



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



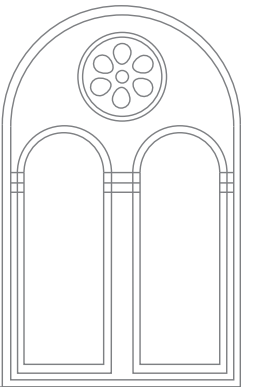
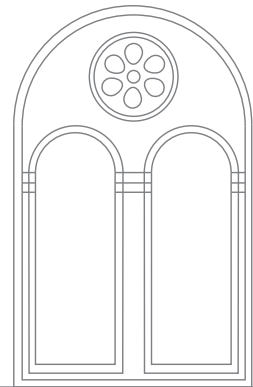
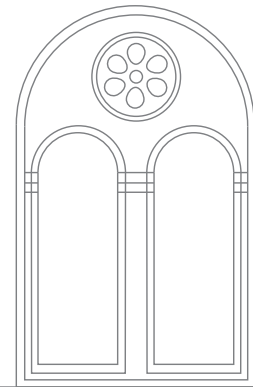
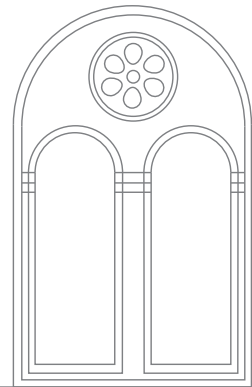
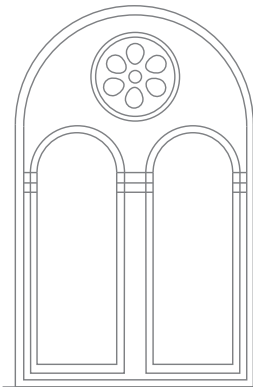
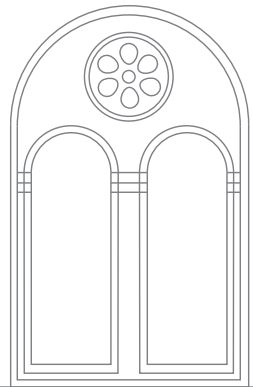
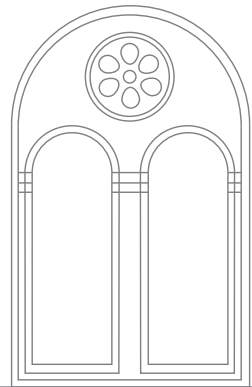
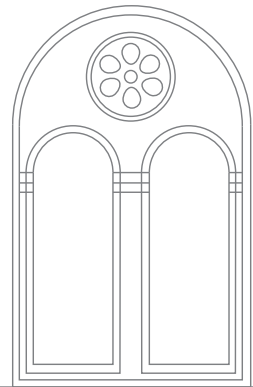
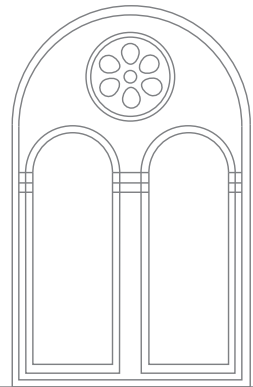
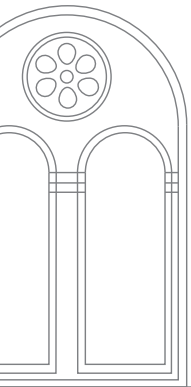
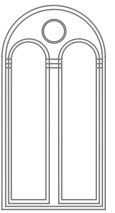
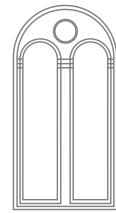
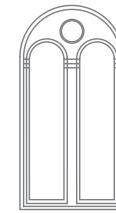
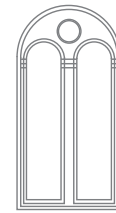
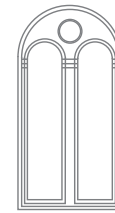
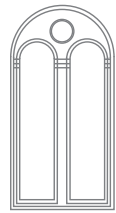
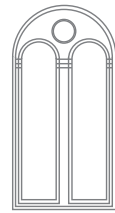
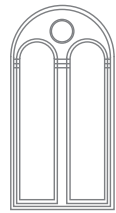
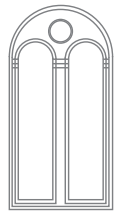
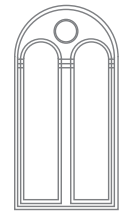
Forschung für  
Energieoptimiertes Bauen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Campus Information Modelling

Energieeffiziente Hochschule

HoEff-CIM



Schlussbericht

# HoEff-CIM

Energieeffiziente Hochschule

Campus Information Modelling

Erstellung eines Stufenplans zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen auf einem Hochschulcampus

im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung im Förderschwerpunkt EnBop

Abschlussbericht



© 2017 Verlag  
Technische Universität München  
Fakultät für Architektur  
Arcisstr. 21, 80333 München  
[www.ar.tum.de](http://www.ar.tum.de), [verlag@ar.tum.de](mailto:verlag@ar.tum.de)  
ISBN 978-3-941370-97-5

Hochschule für Angewandte Wissenschaften München,  
Ludwig-Maximilians-Universität München,  
Brochier Consulting + Innovation GmbH,  
Assmann Ingenieure Beraten + Planen AG

- Autoren: Sebastian Botzler, M.Sc.<sup>2</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Buchholz<sup>4</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Christina Dotzler, M.Eng.<sup>2</sup>  
(Gestaltung & Layout)  
Dipl.-Ing. (FH) Paul Eichel<sup>3</sup>  
Johannes Hofbauer, B.Eng.<sup>3</sup>  
Eshref Januzaj<sup>1</sup>  
Daniel Kierdorf, M.Sc.<sup>2</sup>  
Dr.-Ing. Philipp Pfeifroth<sup>5</sup>  
Dr.-Ing. René Regel<sup>1</sup> (Projektleitung)
- Forschungsstellen: **<sup>1</sup>Hochschule für Angewandte Wissenschaften München**  
Competence Center Energieeffiziente Gebäude  
Prof. Dr.-Ing. Werner Jensch  
Lothstraße 34  
80335 München
- <sup>2</sup>Technische Universität München**  
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges  
Planen und Bauen  
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang  
Arcisstraße 33  
80333 München
- <sup>3</sup>Ludwig-Maximilians-Universität München**  
Zentrale Universitätsverwaltung  
Geschwister-Scholl-Platz 1  
80539 München
- <sup>4</sup>Brochier Consulting + Innovation GmbH**  
Dipl.-Ing. (FH) Oliver Jainta, M.Eng.  
Marthastraße 16  
90482 Nürnberg
- <sup>5</sup>Assmann Ingenieure Beraten + Planen AG**  
Prof. Dr.-Ing. Werner Jensch  
Welfenstraße 22  
81541 München
- Studentische Hilfskräfte: Pierre Keller-Psatopoulos, M.Sc.<sup>2</sup>, Marlene Stoll,  
B.Sc.<sup>2</sup>, Sandra von Vegesack, M.Sc.<sup>2</sup>, Oliver Hell-  
muth, B.Sc.<sup>2</sup>
- Weitere Projektbeteiligte: Dipl.-Ing. Ruth David<sup>4</sup>, BOR Erwin Greschner<sup>3</sup>,  
BDin Ursula Häufle<sup>3</sup>, Alexandra Konz, M.Sc.<sup>5</sup>, RDin  
Jutta Peinkofer<sup>3</sup>
- Laufzeit: Mai 2013 bis Juni 2017

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie BMWi gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Kurzzusammenfassung und Projektziele

Wie kann der Gebäudebestand bis 2050 klimaneutral errichtet und betrieben werden? Diese Frage wird im Rahmen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele 2050 gestellt (BMUB, 2014). Das HoEff-CIM-Projekt setzt sich zum Ziel am Beispiel der LMU München aufzuzeigen, wie große, heterogene Liegenschaften dieses Problem lösen können.

Deshalb werden Methoden und Optimierungskonzepte im Bereich Bauphysik, Gebäudetechnik und Energiemanagement entwickelt, die Wege zu einem klimaneutralen Hochschulcampus aufzeigen sollen. Ziel ist es, die Energieversorgung so zu wählen, dass Treibhausgasemissionen langfristig reduziert werden und erneuerbare Energien gefördert werden. Eine weitere Herausforderung ist die effiziente Sanierung des Gebäudebestands zur Reduktion des Energieverbrauchs unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie, technische Qualität, Prozessqualität, Entscheidungsprozesse).

