteten Gebieten Stadt und Land.

- Die nachfolgenden Aussagen basieren ausschließlich auf den Aussagen der Experten und Expertinnen.
- Die Systemgrenze umfasst die Raumkühlung. Andere Kühlbedarfe, z.B. für die gewerbliche Tiefkühlung, werden nicht betrachtet.
- Des Weiteren besteht bei den Gebäuden keine Einschränkung, es werden also neben privaten Gebäuden wie Einfamilienhäusern oder Mehrparteienhäusern auch Bürogebäude, Bildungseinrichtungen und Handel/Gewerbe analysiert.

Kühlbedarf

„Kühlung" ist die Kontrolle der Temperatur. Das heißt es geht um die Abfuhr der sensiblen, spürbaren Temperatur. Oftmals ist eine Luftzirkulation für die Frischluft ausreichend. „Klimatisierung" bedeutet aber auch z.B. Luftfeuchte zu kontrollieren, was natürlich vor allem in anderen Klimaregionen (z.B. Tropen) relevant ist. Die Kontrolle der Luftfeuchte hat dann auch den dominanten Energieanteil. Die Feuchtigkeit hat einen stärkeren Einfluss auf den Komfort und die Produktivität als die Temperatur. (04)

Ursachen des Kühlbedarfs

International sind die Treiber des Kühlbedarfs das Bevölkerungswachstum, die steigenden Komfortansprüche, sowie der Klimawandel. (04) Tendenziell österreichspezifisch werden von den Experten und Expertinnen die folgenden Treiber genannt: (03, 05, 10, 16)

- Mehr heiße Tage durch den Klimawandel führen zu mehr Kühlgradtagen
- Steigerung des Wunsches nach sommerlichem Komfort
- Reduktion der Kosten der Kälteanlagen (Kälteanlagen gibt es teilweise vom Diskonter)
- Reduktion der laufenden Kühlkosten durch Nutzung von PV

Die Experten und Expertinnen verweisen auf Studien, die eine Steigerung des Kühlbedarfs in Wien von heute 22 GWh/a auf 95 GWh/a prognostizieren. (03) Der Markt für Klimaanlagen hat in den letzten Jahren stark zugelegt. In den letzten vier bis fünf Jahren gab es ein jährliches Marktwachstum von 15 bis 20 %. (02)

Ganz unabhängig seiner potenziellen Steigerung aus unterschiedlichen Gründen ist der Kühlbedarf bereits heute ein Faktum. Teilweise werden in Schulen Ende April um die 30 Grad Celsius im Innenraum gemessen. Gerade bei Neubauten handelt es sich um gut isolierte Gebäude, die Körperwärme würde z.B. in Schulen für den Heizbetrieb im Winter reichen, daher muss diese und mehr Wärme im Sommer abgeführt werden. (08)

Bei der Raumkühlung ist nach Nutzer:innen zu unterscheiden bzw. zumindest nach Tätigkeit zu kategorisieren. Der als optimal zu bezeichnende Zielwert für die Raumtemperatur ergibt sich dabei neben individuellen Ansprüchen vor allem auch aus der jeweiligen Anforderung der Nutzer:innengruppe oder Tätigkeitsgruppe. Etwa stehen im Haushalt vor allem Anforderungen im Zusammenhang mit dem Wohnkomfort in Vordergrund, also eine Definition optimaler Temperaturniveaus hinsichtlich individuell subjektiver Kriterien; während an Arbeitsstätten zusätzlich die Anforderung eines für die Produktivität günstigen Raumklimas besteht, also objektivier(barere) Kriterien zur Anwendung kommen. (16) Nicht verwunderlich ist es deshalb, dass gerade im Bereich des Neubaus von Büroräumlichkeiten Klimatisierung immer mehr zum Standard wird; Büros sind ohne Kühlung heute kaum mehr vermietbar. Der Handel, u.a. im Bereich der Lebensmittel- und Kleidungsgeschäfte, weist ebenso einen klaren Bedarf auf. (06, 07) Auch der Bildungsbereich wird hervorgehoben. (07) Bei Haushalten werden Kühlsysteme z.B. in Dachgeschosswohnungen oder bei Wohnungen mit großen Fenstern verbreitet angewandt. (04)

Zeitpunkt und Höhe

Aufgrund der thermischen Trägheit der Gebäude weist der Kühlbedarf eine Verzögerung („Lag") gegenüber der Solareinstrahlung auf. Dies ist auf die Trägheit der Gebäudemasse zurückzuführen und den Umstand, dass es draußen immer noch heiß ist, also das Gebäude die Wärme nicht abführen kann. (05) Die Verzögerung wird von den Experten und Expertinnen konsistent mit ca. ein bis drei Stunden gegenüber der dem Solar Peak angegeben, wobei stets auf den Gebäudetyp bzw. dessen Konstruktion als ausschlaggebendes Kriterium hingewiesen wird. (05, 06, 10) Natürlich ist an heißen Tagen bereits früher und später bis in den Abend hinein Kühlbedarf gegeben. (06)

Die wichtigste Wärmeeintragung erfolgt passiv-solar, die Kühllast steht in einem direkten Zusammenhang mit der Verglasung und der Einstrahlung durch dies Fenster. (04, 05, 11) Dies ist definitiv die Hauptlast beim Wohnbau und einer der essenziellen Parameter bei anderen Bauten. Bei neuen Gebäuden ist der Anteil der Fensterflächen höher. Dies ist aber eher eine langfristige Entwicklung. Der sogenannte g-Wert definiert den Solareintrag – ein hoher Wert ist im Winter

natürlich vorteilhaft. Durch den Fokus auf Wärme und Dämmung ergibt sich eine potenzielle steigende Kühllast, weil die Wärme im Gebäude bleibt. Die Wärmedämmung hält die Wärme auch im Sommer drinnen; dass die Wärme wegen der Dämmung nicht hereinkann, ist nachrangig. (05, 08)

Im Bürobau gibt es eine generelle interne Last, die mit etwa 50 Watt pro Quadratmeter veranschlagt wird und aus der Körperwärme der anwesenden Personen sowie der Abwärme von Geräten (z.B. Beleuchtung, Computer) resultiert. (03, 04, 08) 60 bis 80 Watt sind pro Person zu rechnen, das sind bei 50 Personen immerhin 4 kW. 150 Watt können bei einem Arbeiter gerechnet werden. (10) Supermärkte sind meist gut designet und es gibt keine großen Einträge über die Fenster, aber sie haben aber sehr hohe interne Lasten auch durch die Produktkühlung. (04) Auch beim Handel sind meist tiefe Räume gegeben und der Solareintrag ist daher geringer. (06) Hingewiesen wird auf das Tool THESIM mit welchem die Kühllast berechenbar ist. (07)

Fokussierung auf urbane Gebiete

Die städtische, bebaute Umgebung wie Beton und Asphalt nimmt die Solarstrahlung und die Hitze leichter auf und speichert diese. Zur normalen Hitze kommt die Abwärme von Industrie, Verkehr und Gebäuden, welche nicht abgeführt werden kann und sich staut. (03) Es kann als ein gegenseitiges Erhitzen und Aufstauen angesehen werden. (05) Die abgesehen von Parks oder einzelnen Grünflächen und Bäumen deutlich geringere Vegetation und damit weniger Verschattung und Verdunstung führt weiters dazu, dass die Hitze nicht abgeführt werden kann. (03) Als Begriff ist in diesem Zusammenhang „Urban Heat Island" entstanden, der diese Aufheizung beschreibt. (03) Der Urban Heat Island Effekt impliziert, dass ceteris-paribus in der Stadt mehr Kühlbedarf als am Land vorliegt. (05)

Das Lüften (v.a. nächtliches Durchlüften) ist auch deswegen nicht effektiv, weil die Luft außen ebenso noch sehr warm ist. Manche Gebäude heizen sich auf 30 Grad und mehr auf und können die Hitze auch in der Nacht nicht abführen. (07) Die Möglichkeit für das Lüften (v.a. tagsüber, aber auch nachts) kann auch durch Staub, Geruch oder Lärm verhindert werden. (10)

Die stereotypische Situation am Land ist analog umgekehrt, mit viel Vegetation, wenig verbauten Flächen, geringen internen Wärmequellen, keinem gegenseitigen Speichern. Viele Gegenden, welche in Österreich als „am Land" beschrieben werden können, also abseits der größeren z.B. zehn Städte, sind auch höher gelegen. (06) Dies wird auch daran deutlich, dass die Kühlungsmöglichkeit mit der Wärmepumpe am Land, vor allem in höheren Lagen, kein Verkaufsargument für diese ist. (09) Auch Verteilernetzbetreiber bestätigen, dass Kühlung am Land bisher kaum ein Thema ist, es gibt hier keine Anträge oder ähnliches (wobei einschränkend die nicht gegebene Meldepflicht kleinerer Anlagen zu bedenken ist). (15)

Zur Kühlung wird auf verstärkte Vegetation/Begrünung (z.B. Bäume am Hauptplatz in Linz), Fassadenbegrünung, extensive Dachbegrünung oder aktive Maßnahmen gesetzt (als Beispiele für Wien werden die Cool Spots im Esterhazypark oder die sogenannte Kühle Meile genannt). (08)

Photovoltaik kann je nach Wirkungsgrad ca. 10 % der eintreffenden Sonnenenergie in Form von Strom abführen. (12) Daneben ist Photovoltaik als Verschattungselement geeignet. (13) Das Verhältnis von Photovoltaik zu Kühlbedarf ist hoch am Land und niedrig in der Stadt. (12) Dachbegrünung ist in der extensiven Form kein Problem für Photovoltaik, da es sich nur um Flachwurzler, Moose oder Gräser handelt, welche durch ihre Verdunstungskühlung auch positiv auf die Photovoltaik wirken können. (08)

Die meisten Kälteanlagen werden in der Stadt gebaut (Büros, Handel, Loft, Dachgeschosswohnungen). (06, 10) Splitgeräte (Luft-Luft-Wärmepumpen) sind in Städten Standard. Dagegen finden Luft-Wasser- oder Erdreich-Wasser-Wärmepumpen für die aktive Kühlung von (Wohn)Gebäuden in der Stadt kaum Anwendung; im dicht verbauten Gebiet hat die Wärmepumpe quasi keine Marktdurchdringung, in Wien sind es z.B. 2 %, vor allem durch die neuen Gebäude in Einfamilienhäusern in besseren Lagen. (09) Hinsichtlich Gewerbe- oder Wohnbauten wird auch festgestellt, dass die Mieten am Land günstiger sind, eine Investition in Kühlung also einen stärkeren Effekt auf die Mietpreise hätte. (06)

Maßnahmen zur Kühlung

Es ist ein fließender Übergang zwischen passiven und aktiven Kühltechnologien. Die Zurechnung ist teilweise unklar, besonders für die passive Kühlung ist die Definition uneinheitlich. (04, 05).

