



Leitfaden für die Energiesystemoptimierung zur Transformation komplexer Bestandsquartiere

Erstellt im Rahmen des BMWi-Projektes CleanTechCampus

(FKZ 03ET1407A und 03ET1407B)

14.04.2021

Technische Universität München

Arcisstraße 21
80333 München

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.

Bereich Energiespeicherung
Walther-Meißner-Straße 6
85748 Garching

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren:

Anna Hermes, ZAE Bayern

Benedikt Schweiger, Lehrstuhl für Energiesysteme, TU München

Dr. Jens M. Kuckelkorn, ZAE Bayern

Wolf Wedel, Lehrstuhl für Energiesysteme, TU München

Christoph Matschi, Zentrum für Nachhaltiges Bauen, TU München (Hochschule Ansbach)

Markus Landerer, Control of Renewable Energies, TU München

Dr. Annelies Vandersickel, Lehrstuhl für Energiesysteme, TU München

Prof. Dr. Hartmut Spliethoff, Lehrstuhl für Energiesysteme, TU München

Inhaltsverzeichnis

- Inhaltsverzeichnis3**
- 1 Einleitung4**
- 2 Methodik der Systemoptimierung5**
- 3 Eingangsgrößen, Preprocessing und externe Modelle6**
 - 3.1 Energiebedarfe6**
 - 3.1.1 Bestandsanalyse7
 - 3.1.2 Energiebedarfsprognosen10
 - 3.2 Energieverteilung12**
 - 3.2.1 Analyse der bestehenden Netzinfrastruktur12
 - 3.2.2 Konzeption von Versorgungsvarianten13
 - 3.3 Energiebereitstellung14**
 - 3.3.1 Bestandsanalyse14
 - 3.3.2 Portfolio verfügbarer Technologien15
 - 3.4 Randbedingungen zum Energieträgereinsatz16**
 - 3.4.1 Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien16
 - 3.4.2 Energieträgerbezug16
- 4 Modellbildung und Optimierung des Gesamtsystems17**
 - 4.1 Modellierung des Energiesystems17**
 - 4.2 Energiesystemoptimierung18**
 - 4.3 Detailmodellierung19**
- 5 Optimierungsergebnisse und Bewertung19**
 - 5.1 Ergebnisgrößen der Energiesystemoptimierung19**
 - 5.2 Bewertung der Optimierungsergebnisse20**
- 6 Literaturverzeichnis21**

1 Einleitung

Dieser Leitfaden ist im Rahmen des Verbundvorhabens CleanTechCampus Garching – gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FZK 03ET1407A und FZK 03ET1407B) – entstanden. Die Zielsetzung lautet, die Möglichkeiten und Vorgehensweisen für eine erfolgreiche Optimierung von komplexen Quartieren für potentielle Nutzer, z. B. Energieversorger, Bauherren, Planer und Forschungsinstitute, aufzuzeigen. Die Weblinks zum Download des verwendeten Programms zur Optimierung sind im Dokument enthalten, die Software ist frei verfügbar und nutzbar.

Die Struktur des Leitfadens orientiert sich an einer möglichen Vorgehensweise zur Systemoptimierung. In Kapitel 2 werden zunächst grundlegende Fragestellungen zur Methodik von Systemoptimierungen einschließlich der Zielsetzung, der zeitlichen und räumlichen Dimension sowie der wichtigsten Begrifflichkeiten erläutert. In Kapitel 3 werden Eingangsgrößen für die Gesamtoptimierung erläutert. Diese Eingangsgrößen sind teilweise über ein Preprocessing oder externe Modelle zu ermitteln. Die Schnittstellen sind dabei von den gewählten Systemgrenzen der Gesamtoptimierung abhängig. In Kapitel 4 wird schließlich die Gesamtsimulation und die Analyse der Ergebnisse erläutert. Abschließend werden in Kapitel 5 die Ergebnisse der Optimierung sowie Möglichkeiten zur Aufbereitung und Interpretation beschrieben. Abbildung 1 zeigt die Vorgehensweise der Modellierung für die Systemoptimierung im Projekt CleanTechCampus Garching.

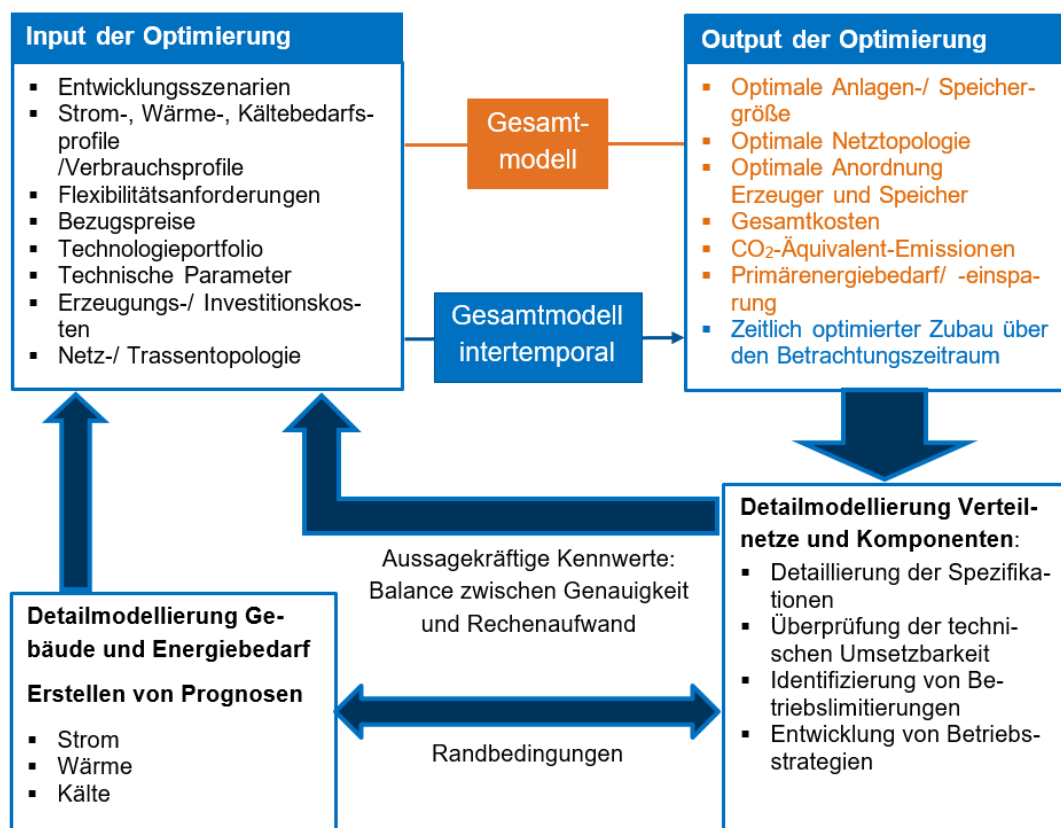


Abbildung 1: Workflow zur Systemoptimierung im Projekt CleanTechCampus Garching

2 Methodik der Systemoptimierung

Optimierung als Basis der Quartiersbewertung

Die energetische Planung von Quartieren rückt im Rahmen der Energiewende weiter in den Vordergrund. Die Unterstützung der Planung mit Optimierungen bietet die Möglichkeit, die hohe Komplexität, die sich durch die zahlreichen zur Verfügung stehenden Technologien und insbesondere den Einsatz erneuerbarer Energien ergibt, mit mathematischen Methoden zu lösen. Ein weitverbreiteter Ansatz hierfür stellt die lineare Optimierung dar. Dabei werden Technologien und Randbedingungen durch lineare Gleichungen und Ungleichungen beschrieben sowie die Zielgröße minimiert. Die Technologien werden durch Kennlinien und Kenngrößen, wie z. B. spezifische Kosten und Wirkungsgrade, charakterisiert.