Es sollen Methoden entwickelt werden, um komplexe Liegenschaften einfach zu verwalten und Einsparungs- sowie Sanierungspotentiale mit geringem zeitlichem Aufwand abzuschätzen und bewerten zu können. Diese Erkenntnisse sind nicht nur für die Organisation von Universitäten und ihrer heterogenen Nutzungsverteilung wichtig, sondern können auch private Liegenschaftsverwaltungen unterstützen. Hierzu erfolgt ein Benchmarking des Gebäudebestands.

Effiziente Methoden des Energiemanagements und der Datenverwaltung werden entwickelt und, soweit im Rahmen der Projektlaufzeit möglich, an der LMU München erprobt. Mit Hilfe eines webbasierten Datenerfassungstools (QuickCheck-Tool) soll eine stufenartige Bestandsaufnahme erfolgen. Das QuickCheck-Tool (QCT) hat das Ziel, die Begehung eines komplexen Hochschulgebäudes zu strukturieren, den Bearbeitungsaufwand zu reduzieren und dem Nutzer die aufbereiteten Informationen darzustellen. Die Gebäudeinformationen sollen dabei auf möglichst wenige, aber aussagekräftige Parameter beschränkt werden. Zur Ermittlung dieser maßgebenden Parameter werden Unsicherheitsanalysen durchgeführt. Die vorhandenen Energiebedarfe sollen zudem unter Berücksichtigung von Gebäudetyp und -nutzung abgebildet werden. Abschließend sollen bauphysikalische und gebäudetechnische Sanierungsmöglichkeiten vorgeschlagen werden, indem ökologische, ökonomische und energetische Einsparpotentiale aufgezeigt werden.

HoEff-CIM baut direkt auf seinem Vorgängervorhaben HoEff auf. Dank HoEff existieren Erhebungsdaten von über 82 Gebäuden der LMU München und spezifische Energiekennwerte für 16 Energieklassen, in denen sich die mehr als 1600 Nutzungen der LMU wiederfinden. Die in HoEff erarbeiteten Energiebedarfsabschätzungen sollen in HoEff-CIM detaillierter aufbereitet werden. Dazu wird die Referenzraummethode entwickelt (RRM), die auf dem Rechenkern der Open Source Software EnergyPlus des U.S. Department of Energy basiert. Sie stellt eine Applikation dar, mit der die maßgebenden Parameter zur Energiebedarfsermittlung automatisiert aus dem QCT in EnergyPlus importiert werden. Die Hochrechnung des energetisch-thermischen Verhaltens erfolgt dabei über typisierte Räume in Abhängigkeit ihrer Nutzungsverteilung.

Abschließend sollen die Erkenntnisse des Projekts in einem Energiemasterplan am Beispiel der LMU München zusammengefasst werden. Es werden Handlungsempfehlungen entwickelt, um die Klimaschutzziele 2050 erreichen zu können.

Über die Informationsplattform [www.hoeff.info](http://www.hoeff.info) werden die Erkenntnisse und die entwickelten Werkzeuge anderen Hochschulen zugänglich gemacht.

## Abstract and Project Aims

How is it possible to build and operate a climate-neutral building stock till 2050? This question is asked in the context of national and international climate protection targets (BMUB, 2014). Based on the example of the Ludwigs-Maximilians-Universität München (LMU) the HoEff-CIM-project wants to show, how large and heterogeneous properties can solve this problem.

Therefore, methods and concepts for optimizations in the fields of building physics, building technologies and energy management are developed, which point ways to a climate-neutral university campus. By choosing a suitable energy supply, the greenhouse gas emissions should be reduced in the long-term and the use of renewable energy should increase. A further challenge is to choose efficient methods for the refurbishment of the building stock to reduce the energy consumption, taking into account the interactions within the field of sustainability (ecology, economy, technical quality, process quality and decision-making processes).

Methods have to be developed in order to easily organize complex properties and to estimate and assess saving potentials and potentials of refurbishment methods with a minimum effort. These methods can support the organization of universities and their heterogeneous usage profiles as well as private properties. For this purpose, the building has to be benchmarked.

Efficient methods of energy and data management are generated and evaluated at the LMU. A web-based data acquisition tool (QuickCheck tool) is designed to provide a step-by-step assessment. The purpose of the QuickCheck tool is to structure the inspection of a complex university building with its different usage profiles and structural behaviour. The processing effort should be reduced and operator should get prepared information. The building information should be restricted to as few as possible but significant parameters. Uncertainty analyzes are carried out to determine these relevant parameters. The present energy demands are shown regarding the building type and its usage profiles. Finally, refurbishments are proposed regarding the building physics and building services. Thereby, the energetic, economic and ecological saving potentials should be presented.

The HoEff-CIM project is based on its preceding project HoEff. Within the HoEff project data for more than 82 buildings of LMU and specific energy characteris-

tics for 16 energy classes was developed, with more than 1600 usage profiles integrated. The estimates of the energy demand, which were prepared in HoEff, are calculated in HoEff-CIM more detailed. For this purpose, the reference room method (RRM) is developed. It is based on the open source software EnergyPlus of the U.S. Department of Energy. With this application the significant parameters are imported from QCT to EnergyPlus automatically to calculate the energy demand. The extrapolation of the energetic and thermal behaviour is made by defining reference rooms with typical usage profiles and distributions.

Finally, the findings of the project are summarized in an energy masterplan using the example of the LMU. Recommendations for action are developed in order to achieve the climate protection targets 2050.

The findings and the developed tools are published and available for other universities at [www.hoeff.info](http://www.hoeff.info).



## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzzusammenfassung und Projektziele.....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract and Project Aims.....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Vorgängerprojekt „HoEff“ und ähnliche Vorhaben.....	1
1.2 Arbeitspakete des Forschungsprojekts.....	2
1.3 Organisation.....	2
<b>2 Darstellung der Liegenschaften und Verwaltung - Ist-Zustand LMU.....</b>	<b>3</b>
2.1 Ausgangssituation.....	3
2.2 Festlegung der Referenzgebäude.....	3
2.3 Verwaltungsapparat großer Liegenschaften.....	4
2.3.1 Organisation der LMU.....	4
2.3.2 Staatliches Bauamt München 2 StBAM2.....	5
2.3.3 Ablauf Bewirtschaftung und Bauunterhalt der Gebäude.....	5
2.3.4 Arbeitsschwerpunkte und hochschulpolitischer Einfluss.....	6
2.3.5 Herausforderungen großer Liegenschaften.....	6
2.4 Datenerfassung.....	6
2.4.1 CAFM-System FAMOS.....	6
2.4.2 Gebäudeleittechnik GLT.....	7
2.4.3 Netzlaufwerk.....	7
2.5 Energiemanagement an der LMU.....	7
2.5.1 Gesetzliche Grundlagen.....	7
2.5.2 Soll-Ist-Vergleich.....	8
2.6 Identifizierung der Schwachstellen.....	9
<b>3 Werkzeuge zur Datenaufnahme und Bewertung von Campus-Liegenschaften.....</b>	<b>11</b>
3.1 Zählerstruktur und Energiemonitoringsoftware EnMoLMU.....	11
3.1.1 Erstellung von Zählerstrukturen für die einzelnen Gebäude.....	11
3.1.2 Entwicklung einer Energiemonitoringsoftware - EnMoLMU.....	12

3.1.3	Weiteres Vorgehen .....	16
3.2	Referenzraummethode (RRM).....	17
3.2.1	Bewertungsprozess von Neubauten und Bestandsgebäuden .....	18
3.2.2	Statistische Verfahren .....	19
3.2.3	Methodik .....	19
3.2.4	Einfluss von Nutzungen .....	21
3.2.5	Ergebnisvergleich: Referenzraummethode gegenüber vollständigem Gebäudemodell .....	23
3.2.6	Referenzraummethode: Schlussfolgerungen und Limitierungen .....	25
3.3	Energiemanagementprozess und QuickCheck-Tool QCT .....	25
3.3.1	Energiemanagementprozess .....	25
3.3.2	QuickCheck-Tool.....	27
<b>4</b>	<b>Entwicklung und Ranking von Sanierungsmaßnahmen .....</b>	<b>33</b>
4.1	Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen .....	33
4.1.1	Erarbeitung der Sanierungsmaßnahmen – Grundlagen .....	33
4.1.2	Energetische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen .....	37
4.1.3	Ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen .....	38
4.1.4	Ökologische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen .....	39
4.1.5	Sanierungskatalog .....	41
4.1.6	Schadensdokumentation .....	41
4.1.7	Ausblick: Bayes'sches Netz .....	43
4.2	Gebäudetechnische Sanierungsmaßnahmen.....	45
4.3	Vergleich Sanierungsmaßnahmen Bauphysik und Gebäudetechnik .....	49
<b>5</b>	<b>Energiemasterplan .....</b>	<b>51</b>
5.1	Zieldefinitionen und Fragestellungen .....	51
5.2	Energiebedarfsreduktion und Sanierungspotentiale der Einzelgebäude .....	52
5.3	Technische Gebäudeausrüstung und Energiemanagement .....	54
5.4	Optimierungspotentiale im Quartier .....	55
5.5	Einsatz erneuerbarer Energien .....	55