Passive Kühltechnologien

Der passiven Kühlung sind zuzurechnen:

- Begrünung: Vorhandensein von Gärten, Gebäudebegrünung wie Fassadenbegrünung oder extensive Dachbegrünung. (03, 08)
- Verschattung: Diese ist die primäre passive Maßnahme. Diffuses Licht soll allerdings bereitstehen, um nicht wieder Beleuchtungsbedarf (inklusive Wärmeabstrahlung) zu haben. Es folgt daraus der Bedarf nach einem steuerbaren, außenliegenden Sonnenschutz, denn ein stationärer Sonnenschutz wie z.B. ein Balkon verschattet auch 2000 bis 3000 Stunden pro Jahr, wenn die Einstrahlung positiv wäre. Außenliegende Raffstores oder Jalousien sind eine einfache und kosteneffiziente Möglichkeit zur Verschattung. Eine Südfassade lässt sich im Sommer gut verschatten, denn die Sonne kommt steil von oben, und trotz Verschattung kommt Helligkeit in den Innenraum. Ost- und Westfassaden sind herausfordernder, weil dort das Tageslicht aufgrund des flachen Winkels nur ausgesperrt werden kann. (04, 08)

- Interne Kühllasten: Reduktion der internen Kühllasten, indem weniger und effizientere Geräte verwendet werden. (05)
- Nachtlüftung: Durch das Öffnen der Fenster wird die Gebäudemasse nachts ausreichend abgekühlt, um idealerweise tagsüber eine Erhitzung nur im erträglichen Bereich zu gewährleisten. (04)
- Gebäudemasse: Die Gebäudemasse als Speicher wird ebenso tendenziell dem passiven Bereich zugeschrieben, es ist aber unklar, ob diese hier dazu gezählt werden kann, da diese Speichermasse ja einmal voll ist. (04)
- Forcierte (Nacht)Lüftung: wenn der natürliche Durchzug zu gering ist, können Ventilatoren die Abkühlungswirkung der Lüftung unterstützen.

Aktive Kühltechnologien

Hitzewellen machen eine aktive Kühlung erforderlich, wenn die forcierte Abkühlung in der Nacht und die Reduktion der Einstrahlung nicht erreicht werden können und eine gewisse erwünschte Maximaltemperatur zu erreichen ist. Dies ist grundsätzlich nicht vollständig zu verhindern, aber die Frage ist für wie viele Tage pro Jahr die aktive Kühlung erforderlich ist. (05)

Thermische Bauteilaktivierung und Erdsonden: Die thermische Bauteilaktivierung (Betonkernaktivierung) eignet sich zur Speicherung sowie zum Heizen und Kühlen. Diese Vorgangsweise harmonisiert gut mit Erdsonden, denn im Erdreich hat es immer um die 10° Celsius bei plus/minus 5° Celsius im Sommer/Winter. Dies ermöglicht bei einer Wärmepumpe einen COP von 4 bis 5 bzw. und im Kältebetrieb einen COP von 15 und höher. Auch Freecooling ist gut möglich, indem nur kaltes Wasser durchgepumpt wird. Energie für die Kreislaufpumpen ist erforderlich, denn die Kühlung soll maximal ca. 4 Grad Celsius unter der Raumtemperatur erfolgen, um die Gefahr von Kondensat zu vermeiden; es gilt also, viel zu pumpen, um ein so kleines Delta bei der Temperatur zu erreichen. Die Betondecken halten die Temperatur tagelang, wodurch sich ein starker Benefit für das Stromnetz ergeben kann. Beton verfügt über eine hohe Speicherkapazität, hat aber gleichzeitig eine gute Leitfähigkeit, womit sich die Wärme gut verteilt. Durch die breit verteilte Wärmeabgabe kann im Gegensatz zu einer Konvektoren-Heizung schon bei 2 Grad weniger der gleiche Komfort erzielt werden. Die Bauteilaktivierung ist, wenn bereits bei der Errichtung realisiert, ein technisch sehr einfaches System. Eine Abgabe über die Decke ist ideal, weniger ideal aber möglich (kalte Füße, Kaltluftseen) ist auch eine Fußbodenkühlung; auch können über die Fußbodenkühlung nur 15 Watt in den Raum gebracht werden, während bei gleicher Leistung über eine Deckenkühlung 50 Watt in den Raum gebracht werden können. (07, 08)

Wärmepumpen: Im Ein- bzw. Zweifamilienhaus-Sektor sind etwa 60 % der neu installierten Heizungen Wärmepumpen, nur im dicht verbauten Gebiet hat die Wärmepumpe quasi keine Marktdurchdringung. Die Experten und Expertinnen nehmen an, dass kaum welche der Wärmepumpen, die aktuell verkauft werden, bewusst wegen dem Zusatznutzen Kühlung gekauft werden. Der Zusatznutzen

Kühlung wird aber immer propagiert, und die Möglichkeit zur Kühlung wird wahrscheinlich von weitaus mehr Kunden und Kundinnen genutzt als der Anteil jener, für welche dies ein entscheidendes Kaufkriterium war. Besonders bei Sole- bzw. Erdreich-Wärmepumpen dient die Kühlung nicht nur dem Komfort, sondern auch der Regeneration; hier ist auch eine passive Kühlung möglich: mit einer ca. 15 Watt Pumpleistung wird über den Wärmetauscher der Fußbodenheizung gekühlt. Die Kühlung ist im Bandbetrieb ideal, weil sonst der Fußboden für den Komfort zu kalt wird bzw. es unter ca. 18° eine Taupunktunterschreitung geben würde. Eine aktive Kühlung ist auch mit dem Großteil der Luft-Wasser-Wärmepumpen möglich, deren Betrieb mit etwa 300 Stunden pro Jahr und mit einer Leistung von 500 bis 700 Watt geschätzt wird. (09)

Splitgeräte sind die dominante Technologie am Markt. (04, 05, 06) Die Experten und Expertinnen führen diese Dominanz auf die Einfachheit der Lösung und die einfache Möglichkeit zur Nachrüstung im Bestand, ohne größere bauliche Maßnahmen durchführen zu müssen, zurück. (03, 07) In Österreich gibt es sechs große gewerblicher Anbieter, die fast den gesamten Markt abdecken: Daikin, Fujitsu, LG, Samsung, Panasonic und GEA. (09) Eine Mono-Split-Klimaanlage hat eine Leistungsaufnehme etwa 2 bis 7 kW. Sie kühlt 1 Raum mit 1 Außengerät. Eine durchschnittliche Multi-Split-Klimaanlage für 3 Räume hat eine Leistungsaufnahme von 4 bis 9 kW und kostet etwa 3.000 bis 4000 Euro für die Gerätschaft inklusive Mehrwertsteuer, hinzu kommt die Installation. Die Betriebskosten belaufen sich auf bis zu 200 Euro pro Jahr. Speicher sind eigentlich nie vorgesehen. Im kleineren Bereich ist die Leistungsaufnahme kein Kriterium. Die Netzbetreiber hätten gerne einen dreiphasigen Anschluss ab etwa 6 kW oder mehr. (02) Splitgeräte werden gegebenenfalls auch zur Beheizung von Büros benutzt, und punktuell wärmere Bereiche haben zu können bzw. die Heizung nicht durchgehend betreiben zu müssen. (06)

Fernkälte ist analog zur Fernwärme eine zentrale Wärmeversorgung, deren Wirtschaftlichkeit sich aus der Größe der Anlage (economies of scale) oder anderen Vorteilen (Verfügbarkeit der Energie) ableitet. Größte wirtschaftliche Herausforderung ist die geringe Temperaturspreizung von 5-10° C zwischen der Vorlauf- und der Rücklauftemperatur (bei Fernwärme sind es bis zu 70° C), wodurch auch für geringe Leistungen große Rohre erforderlich sind. Neben zentralen elektrischen Anlagen kann die Fernkälte auf thermische Adsorptions- und Absorptionsmaschinen zurückgreifen. (11)

Fokussierung auf elektrische Kälteanlagen

Elektrische Kälteanlagen sind aus Sicht der Interviewpartner kurz- bis mittelfristig die einzige wirtschaftliche Perspektive für aktive Kälteanlagen, die nicht auf z.B. Erdsonden und Bauteilkühlung zurückgreifen können. Die Elektrifizierung bei EndKunden und Kundinnen sei sowieso gegeben, durch Elektromobilität, Photovoltaik, Wärmepumpe, Kühlung. (02, 10, 11)