Im Rahmen des Projekts CleanTechCampus wurde die Optimierungssoftware urbs verwendet und weiterentwickelt. Dieses Open-Source-Optimierungswerkzeug inklusive Dokumentation ist verfügbar unter:

- Nutzerdokumentation: <https://urbs.readthedocs.io/en/latest/>
- Optimierungsframework urbs: https://github.com/tum-ens/urbs/tree/urbs_gui/Installer/Output

Optimierungsziele

Im Rahmen der Optimierung muss entschieden werden, auf welche Zielgröße das System optimiert werden soll. Minimale Gesamtkosten stellen die häufigste Zielgröße dar, wobei Energiesysteme vermehrt auch auf die maximal mögliche Treibhausgasemissionsreduktion optimiert werden. Eine Möglichkeit sowohl ökologische als auch ökonomische Faktoren zu berücksichtigen, ist beispielsweise, bei der ökonomischen Optimierung ein Limit an Treibhausgasemissionen als Randbedingung vorzugeben. In diesem Fall wird das kostengünstigste System unter Einhaltung der vorgegebenen Emissionsziele konfiguriert.

Spartenübergreifende Optimierung

Bei der spartenübergreifenden Optimierung werden mehrere Sektoren, bspw. Strom, Wärme und Kälte, gekoppelt betrachtet. Für eine effiziente Nutzung von Energieträgern ist häufig der Einsatz von Co-Generationsprozesse, z. B. in Form von Kraft-Wärme- oder Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen, zielführend. Die spartenübergreifende Optimierung ist in der Formulierung des Optimierungsproblems nicht auf einen Sektor begrenzt und kann dadurch zusätzliche Kosten- und Emissionsreduktionspotentiale identifizieren.

Jahressimulation und intertemporale Simulation

Bei einer Jahressimulation wird der Technologiepark anhand von Verbrauchszeitreihen, Systemtemperaturen und Technologie- sowie Energieträgerkosten für ein Jahr optimiert. Um die langfristige Quartiersentwicklung und erwartete Veränderungen, z. B. im Bereich des technologischen Ausbaus, der

Energiekosten oder der Technologieentwicklung zu berücksichtigen, wird die intertemporale Optimierung genutzt. Dabei werden in bestimmten Abständen Stützjahre definiert, z. B. für einen 20-Jahreszeitraum fünf Jahresintervalle. Diese Stützjahre werden basierend auf ermittelten Prognosen (z. B. für die Kostenentwicklung bei Photovoltaik, die Bedarfsentwicklung oder die Entwicklung der Systemtemperaturen) parametrisiert. Das Optimierungsproblem wird über den gesamten Zeitraum gelöst und gibt dadurch die unter den angenommenen Randbedingungen optimalen Zubauzeitpunkte für die unterschiedlichen Technologien aus.

3 Eingangsgroßen, Preprocessing und externe Modelle

Für die vollständige Abbildung eines Gesamtenergiesystems, welches sämtliche Sparten hinsichtlich Energiebereitstellung, Energiespeicherung, Energieverteilung und Energiesenken sowie räumliche und zeitliche Aspekte berücksichtigt, werden häufig vereinfachende Modelle eingesetzt, u. a. um die Rechenzeit zu begrenzen. So werden für Systemoptimierungen oftmals 1-Knoten-Modelle verwendet, die insbesondere die räumliche Verteilung nur indirekt oder gar nicht abbilden.

Daher ist es zielführend, die dynamischen Effekte, z. B. von Energienetzen, vorab im Rahmen eines Preprocessing durch vorgelagerte Modelle abzudecken.

Im ersten Schritt ist es generell erforderlich, eine Grundlagenerhebung für den Bestand und zukünftigen Ausbau aller Sektoren durchzuführen, um die Eingangsparameter für die weitere Untersuchung zu ermitteln.

3.1 Energiebedarfe

Die Analyse des energetischen Ist-Zustandes sowie Prognosen zu dessen zukünftiger Entwicklung bilden die Grundlagen für die Generierung von Energiebedarfszeitreihen, welche zur spartenübergreifenden Optimierung des Gesamtsystems erforderlich sind.

Bei der Ermittlung von Energiebedarfen sind die für die Untersuchung gewählten Systemgrenzen zu definieren. So ist beispielsweise bei einer Optimierung von Einzelgebäuden der Energiebedarf auf Gebäudeebene maßgeblich, auf Quartiersebene sind zusätzlich z. B. auch Energieverluste von Verteilnetzen zu berücksichtigen. Für die Energiebedarfsermittlung werden zunächst alle Energiesenken und Verluste betrachtet. Sowohl für den Ist-Zustand als auch für die Zukunftsprognose ist die Dynamik von Leistungen und Energien aller Sektoren hinreichend genau zu ermitteln.

Zur realitätsnahen Generierung von Energiebedarfszeitreihen für die Gesamtsimulation ist zunächst der Ist-Energieverbrauch zu ermitteln und in einen Ist-Energiebedarf (z. B. Klimabereinigung) umzurechnen, um eine Kalibrierung für prognostizierte Energiebedarfszeitreihen zu ermöglichen.

Als Grundlage dienen einerseits Messdaten, die nicht zwangsläufig einem funktionalen und komfortgerechten Betrieb entsprechen, sowie Planungsunterlagen (insbesondere für den Zubau) und regulatorische Rahmenbedingungen.

Die Energiebedarfe lassen sich klassifizieren in gebäudeinduzierte Energiebedarfe, Prozessenergiebedarfe (hauptsächlich Sondernutzungen) und Energieverluste von Verteilsystemen und Speichern. Insbesondere Prozessenergie kann bei komplexen Mischgebieten ganzjährig einen hohen Anteil am Energieumsatz ausmachen. Dies kann durchaus auch bei Energieverlusten von Verteilsystemen und Speichern zutreffen.

3.1.1 Bestandsanalyse

Zur Ermittlung von systemrelevanten Strukturen sowie Leistungs- und Energiebedarfen ist es zielführend, möglichst genaue dynamische Modelle von Einzelgebäuden und Verteilnetzen auf Basis von Planungsunterlagen zu erstellen und diese mit Messdaten zu kalibrieren. Alternativ können vereinfachte Verfahren angewendet werden, die entweder ausschließlich auf Planzahlen oder größtenteils auf Messdaten beruhen.