5.5.1	Solare Energiegewinnung.....	55
5.5.2	Biogas .....	55
5.5.3	Windkraft.....	55
5.5.4	Oberflächennahe- und Tiefengeothermie .....	56
5.6	Visualisierung.....	56
5.6.1	Bewertung der Optimierungspotentiale im Quartier.....	56
5.7	Bewertung der Ziele 2050 und Schlussfolgerungen .....	56
<b>6</b>	<b>Ausbau bzw. Integration Energiemanagement an der LMU.....</b>	<b>59</b>
6.1	Ausbau der erforderlichen Infrastruktur.....	59
6.1.1	Mobile Messgeräte zur Zählerüberprüfung und Anlagenoptimierung .....	59
6.1.2	Mobile Geräte für den Einsatz des QuickCheck-Tool QCT .....	59
6.1.3	Server für die Energiemanagement-Werkzeuge.....	59
6.2	Energiedatenprojekt.....	59
6.3	Vorbereitung einer zentralen Stelle .....	60
6.3.1	Organisation des technischen Personals an der LMU.....	60
6.3.2	Umstrukturierung Referat IV.2.....	60
6.4	Integration Energiemonitoring in die Planungsphase bei Baumaßnahmen .....	62
6.5	Weitere Maßnahmen bzw. Bemühungen .....	63
6.5.1	Leitfaden Bau .....	63
6.5.2	Ökoprofit .....	63
6.6	Ausblick.....	63
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>65</b>
7.1	Fazit .....	65
7.2	Weiterer Forschungsbedarf.....	66
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>67</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>69</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>70</b>
	<b>Normen und Verordnungen.....</b>	<b>73</b>

Inhaltsverzeichnis

<b>Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojektes .....</b>	<b>73</b>
<b>Verwendete Software .....</b>	<b>74</b>
<b>Teilberichte zu den einzelnen Themen .....</b>	<b>74</b>





## 1 Einleitung

Das Projekt HoEff-CIM - „EnergieEffiziente Hochschule - Campus Information Modeling“ baut direkt auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts „HoEff – Die Hochschule auf dem Weg zu einem energieEffizienten Gebäudebetrieb“ auf. Dabei wurden anhand des repräsentativen Gebäudebestandes der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) Energie- und Kosteneinsparpotentiale ermittelt. In diesem Projekt wird ebenfalls an den Liegenschaften der LMU aufgezeigt, wie Hochschulen auf ihrem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebetrieb unterstützt werden können.

Die wesentlichen Elemente dieses Forschungsprojekts liegen in der Aufdeckung der energetischen Einsparpotentiale, der energetischen Bedarfsreduktion und der Steigerung der Energieeffizienz für einzelne Bestandsgebäude sowie den Gesamtcampus. Dabei liegt der Schwerpunkt, im Vergleich zum Vorgängerprojekt, in der Vereinfachung und zeitnahen Auswertung der digitalen Erfassung von komplexen Liegenschaften sowie der Entwicklung eines automatisierten Empfehlungswesens für Sanierungsmaßnahmen. Hierfür wird die Datengrundlage des bereits im ersten Projekt realisierten QuickCheck-Tools (QCT) analysiert betrachtet und um die Aspekte „Bauphysik“, „thermischer Komfort“ und den entsprechenden Maßnahmenkataloge ergänzt. Mit Hilfe der Referenzraummethode (RRM) wird ein Werkzeug geschaffen, das die vereinfachte energetische Bewertung des Gebäudebestandes von komplexen Liegenschaften erlaubt.

Das übergreifende Ergebnis des Forschungsprojekts ist ein holistischer Energiemasterplan, der sowohl die erfassten Daten als auch die Einzelmaßnahmen und deren Einsparpotentiale über einer Campus-Hochrechnung für den Gesamtcampus berücksichtigt. Langfristig soll der Masterplan als Handlungsempfehlung zu einer Reduktion des Energieverbrauchs der Liegenschaften der LMU München führen, um die nationalen Anforderungen des Klimaschutzes zu erfüllen.

### 1.1 Vorgängerprojekt „HoEff“ und ähnliche Vorhaben

Ausgangssituation für die aktuelle Forschungsfrage ist das Projekt „HoEff“ (HoEff – Die Hochschule auf dem Weg zu einem energieEffizienten Gebäudebetrieb“), das im Zeitraum vom 01.12.2008 bis 31.03.2012 in Kooperation der Hochschule München und Ebert

Ingenieure GmbH durchgeführt wurde. Hierbei wurden eine Datenbasis und eine Softwarearchitektur geschaffen, die in HoEff-CIM um vielseitige Aspekte erweitert und insgesamt optimiert wird.

Innerhalb des HoEff-Projekts wurde das energetische Einsparpotential von öffentlichen Gebäuden untersucht, die durch umfassende Sanierungsmaßnahmen eine Vorbildfunktion für zukünftige privatwirtschaftliche Bauvorhaben einnehmen sollen. Die Zielvorgabe des Projektes war es, die Betriebskosten großer Liegenschaften durch geringere Energieverbräuche deutlich zu reduzieren. Bevor die Potentiale aber ausgeschöpft werden konnten, mussten die Gebäudedaten und Bedarfe genau ermittelt und dokumentiert werden. Hierzu wurden die entsprechenden Daten des Gebäudebestands der LMU München herangezogen und in Tabellen erfasst.

Um die Datenerfassung von heterogenen Gebäudebeständen zu beschleunigen und auch in Zukunft praktikabel zu gestalten, wurde das so genannte QuickCheck-Tool (QCT) entwickelt. Die Entwicklung eines Prototyps des webbasierten Tools wurde eine der Hauptaufgaben dieses Forschungsprojekts. Die browserbasierte Software bietet die Möglichkeit komplexe Liegenschaften einfach zu erfassen und die ermittelten Daten in einer strukturierten Datenbank abzulegen. Somit konnte eine Datenerfassung gewährleistet werden, die einen reduzierten Einsatz von Fachkräften ermöglicht. Die über das QCT ermittelten Daten wurden dem Nutzer in Form eines Gebäudesteckbriefs am Ende der Datenerfassung dargestellt. Somit konnten die möglichen Einsparungen auf visueller Ebene dargestellt werden ohne auf ein klassisches Berichtswesen zu verzichten.

Diverse Forschungsvorhaben beschäftigen sich ebenfalls mit der Thematik der energieeffizienten Gebäudesanierung und der vereinfachten Datenerhebung. Die thematischen Schnittstellen zu gemeinsamen Forschungsfeldern sind teilweise groß, jedoch unterscheiden sie sich im Detail erheblich. Unter dem Projektrahmen „EnBop – Forschung für energetische Betriebsoptimierung“ des Projektträgers Jülich finden sich zahlreiche Themen, die Schnittstellen zu HoEff aufweisen (Steigerung der Energieeffizienz durch integrierte Planung, zentrale Wärmeversorgung und Gebäudedämmung, Berücksichtigung der beteiligten Akteure). Im Bereich des Energiemanagements an Hochschulen hat das Hochschul-Informationssystem eG (HIS) ein Handbuch im Jahr 2012 veröffentlicht, dass die Bedeutung von Hochschulen als

Energieverbraucher darstellt und die Potentiale der Energieeinsparung hervorhebt. Wissenschaftler des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt haben gemeinsam mit anderen Fachleuten aus Wissenschaft und Praxis eine Methodik zur energetischen Analyse von Nichtwohngebäuden entwickelt. Diese wurde in eine Software umgesetzt und in einem Feldtest erprobt. Das Programm und zugehörige Rechenverfahren TEK-Tool unterstützt Energieberater dabei, den Ist-Verbrauch von Gebäude-Portfolios abzuschätzen, Teilverbräuche zu bewerten, Schwachstellen zu erkennen und Einsparpotentiale zu berechnen. Für das Rechenverfahren wurde der Ansatz der DIN V 18599 vereinfacht. Ein komplexes Gebäude lässt sich so innerhalb von nur drei Arbeitstagen energetisch bewerten.