Absorption wird verwendet, wo es keinen Strom gibt, oder wo der Kompressor nicht zu hören sein soll, ist aber nur durchführbar, wenn es der Zweck erfordert oder Wärmeenergie kostengünstig zur Verfügung steht. Adsorptionskältemaschinen brauchen geringere Vorlauf-Temperaturen von ca. 80°C. Absorptionskältemaschinen sind bei 80°C Vorlauf sehr groß und sehr teuer, bei 130°C wären sie günstiger. (02, 10, 11)

Durch Forschung im Bereich der Kälteanlagen, z.B. zu Kältemitteln, Kompressoren, Lüftern, wird die Technologie immer effizienter werden. Aber eine Alternativ-Technologie sei nicht in Sicht. (02)

Unterschiede bei Neubau und Sanierung

Bei Büros, Gewerbe und hochklassigen Wohnungen wird gemäß den Expert:innen die Kühlung beim Neubau mitbeachtet. (06) Bei Stadtwohnungen bzw. im gemeinnützigen Wohnbau ist Kühlung im Normalfall aus Kostengründen ein nachrangiger Bestandteil, (06, 11) aber eine Steigerung wird allgemein erwartet. (05) Split-Geräte seien die dominante Technologie, aber im Gewerbe sei es Standard, Bauteilaktivierung im Neubau anzuwenden (06) und Expert:innen weisen auch auf Pilotprojekte und Bauträger hin, welche diese im privaten Wohnbau einplanen (07) und zumindest Leerverrohrungen vorsehen. (04) Im Neubau wird auch auf Verschattung und Nachtkühlung gesetzt. (05) Erdwärmepumpen und Bauteilaktivierung im Neubau bzw. zur Kühlung verwendbare Wärmepumpen im Neubau könnten ein Grund dafür sein, dass hier weniger Splitgeräte verkauft werden. (02, 07)

Im Bestand sind komplexere Kühlsysteme wie Deckenkühlung oder Bauteilaktivierung mit größeren Umbauarbeiten verbunden, es geht um eine Ergänzung. Somit werden einfach nachzurüstende Split-Geräte gewählt, um mit diesen eine partielle Versorgung an essenziellen Punkten zu gewährleisten, z.B. im privaten Bereich, um einzelne bzw. die wichtigeren Räume zu kühlen. (05, 06) Grund ist, dass die Stromanschlüsse nicht vorhanden sind: dies betrifft auch aber kaum die Netzbereitstellung, nur selten ist z.B. der Austausch eines Trafos erforderlich, aber wesentlich ist vor allem die Verkabelung im Gebäude, welche für Split-Geräte in allen Räumen oftmals zu dünn ausgelegt ist und zu einer Überhitzung der Leitungen führen würde. (06)

Bei Haushalten werden Kühlsysteme z.B. in Dachgeschosswohnungen oder bei Wohnungen mit großen Fenstern verbreitet angewandt. (04) Als preislich-praktisch mögliche Alternativen nennen die Experten und Expertinnen das Nutzerverhalten und die Verschattung, also keine tatsächlichen Kühlsysteme. (07)

Trotz dem spezifischen Wissen der Experten und Expertinnen verbleibt Unklarheit über tatsächliche Marktzahlen zur Verteilung der Kühlsysteme im Neubau und bei der Nachrüstung im Bestand. Zahlen basieren auf Informationen, welche den Experten und Expertinnen zugespielt werden, denn die Anlagen selbst werden an

die Installateure verkauft bzw. beim Bau miterrichtet, und deren Endkunden nicht systematisch erfasst.

Speicher

Größere Speicher werden kaum eingesetzt. Bei Gebäuden werden üblicherweise keine Kältespeicher verwendet. (10, 11) Speicher könnten mit unterschiedlichen Zielsetzungen eingesetzt werden. Zu diesen zählen die:

- Verlagerung der Kühlung in die Nacht, weil dort eventuell günstigere Energiepreise und günstigere Netzentgelte gegeben sind und des Weiteren auch die Kühlung aufgrund geringerer Außentemperaturen energieeffizienter erfolgen kann. (03, 04)
- Vermeidung von Kühllastspitzen, um eine effiziente Auslegung der Kühlanlage zu ermöglichen. (02, 10)
- Vermeidung von Stromlastspitzen, um die damit verbundenen Kosten zu vermeiden. (12)
- Erhöhung des Nutzungsanteils der PV-Eigenerzeugung. (12)

Herkömmliche Kältespeicher verwenden eine Kühlsole. Propylenglykol wird bei Lebensmittel verwendet, Ethylenglykol bei sonstigen Prozessen. Letzteres hat einen besseren Wirkungsgrad und Temperaturen bis minus 8 Grad Celsius sind möglich. Diese Technologien werden im gewerblichen Kühlbereich angewandt. (10)

- Kaltwasserspeicher, z.B. bei mit Kaltwasser arbeitenden „Variable Refrigerant Flow" VRF-Anlagen, welche eine Größe ab 10 kW haben und im gewerblichen Bereich eingesetzt werden, bei denen ein Wasserspeicher möglich ist. (02)
- Phase Changing Materials (PCM) wie Eisspeicher sind ebenso eine potenzielle Technologie, welche die mit dem Phasenwechsel verbundene Energie ausnutzen. (04)
- Als mögliche Technologie werden auch Batterien als kurzfristige Stromspeicher für die bessere Nutzung der PV bzw. eine geringere Stromlast angeführt. (12)
- Nutzung des Gebäudes als thermischer Speicher z.B. anhand von Wetterdaten, wenn zu anderen (früheren) Zeiten Heizbedarf bestehen würde. (12)
- Kühlung des Gebäudes ab der ersten Erwärmung bzw. vor tatsächlicher Nutzung (z.B. am späten Nachmittag, bei Rückkehr von der Arbeit), um Kühllasten zu verteilen. (10)
- Bei Erdreich-Wärmepumpen ist die Regeneration des Erdreichs im Sommer vorteilhaft. Dies ist ein bidirektionaler Saisonspeicher. (05, 09)

Photovoltaik

Verwenden Kunden und Kundinnen vor Ort am Wohn- oder Betriebsgebäude erzeugten PV-Strom, entfallen im Vergleich zum normalen Strombezug Netzentgelte, Steuern und Abgaben, sowie natürlich die Energiekosten. Da es sich

bei den Investitions- und Installationskosten der PV-Anlage um Fixkosten handelt, sind die variablen Kosten der Nutzung des erzeugten Stroms null; für eine kWh sind jedoch die entgangenen Einnahmen für eine eingespeiste kWh als Alternativkosten anzusetzen. (12)

Daraus ergibt sich ein relativ günstiger Strompreis. Daraus leitet sich das aktuell dominante Geschäftsmodell der Photovoltaik, ein hoher Eigenverbrauch der Kunden und Kundinnen, ab, (03) denn Kunden und Kundinnen, speziell im gewerblichen Bereich, streben an, geringe Kosten zu haben. (12)

Gleichzeitigkeit von PV und Kühlung

Es besteht eine gewisse Überlagerung zwischen dem außen induzierten Kühlbedarf, und der Photovoltaik. Treiber ist die Sonne, welche sowohl zu Photovoltaik-Erzeugung als auch der Hitze im Gebäude führt. (12, 13, 15) Beide ergeben sich zumindest teilweise gleichzeitig. (03) Allerdings muss bei Sonnenschein kein Kühlbedarf gegeben sein (z.B. am ersten wärmeren Tag) und bei Kühlbedarf kann z.B. durch das zeitliche Zurückbleiben dessen bereits kein oder weniger Sonnenschein gegeben sein. (05) Das tatsächliche und ein optimiertes Zusammenspiel wären zu berechnen. (03)

PV-Anlagen werden im Privatbereich nicht wegen einer vorhandenen Klimaanlage oder im Zuge der Installation einer Klimaanlage errichtet. Auch umgekehrt sei die Installation einer Klimaanlage wegen einer vorhandenen PV-Anlage nicht üblich. (02) Für Neubauten gilt aber, dass sie von Anfang an mit PV und mit Kühlung ausgestattet werden. (14)

Die Installation einer PV wegen einer Wärmepumpe bzw. für die Wärmebereitstellung ist den Interviewpartnern aus ihren Erfahrungen geläufiger, (02) obwohl eine Kombination von Photovoltaik und Heizung nicht ideal ist. In der Jahresbilanz gleichen sich die Energiemengen aus Verbrauch und Erzeugung vielleicht aus, und auch in der Übergangszeit können sich Vorteile ergeben, aber es ergibt sich aus der Kombination insgesamt keine nennenswerte Einsparung bei den Kunden und Kundinnen und der Netzausbau ist voll erforderlich. (12) Wärmepumpen, insbesondere jene mit Erdsonden, weisen aber im Kühlbetrieb gute und wirtschaftliche Kombinationsmöglichkeiten mit PV auf, wenn es um die Gebäudekühlung geht (09).