Wärme:

Zur Durchführung der Bestandsanalyse der gebäudeinduzierten Energiebedarfe werden folgende Eingangsdaten bei der Grundlagenerhebung herangezogen:

- Planungsunterlagen: Standort (insbesondere Klima), Gebäudegeometrie, -orientierung, -exposition, -hülle und Bauphysik (z. B. Baualtersklasse, Energiestandard, transparente Bauteile), Gebäudenutzung (Nutzungsprofile) und -zonierung (Büro, Labor, Besprechungsräume, usw.), interne Gewinne, Regelkonzepte
- Messdaten zu Energietechnik und Komfort: Energie- und Leistungsdaten (Wärme und Ersatzgröße Strom für Gesamtbedarf und Subsysteme), Systemtemperaturen, Wetterdaten, Raumtemperaturen und Raumluftqualität
- Regulatorischer Rahmen: Normen, Gesetzestexte, Verordnungen, Richtlinien, etc.

Die Ermittlung von Prozesswärmebedarfen ist in der Regel sehr komplex. Grundsätzlich kann Prozesswärme z. B. in Form von Brauchwarmwasserbedarf, Antriebswärme, Wärme für Laborversuchsstände, Dampf für Großküchen und Wäschereien etc. anfallen. Auch hier helfen Planungsunterlagen und Messdaten (Leistungen, Energien, Systemtemperaturen, Volumenströme, etc.).

Bei einer Wärmeversorgung mit Fernwärmenetzen stellen dessen Energieverluste einen Energiebedarf dar, der durch die Erzeugungsanlagen kompensiert werden muss. Die Netzverluste können z. B. anhand von zentralen und dezentralen Wärmemengenzählern ermittelt oder im Rahmen einer Rohrnetzsimulation berechnet werden (siehe auch Kapitel 3.2). Weiterhin ist hier hinsichtlich der bereitzustellenden Wärmeleistung der Energiezentrale der Gleichzeitigkeitsfaktor im Wärmenetz zu berücksichtigen. Dieser hängt von Anzahl, Art und Leistungsbedarf der Abnehmer ab. Die Energieverluste von Wärmespeichern können entweder durch Mitteltemperaturen und Verlust über die Speicherhülle berechnet werden, über Wärmemengenzählung der Be- und Entladung bilanziert werden oder in einer dynamischen Simulation ermittelt werden.

Für Bedarfsermittlungen sind Energieverbräuche z. B. über Korrekturen für Klima und Komfort erfüllungen zu normieren.

Im Einzelfall können stark vereinfachende Methoden hinreichende Ergebnisse liefern. So kann die Bestimmung der jährlichen Wärmebedarfsmenge zur Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung im einfachsten Fall mittels statischer Berechnungsmethoden erfolgen. Üblich sind hierbei die beiden unterschiedlichen Ansätze nach (DIN V 4108-6:2003-06) in Verbindung mit (DIN V 4701-10:2003-08), wodurch allerdings ausschließlich Wohngebäude abgebildet werden, sowie nach (DIN V 18599-2:2018-09) Zur Ermittlung der Heizlast gibt es die Berechnung nach (DIN EN 12831-1:2017-09).

Zur Erzeugung von Wärmebedarfszeitreihen können z. B. Klima-Testreferenzjahre und Heizgradstunden genutzt werden. Dabei müssen insbesondere die Heizgrenztemperatur, das Innentemperaturprofil sowie die Transmission der Gebäudehülle berücksichtigt werden. Eine qualitativ hochwertigere, allerdings deutlich aufwendigere Alternative zur statischen Berechnung der Energiebedarfe stellen dynamisch-thermische Gebäudesimulationen dar (z. B. AX 3000, IDA ICE, TRNSYS, EnergyPlus).

Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, können Gebäude in Form von typischen Gebäudeteilen mit ihren jeweiligen Nutzungsarten (Büro, Labor, etc.) zusammengesetzt werden oder charakteristische Nutzungseinheiten verwendet werden. Diese Bausteine können nach verschiedenen Energiestandards und Verglasungsanteilen modifiziert werden.

Anhand dieser Analysen können die Wärmebedarfe für Heizwärme, Brauchwarmwasser, Prozesswärme sowie Wärmeverluste von Verteilnetzen und Speichern ermittelt und zusammengeführt werden.

Kälte:

Das Vorgehen zur Ermittlung des Kältebedarfs ähnelt in vielerlei Hinsicht dem zur Ermittlung des Wärmebedarfs.

Zunächst ist eine Bestandsanalyse zur Ermittlung des Bedarfs zur Gebäudekühlung anhand von Planungsunterlagen, Messdaten sowie regulatorischen Rahmenbedingungen vorzunehmen. Im Gegensatz zum Wärmebedarf eines Gebäudes, der zu einem großen Teil durch die Außentemperatur bestimmt ist, unterliegt der Kühlenergiebedarf jedoch mehreren wesentlichen Einflussfaktoren. Dabei sind insbesondere Solarstrahlung, Glasflächenanteile, Verschattung, nutzbare Wärmekapazität, interne Lasten und Regeltechnik entscheidend.

Bei der Ermittlung des Kühlenergiebedarfs der Gebäude ist zwischen aktivem und passivem Kühlenergiebedarf zu unterscheiden. Der aktive Kühlenergiebedarf wird durch eine effiziente Gebäudeplanung (reduzierter Glasflächenanteil, Verschattungsanlagen, Regeltechnik, etc.) sowie Technologien wie Nachtlüftung, Kälterückgewinnung und Adiabatik erheblich reduziert.

Zur Analyse des Prozesskältebedarfs, z. B. zur Kühlung von Laboranlagen, können Messdaten und Planungsunterlagen herangezogen werden. Nachdem es sich hierbei oftmals nicht um Standardanwendungen handelt, stellt die Ermittlung des Prozesskältebedarfs in der Regel eine große Herausforderung dar.

Weiterhin sind – soweit vorhanden – analog zur Wärmebedarfsermittlung auch Energieverluste von Kältenetzen oder -speichern zu berücksichtigen. Zur Bestimmung des Kältebedarfs ist auch hier eine Normierung der Energieverbräuche bei gleichzeitiger Erfüllung der Komfortbedingungen vorzunehmen.

Eine überschlägige Ermittlung des Kühlenergiebedarfs von bestimmten Gebäudetypen kann durch statische Berechnungsmethoden wie der (DIN V 18599-2:2018-09) erfolgen. Eine weitere, sehr einfache Methode stellt die Abschätzung des Kältebedarfs anhand unterschiedlicher Nutzungszonen der Gebäude in Verbindung mit standardisierten, flächenbezogenen Bedarfskennwerten dar. Bei vielen Nichtwohngebäuden oder Quartieren mit komplexer Nutzungsstruktur, wie z. B. einem Forschungscampus, stößt eine Kältebedarfsermittlung durch diese vereinfachenden Berechnungsverfahren an Ihre Grenzen. Insbesondere der Kältebedarf von Laboren oder Versuchshallen ist in dieser Form nicht differenziert abbildbar und muss separat berücksichtigt werden.

Die Generierung von Kältezeitreihen kann in vereinfachter Form ähnlich zur Wärmebedarfszeitreihe durch die Anwendung von Kühlgradstunden und Testreferenzjahren erfolgen. Bei vereinfachenden Methoden können auch gemessene charakteristische Referenzlastprofile herangezogen werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Kühlenergiebedarf von Gebäuden abgesehen von der Außentemperatur durch weitere Einflussfaktoren wie Strahlungsbilanz, Wärmekapazität, Nachtlüftung und Qualität der Verschattungsanlage maßgeblich bestimmt wird.