Diese Vorhaben sind dem HoEff-Vorhaben ähnlich, unterscheiden sich aber wesentlich in der Umsetzung und Datenerhebung. So wird im Rahmen des HoEff-Projektes die energetische Bewertung anhand eines Referenzraumes durchgeführt, der es erlaubt Aussagen über den Zustand sowie mögliche Sanierungskonzepte zu treffen. Der komplette Bewertungsablauf erfolgt stets unter Berücksichtigung der Aspekte der Nachhaltigkeit.

### 1.2 Arbeitspakete des Forschungsprojekts

Für das Verbundprojekt werden vier übergeordnete Arbeitspakete definiert. Nachfolgende Abbildung ver-

deutlicht die einzelnen Arbeitspakete und die Aufgabenverteilung. Die Detailvorstellung der einzelnen Arbeitspakete erfolgt in den Teilberichten der Projektpartner (vgl. Seite Seite 75). Dieser Kurzbericht fasst die wesentlichen Inhalte und Erkenntnisse des Projektes übersichtlich zusammen.

### 1.3 Organisation

Das Verbundprojekt wurde gemeinsam von der Technischen Universität München, der Ludwig-Maximilians-Universität München, der Hochschule München, Brochier Consulting + Innovation GmbH sowie Assmann Ingenieure Beraten + Planen AG bearbeitet.

In regelmäßigen Abständen wurden Projekttreffen durchgeführt, um aktuelle Bearbeitungsstände und weitere Vorgehensweisen abzustimmen. Dazu gehörten Workshops zur Identifikation der Handlungsfelder oder zur Definition der Datenmodelle des QCT sowie der RRM. Ferner wurden Leistungsbeschreibungen der entwickelten Tools und des Berichtswesens abgestimmt und die Prototypen getestet. Gebäudesteckbriefe mussten entwickelt und Sanierungsmaßnahmen und ihre Energieziele definiert werden.

Darüber hinaus wurden mehrere Ortsbegehungen der LMU Referenzgebäude zur Erfassung des Ist-Zustandes und weitere Einzelabstimmungen durchgeführt.

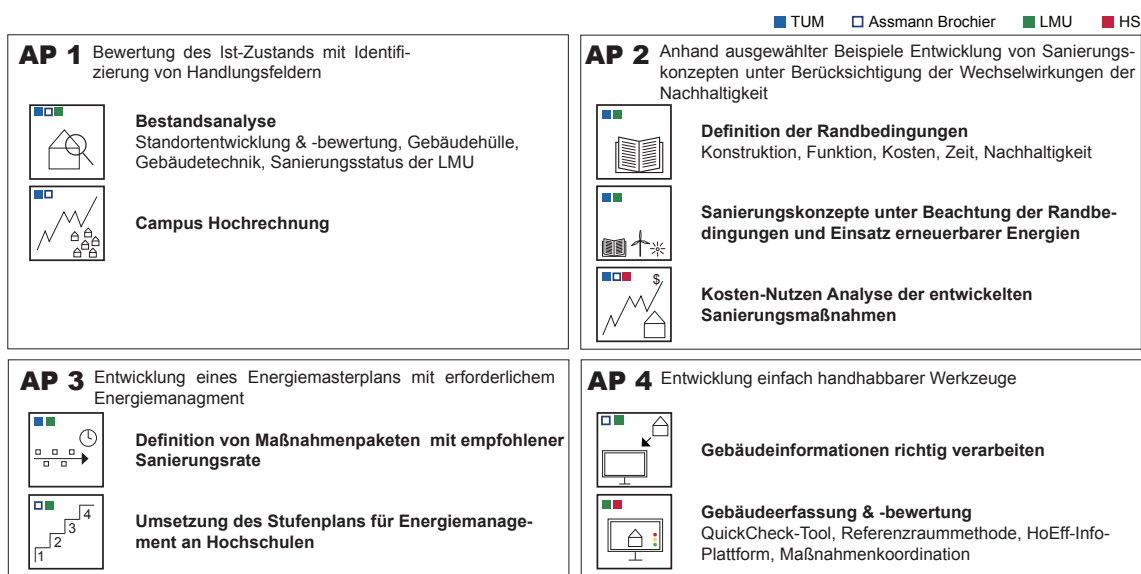


Abb. 1-1 Arbeitspakete und Aufgabenverteilung des HoEff-CIM-Projektes (eigene Darstellung)

## 2 Darstellung der Liegenschaften und Verwaltung - Ist-Zustand LMU

Die LMU ist eine der größten Universitäten Deutschlands, mit einem dementsprechend großen Flächenbedarf.

Derzeit verwaltet die LMU ca. 275 Gebäude bzw. Gebäudeteile mit einer Netto-Grundfläche von insgesamt ca. 773.547 m<sup>2</sup> (ohne Klinikum Großhadern). Die Bewirtschaftung dieses heterogenen Gebäudebestandes stellt die Liegenschaftsverwaltung der LMU und die anderen beteiligten Institutionen und Behörden immer wieder vor große Herausforderungen.

### 2.1 Ausgangssituation

Charakteristisch für den Gebäudebestand der LMU ist seine Vielfalt. Kein Gebäude gleicht einem anderen. Große Unterschiede gibt es insbesondere:

- beim Baualter (von 1840 bis 2016),
- bei den Nutzungen (z.B. Büros, Bibliotheken, Hörsäle, Labore, Tierhaltungen, usw.), die häufig auch noch in einem Gebäude vereint sind,
- bei der Komplexität der Technischen Gebäudeausstattung (von einfachen Bürogebäuden bis hin zu hochkomplexen Laborgebäuden),
- bei der Größe der Gebäude (von alleinstehenden Gebäuden bis hin zu großen Gebäudekomplexen oder campusartigen Strukturen),
- beim Zustand der Gebäudesubstanz (vom abrisssreifen Gebäude bis zum Neubau).

Des Weiteren sind die Gebäude über das gesamte Stadtgebiet Münchens und darüber hinaus verteilt (siehe Abb. 2-1). Die LMU ist somit keine klassische Campus-Universität.

Die Liegenschaften lassen sich in die vier großen Bereiche „Stammgelände“, „Areal Sendlinger Tor“, „Oberschleißheim“ und „Großhadern/Martinsried“ aufteilen. Mehrere Institute der Fakultät für Physik sind außerdem in Garching auf dem Gelände der Technischen Universität München (TUM) untergebracht. Die Gebäude werden von der TUM verwaltet und werden im Verlauf des Projekts nicht weiter berücksichtigt.

### 2.2 Festlegung der Referenzgebäude

Um für diesen großen Gebäudebestand eine repräsentative energetische Analyse im Rahmen der Ziele dieses Forschungsvorhabens durchführen zu können, wurden verschiedene Kriterien für einen Auswahlprozess ausgearbeitet, anhand derer der Gebäudebestand analysiert und bewertet werden kann. Die sechs so ausgewählten Gebäude, werden nachfolgend mit einem Vermerk zur Nutzung aufgelistet:

- **Marchioninistraße 27, München Großhadern:**  
Das Gebäude ist ein Teil des Pathologischen Instituts der LMU. Die Hauptnutzung ist die Medizinische Forschung. Das Gebäude wurde im Jahr 1974 als Blockbau errichtet und umfasst eine Bruttogrundfläche von 15.441 m<sup>2</sup> auf drei Vollgeschossen. Das Gebäude wird mit Fernwärme mit dem Wärmeträgermedium Heißwasser versorgt.
- **Martiusstraße 4, München:**  
Das Verwaltungsgebäude beherbergt die Abteilung Finanz- und Sachmittelverwaltung sowie Teile der Systemadministration der LMU. Das Gebäude wurde im Jahr 1908 als Blockbau errichtet und umfasst auf vier Vollgeschossen eine Bruttogrundfläche von 4.963 m<sup>2</sup>. Die Wärmeversorgung erfolgt über Fernwärme mit dem Wärmeträgermedium Hochdruckdampf.
- **Sonnenstraße 18, Oberschleißheim:**  
Das Gebäude in Oberschleißheim wurde 1992 als Institutsgebäude mit der Hauptnutzung für medizinische Forschung und Untersuchung errichtet. Es umfasst als L-Bau auf zwei Vollgeschossen eine Bruttogrundfläche von 3.435 m<sup>2</sup>. Die Wärmeversorgung erfolgt über einen Gasbrennwertkessel.
- **Ludwigstraße 28, München:**  
In diesem Institutsgebäude ist die Hauptnutzung Büro- und Verwaltung sowie eine Bibliothek der LMU. Das Gebäude wurde im Jahr 1938 als Blockbau errichtet und umfasst auf drei Vollgeschossen eine Bruttogrundfläche von 8.443 m<sup>2</sup>. Die Wärmeversorgung wird mit Fernwärme mit dem Wärmeträgermedium Hochdruckdampf abgedeckt.