Bei gewerblichen Objekten weisen die Expert:innen auf Beispiele hin, bei denen PV und Kühlanlagen gekoppelt werden. So wird in einem Objekt die Kombination von PV und einem zentralen Wärmepumpen-basiertem System realisiert. (06)

Maßnahmen zur besseren Nutzung der PV zur Kühlung

Die potenziell gute Kombination von PV und Kühlung ist bekannt. Es wurden bereits vor mehreren Jahren/Jahrzehnten PV-Kühlung-Insellösungen angedacht. (12) Die Kommunikationsverbindung zwischen Photovoltaik und Wärmepumpe (auch im

Kühlbetrieb) ist technischer Standard. Generell ist eine Einstellung von Wärmepumpen, Warmwasseraufbereitung, und Poolpumpe auf die Photovoltaik sinnvoll, weil weitgehend zeitunabhängig. (09) Die Abregelung der Photovoltaik-Anlagen durch Stromnetz-seitige Vorgaben kann ein Anreiz für Kunden und Kundinnen sein, die Kühlung auf die Photovoltaik auszurichten. (14)

Dadurch, dass der Hitzehöhepunkt aufgrund der Gebäudeträgheit in den Nachmittag verschoben ist, könnte eine Ausrichtung der PV nach Südwest die Korrelation verbessern. Der tatsächliche Mehrwert sowie bauliche und andere Barrieren (z.B. Verschattung) sind jedoch zu beachten. (03) Entsprechend dem PV-Aufkommen kann auch eine Vorkühlung des Gebäudes stattfinden. Dieses wirkt dann als thermischer Speicher. Vorausschauendes Verhalten ist generell zu empfehlen, z.B. auf Basis von Wetterdaten, um Ineffizienzen zu vermeiden, z.B. das Heizen am Morgen und das Kühlen zu/ab Mittag. Eine Alternative ist ein Stromspeicher, welcher eine Verschiebung der Energiemenge zulässt (und bei dann nicht gegebenem Kühlbedarf auch andere Nutzungsmöglichkeiten hat). (12)

Stromnetz

Aus Sicht des Stromnetzes sind jene Kühlanlagen zu beachten, welche elektrischen Strom beziehen. Fernkälte oder thermisch betriebene Wärmepumpen (Heat-to-Cold) stellen also keine Auswirkung, zumindest nicht vor Ort, dar; Kreislaufpumpen bei Erdsonden-Kühlsystemen oder einer Bauteilaktivierung sind tendenziell vernachlässigbar. Elektrische Kälteanlagen und Splitgeräte (Kompressoren) sind jene Technologien, welche relevante Lasten verursachen könnten.

Last elektrischer Kühlanlagen

Ein Mono-Splitgerät kühlt einen Raum mit einem Außengerät und hat eine Last von etwa 2 bis 7 kW. Ein durchschnittliches Multi-Splitgerät für drei Räume hat eine Last von 4 bis 9 kW. Die Betriebskosten belaufen sich im maximalen Fall etwa auf 200 Euro pro Jahr. Speicher, welche auch für einen stetigeren Strombezug mit geringerer Last genutzt werden könnten, sind eigentlich nie vorgesehen. In diesem kleinen Bereich ist die Last der Kühlanlagen überhaupt kein Thema. (02) Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass nur größere Anlagen, welche gemeldet werden müssen, dem Netzbetreiber zur Kenntnis kommen. Diese Meldungen betreffen Nachrüstungen z.B. im Gewerbe oder in Gasthäusern, denn auch für Neubauten wird nur der Gesamtlastbedarf angegeben und Kühlanlagen nicht separat ausgewiesen. (14) Allerdings sagen auch größere Kühlanbieter, dass Lasten kein essenzielles Kriterium bei der Bewertung einer Neuinstallation sind. (11) Netzbetreiber geben an, dass für einzelne größere Kühlanlagen Nachrüstungen der Netze erforderlich waren. (14, 15)

Ab etwa 6 kW wird von Netzbetreiber ein dreiphasiger Anschluss gewünscht bzw. gefordert. Andere netzseitige Anforderungen werden von Technologienanbietern

nicht erwähnt. (02) Verdichter-Drehzahlregelung oder viele kleine zuschaltbare Kompressoren stellen Möglichkeiten zur Stromnetzentlastung dar. Um eine möglichst geringe und konstante Last zu erreichen, gilt es, das Aufheizen des Gebäudes zu vermeiden, um nicht konzentrierte Kühlleistungen zu benötigen (z.B. beim Heimkommen). (10)

Summe der Lasten und Gleichzeitigkeit

Gleichzeitigkeit im relevanten Sinne ist dann gegeben, wenn viele Kunden und Kundinnen aufgrund eines bestimmten, für alle gleichen Anlasses, zu einer bestimmten Tageszeit (also über mehrere Viertelstunden hinweg) das Stromnetz beanspruchen. Ihre Lasten verschwinden dann im vorgelagerten Netz nicht in einem „Rauschen", sondern summieren sich auf, was eine starke Beanspruchung des Netzes bedeutet. Dies gilt z.B. für die PV-Erzeugung bei Sonneneinstrahlung, für Wärmepumpen oder andere elektrische Heizungen in Abhängigkeit von der Temperatur, in vielen Fällen auch für Elektroautos bei der Rückkehr nachhause, und schlussendlich für den Kühlbedarf bei Hitze. Beim E-Herd, der eine Last von bis zu 15 kW verursacht, herrscht z.B. in der Praxis eine viel niedrigere Gleichzeitigkeit. (03)

Natürlich ist aufgrund der thermischen Trägheit der Gebäude bzw. unterschiedlicher Gebäudekonstruktionen eine punktgenaue zeitliche Übereinstimmung des Betriebs der Kühlanlagen nicht zu erwarten. Dennoch weist Kühlung gemäß oben eingeführter Definition eine hohe Gleichzeitigkeit auf, da sie an heißen Tagen und in den Nachmittagsstunden verstärkt nachgefragt wird, und analog umgekehrt zu Wärmepumpen mit höheren und länger anhaltenden hohen Temperaturen an Gewicht gewinnt. (03, 15)

Die Österreichischen Stromverteilernetze sind auf Lasten ausgelegt. Die Netze gehen also nicht sofort an ihre Grenzen. Gerade junge Netze haben einen hohen Verkabelungsgrad und sind damit gut gerüstet. (03) Für den Verteilnetzbetreiber gibt es keine Vorbereitung z.B. erst am Beginn der Hitzewelle, die Stromnetze müssen bei der Errichtung auf Extremfälle („Worst Case") ausgelegt sein. Der Worst Case sind die minimalen bzw. maximalen Lasten, welche im betrachteten Netzabschnitt auftreten können. Bei der Eruierung des Worst Case wird ein probabilistisches Verfahren angewandt. Beim Maximallast Tag, anzunehmen im Jänner, ist die Relevanz der vielen Wärmepumpen (bzw. im Falle eines Gebäudes auch die Relevanz der einen Wärmepumpe) mindestens etwa so groß wie die der Kühlung. Beim Minimallast Tag, anzunehmen im Sommer, gibt es viel Einspeisung und wenig Last (hier würde also angenommen, dass die Kühlung nicht läuft. (03, 14, 15)

Auch wird im Durchschnitt die Kühlung für das Stromnetz in den kommenden Jahren noch nicht ein zentrales Thema werden, denn der Einbau von Kühlanlagen ist oftmals gebunden an Neubau und Sanierung. (03) Die Expert:innen stimmen aber auch überein, dass der Kühlbedarf steigt. Kühlanlagen sind als einzelne Last nicht gemessen, daher ist ein kausaler Zusammenhang über Daten nicht

vorhanden. Daten von Klimaanlagen wären eine Voraussetzung für eine bessere Beurteilung. (15) In den Netzplänen sind mangels Erfassung Kühlanlagen (genauso wie Wärmepumpen) nicht verortet. (14) Wie sich die Kühlung auf das Stromnetz auswirkt, unterliegt vielen unterschiedlichen Parametern, welche v.a. die Netzstruktur, die Verbraucherstruktur im Netz und den Kühlbedarf aufgrund der Gebäudestruktur umfassen. (03) Vor allem in der Stadt wird Kühlung nicht als Problem angesehen, hier ist meist „dick verkabelt". (15) Am Land können aufgrund der „schwächeren" Leitungen auch geringe Lastspitzen problematisch sein, (12) wenngleich Kühllasten im Verhältnis zu anderen keine wesentlichen Bedenken hervorrufen (siehe unten). Dies gilt generell bzw. ist eine generelle Aussage. Manchmal, in einzelnen Fällen, kommt es an Tagen im Sommer wegen der Kühlung zu Netzproblemen. Diese Probleme sind immer punktuell. Aber auch andere Verbraucher verursachen punktuell netzseitigen Anpassungsbedarf. (14, 15)

Stromnetz-Wirkung der Gleichzeitigkeit mit PV

Für den Verteilnetzbetreiber gilt der Worst Case, wenngleich dies durch probabilistische Verfahren nachgebessert wird. (15) Es gibt seitens des Verteilnetzbetreiber keine Möglichkeit zur Vorbereitung z.B. erst am Beginn der Hitzewelle, das Netz muss auf Extremsituationen ausgelegt sein. Daraus leitet sich ab, dass die oftmalige zeitliche Überschneidung von PV und Kühlung für die Auslegung des Stromnetzes nicht relevant ist, (03) weil Kühllastspitzen ohne Sonneneinstrahlung (z.B. bei kurzfristiger Bewölkung) und PV-Erzeugungsspitzen ohne Kühlbedarf gegeben sein können. Das probabilistische Verfahren beachtet allgemein einen minimalen Verbrauch, darunter auch, aber nicht speziell einberechnet bzw. ausgewiesen, die Kühlung. (14)

Verhältnis der Kühlung zu anderen (neuen) Lasten

Alle Expert:innen stimmen überein, dass der Netzausbau nicht von der Kühlung getrieben sein wird. (13) Als zentrale Treiber werden die E-Mobilität, Photovoltaik und/oder Wärmepumpen angeführt. (13, 14, 15) Bei Einfamilienhäusern, gerade wenn Sie neu gebaut sind, sind Kühlanlagen nicht die Maximallast. (14) Die E-Mobilität kommt zu einer „Abendspitze", die sich von der früheren „Mittagsspitze" wegverlagert hat, hinzu. (14, 15) In einer länger anhaltenden Kälteperiode, z.B. wenn es eine Woche lang -20 Grad Celsius hätte, werden Wärmepumpen kritisch gesehen: so sind z.B. Luftwärmepumpen mit 3kW nicht gemeldet, bei denen sich dann aber eine Heizpatrone mit 8 kW zuschalten kann. (14)

Es lässt sich subsummieren, dass die Kühlung im Verhältnis zu anderen (neuen) Lasten und Photovoltaik eine geringere Brisanz aufweist, woraus sich eine Fokussierung der Verteilernetzbetreiber auf diese anderen ergibt.