Idealerweise wird der Kühlenergiebedarf und die Lastcharakteristik eines Gebäudes anhand einer detaillierten Gebäudesimulation berechnet (z. B. TRNSYS). Dabei ist auch hier zur Bestimmung des Gesamt-Kältebedarfs eines Versorgungsgebiets die Zusammensetzung typischer Gebäudeteile möglich, um den Berechnungsaufwand zu reduzieren.

Im Ergebnis werden die Kältebedarfe für aktive Gebäudekühlung und Prozesskälte sowie passive Gebäudekühlung und Verluste ermittelt.

Strom:

Die Qualität und Verfügbarkeit von Daten zum Stromverbrauch bzw. -bedarf ist mitunter sehr heterogen. Im Optimalfall findet die Verbrauchsbestimmung mittels vorhandener Lastgangmessungen für das gesamte Quartier, für die Einzelgebäude und einzelne Verbrauchergruppen (z. B. Sektor Kälteerzeugung, Netzpumpen zur Energieverteilung, Sondernutzungen) statt. Das Ziel der Evaluierung ist die Erstellung von Strombedarfszeitreihen, bei denen unterschieden wird zwischen dem Strombedarf zur Bereitstellung von Wärme und Kälte und dem Strombedarf von Gebäuden und Sondernutzungen. Daraus wird ein Lastgang für den Strombedarf ohne den Eigenbedarf der Erzeugungsanlagen für eine repräsentative Periode, beispielsweise ein Jahr, in geeigneter Auflösung, z. B. stündlich, generiert.

Zur Schließung von Datenlücken, z. B. für einzelne Quartiersabschnitte, können entweder Messstellen nachgerüstet werden oder Standardlastgänge für die jeweiligen Gebäudenutzungen angenommen werden. Im letzteren Fall ist es empfehlenswert, im Nachgang eine Validierung durchzuführen. Sollten die Jahresenergiemengen bekannt sein, kann ebenfalls auf Standardlastgänge zurückgegriffen werden, die dann entsprechend der Jahresenergiemengen skaliert werden. Punktuelle Messungen, z. B. in repräsentativen Gebäudezonen oder der größten Verbraucher über einige Wochen hinweg, können bei der Validierung der angenommenen Lastgänge mit geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand bereits einen großen Mehrwert liefern.

Validierte Standardlastgänge sollten nur eingesetzt werden, wenn keine Möglichkeit besteht, reale Messdaten zu erhalten. Für den Wohnbereich können diese z. B. basierend auf (Fünfgeld und Tiedemann) oder mit einem Lastganggenerator, wie bspw. jenem von (Pflugradt), erzeugt werden. Der GHD-Sektor ist deutlich heterogener und kann beispielsweise nach den Profilen G0 bis G7 des BDEW erstellt werden (Fünfgeld und Tiedemann).

3.1.2 Energiebedarfsprognosen

Die Erstellung von Energiebedarfsprognosen bildet die Grundlage für eine spartenübergreifende Analyse des Gesamtsystems bestehend aus Energieerzeugung, Energieverteilung und Abnehmern (Gebäuden).

Wärme:

Die Energiebedarfsprognosen beschreiben, basierend auf der Bestandsanalyse aus Kapitel 3.1.1, die zukünftige Entwicklung des Wärmelastverhaltens (z. B. stündlich aufgelöste Lastgänge) eines Quartiers, idealerweise bis zu einem Endausbauzustand.

Um Energiebedarfsprognosen erstellen zu können, müssen zunächst Ereignis-Szenarien erarbeitet werden. Hier wird im Rahmen eines Masterplans festgelegt, wann, wo und in welchem Umfang Gebäude saniert, zurückgebaut oder neu errichtet werden. Neubauten werden dabei analog Kapitel 3.1.1 anhand von Planvorgaben berechnet. Weiterhin können unterschiedliche Entwicklungspfade definiert werden. Dies betrifft z. B. Ausbaugeschwindigkeit, Energiestandard, etc.

Dabei sind auch zukünftige Entwicklungen der Randbedingungen zu prognostizieren. Dazu zählen unter anderem Änderungen von gesetzlichen Vorgaben, Klimawandel, Systemtemperaturen, Nutzerverhalten, etc.

Sowohl bei der Prozesswärme als auch bei der Bewertung von Energieverlusten (Verteilnetzen und Speichern) sind zukünftige Änderungen bei der Erstellung von Bedarfsprognosen zu berücksichtigen. Bei der Prozesswärme betrifft dies z. B. den Brauchwarmwasserbedarf von Neubauten. Auswirkungen auf die Energieverluste im Verteilnetz können sich z. B. durch einen Ausbau des Fernwärmenetzes oder eine Änderung der Fernwärmenetz-Temperaturen ergeben (siehe auch Kapitel 3.2.2).

Auf Basis eines oder mehrerer Entwicklungsszenarien werden analog zu den in der Bestandsanalyse beschriebenen Methoden Wärmebedarfszeitreihen erstellt.

Kälte:

Für die Erstellung von Bedarfsprognosen werden analog zur Wärmebedarfsprognose zunächst die verfügbaren Informationen zu geplanten Neubauten zusammengetragen sowie das Sanierungspotential für den Gebäudebestand bewertet und daraus ein oder mehrere Szenarien für den zukünftigen Ausbau sowie Sanierungen entwickelt.

Eine genaue Prognose des zukünftigen Kältebedarfs ist bei einem hochkomplexen Mischgebiet, wie einem universitären Forschungscampus, anspruchsvoll, insbesondere, wenn zahlreiche Neubauten geplant sind, deren Nutzungen noch nicht näher festgelegt sind. Eine detaillierte Abbildung des Kältebedarfs erfolgt in Form von Simulationen. Dadurch kann sowohl die Reduktion des Kühlenergiebedarfs aufgrund von Sanierung im Gebäudebestand als auch der zukünftige Bedarf von Neubauten berechnet werden. Dabei sind sowohl der aktive als auch passive Bedarf zur Gebäudekühlung zu ermitteln. Sofern für Neubauten noch keine konkrete Planung vorliegt, können Methoden zur Abschätzung des zukünftigen Kältebedarfs analog zur Bestandsanalyse herangezogen werden.

Für die Ermittlung des Bedarfs an Prozesskälte muss die Gebäudenutzung im Detail bekannt sein. Daher ist eine Prognose zum zukünftigen Prozesskältebedarf unter Umständen sehr schwierig. Hier kann einerseits eine durchschnittliche Nutzung über mehrere Gebäude hinweg sowie die Berücksichtigung einer Flexibilität des Gesamtsystems als methodischer Ansatz verwendet werden.

Auch beim Kältebedarf sind mögliche zukünftige Änderungen der Randbedingungen zu bewerten, wobei sich die wesentlichen Faktoren nicht von denen des Wärmebedarfs unterscheiden. Weiterhin sind analog Entwicklungen bei Energieverlusten (Verteilnetzen und Speichern) zu berücksichtigen.