- **Georgenstraße 7, München:**  
 Das Gebäude in der Georgenstraße 7 in München ist ein Verwaltungsbau der LMU und wurde im Jahr 1885 als Blockbau errichtet und 2007 komplett saniert. Es umfasst auf vier Vollgeschossen eine Bruttogrundfläche von 1.708 m<sup>2</sup>. Das Gebäude wird mit Fernwärme mit dem Wärmeträgermedium Hochdruckdampf versorgt.
- **Feodor-Lynen-Straße 7, München:**  
 Als Teil des Neuropathologischen Instituts der LMU mit der Hauptnutzung der Medizinischen Forschung, wurde das Gebäude im Jahr 2003 als Blockbau errichtet und umfasst auf vier Vollgeschossen eine Bruttogrundfläche von 8.501 m<sup>2</sup>. Die Wärmeversorgung erfolgt mit Fernwärme mit dem Wärmeträgermedium Heißwasser.

Arbeitsschwerpunkte und Herausforderungen bei der Bewirtschaftung eingegangen werden.

### 2.3.1 Organisation der LMU

Die LMU ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts und besitzt das Recht der Selbstverwaltung. Zugleich ist sie eine staatliche Einrichtung und, wie in Abb. 2-2 ersichtlich, in einen Zentralbereich sowie 18 Fakultäten gegliedert (LMU, o. J.).

Von den Mitarbeitern gehören allein über 2.400 zur Zentralen Universitätsverwaltung (ZUV) der LMU, die sich um Aufgaben wie Arbeitssicherheit, Kommunikation und Presse, Haushalt und Finanzen, Liegenschaften und Technik oder Forschungs- und Nachwuchsförderung kümmert (LMU, 2015).

Einen Teil der ZUV stellt wiederum das Dezernat IV „Liegenschaften und Technik“ dar, das die bauliche und technische Infrastruktur der LMU organisiert. Zu den Arbeitsaufgaben zählen unter anderem die Koordination von Sanierungen, Umbauten und Neubauten sowie die Flächen- und Raumplanung und der Abschluss von Energielieferverträgen.

## 2.3 Verwaltungsapparat großer Liegenschaften

Die Bewirtschaftung der hohen Anzahl an Gebäuden erfordert einen großen Verwaltungsapparat. Im Folgenden soll auf die Organisation der LMU, die unterschiedlichen beteiligten Parteien und Zuständigkeiten, den Ablauf des Bauunterhalts sowie die

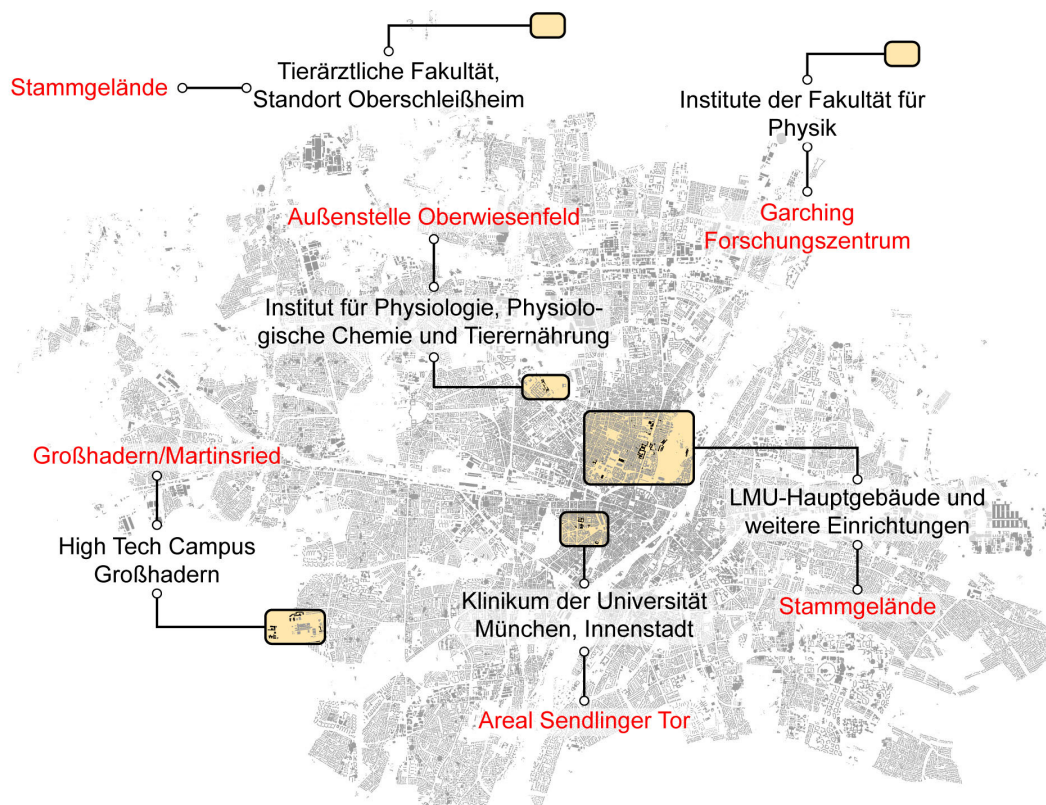


Abb. 2-1 Verteilung der LMU Standorte im Stadtgebiet (eigene Darstellung nach(LMU, o.J.))



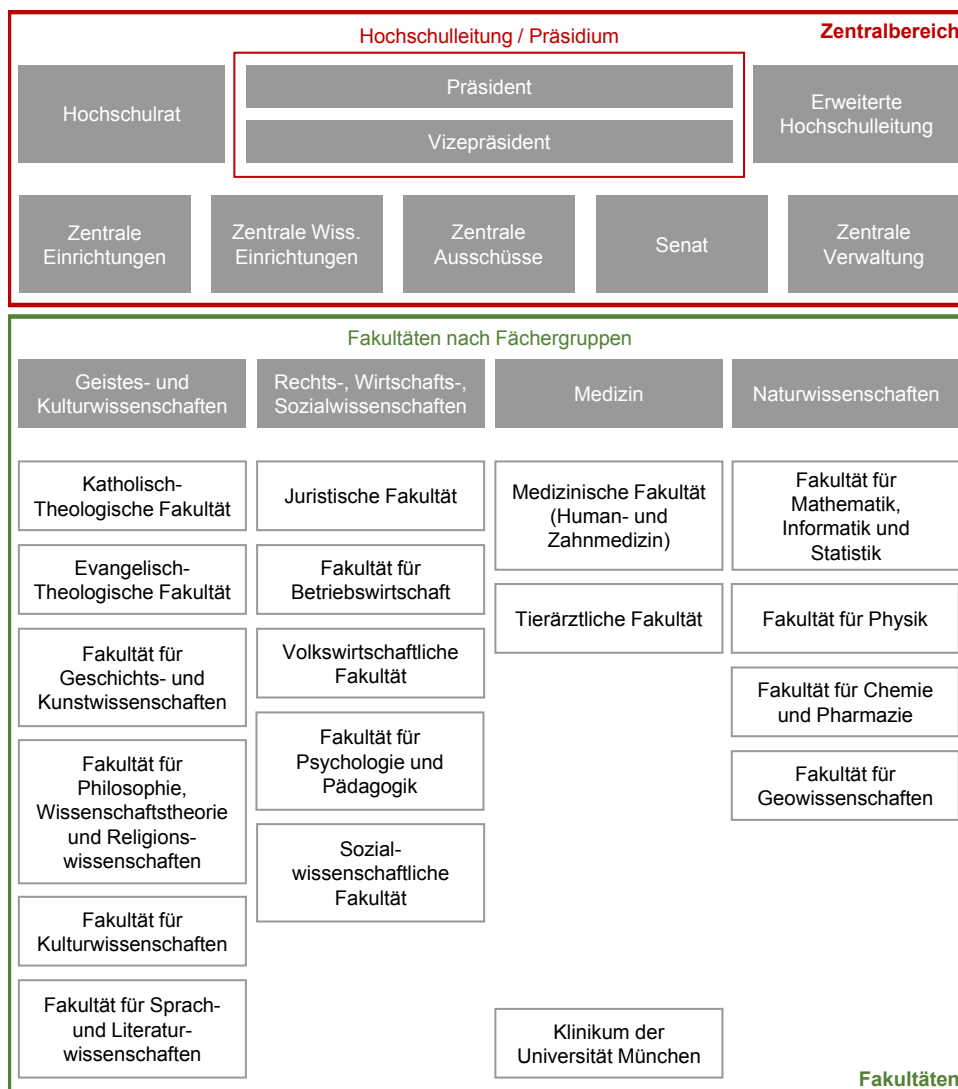


Abb. 2-2 Organigramm der LMU (eigene Darstellung nach (LMU, o.J.))