Minderung der Netzauswirkung der Kühlung

Es lässt sich feststellen, dass bei den Kunden und Kundinnen eine Kilowattstunden-Orientierung besteht, die verursachten Netzlasten also wenig wahrgenommen werden. (12) Die Kühlung bzw. Kühlanlagen könnten für den Verteilnetzbetreiber flexibilisiert werden. (13) Aufgrund der nicht üblichen Anwendung von Speichern stehen dem Komfortverluste entgegen bzw. eine zeitliche Beschränkung bei der Nutzung der thermischen Gebäudeträgheit. Als übliches Mittel der Beeinflussung der Verbrauchsseite gibt es seitens der Verteilnetzbetreiber Vorgaben; Anreize oder gar Märkte, deren (lokale) Effekte schwer kalkulierbar sind, sind nicht gegeben. (12) Vorgaben zur spannungsabhängigen Regelung der Kühlanlagen, umgekehrt zur PV-Abregelung, wären eine technische Möglichkeit. (15)

Weitere Erkenntnisse

Split Incentives

Der Betrieb von Kälteanlagen kann in wenigen Jahren mehr als deren Anschaffung kosten. Eine gute Beratung in dieser Richtung ist nicht nachteilig für den Verkäufer der Kälteanlage: diese wird dennoch installiert, die Einsparung für die Kunden und Kundinnen liegt beim Strombezug. Bei Einfamilienhäusern sind NutzerIn und InvestorIn die gleiche Person, hier ist mehr direkte Beratung wirkungsvoll; Jalousien und Markisen sind hier einfache und akzeptierte Lösungsmittel. (10)

Jedoch sind die Planung des Gebäudes (inklusiver passiver Maßnahmen wie Beschattung) und die Nutzung (bzw. auch der Betrieb der Kälteanlage) oftmals in unterschiedlichen Verantwortlichkeiten. (10) Die passive Kühlung ist in der Verantwortung der Architekt:innen, die aktive Kühlung bzw. die Klimatisierung sind in der Verantwortung der Gebäudetechniker:innen. (04) Die Experten und Expertinnen stimmen überein, dass bei der Errichtung von Gebäuden HKLS-Techniker:innen, Bauträger, etc. eingebunden werden, die Bedürfnisse der späteren Nutzer:innen hinsichtlich einer kosteneffizienten Kühlung aber mitunter vernachlässigt werden. Im Betrieb wird von Nutzer:innen dann aber ein bestimmter Standard erwartet wird – dies wird u.a. vom Facility Management an Vermieter:innen und Eigentümer:innen zurückgespielt. Wenngleich auch Beschattungsmaßnahmen (z.B. Folierung) durchgeführt werden, werden im Bestand zum überwiegenden Teil Split-Geräte nachgerüstet. (06) Daraus können zu wenige passive Kühlmaßnahmen resultieren, (10) wobei anzumerken ist, dass oftmals eine grundlegende Beschattung vorhanden ist. (06)

Das Stromnetz ist an den möglichen Lasten orientiert und die Auslegung erfolgt auf Basis eines (realistischen) Worst Case. Gleichzeitig optimieren Kunden und Kundinnen, gerade bei Kleinkunden und Kleinkundinnen auch mangels Bewusstseins über Lasten, vor allem auf Basis der Kosten einer kWh. Anreize, Kühllasten zu verstetigen oder gänzlich zu vermeiden, entfallen. (12)

Öffentliche Anforderungen und Förderungen

Die ÖNORM 8110-3 gibt ein sommertaugliches Gebäude vor, in dem tags und nachts erträgliche Temperaturen gegeben sind. Allerdings beachtet diese nicht die Wärme der Personen und Geräte, und arbeitet mit der Annahme, dass in der Nacht 16° C oder weniger Außentemperatur herrschen. Die Sommertauglichkeit gilt für z.B. Büros, nicht für Privatwohnungen. (07, 08)

Der Fokus in der Branche, der Maßnahmen, der (Landes)Förderungen und der Politik liegt auf der Wärmeisolierung bzw. dem Heizwärmebedarf. Deren Relevanz, so betonen die Experten und Expertinnen konsistent, soll auch nicht in Frage gestellt werden. Auch soll damit, dass dieser Fokus festgestellt wird, nicht unterstellt werden, dass der Kühlbedarf keine Beachtung fände. Dieser ist zumindest in der Branche der Bauträger und insbesondere der Gebäudetechniker sehr relevant. (04, 05, 06, 08, 10)

Eine bessere Balance zwischen Kühlung und Wärme ist bei der Wahrnehmung und der Förderung zu suchen. Einfacher außenliegender Sonnenschutz ist eine einfache Möglichkeit, (04) beim Fenstertausch sollten jedenfalls Rollläden angedacht werden. (05)

Wien scheint eine Vorreiterrolle bei der Wahrnehmung und Forcierung von Kühlmaßnahmen zu sein. Die Stadtbaudirektion hat hier vor ca. 5 Jahren eine erhöhte Sensibilität entwickelt, vor allem aufgrund der Hitze in Bildungsbauten. Die Überhitzung der Stadt ist ein erkanntes Thema und mündete bislang in Strategien. Auch besteht in Wien, mit dem Ziel der klimaneutralen Stadt im Jahr 2040, mehr und mehr das Bewusstsein, dass Wärmemaßnahmen durch den erhöhten Kühlbedarf konterkariert werden könnten. (08) In Wien wurde 2019 für Gebäude, die 20 Jahre oder älter sind, eine Sanierungsförderung für Sonnenschutz aufgestellt (betrifft z.B. außenliegende Jalousien oder Raffstore). (04, 05, 08) Initiativen zur Gebäudebegrünung werden unterstützt. (13)

Zusammenfassung Stakeholder-Interviews

Die folgenden Ergebnisse lassen sich auf Basis der themenspezifischen Erkenntnisse aus den Interviews mit den Experten und Expertinnen zusammenfassen:

- Die Kühlung ist eine Thematik, welche auf städtische Umgebungen fokussiert ist – primär aufgrund der urbanen Hitze, auch aufgrund des dort erwarteten Komforts und der relativen Mietpreissteigerung durch Kühlanlagen.
- Beschattung, kühle Gebäudemassen und andere Maßnahmen des passiven Kühlens, sowie Vorkühlen und Speicher mindestens zur Deckung der Kühllastspitzen sind zu empfehlen. Der „Speicher" kann durchaus die Batterie sein.
- Aktive Kühlung kommt kurz- bis mittelfristig aus strombasierten Technologien, auch in den Städten, wenn nicht auf andere Systeme wie Erdreich-Kühlung und Bauteilaktivierung zurückgegriffen werden kann.

- Kühlung ist nicht das zentrale Problem der Stromnetze bzw. wurde noch nicht als solches identifiziert – Wärmepumpen, PV und Elektroautos sind/werden relevanter.
- Die Interaktion von PV und Kühlung ist interessant für den privaten/betrieblichen Endkunden und Endkundinnen, hat aber kaum Relevanz für das Stromnetz aufgrund der auch nicht gleichzeitig anfallen könnenden Last/Leistung.

Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Kapitel werden anhand der Projektergebnisse aus den unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen Schlussfolgerungen abgeleitet und der darauf basierende Ausblick formuliert.

Entwicklung des Strombedarfs

Die Analysen ergeben eine sehr hohe Bandbreite der möglichen Entwicklung des Kühlbedarfs bzw. des damit in Zusammenhang stehenden Endenergiebedarfs in den kommenden Jahrzehnten. Die wesentlichen Treiber dafür sind: (1) Konsequente Umsetzung passiver Maßnahmen wie Verschattung, Nachtkühlung oder (moderate) Anpassung von Innenraumtemperaturen. Diese haben das Potenzial, den Kühlbedarf um etwa 70 % zu reduzieren. (2) Klimaszenarien: Je nach betrachtetem Klimaszenario und Bezugsjahr kann der Bedarf um 20-30 % vom Maximal-Wert abweichen. Gegeben die Unsicherheit, die mit Klimaszenarien und insbesondere Extremereignissen wie Hitzeperioden, verbunden ist, kann diese Bandbreite als konservative Abschätzung angesehen werden. (3) Durch die Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen bei Kühlsystemen und deren Wechselwirkungen mit passiven Maßnahmen kann der Strombedarf im OptEcon Combi-Szenario im Vergleich zum OptEcon Pur und OptEcon PV-Szenario um 80 % gesenkt werden. (4) Wird angenommen, dass der – nach Umsetzung von passiven Maßnahmen – geringere Kühlbedarf auch zu einer geringeren Diffusion von aktiver Kühlung führt, lässt sich eine Reduktion von über 90 % im OptEcon Combi-Szenario im Vergleich zum OptEcon Pur und OptEcon PV erzielen.