Eine Generierung von zeitlich aufgelösten Lastgängen kann wiederum anhand von Gebäudesimulationen oder vereinfachten Methoden (siehe Bestandsanalyse) auf Basis der aufgestellten Entwicklungsszenarien erfolgen.

Strom:

Bei der Prognose der Entwicklung des Strombedarfs eines Quartiers in Form von Jahressummen und zeitlich aufgelösten Jahreslastgängen sind mehrere Faktoren einzubeziehen. Zukünftige Entwicklungen betreffen z. B. die Nutzungsstruktur vorhandener Gebäude, Mitarbeiter- oder Bewohnerentwicklungen sowie Neubauprojekte oder geplante Rückbauten. Weiterhin sollten Trends aus der Vergangenheit, wie technologische Entwicklungen, Effizienzsteigerungen und Verbrauchsverhalten bei der Erstellung von Prognosen berücksichtigt werden.

Falls Lastgänge hinreichend vorhanden sind, kann eine Top-Down-Analyse, z. B. in Form der Ermittlung spezifischer Verbräuche pro Mitarbeiter oder pro Quadratmeter Nutzfläche erfolgen. Die zukünftige Entwicklung wird dann basierend auf den spezifischen Kennwerten und der erwarteten Mitarbeiter, bzw. Gebäudebauentwicklung extrapoliert. Für neue Gebäude kann dabei z. B. ein vergleichbares Bestandsgebäude ausgewählt werden. Falls diese Vorgehensweise nicht möglich oder plausibel ist, können Standardlastprofile für den Gebäudetyp bzw. die Nutzungsart angewendet werden.

Das Fortschreiben von Trends aus der Vergangenheit, wie z. B. die zunehmende Effizienzsteigerung durch den Einsatz von LED-Leuchtmitteln und neuer EDV kann die Prognose unterstützen. Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, die Trends nicht ohne Analyse fortzuschreiben, da sonst unrealistische Ergebnisse resultieren können. Beispielsweise kann eine weitere Einsparung bei der Beleuchtung nicht realisiert werden, wenn diese bereits durchgängig anwesenheitsgesteuert, tageszeitenabhängig und auf LED-Leuchtmitteln basierend ist, auch wenn in der Vergangenheit durch die sukzessive Umstellung auf dieses System kontinuierlich Einsparungen erzielt werden konnten.

Wenn eine detaillierte Prognose mangels Eingangsdaten nicht möglich ist, kann eine stark vereinfachende Methode eingesetzt werden, bei welcher der bisherige Verbrauchslastgang mit einem Faktor multipliziert wird, welcher der Erwartung der zukünftigen Entwicklung des Gesamtverbrauches entspricht.

3.2 Energieverteilung

Um zukünftige Potentiale für die Versorgungsinfrastruktur zu untersuchen, wird zunächst der Ist-Zustand der Energieverteilung detailliert analysiert. Hierzu werden anhand von Planungsunterlagen und Messdaten Informationen zu Abnehmern, Netzinfrastruktur und Betriebsparametern gesammelt und bewertet. Dabei können relevante Randbedingungen oder Limitierungen (z. B. in der Netzdimensionierung) identifiziert und für die Konzeption zukünftiger Versorgungsvarianten berücksichtigt werden.

Zur Generierung zukünftiger Ausbauvarianten sind die geplanten Entwicklungen auf Gebäudeseite (Abriß, Umbau oder Neubau) und die sich daraus ergebenden Energie- und Leistungsbedarfe zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.1.2).

Für die Zusammenführung des Gesamtsystems sind die vorhandenen Schnittstellen zu anderen Bereichen zu bestimmen und die für das Gesamtmodell relevanten Ergebnisse (z. B. Netzverluste und Systemtemperaturen) zu ermitteln.

3.2.1 Analyse der bestehenden Netzinfrastruktur

Thermische Versorgungsnetze

Thermische Versorgungsnetze umfassen sowohl Wärme- als auch Kältenetze. Nachdem das grundsätzliche Vorgehen in beiden Fällen nahezu identisch ist, wird in der weiteren Beschreibung nicht zwischen Wärme- und Kältenetzen unterschieden.

Zur Bestandsanalyse der thermischen Versorgungsinfrastruktur können Planungsunterlagen und Messdaten herangezogen werden. Wichtige Fragestellungen lauten hierbei z. B.:

- Systematische und vollständige Erfassung der Abnehmerstruktur: Geographische Verteilung, Anschlussleistungen, Abnahmeprofil und Eigenerzeugung, benötigte Temperaturen, etc. (siehe auch Kapitel 3.1)
- Bei Bestandsnetzen: Struktur der Wärme- und Kältequellen, Systemtemperaturen, technische Auslegungsparameter, Trassenverlauf, Alter der Rohre, Rohrdimensionierung und Dämmstandards, direkte und indirekte Versorgungen, Technik der Hausübergaben, Systemtrennungen
- Bei Konzeption neuer Netzabschnitte: Leistungs- und Energiebedarfe, Systemtemperaturen

Die aufbereiteten Daten können z. B. in einer GIS-Datenbank zusammengetragen werden, welche die Möglichkeit bietet, auch die räumliche Verteilung von Gebieten abzubilden.

Sofern bereits eine netzgebundene Versorgung vorliegt, bietet eine Rohrnetzsimulation die Möglichkeit, den Ist-Zustand hydraulisch und energetisch zu untersuchen und die Dimensionierung des Netzes zu bewerten. Maßgebliche Aspekte sind hierbei unter verschiedenen Betriebszuständen Auslastung, Fließgeschwindigkeiten, Druckverluste, Energie- und Temperaturverluste.

Die Energieverluste des Versorgungsnetzes können, abgesehen von einer rechnerischen Ermittlung mittels Rohrnetzsimulation, in manchen Fällen durch zentrale und dezentrale Erfassung der Wärmemengen direkt gemessen werden, falls alle Abnehmer eine geeignete Messstelle besitzen.

Die Energieverluste thermischer Versorgungsnetze sind für die Gesamtanalyse innerhalb der Bedarfs-ermittlungen zu berücksichtigen.

Stromnetze

Analog zu den thermischen Netzen ist auch das vorhandene Stromnetz zu analysieren. Dabei sind einerseits technische Aspekte wie Flexibilität, Möglichkeiten zur Durchleitung, Netzstabilität und Dimensionierung zu betrachten (z. B. für die Integration dezentraler PV-Anlagen). Die bisherige Qualität des Netzbetriebes (z. B. Spannung, Phasenverschiebung) ist durch zeitlich hochaufgelöste Messungen zu untersuchen, sowie die Einflussfaktoren bei der Integration zusätzlicher Stromquellen und Stromsenken zu identifizieren.

Weiterhin sind ökonomische und regulatorischen Randbedingungen, insbesondere für Durchleitung und Eigenstromversorgung, zu ermitteln.

3.2.2 Konzeption von Versorgungsvarianten

Im nächsten Schritt können passende Versorgungsszenarien aufgestellt werden. Auf Basis der Energiebedarfsprognosen der Gebäude bis zum Endausbau und der vorhandenen Infrastruktur werden verschiedene Infrastrukturszenarien zu zentralen und dezentralen Lösungen für die unterschiedlichen Sektoren entwickelt.