### 2.3.2 Staatliches Bauamt München 2 StBAM2

Das Staatliche Bauamt München 2 (StBAM2) organisiert die Baumaßnahmen aller staatlichen Hochschulen in München sowie aller hochschulnaher Einrichtungen. Das StBAM2 vertritt bei Baumaßnahmen den Freistaat Bayern als Bauherrn und übernimmt Planungs-, Bauleitungs- und Projektmanagementaufgaben. Außerdem kümmert es sich um den Bauunterhalt der bestehenden Gebäude (StBAM2, o. J.).

### 2.3.3 Ablauf Bewirtschaftung und Bauunterhalt der Gebäude

Der Großteil der von der LMU genutzten Gebäude befindet sich im Besitz des Freistaates Bayern bzw. sind körperschaftseigene Gebäude. Nach dem Bay-

erischen Hochschulgesetz ist die LMU als staatliche Einrichtung selbst für die Bewirtschaftung dieser Liegenschaften zuständig (Art. 12 Abs. 3 Nr. 3 BayH-SchG).

Um Baumaßnahmen und den Bauunterhalt der Gebäude kümmert sich dagegen das StBAM2. Die LMU ist in diesem Fall unterstützend tätig. Ausnahmen davon stellen „kleine“ Maßnahmen des Bauunterhalts dar, welche von der LMU selbst durchgeführt werden. Der genaue Ablauf ist in den Richtlinien für die Durchführung von Hochbauaufgaben des Freistaates Bayern (RLBau, 2011) ausführlich beschrieben.

Vielen Bauunterhaltsmaßnahmen geht ein langer Beantragungs- und Planungsprozess voraus. Besonders bei Baumaßnahmen gestaltet sich dieser aber noch ausführlicher, da insbesondere bei großen

Baumaßnahmen der Bayerische Landtag oder der Ausschuss für Staatshaushalt und Finanzfragen des Bayerischen Landtags die Mittel genehmigen muss (RLBau, 2011).

#### 2.3.4 Arbeitsschwerpunkte und hochschulpolitischer Einfluss

Kernaufgabe einer Universität ist die Lehre und Forschung und diese zu einer vorwiegend wissenschaftlichen Ausbildung zu verbinden (Art. 2, Abs. 1, Nr. 4, BayHSchG).

Die Zentrale Universitätsverwaltung bzw. die Liegenschaftsabteilung verstehen sich aus diesem Grund als Dienstleister, um adäquate Bedingungen für diese Aufgaben zu schaffen. Gemeinsam mit dem StBAM2 stellt das Dezernat IV der LMU die bauliche und technische Infrastruktur für einen funktionierenden Gebäudebetrieb zur Verfügung und betreibt diese möglichst effizient bzw. hält diese in Stand.

Die Liegenschaftsentwicklung ist oft von hochschulpolitischen Entscheidungen abhängig. Häufig finden z.B. Umbauten oder Sanierungen aufgrund von Neuberufungen oder geänderten Anforderungen an die Gebäude oder Technik statt. Andere Maßnahmen dagegen müssen wiederum verschoben werden, weil sie den Universitätsbetrieb zu stark beeinträchtigen. Zusätzlich spielt die Flächenplanung der LMU eine gewichtige Rolle. So werden z.B. zukünftig die tiermedizinischen Institute und Kliniken in Oberschleißheim gebündelt. Dies bedeutet neben zahlreichen Neubauten auch den Abriss einiger alter Gebäude. Dies stellt die Liegenschaftsverwaltung der LMU vor große Herausforderungen. So muss das StBAM2 bei den Neubaumaßnahmen unterstützt werden. Dies bedeutet vor allem die Vorgaben der späteren Gebäudenutzer und die eigenen Standards zu bündeln und die Planung diesbezüglich zu überwachen. Außerdem muss für die alten Gebäude ein wirtschaftliches Konzept für die Restnutzungsdauer erarbeitet werden.

#### 2.3.5 Herausforderungen großer Liegenschaften

Die gewachsenen Strukturen an der LMU und die große Anzahl sowie Vielfalt der Gebäude und Gebäudenutzer erschweren der Liegenschaftsverwaltung den Überblick. Hochschulpolitische Entscheidungen und unterschiedlichste Zuständigkeiten sowohl intern (Zentrale Universitätsverwaltung, Hochschulleitung,

usw.), als auch extern (StBAM2, Staatsministerium, usw.), erschweren dies zusätzlich. Auch die komplexen Abläufe von der Feststellung einer Maßnahme (Umbau, Sanierung, Bauunterhalt) bis zur Mittelfreigabe und letztendlich zur Umsetzung verhindern oftmals zeitnahes und flexibles Handeln. Es stellt aber häufig eine Notwendigkeit dar, um die vielen Maßnahmen kontrollieren zu können. Das Dezernat IV versucht diesem Problem mit entsprechenden Werkzeugen zu begegnen, die eine Verwaltung erleichtern sollen. Dabei stehen verschiedene Tools zur Datenerfassung zur Verfügung, welche im Kapitel 2.4 näher erläutert werden.

## 2.4 Datenerfassung

Wie im Kapitel 2.3.5 beschrieben, ist es für eine gut funktionierende Liegenschaftsverwaltung und ein effizientes Energiemanagement unerlässlich, über aktuelle Gebäude- und Anlagendaten sowie andere Werkzeuge zur Datenerfassung zu verfügen. Diese müssen zentral gesammelt und den verschiedenen Stellen zugänglich gemacht werden. Im Folgenden werden die bestehenden Systeme zur Datenerfassung vorgestellt und ihre Schwachstellen abgeleitet.

### 2.4.1 CAFM-System FAMOS

Als CAFM-System (Computer Aided Facilities Management-System) nutzt die LMU „FAMOS“, eine Software der Firma Keßler Real Estate Solutions GmbH. Dieses ist unterteilt in die Bereiche „Flächenmanagement“, „infrastrukturelles Gebäudemanagement“, „technisches Gebäudemanagement“ und „kaufmännisches Gebäudemanagement“.

Die LMU nutzt derzeit nicht alle Module in FAMOS. In Zukunft sollen aber einige Teile aktiviert bzw. verändert werden. So wird z.B. angestrebt, alle wartungsbedürftigen bzw. -pflichtigen Anlagen in FAMOS zu erfassen. Diese sollen inkl. der wichtigsten technischen Daten und anderen wichtigen Informationen (z.B. Gewährleistungszeitraum, Aufstellort, Prüffristen) zukünftig im Modul Anlagenverwaltung eingepflegt werden. Damit soll eine bessere Übersicht über die durchzuführenden sicherheits- und betriebsrelevanten Wartungen erreicht werden.

Des Weiteren befindet sich das Modul Verbrauchsdatenerfassung in Bearbeitung. Bisher waren nur handerfasste Zählerstände in FAMOS verfügbar. Je nach Einbauort des Zählers, hat dieser den Verbrauch einzelner Gebäudebereiche, ganzer oder mehrerer Gebäude wiedergegeben. Die Struktur in FAMOS soll

dahingehend verändert werden, dass zukünftig eine gebäudeweise Übersicht über die Zählerstände möglich ist. Außerdem sollen vor allem Zählerwerte, die zur Weiterverrechnung dienen (z.B. bei Vermietungen), in FAMOS verfügbar sein. Deswegen werden weiterhin Zählerstände manuell ermittelt und eingetragen, aber auch Zählerwerte aus der Gebäudeleittechnik (GLT) eingelesen, um möglichst viele Daten zu bündeln. Somit soll sichergestellt werden, dass nicht nur das technische Personal, sondern auch andere Abteilungen der Liegenschaftsverwaltung schnellen Zugriff auf Verbrauchsdaten haben.