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass einige Aspekte im Rahmen dieser Studie nicht umfassend bearbeitet werden konnten. Dies betrifft z.B. den Effekt, der durch städtische Wärmeinseln hervorgerufen wird und die verstärkende Wirkung, die sich durch dezentrale aktive Kühlgeräte in diesem Zusammenhang ergibt. Auch konnten nicht alle relevanten innovativen aktiven Technologien im Detail behandelt werden, insbesondere die Möglichkeiten und Grenzen von Free-Cooling, Fernkälte, Nutzung von Abwärme in Sorptionskältemaschinen oder auch Anergienetzen.

Auswirkungen auf die Stromnetze

Auf der Grundlage der Ergebnisse der verschiedenen Simulationen für jedes der Szenarien über 500 Netze hinweg wird deutlich, dass die in diesem Projekt angenommene Durchdringung des Kühlbedarfs und die angenommene Integration von PV bei Haushalten keine signifikanten Engpässe bei den untersuchten Stromnetzen im Jahr 2030 und 2050 verursachen. In den meisten Fällen können die Auswirkungen des erhöhten Kühlbedarfs bereits durch den Einsatz von Beschattungstechnologien und die Integration von Haushalts-PV gemildert werden.

Die Integration von Kühllasten mit und ohne die Integration von Haushalts-PV für die Jahre 2030 und 2050 verursacht nur bei einigen Netztypen Probleme innerhalb des Stromnetzes. Dies liegt daran, dass im Allgemeinen davon ausgegangen werden kann, dass die Summe aus Grundlast im Sommer (die in der Regel sehr nahe an einem Niedriglastzustand liegt) und zusätzliche Kühllast in Summe die Netze weniger belastet als die in den Wintermonaten üblicherweise auftretende hohe Last. Allerdings ist davon auszugehen, dass umgekehrt für eine flächendeckende PV-Integration Netzverstärkungen sinnvoll und erforderlich sind. Ohne eine derartige Netzverstärkung können sich auch in der Kombination von Kühllast und PV-Erzeugung Netzüberlastungen ergeben, da die Kühllast die PV-Einspeisung nicht dauerhaft und jederzeit kompensiert.

Es ist jedoch zu beachten, dass die simulierten Szenarien die Integration anderer Technologien wie Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Batteriespeicher sowie die zur Erreichung der Klimaziele notwendige großflächige Integration von PV und Wind nicht berücksichtigen. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Netzverletzungen in den Monaten Februar und März auftraten. In Zukunft, wenn die Tage kalt, aber sonnig sind, könnte die Kombination von Wärmepumpen, PV-Durchdringung und EV-Ladungen andere Auswirkungen auf das Netz haben.

Stromnetzverstärkungsmaßnahmen

Die Analyse der Szenarien mit den gegebenen Annahmen hat gezeigt, dass im Allgemeinen keine Netzverstärkung erforderlich ist. In Ausnahmefällen (0,6 %) wurde gezeigt, dass in einigen Netzen geringe Netzverstärkungsmaßnahmen erforderlich sind. Berücksichtigt man, dass die Verteilernetzbetreiber ihre Netzanlagen ohnehin alle 50 bis 60 Jahre erneuern, so werden bis zu 2 % der Netze pro Jahr im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen ohnehin erneuert und damit auch verstärkt. Da das Alter der Netzanlagen in der Netzberechnung nicht berücksichtigt werden konnte, kann keine Aussage über die Notwendigkeit einer "Zusatzinvestition" zusätzlich zu den permanenten Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen der Netzbetreiber getroffen werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diejenigen Netzabschnitte, in denen bei der Netzberechnung Probleme aufgetreten sind, von den Netzbetreibern im Rahmen ihrer regulären Investitionen verstärkt werden. Damit sollten diese Netze rechtzeitig für die erwarteten Zukunftsszenarien 2030 und 2050 in einem angemessenen Zustand sein.

Wie bereits erwähnt, wurde in dem Projekt eine homogene PV-Integration angenommen, außerdem umfasste der Umfang des Projekts auch nicht die Integration anderer Zukunftstechnologien wie Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen, Speicher usw. Je nach Integrationsgeschwindigkeit bzw. konkreter Ausgestaltung dieser Zukunftsszenarien werden zusätzliche Netzverstärkungsmaßnahmen erwartet, um die großangelegte Einführung dieser Technologien in der Zukunft zu ermöglichen.

Maßnahmen zur Eindämmung des Strombedarfs für Gebäudekühlung

Passive Maßnahmen: Aus den Ergebnissen der Modellierung des österreichischen Kühlbedarfs und der Gebäudesimulationen können die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf den Kühlbedarf zusammengefasst und Empfehlungen abgeleitet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Kühlbedarf und Kühllast in Abhängigkeit des Klimas variieren, aber auch durch technische Maßnahmen stark beeinflusst werden können.

- Die Reduktion der solaren Wärmegewinne spielt eine wesentliche Rolle. Außenliegende Verschattungseinrichtungen sind hierbei besonders wirksam und können somit sowohl den Kühlbedarf als auch die maximale Kühllast stark reduzieren. Sonnenschutzverglasungen können einen ähnlichen Effekt aufweisen.
- Noch grundsätzlicher dürften Verglasungsanteil und Gebäudeausrichtung einen großen Einfluss auf den Kühlbedarf haben. Dies spiegelt sich unter anderem im höheren Kühlbedarf vom hochverglasten Gebäudetyp 4 in den Gebäudesimulationen wider.
- Der Temperatursollwert hat einen starken Einfluss auf den Kühlbedarf. Die Anzahl der Kühlstunden ist mit einem Sollwert von 24 °C wesentlich höher als mit einem Sollwert von 26 °C.
- Eine Reduktion von internen Wärmegewinnen, die durch die Verwendung von effizienten Geräten und Leuchtmitteln erreicht werden kann, führt zu einer Reduktion des Kühlbedarfs.
- Nachtlüftung wurde in allen durchgeführten Gebäudesimulationen konstant angenommen, stellt aber auch eine wirksame Maßnahme zur Senkung des thermischen Kühlbedarfs dar. Das Potenzial von Nachtlüftung ist von der Differenz zwischen Raumtemperatur und Außentemperatur abhängig. Somit ist dieses Potenzial ab einer gewissen Außentemperatur (in der Nacht) begrenzt. Auch ist bei höheren Solltemperaturen größer (Blondeau et al., 1997).
- Die Erhöhung des Reflexionsgrades von Wand- und Dachoberflächen wurde im Projekt nicht simuliert, aber sie kann auch den Kühlbedarf senken. Vor allem bei großen Dachflächen sind reflektierende Oberflächen („Cool Roofs“) von Vorteil im Kühlfall (Akbari et al., 2005).

Aktive Maßnahmen: Die Möglichkeit von Free Cooling und der Wirkungsgrad von aktiver Kühlung ist durch die Art der Kälteübergabe bedingt. Flächenkühlung ermöglicht im Vergleich zu luftgeführten und konvektionsbasierten Lösungen einen Betrieb mit kleineren Temperaturdifferenzen und somit höheren Wirkungsgraden, aber sie weist eine beschränkte Leistung auf.

Die „passiven Maßnahmen" wirken sich also doppelt auf den Kühlenergiebedarf aus, indem sie einerseits den thermischen Kühlbedarf reduzieren, und andererseits es durch die Reduktion der Spitzenlasten erlauben, Kühlanlagen mit höheren Temperaturen und somit effizienter zu betreiben.

Zu den aktiven Maßnahmen gehört auch die solarelektrisch angetriebene Kühl- bzw. Klimatisierungstechnik. Zu Zeiten hoher Raumkühllasten in den Sommermonaten sind die Solarstrahlungswerte meistens hoch und es gibt eine relativ gute Korrelation der beiden Leistungsprofile. Die Ergebnisse der dynamischen Simulation zeigen jedoch, dass die Kühllast dazu neigt, am Nachmittag – und somit ein paar Stunden später als die Photovoltaik-Leistung – ihren Höchstwert zu erreichen. In diesem Zusammenhang erscheint es günstig, die von thermischen Speichermassen in Gebäuden ermöglichte Flexibilität auszunutzen, um die Kühllast in Richtung der Photovoltaik-Höchstlast zu verschieben. Dies ist wiederum vor allem bei Flächenkühlung und insbesondere bei thermischer Bauteilaktivierung möglich. Tabelle 13 bietet einen Vergleich verschiedener Maßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den thermischen Kühlbedarf, den Heizwärmebedarf, die maximale thermische Kühllast und die maximale elektrische Last aufgrund von Gebäudekühlung.

Tabelle 13: Zusammenfassung technischer Maßnahmen und ihrer Auswirkungen auf Kühlbedarf und maximale Kühllast. -/+: Reduktion/Erhöhung des Energiebedarfs bzw. der Kühllast

Maßnahme	**Thermischen Kühlbedarf**	**Heizwärmebedarf**	**Max. thermische Kühllast**	**Max. elektrische Last aufgrund von Kühlung**
Außenliegende Verschattung	- -		- -	- -
Reduktion des Transmissionswärme-transferkoeffizients		- -	-	-
Nachtlüftung	- -		-	-
Erhöhung des Temperatur-Sollwerts	- -		-	- -
Reduktion der internen Wärmegewinne	- -		-	- -
Erhöhung des Reflexionsgrades von Wand- und Dachoberflächen	-	+	-	-
Verwendung eines effizienten Kühlsystems				- -

Empfehlungen für die künftige Gestaltung von Förderprogrammen

Derzeit liegt der Fokus der Förderungen im Gebäudebereich (z.B. Wohnbauförderung) auf der Reduktion des Heizwärmebedarfs in erster Linie durch Wärmedämmung der Gebäudehülle. Hingegen wird der Kühlbedarf in den diversen Förderprogrammen oft nicht ausreichend berücksichtigt. Daher wäre eine bessere Integration von Maßnahmen zur Reduktion des Kühlbedarfs in die bestehenden Instrumente zur Reduktion des Heizwärmebedarfs sinnvoll. In einigen Gebietskörperschaften bestehen bereits Förderprogramme für passive Maßnahmen zur Reduktion des Kühlbedarfs. Dies könnte insofern erweitert werden, als dass passive Maßnahmen zur Reduktion des Kühlbedarfs sowohl regulativ (Bauordnung) als auch als Förderkriterium expliziter herangezogen werden. Des Weiteren könnte auch im Falle eines Fenstertausches (Einzelmaßnahme) das Anbringen von Rollläden forciert werden.