Thermische Versorgungsnetze

Ausgehend vom Ist-Zustand liegt entweder eine dezentrale Versorgung oder ein bestehendes Netz vor. Ausgangspunkte für mögliche Szenarien können z. B. ein möglichst geringer Eingriff in die bestehende Infrastruktur, die Entwicklung einer optimalen, zentralen Lösung oder auch das sukzessive Anpassen der bestehenden Infrastruktur sein.

Bei einer dezentralen Versorgung sind in erster Linie geeignete Techniken zur Energiebereitstellung (siehe Kapitel 3.3) zu ermitteln, welche im Rahmen der Gesamtoptimierung bewertet werden können. Für die Untersuchung einer zentralen oder semizentralen Versorgung werden zunächst mögliche Varianten für den Trassenverlauf, bzw. bei Bestandsnetzen für Umlegung oder Erweiterung, entwickelt. Dabei werden auf Basis der Energiebedarfsprognosen bauliche Änderungen/Erweiterungen in Form von Bauabschnitten ermittelt. Bei der Gestaltung der Netze können entscheidende Faktoren in der Versorgungssicherheit, möglichst kurzen Leitungswegen, bereits vorhandener Infrastruktur und geographi-

scher Verteilung der Abnehmer liegen. Die Dimensionierung des Netzes kann z. B. mittels Rohrnetzsimulation erfolgen. Dabei können verschiedene exergetische Konzepte bezüglich der Vor- und Rücklaufemperaturen verfolgt werden. Ausgehend von den aufgestellten Szenarien kann eine Variation von Parametern untersucht werden, wie z. B. eine Absenkung der Netzvorlaufemperaturen oder eine Verbesserung der Rohrdämmung.

Die für die Gesamtoptimierung relevanten Ergebnisse des jeweiligen Versorgungsszenarios (z. B. Netzverluste) sind zu identifizieren und in der Bedarfsermittlung zu berücksichtigen. Die ausgearbeiteten Versorgungsstrategien sollten iterativ innerhalb der Gesamtoptimierung auf technische Umsetzbarkeit überprüft werden. Beispielsweise kann der Einsatz einer innovativen Technik mit niedrigerer Vorlaufemperatur zu einer geringeren Temperaturspreizung im Netz und damit höherem Volumenstrom führen oder Maßnahmen zur Absenkung der Rücklaufemperatur erforderlich machen.

Stromnetze

Auf Basis der Bestandsanalyse zum Stromnetz sowie der erstellten Bedarfsprognose werden Ausbauvarianten des Stromnetzes sowie die potentielle Integration von Stromerzeugern untersucht.

3.3 Energiebereitstellung

Für die Entwicklung zukünftiger Versorgungskonzepte wird, basierend auf den Analysen zu Energiebedarf, Energieverteilung und Energieträgereinsatz, ein hinreichendes Technologieportfolio von zur Verfügung stehenden Energieversorgungsanlagen erstellt.

Hierzu sind zunächst die vorhandenen Energiepotentiale (z. B. Abwärme- und Niedertemperaturquellen) zu analysieren, die für die Bereitstellung von Wärme, Kälte und Strom genutzt werden könnten.

Weiterhin wird anhand von Begehungen, Planungsunterlagen und Messdaten eine Bestandserfassung der Energiebereitstellung im Ist-Zustand vorgenommen.

Für die Untersuchung zukünftiger Erzeugungsanlagen sowie Speichern werden technische und ökonomische Anlagenparameter bestehender und zukünftig denkbarer Technologien zusammengetragen und der spartenübergreifenden Optimierung als mögliche Optionen zur Energiebereitstellung zur Verfügung gestellt.

3.3.1 Bestandsanalyse

Um den Bestand an Erzeugungsanlagen in der Optimierung zu berücksichtigen, ist es notwendig, diesen nach verschiedenen Kriterien, wie z. B. Funktionalität, Leistung und Standort, zu analysieren.

Im Falle von Dokumentationslücken zum Anlagenbestand kann es notwendig sein, Begehungen durchzuführen und Anlagendaten – z. B. anhand Typenschilder – zu ermitteln.

Die zur Datenerfassung im Anlagenbestand wichtigsten Parameter sind im Folgenden aufgeführt:

- Standort/Aufstellort

- Baujahr/Jahr der Inbetriebnahme
- Installierte Leistung und Lastband der Anlage
- Teillastfähigkeit und mögliche Lastgradienten der Anlage
- Kennlinien bzw. Wirkungsgrade in Nenn- und Teillast oder Jahresnutzungsgrade der Anlage
- Speicherkapazität, Be- und Entladeleistung
- Wirkungsgrade (Beladen und Entladen) und Speicherverluste
- Ausrichtung und Neigung von PV-Anlagen und Solarthermieanlagen
- Ein-/Aus- und Umschaltkriterien der Regelung (z. B. Heiz- und Kühlgrenzen)
- Regelkriterien (z. B. stromgeführt oder wärmegeführt)
- Betriebs- und Wartungskosten, Wartungsintervalle

Falls einzelne Kennwerte für installierte Anlage nicht ermittelbar sind, können diese näherungsweise mit Kennwerten vergleichbarer Anlagen abgeschätzt werden.

Abgesehen vom Anlagenbestand sind Potentialermittlungen für die zukünftige Energiebereitstellung erforderlich.

- Klima- und Wetterdaten
- Potentielle Abwärmequellen (Lastgang, Energie, Temperaturen)
- Verfügbarkeit von Energieträgern
- Mögliche Wärmesenken zur Rückkühlung
- Abdeckung des Kühlbedarfs (z. B. Aufteilung freie Kühlung, adiabatische Kühlung, Kältemaschinen)
- Ermittlung unverschatteter, tragfähiger Dachflächen, Fassadenflächen und Freiflächen für PV-Anlagen und Solarthermieanlagen
- Mögliche Aufstellorte für die Installation von Anlagen und Speichern

3.3.2 Portfolio verfügbarer Technologien

Zusätzlich zur Erfassung des Anlagenbestands soll die Systemoptimierung möglichst viele Technologien für eine potentielle Nutzung im Quartier berücksichtigen. Die verfügbaren Technologien müssen in die Modellierung integriert werden und projektspezifisch parametrisiert werden.

Beispiele für Technologien sind fossile Heizkessel, BHKWs, Gasturbinen, Biomasse-KWK-Anlagen, Brennstoffzellen-KWK-Anlagen, PV-Anlagen, Solarthermie-Anlagen, Biomassekessel, Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen, Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen, Wärmetransformatoren, thermische Speicher, Batteriespeicher etc.

Die genannten Anlagen sind abhängig von den in der Bestandsanalyse ermittelten lokalen Verhältnissen, wie z. B. Klimastandort, Verfügbarkeit von Brennstoffen und Abwärmequellen oder Anforderungen an Immissionen.