#### 2.4.2 Gebäudeleittechnik GLT

Zur Steuerung und betriebstechnischen Überwachung der technischen Anlagen, steht dem technischen Personal eine Gebäudeleittechnik (GLT) zur Verfügung. Auf Managementebene nutzt die LMU die Leittechniksoftware „ProGrafNT“ der Firma Neuberger Gebäudeautomation GmbH. Neben den Betriebszuständen von Anlagen bzw. Bauteilen (z.B. Pumpen, Brandschutzklappen, Ventilatoren, usw.), werden in der GLT auch andere Messwerte aufgezeichnet (z.B. Temperaturen, Zählerstände, usw.).

Um verwendbare Zählerdaten und Verbrauchswerte zu erhalten, werden im Rahmen der Projektlaufzeit zahlreiche digitale Zähler bzw. Netzanalysatoren für die Stromverbrauchszählung überprüft und auf die GLT aufgeschaltet. Die erfassten Zählerdaten und Verbrauchswerte dienen als Datengrundlage für das Energiemonitoring und ermöglichen eine Kontrolle der Energierechnungen. Teilweise werden die Zählerstände auch zur Weiterverrechnung (z.B. bei Vermietungen) benötigt.

Erstes Ziel stellt dabei eine gebäudeweise Zählung aller LMU Liegenschaften dar, was die Installation weiterer Zähler erfordert. Da die GLT aber nur eine rudimentäre Möglichkeit der Visualisierung gibt, stellt sie nur die Infrastruktur für die elektronische Übermittlung von Zählerständen zur Verfügung. Des Weiteren werden diese Werte nur als Rohdaten in der GLT gespeichert, also ohne Plausibilitätsprüfung oder Witterungsbereinigung. Als direktes Werkzeug für ein brauchbares Energiemonitoring kann sie daher nicht dienen.

Die GLT dient nicht nur als Datenerfassungswerkzeug, sondern auch zur Energieoptimierung. So können z.B. von technischen Anlagen die Nutzungszeiten hinterlegt und von Heizungsanlagen die Heizkurven angepasst werden. Auch die Umstellung von z.B. Lüftungsanlagen von Dauerbetrieb auf CO<sub>2</sub>-gesteuerten

Betrieb verringert den Energieverbrauch meist deutlich. Die GLT kann also teilweise für die Umsetzung identifizierter Verbesserungsmaßnahmen verwendet werden.

#### 2.4.3 Netzlaufwerk

Als einfache Methode einer Schadensdokumentation wird das gemeinsame Netzlaufwerk genutzt. Hier werden, sortiert nach Gebäuden, Bilder zu allen Baumängeln und -schäden hinterlegt. Versehen mit Ort, Datum lässt sich eine erste Einschätzung des Gebäudezustandes erreichen. Außerdem werden in den Unterordnern der Gebäude die Dateien zu größeren Maßnahmen (Sanierungen, Umbauten, usw.) abgespeichert und die entsprechende Dokumentation (Bestandsunterlagen, Besprechungsprotokolle, usw.) hinterlegt. Je nach Berechtigung haben somit auch andere Stellen aus der Liegenschaftsverwaltung Zugriff auf die Daten und können sich ein Bild über die abgelaufenen Maßnahmen machen.

Dieses System hat einige Schwächen. Die Informationen sind z.B. weit verstreut. Will man einen Gesamtüberblick über ein Gebäude erhalten, muss man sich durch eine weit verzweigte Ordnerstruktur klicken. Unter Umständen sind die Daten aber auch unvollständig, weil sie z.B. nicht eingepflegt oder versehentlich gelöscht wurden. Außerdem fehlt häufig eine Beschreibung zu Schadensbildern bzw. die Information, ob die Schäden vollständig behoben wurden. Des Weiteren erfolgt die Einschätzung des Zustandes häufig durch verschiedene Mitarbeiter der Liegenschaftsverwaltung, was teilweise zu unterschiedlichen Einstufungen führt. Mit Hilfe der im Rahmen des Projektes entwickelten Schadensdokumentation (siehe Kapitel 4.1.6), soll allerdings zukünftig eine einheitliche Zustandszuordnung erreicht werden.

### 2.5 Energiemanagement an der LMU

In diesem Kapitel soll auf die Anforderungen gängiger Energiemanagement-Zertifizierungen eingegangen und mit den bereits vorhandenen Tätigkeiten im Bereich Energiemanagement an der LMU verglichen werden.

#### 2.5.1 Gesetzliche Grundlagen

Laut Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G) mussten alle größeren Unternehmen bis zum 05.12.2015 ein Energieaudit nach DIN EN ISO 16247 durchführen lassen (§8 Abs.1 Nr. 1 EDL-G) und dieses alle vier

Jahre wiederholen (§8 Abs.1 Nr. 12 EDL-G). Von dieser Pflicht sind jedoch Universitäten und Hochschulen als öffentliche Einrichtungen aufgrund ihrer hoheitlichen und somit nicht wirtschaftlichen Tätigkeit ausgenommen. (Merkblatt für Energieaudits, 2015, S.7 u. S.12).

Trotz dieser fehlenden Pflicht, stellen diese Zertifizierungen eine gute Grundlage dar, um abzustecken, welche Anforderungen ein Energiemanagement erfüllen sollte. Deswegen wurden im Rahmen des Projektes HoEff-CIM folgende Normen bzw. Empfehlungen genauer betrachtet:

- DIN EN 16247 Energieaudits
- DIN EN ISO 50001 Energiemanagementsysteme
- AMEV Hinweise zum Energiemanagement in öffentlichen Gebäuden

2.5.2 Soll-Ist-Vergleich

Aufbauend auf den Inhalten und Anforderungen der oben genannten Zertifizierungen bzw. auf den Hinwei-

sen des Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), werden die notwendigen und vorhandenen Werkzeuge und deren Zusammenspiel für ein funktionierendes Energiemanagement analysiert. Außerdem wird die Organisationsstruktur der am Energiemanagement beteiligten Stellen an der LMU betrachtet.

2.5.2.1 Werkzeuge

Wie in Abb. 2-3 ersichtlich, soll das Energiemanagement an der LMU hauptsächlich mit Hilfe der drei Werkzeuge CAFM-Software (FAMOS), energetische Beurteilung der Gebäude (mit dem QuickCheck-Tool) und einer Energiemonitoringsoftware umgesetzt werden und in Sanierungskonzepte und Verbesserungsmaßnahmen münden.

Mit dem CAFM-System (FAMOS) werden hauptsächlich die Gebäudedaten (Flächenaufteilung, Nutzungsarten, usw.) verwaltet. Außerdem dient es zur Rechnungsverwaltung und -prüfung sowie zur Energiezählerübersicht (siehe Kapitel 2.4.1).