Als Vorbild könnte Wien dienen, wo die Stadtbaudirektion vor allem aufgrund der Hitze in Bildungsbauten bereits eine erhöhte Sensibilität entwickelt hat. So wurde beispielsweise für Gebäude, die 20 Jahre oder älter sind, eine Sanierungsförderung für Sonnenschutz aufgestellt (z.B. außenliegende Jalousien).

Grundsätzlich ist sicherlich anzumerken, dass Bauvorschriften und Förderungen in erster Linie passive Maßnahmen und erst in zweiter Linie jene in Verbindung mit aktiver Kühlung berücksichtigen sollten. Wenn passive Maßnahmen nicht ausreichen, sollten innovative Systeme, z.B. im städtischen Bereich Anergienetze oder mit Abwärme betriebene Fernkältenetze, forciert werden.

Wenn die Errichtung einer solchen Infrastruktur nicht machbar ist (z.B. im ländlichen Raum), sollten Förderprogramme bei den dann nötigen aktiven Kühltechnologien auf höchste Energieeffizienz und die Erschließung von Wärmesenken mit möglichst geringer Temperatur (z.B. Erdreich, Grundwasser) geachtet werden. Da Bauteilaktivierung und Flächenkühlung, sowie –heizung ein großes Potenzial zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpen (sowohl Kühl- als auch Heizfall) darstellt und da die damit vorhandene Speicherkapazität für die Lastverschiebung zur PV-Eigenverbrauchsoptimierung besonders dienlich ist, sollten Förderprogramme auf Bauteilaktivierung ein besonderes Augenmerk legen.

Literaturverzeichnis

APCS Power Clearing and Settlement AG, „Synthetic load profiles", [Online]. Available: https://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile. [Zugriff am 05 10 2021].

CENELEC - EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, 2010

Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., & Richels, R. (2007). CCSP synthesis and assessment product 2.1, Part A: scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. US Government Printing Office, Washington DC.

D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte und Others, „EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program," Energy and buildings, Bd. 33, p. 319–331, 2001.

DIgSILENT GmbH, DIgSilent Power System Solutions.

European Commission, 'PRIMES draft reference scenario, 2020', 2021.

H. Akbari, R. Levinson und L. Rainer, „Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings," Energy and Buildings, Bd. 37, p. 1007–1016, 2005.

J. S. Stein, W. F. Holmgren, J. Forbess und C. W. Hansen, „PVLIB: Open source photovoltaic performance modeling functions for Matlab and Python," in 2016 ieee 43rd photovoltaic specialists conference (pvsc), 2016.

Jacob, D.; Petersen, J.; Eggert, B.; Alias, A.; Christensen, O. B.; Bouwer, L. M.; 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.; van 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. EURO-CORDEX (2014): new high-resolution climate change projections for European impact research Regional Environmental Changes. Vol. 14, Issue 2, pp. 563-578., https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2

Kranzl, L., Aichinger, E., Büchele, R., Forthuber, S., Hartner, M., Müller, A., Toleikyte, A., 2018. Are scenarios of energy demand in the building stock in line with Paris targets? Energy Efficiency. https://doi.org/10.1007/s12053-018-9701-1

Kranzl, L., Mascherbauer, P., Büchele, R., Fallahnejad, M., Pezzutto, S., Novelli, A., Zambito, A., Miraglio, P., Belleri, A., Bottecchia, L., Gantioler, S., Riviere, P., Etienne, A., Stabat, P., Berthou, T., Viegand, J., Jensen, C., Hummel, M., Müller,

A., 2022. Renewable Cooling Definition Options and Calculation Methodology. Final Report of the project ENER/C1/2018-493 Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive.

Kranzl, L., Mascherbauer, P., Büchele, R., Fallahnejad, M., Pezzutto, S., Novelli, A., Zambito, A., Miraglio, P., Belleri, A., Bottecchia, L., Gantioler, S., Riviere, P., Etienne, A., Stabat, P., Berthou, T., Viegand, J., Jensen, C., Hummel, M., Müller, A., 2022. Renewable Cooling Definition Options and Calculation Methodology. Final Report of the project ENER/C1/2018-493 Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive.

Kranzl, L., Müller, A., Maia, I., Büchele, R., Hartner, M., 2018. Wärmezukunft 2050. Erfordernisse und Konsequenzen der Dekarbonisierung von Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Österreich. Auftraggeber: Erneuerbare Energie Österreich, Wien.

M. Hartner et al., 'Summary report on case study: Energy demand and supply in buildings and the role for RES market integration', Mar. 2018 [Online]. Available: www.set-nav.eu

Moss, Richard H., et al. "The next generation of scenarios for climate change research and assessment." Nature 463.7282 (2010): 747-756.

Moss, Richard H., et al. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. No. PNNL-SA-63186. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 2008.

Müller, A., 2015. Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock (PhD-Thesis). Technische Universität Wien, Wien.

Müller, A., Fritz, S., Kranzl, L., 2017. Energieszenarien bis 2050: Wärmebedarf der Kleinverbraucher. Ein Projekt im Rahmen der energiewirtschaftlichen Szenarien für den klima- und energiepolitischen Rahmen 2030 und 2050 und den Monitoring Mechanism 2017. Endbericht (Ausarbeitung im Auftrag der Umweltbundesamt GmbH, Wien). TU Wien, e-think, Wien.

Müller, A., 'Space cooling needs density map of buildings in EU28 + Switzerland, Norway and Iceland for the year 2015'. Hotmaps project, 2019 [Online]. Available: https://gitlab.com/hotmaps/heat/cool_tot_curr_density

P. Blondeau, M. Spérandio und F. Allard, „Night ventilation for building cooling in summer," Solar energy, Bd. 61, p. 327–335, 1997.

Pezzutto, S., De Felice, M., Fazeli, R., Kranzl, L., Zambotti, S., 2017. Status Quo of the Air-Conditioning Market in Europe: Assessment of the Building Stock. Energies 10, 1253. https://doi.org/10.3390/en10091253

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. Climatic change, 109(1), 33-57.

Smith, Steven J., and T. M. L. Wigley. "Multi-gas forcing stabilization with Minicam." The Energy Journal Special Issue# 3 (2006).

T. Fleiter et al., 'Profile of heating and cooling demand in 2015. Data Annex. Deliverable of the project Heat Roadmap Europe.' 2017 [Online]. Available: https://heatroadmap.eu/heating-and-cooling-energy-demand-profiles/. [Accessed: Jun. 28, 2020]

Vrac, M., Drobinski, P., Merlo, A., Herrmann, M., Lavaysse, C., Li, L., & Somot, S. (2012). Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate: uncertainty assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, 2769-2784.

Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., ... & Edmonds, J. (2009). Implications of limiting CO2 concentrations for land use and energy. Science, 324(5931), 1183-1186.

Anhang

Schätzkoeffizienten Haushaltsstrom-Lastprofile

Variable	Koeff.	Std. Fehler
Strompreis	-1.069***	(0.379)
Niederschlag	0.00283***	(0.000696)
CDD	-0.00119	(0.000754)
HDD	0.00317***	(0.000348)
Globalstrahlung	-0.000111***	(0.0000103)
0:00	0	(.)
1:00	-0.0264***	(0.00226)
2:00	-0.0415***	(0.00363)
3:00	-0.0461***	(0.00451)
4:00	-0.0382***	(0.00516)
5:00	0.00395	(0.00696)
6:00	0.0927***	(0.00947)
7:00	0.141***	(0.00991)
8:00	0.186***	(0.0101)
9:00	0.227***	(0.0116)
10:00	0.269***	(0.0130)
11:00	0.346***	(0.0151)
12:00	0.339***	(0.0136)
13:00	0.303***	(0.0122)
14:00	0.279***	(0.0116)
15:00	0.265***	(0.0108)
16:00	0.286***	(0.0116)
17:00	0.336***	(0.0134)
18:00	0.363***	(0.0142)
19:00	0.363***	(0.0138)
20:00	0.322***	(0.0124)
21:00	0.253***	(0.0104)
22:00	0.150***	(0.00716)
23:00	0.0579***	(0.00344)
Konstante	0.378***	(0.0617)
N	3215939	
adj. R-sq	0.099	

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

Modellannahmen Gebäudesimulation

Tabelle 14: Angenommene Gebäudeeigenschaften für die Gebäudesimulationen, für die drei Gebäudekategorien Doppelhaushälfte (DH), Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) und die vier Gebäudestandards 1, 2, 3 und 4

Gebäude-kategorie/ -standard	Anzahl Zonen	BGF	Brutto-Volumen	Thermische Hülle (außen)	Fenster -fläche	Mittlerer U-Wert
Einheit	-	m²	m³	m²	m²	W/(m².K)
DH-1	2	148	385	201	25	1,64
DH-2	2	148	385	201	25	1,51
DH-3	2	148	385	201	25	0,89
DH-4	2	148	385	201	34	0,29
EFH-1	2	148	385	258	37	1,71
EFH-2	2	148	385	258	37	1,54
EFH-3	2	148	385	258	37	0,80
EFH-4	2	148	385	258	51	0,29
MFH-1	4	1350	3510	1148	162	1,70
MFH-2	4	1350	3510	1148	162	1,54
MFH-3	4	1350	3510	1148	162	0,81