Zu den Technologien sind die Investkosten, Betriebskosten (exklusive Energieträger) und Wartungskosten zu ermitteln. Die Kosten der Energieträger selbst werden im Gesamtmodell gesondert berücksichtigt. Bei einer Pauschalisierung über spezifische Kostenansätze ist zu berücksichtigen, dass bei

einzelnen Technologien erhebliche Kostenunterschiede zwischen unterschiedlichen Baugrößen herrschen. In der linearen Optimierung können durch die Implementierung von Ober- und Untergrenzen für bestimmte Technologien auch Kostenstufen im Ausbau dargestellt werden, dann ist aber ein iteratives Vorgehen notwendig, um den virtuellen Zubau von Bruchteilen großer Anlagen auszuschließen.

3.4 Randbedingungen zum Energieträgereinsatz

3.4.1 Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien

Die Nutzung von Wind- und Sonnenenergie ist im Gegensatz zu energieträgerbasierten Energiewandlungsanlagen auf die Verfügbarkeit von Solarstrahlung und die Windverhältnisse angewiesen. Die Basis für die Berücksichtigung dieser Technologien sind deshalb Wetter- und Klimadatensätze. Diese Datensätze müssen mit den Zeitreihen der Bedarfsermittlung konsistent sein, damit z. B. Nutzungslastprofile, Gebäudeverhalten und Solaranlagen zeitlich zueinander korrekt abgebildet werden. So müssen für Photovoltaik- und Solarthermieanlagen sowohl die direkten als auch die diffusen Anteile der Strahlung in Abhängigkeit der Modulneigung berücksichtigt werden.

Üblicherweise werden als Klimadatensätze allgemein anerkannte Testreferenzjahre verwendet. Eine andere Option besteht in der Nutzung von Wetterdaten, die teilweise frei verfügbar sind. Dies kann insbesondere für die Berücksichtigung des Klimawandels sinnvoll sein, auch um zukünftige Entwicklungen abzubilden.

Im Fall der Berücksichtigung von Potentialen zum Photovoltaikausbau im Quartier können Parameter wie Flächenbedarf pro Peakleistung in Abhängigkeit von der Neigung und dem resultierenden Flächenbedarf pro erzeugter Energiemenge bestimmt werden. Zukünftige Entwicklungen oder z. B. alternative Modultypen mit beispielsweise höherem Wirkungsgrad können dann anhand von Leistungszeitreihen bei verändertem Flächenbedarf implementiert werden.

3.4.2 Energieträgerbezug

Bei der Analyse der Verfügbarkeit von Energieträgern werden die vorhandenen netzgebundenen Anschlüsse des Quartiers, wie Strom, Fernwärme und Erdgas erfasst. Dabei sind Aspekte wie vorhandene Anschlussleistungen, Kosten für Erweiterungen der Anschlussleistungen sowie die ökonomischen, vertraglichen und regulatorischen Randbedingungen zu ermitteln.

Hinzu kommen die nicht netzgebundenen Energieträger, wie z. B. fossile Brennstoffe und Biomasse.

Für die einzelnen Energieträger muss eine detaillierte Kostenstruktur ermittelt werden (Arbeitspreis, ggf. Grundpreis/Leistungspreis, jeweils inklusive aller Umlagen und Steuern bzw. Steuerrückerstattungen, CO₂-Zertifikate). Bei den Prognosen ist zu beachten, dass sich viele der Preisbestandteile jährlich ändern.

Um die Ökologie des Energiebezugs zu bewerten, werden Faktoren zu CO₂-Äquivalent-Emissionen und Primärenergiebedarf eingesetzt. Dabei sind auch die Vorketten bzw. der kumulierte Energieaufwand zu berücksichtigen. Dies kann entweder über Jahresdurchschnittswerte oder über zeitschrittsspezifische Werte erfolgen. Eine zeitaufgelöste Bewertung der Ökologie liefert aufgrund saisonaler Effekte oder der fluktuierenden Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien wesentlich genauere Ergebnisse.

Für die Gesamtsimulation und Sensitivitätsanalysen müssen die zukünftigen Kostenentwicklungen der Energieträger abgeschätzt werden.

In der Gesamtsimulation ist auch die Berücksichtigung z. B. von Ökostrom oder Biomethan möglich. Dabei gilt abzuwägen, ob tatsächlich ein ökologischer Vorteil entsteht.

4 Modellbildung und Optimierung des Gesamtsystems

4.1 Modellierung des Energiesystems

Eine Grundbedingung des Energiesystemmodells ist, dass die vorgegebenen Lastgänge für Strom, Wärme und Kälte zu jedem Zeitschritt mithilfe der bereitgestellten Prozesse und Speicher gedeckt werden müssen. Prozesse wandeln die Energieträger in Strom, Wärme und Kälte um.

Hierbei fallen Kosten für den Bezug von Energieträgern, den Bau von Neuanlagen, Wartung und Betrieb der Anlagen sowie ggf. CO₂-Abgaben an.

Optimierungsziel:

Zu Beginn der Optimierung müssen die Optimierungsziele definiert werden. Tabelle 1 zeigt, wie auch bei einem linearen Verfahren mehrere Ziele berücksichtigt werden können.

Das Optimierungsziel sollte im Vorfeld mit den Stakeholdern eines Quartiers besprochen werden und sich daran orientieren, was für die Nutzer und Betreiber besonders wichtig ist.

Tabelle 1: Fallbeispiele zur Umsetzung von Optimierungszielen

Ökonomisch	Ökologisch	Kopplung der Ziele
Kostengünstigste Variante	Emissionsminimum	a) Kostengünstigste Variante unter Einhaltung von Emissionsgrenzen (z. B. Reduktionsvorgaben) b) Emissionsminimum unter Einhaltung von Kostengrenzen (z. B. aktuelle Systemkosten oder maximale Mehrkosten)

Eine maximale Treibhausgasreduktion im Quartier ist unter Umständen nicht die sinnvollste Lösung, sofern dafür z. B. Ökostrom zugekauft werden muss, dessen Herkunft nicht näher bekannt ist oder auch begrenzte Biomasseressourcen eingesetzt werden.

Optimierungsansatz und zeitliche Auflösung

Die benötigte zeitliche Auflösung und die Optimierungsmethode sind abhängig von der Zielsetzung der Optimierung, insbesondere bzgl. der gewünschten Genauigkeit und der zur Verfügung stehenden Rechenleistung (siehe auch Tabelle 2).

Tabelle 2: Optimierungsansatz und zeitliche Auflösung

	Regelleistung	Ausbau- und Einsatzplanung	
Zukunftshorizont	Nahe Zukunft	Nahe Zukunft	Mehrere Jahrzehnte
Auflösung, zeitlich	Minute	Stunde	Stunde
Optimierer	MILP	LP / MILP	LP
Rechenaufwand	groß	klein	groß

Räumliche Abbildung des Quartiers

Im Rahmen des Preprocessing wird die räumliche Abbildung des Quartiers so aufbereitet, dass in der Gesamtsimulation ein 1-Knoten-Modell verwendet werden kann. In bestimmten Fällen kann es jedoch notwendig werden, eine Aufteilung in mehrere Energieversorgungsknoten mit eigenen zu deckenden Energiebedarfszeitreihen und Prozessen vorzunehmen.

Sofern bei der Wärmeversorgung Teilnetze mit unterschiedliche Systemtemperaturen vorliegen, muss für jedes Teilnetz ein eigener Wärmeknoten definiert werden. Auch für die Kälteversorgung können einzelne Knoten berücksichtigt werden. Je nach Bedarf können Energieversorgungsknoten, Wärme- und Kälteknoten miteinander gekoppelt werden. Beispielsweise kann eine Wärmeübertragung von einem wärmeren in ein kälteres Netz implementiert werden (Auskühlung des Fernwärmerücklaufs).

Gebäude bzw. Gebäudekomplexe, die mit Absorptionskältemaschinen oder -wärmepumpen versorgt werden bzw. könnten, sind ggf. mit einem eigenen Knoten zu berücksichtigen. Dies ist notwendig, wenn aufgrund der Antriebswärme eine direkte Kopplung zu einer zentralen Wärmeversorgung vorliegt.

Für dezentral installierte Kältemaschinen können ebenfalls separate Kälteknoten erzeugt werden, um Maschinengrößen, Kältequellen, Rückkühlung und Antrieb entsprechend zu berücksichtigen.

4.2 Energiesystemoptimierung

Die im Rahmen des Preprocessing ermittelten Eingangsgrößen, Bedarfsszenarien und technischen Varianten werden dem Gesamtmodell zur Verfügung gestellt. Dies erfolgt in Form von Parametrierung, Einlesen von Zeitreihen und Modellanpassungen.

Für die Systemoptimierung werden zunächst verschiedene Szenarien festgelegt. Eine zielführende Vorgehensweise umfasst dabei die Aufstellung folgender Szenarien:

- Basisszenario: keine nennenswerten Veränderungen der Technologien

- Referenzszenario: Stand der Technik, marktverfügbare Komponenten, hohe Wahrscheinlichkeit der Realisierung
- Ausbauszenarien: Verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen strategischen Ansätzen, innovative Technik, zukünftig verfügbare Komponenten, Extremfälle von Randbedingungen und Zielvorgaben

Bei einzelnen Szenarien können insbesondere für schlecht prognostizierbare Randbedingungen (z. B. Regulierungen oder Energiepreise) Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um z. B. die Unsicherheit der zukünftigen Entwicklungen und den Einfluss von Entscheidungen für oder gegen bestimmte Technologien zu untersuchen.

Aufgrund der hohen Komplexität ist es einerseits empfehlenswert, einzelne Parameter zu variieren, um deren Sensitivität zu untersuchen, andererseits können ganze Parametersätze variiert werden (Best-Case-Szenario, Worst-Case-Szenario).

4.3 Detailmodellierung

Für die Entwicklung von Szenarien können z. B. geographisch höher aufgelöste Variantenvergleiche notwendig sein, wofür gesonderte, detaillierte ortsaufgelöste Simulationen erforderlich sind. Weiterhin können Ergebnisse der Gesamtsimulation dazu führen, dass iterativ weitere Szenarien oder die Erhöhung des Detaillierungsgrades bestimmter Komponenten ausgearbeitet werden müssen. Hierfür sind entsprechende Detailmodellierungen erforderlich.

Unter Umständen kann die Erstellung weiterer Szenarien zur Modellierung bestimmter Versorgungsgebiete notwendig werden. Beispielsweise können weitere Einspeisepunkte innerhalb des Netzes, optionale Ringschlüsse, Inselnetze oder der optionale Anschluss weiterer Gebäude zusätzliche Varianten der Netzdimensionierung erforderlich machen. Hier ist individuell für das jeweilige Gesamtsystem zu prüfen, an welcher Stelle Verfeinerungen in der Modellierung benötigt werden.

Gleiches gilt für die Detaillierung einzelner Anlagen und Komponenten, welche in der Gesamtmodellierung zunächst vereinfacht abgebildet wurden und im Zuge der Untersuchung verfeinert abgebildet werden sollten (z. B. Integration einer genaueren Ermittlung von Anlagenkennlinien). Auch für die Betrachtung innovativer Pilottechnologien kann eine Detailmodellierung erforderlich werden.

5 Optimierungsergebnisse und Bewertung

5.1 Ergebnisgrößen der Energiesystemoptimierung

Die Ergebnisgrößen der Energiesystemoptimierung sind abhängig von den Optimierungszielen und von dem verwendeten Optimierungswerkzeug. Als Rechenergebnis werden z. B. folgende Größen ausgegeben:

- **Ökonomisch:** Gesamtkosten, Kostenstruktur inkl. Investitionskosten, Fixkosten, variable Kosten, CO₂-Kosten etc.
- **Ökologisch:** CO₂-Äquivalent-Emissionen, Primärenergiebedarf, etc.
- **Technisch:** Art und installierte Leistungen der Energieversorgungsanlagen (je Stützjahr), Art und installierte Leistungen und Kapazitäten von Speichern (je Stützjahr)
- **Energetisch:** Energieumsätze von Endenergie und Energieträgern, Lastgänge von Anlagen und Speichern

5.2 Bewertung der Optimierungsergebnisse

Die Untersuchung verschiedener potentieller Entwicklungen sowie die Durchführung von Sensitivitätsanalysen bedingen unter Umständen eine hohe Anzahl an betrachteten Szenarien und Variationen. Dies erfordert eine geeignete Auswertung, die eine Interpretation der Ergebnisse und die Identifizierung grundlegender Trends ermöglicht.

Bei einer ökonomischen Optimierung mit CO₂-Grenzwerten hat es sich als praktikabel erwiesen, Kosten und CO₂-Äquivalent-Emissionen in Form eines Punktediagramms darzustellen, bei dem als Bezugspunkt das Basisszenario oder das Referenzszenario abgebildet ist. Dadurch werden die Auswirkungen von zukünftigen Entwicklungen und Entscheidungen, Bedarfsvariationen oder Vorgaben zur Emissionsbegrenzung auf die Gesamtkosten und CO₂-Äquivalent-Emissionen sichtbar.

Weiterhin können anhand einer Darstellung der jährlich von jeder Erzeugungsanlage bereitgestellten Energiemenge Rückschlüsse zur Betriebsweise der Anlagen sowie zur Zusammensetzung der Energiebereitstellung im gesamten Quartier gezogen werden. Die Betrachtung kann bei Bedarf aufgeteilt nach Knoten erfolgen. Ebenso können die installierten Leistungen von Anlagen und Speichern über den gesamten Betrachtungszeitraum dargestellt werden.

Die Simulationsergebnisse können sowohl bezogen auf die zeitliche Entwicklung als auch den Endzustand im letzten Simulationsjahr betrachtet werden. Letzteres repräsentiert den langfristigen Optimierungserfolg.

6 Literaturverzeichnis

DIN V 4701-10:2003-08, August 2003: Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.

DIN V 18599-2:2018-09, September 2018: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.

DIN EN 12831-1:2017-09, September 2017: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017.

Füfungeld, Christian; Tiedemann, Remo: Anwendung der Repräsentativen VDEW-Lastprofile. step - by -step. Brandenburgische Technische Universität Cottbus.

Pflugradt, Noah: LoadProfileGenerator. Online verfügbar unter <https://www.loadprofilegenerator.de/impressum/>.

DIN V 4108-6:2003-06, Juni 2003: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.