Tabelle 15: Annahmen für die Gebäudesimulation

Parameter	Wert	Einheit	Anmerkung
Sollwert für Kühlung	24 bis 26	°C	Variationsparameter
Hygienischer Luftwechsel Einfamilienhaus	0,19	h^{-1}	Auf das Brutto-Volumen bezogen. In Anlehnung an ÖNORM B8110-5 2019 (0,28 h^{-1} auf das Luftvolumenbezogen).
Hygienischer Luftwechsel Mehrfamilienhaus	0,25	h^{-1}	Auf das Brutto-Volumen bezogen. In Anlehnung an ÖNORM B8110-5 2019 (0,38 h^{-1} auf das Luftvolumenbezogen).
Erhöhung des Luftwechsels bei Nachtlüftung[10]	+50 %		
Max. interne Gewinne durch Geräte und Beleuchtung	4,4 bis 12,3	W/m²	Werden mit mittleren Wochenprofilen für drei „Cluster" auf Basis der Stromverbrauchsprofilen multipliziert.
Max. Personendichte	0,019	Personen/ m²	Wird mit Anwesenheitsprofil multipliziert.
Personenwärme	111	W/Person	

[10] Angenommene Bedingungen für die Nachtlüftung: Differenz Raumtemperatur – Außentemperatur > 2 K, Außentemperatur über 15 °C, Raumtemperatur über 21,5 °C, Uhrzeit zwischen 20:00 und 8:00 Uhr.

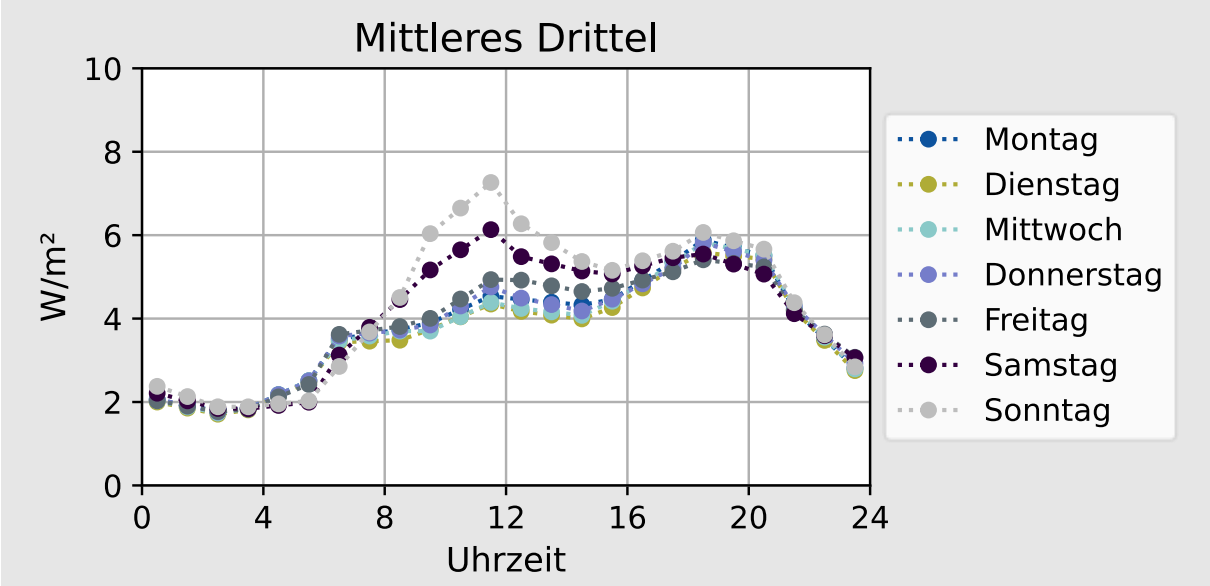


Abbildung 29: Wochenprofil der internen Wärmegewinne für die Gebäudesimulation für die mittlere Gruppe

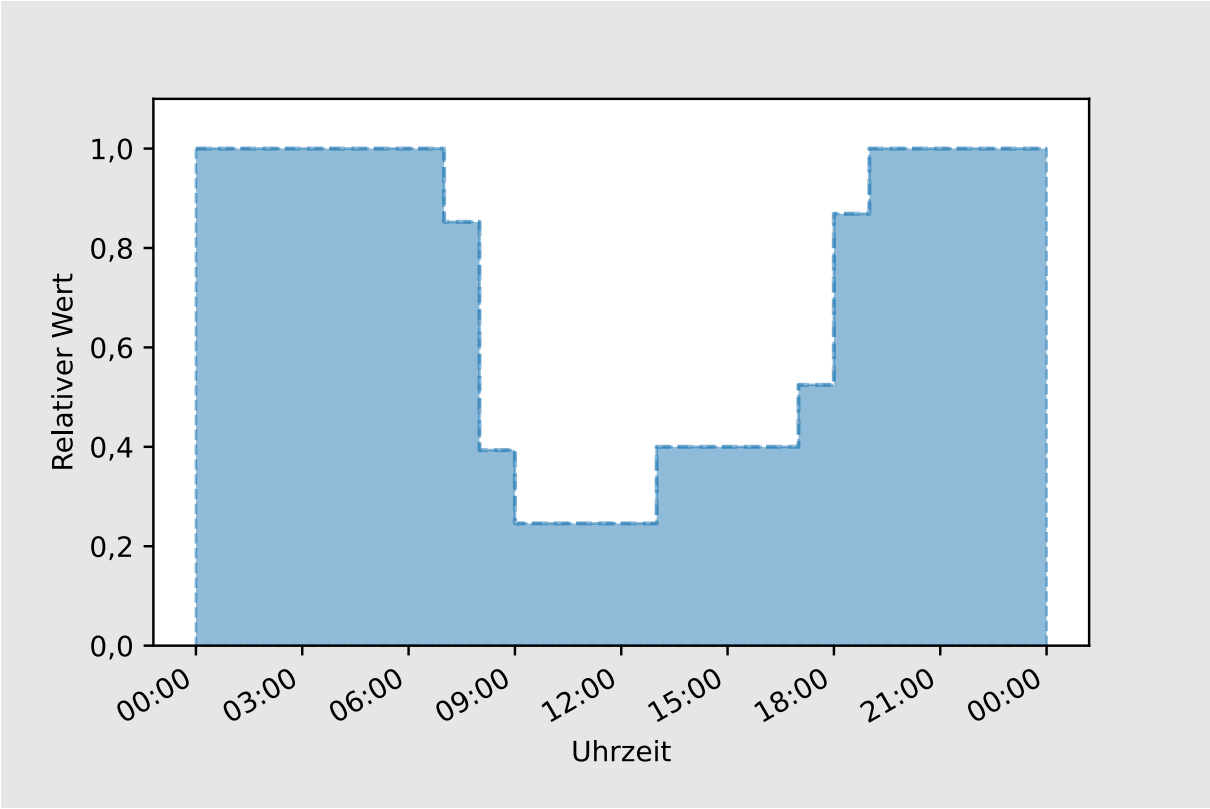


Abbildung 30: Tagesprofil der Anwesenheit für die Gebäudesimulation

Tabelle 16: Annahmen für die Anlagenmodellierung

Anlagentyp	Vorlauftemperatur	EER_{max}
Luft/Luft (Split-Gerät)	7	6
Luft/Wasser (reversible Wärmepumpe)	17	8
Free-Cooling	-	10

Szenarien für die Zuordnung von Kühllastprofilen

Tabelle 17: Definition der drei Temperaturzonen. Die Variable CDD_wmax bezeichnet die maximale wöchentliche Summe der Kühlgradstunden für das Bezugsjahr 2050 im Szenario RCP 8.5

Temperaturzone	Bereich CDD_wmax	Mittelwert CDD_wmax	Koordinaten
nieder	Unter 514 K.h	360 K.h	(47,8; 15,9)
mittel	514 bis 1060 K.h	722 K.h	(47,7; 16,2)
hoch	Über 1060 K.h	1168 K.h	(48,1; 16,4)

Tabelle 18: Annahmen zur Verteilung von Kühlsystemen nach Szenario

System	Referenz	OptEcon Pur	OptEcon PV	OptEcon Combi
Luft/Luft	0,90	0,6	0,6	0,2
Luft/Wasser	0,08	0,3	0,3	0,5
Free Cooling	0,02	0,1	0,1	0,3

Tabelle 19: Annahmen zur Verteilung von Verschattungseinrichtungen nach Szenario. Bei der außenliegenden Verschattung wird ein geringer Transmissionsgrad von 30 % angenommen

Standard	Referenz	OptEcon Pur	OptEcon PV	OptEcon Combi
Unverschattet	0,75	0,40	0,40	0,20
Außenliegende Verschattung	0,25	0,60	0,60	0,80

Tabelle 20: Annahmen zur Verteilung von Kühl-Sollwerten nach Szenario

Sollwert	Referenz	OptEcon Pur	OptEcon PV	OptEcon Combi
24 °C	0,60	0,20	0,20	0,20

Sollwert	Referenz	OptEcon Pur	OptEcon PV	OptEcon Combi
25 °C	0,30	0,50	0,50	0,30
26 °C	0,10	0,30	0,30	0,50

Tabelle 21: Annahmen zur Verteilung von PV-Anlagen nach Jahr, für die Szenarien OptEcon PV und OptEcon Combi

Peak-Leistung	2020	2030	2050
0 kWp	0,85	0,50	0,10
2 kWp	0,15	0,50	0,90