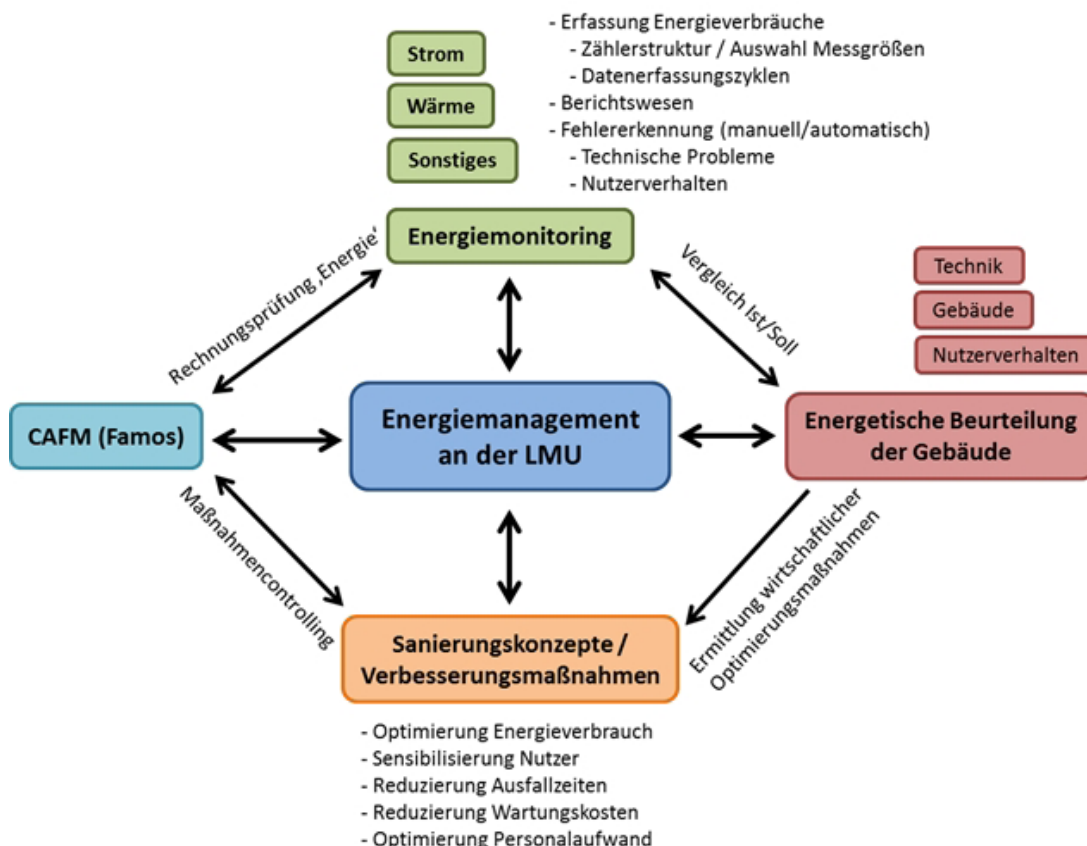


Abb. 2-3 Energiemanagementwerkzeuge und deren Zusammenspiel (eigene Darstellung)

Zur Bündelung von Informationen bezüglich des Zustandes der Gebäude und somit zur energetischen Beurteilung, soll die im Rahmen des Projektes entwickelte Software Quick-Check-Tool (QCT) in Verbindung mit der Referenzraummethode (RRM) dienen (siehe Kapitel 3.2 und 3.3).

Um daraus Sanierungskonzepte und Verbesserungsmaßnahmen ableiten zu können, fehlt eine Software für Energiemonitoring zur Visualisierung und übersichtlichen Darstellung von Verbrauchswerten und Zählerständen. Außerdem sollen durch diese kontinuierliche Überwachung schneller Fehler entdeckt werden, die zu erhöhten Energieverbräuchen führen. Diese Lücke soll mit einer selbst programmierten Lösung geschlossen werden, welche im Kapitel 3.1 auf Seite 12 näher beschrieben wird.

#### 2.5.2.2 Organisationsstruktur

Die LMU hat im Jahr 2015 ca. 22 Mio. € für Energie (Strom, Fernwärme, Heizöl, Erdgas) ausgegeben. Dennoch existiert bisher keine eigene Stelle, die sich ausschließlich mit dem Thema Energiemanagement beschäftigt.

So sind die Aufgaben des Dezernats IV aktuell folgendermaßen verteilt:

- Referat IV.1 Planung, Bau, Liegenschaften
  - die Betreuung von Sanierungen, Umbauten, Neubauten
  - die Betreuung des CAFM-Systems
  - die Raum- bzw. Flächenplanung
  - die Koordination von Energieausweisen
- Referat IV.2 Betriebstechnik Stammgelände
  - die Betreuung der betriebstechnischen Anlagen
  - der Abschluss von Energielieferverträgen
  - die Erfassung und Auswertung von Energiedaten
- Referat IV.3 Geräte- und Nachrichtentechnik:
  - die Beschaffung energieeffizienter Telekommunikationsstruktur und Medientechnik
- Referat IV.4 Hausverwaltung:
  - die Bezahlung von Energierechnungen
- Referat VI.1 EDV-Beschaffungen:
  - die Beschaffung energieeffizienter EDV-Ausstattung

Für eine fundierte Analyse des gesamten Energiebedarfs und zur Effizienzsteigerung ist es erforderlich,

diese Aufgabenverteilung zu bündeln. Als ausfalligster bzw. größter Schwachpunkt wurde im Rahmen des Projektes HoEff-CIM der Prozess der Energiebeschaffung und der damit verbundenen Rechnungsprüfung aufgedeckt. Wie oben ersichtlich, ist das Referat IV.2 für den Abschluss der Energielieferverträge und die Erfassung und Auswertung von Energiedaten zuständig, während die Energierechnungen vom Referat IV.4 bezahlt werden. In einem ersten Schritt wurde deshalb versucht diese Aktivitäten zu bündeln, was unter Kapitel 6.2 näher beschrieben wird.

## 2.6 Identifizierung der Schwachstellen

Die LMU bewirtschaftet eine Vielzahl von Gebäuden, die sich hinsichtlich Zustand, Nutzungsart, Komplexität, Größe und Baualter enorm unterscheiden. Diese Gebäude werden von einer großen Liegenschaftsverwaltung betreut, die hinsichtlich ihrer geplanten Maßnahmen und Projekte von den Entscheidungen bzw. von der Zuarbeit anderer Stellen sowohl innerhalb (z.B. Hochschulleitung) als auch außerhalb der LMU (z.B. StBAM2, Staatsministerium) abhängig ist.

Die vorhandenen Werkzeuge zur Datenerfassung stellen jeweils für ihren Bereich gesehen, bereits eine große Arbeitshilfe dar. Was allerdings fehlt ist ein übergreifendes Tool, welches auf die vorhandenen Werkzeuge zugreift und mit Hilfe zusätzlicher Informationen (durch Gebäudebegehungen) die Aussagen zu den Liegenschaften bündelt und bereits erste Prioritäten für mögliche Sanierungsmaßnahmen vorgibt. Hierzu soll zukünftig das im Rahmen des Projektes entwickelte QuickCheck-Tool (QCT) dienen.

Die Liegenschaftsverwaltung der LMU ist stets bemüht, den Energieverbrauch der Gebäude zu senken und strebt die Erreichung der Klimaschutzziele 2050 an. Diese Aufgabe ist allerdings auf viele Stellen und Zuständigkeitsbereiche verteilt, weswegen hier hauptsächlich eine zentrale Koordinationsstelle und genügend Personal fehlt, um ein richtiges Energiemanagement aufzubauen. Mittels einer Energiemonitoringsoftware soll allerdings die Identifikation von Schwachstellen und Optimierungspotentialen erleichtert bzw. der Zeitaufwand dafür reduziert werden. Dazu wurde im Rahmen des Projektes die Energiemonitoringsoftware EnMoLMU entwickelt.

2 Darstellung der Liegenschaften und Verwaltung - Ist-Zustand LMU |  
Identifizierung der Schwachstellen



Abb. 2-4 LMU-Liegenschaften - Beispiele für unterschiedliche Baualtersklassen (Bild oben links/unten links: eigenes Bild, Bild oben rechts/unten rechts: LMU)

### 3 Werkzeuge zur Datenaufnahme und Bewertung von Campus-Liegenschaften

Im Projekt werden zwei Werkzeuge erstellt: die Referenzraum-Methode (RRM) sowie das QuickCheck-Tool (QCT). Diese unterstützen die Erfassung und Bewertung der Liegenschaften eines Hochschulcampus und werden in Kapitel 3.2 bzw. Kapitel 3.3 detailliert vorgestellt. Eine einheitliche Erfassung der Daten erfordert zunächst eine Bewertung der Zählerstruktur und der Qualität des Energiemonitorings (Kapitel 3.1).

#### 3.1 Zählerstruktur und Energiemonitoringssoftware EnMoLMU

Zur energetischen Anlagenüberwachung und -optimierung sind verschiedene Daten, von Zustandsangaben (z.B. Pumpe ein/aus) über Temperaturen (z.B. Rücklauftemperaturen verschiedener Heizkreise) bis hin zu Leistungs- oder Verbrauchswerten, erforderlich.

Notwendige Zustandsangaben und Temperaturen an der LMU werden bereits mehr oder weniger detailliert in der Gebäudeleittechnik (GLT) abgebildet (vgl. Kapitel 2.4.2). Außerdem waren zu Projektbeginn bereits diverse Energie- oder Medienzähler (im folgenden „Zähler“) zur Leistungs- und Verbrauchsmessung installiert. Im Zuge behelfsmäßiger Auswertungen wurde allerdings festgestellt, dass teilweise Gebäude oder relevante Bereiche nicht einzeln gezählt werden oder Zähler keine belastbaren oder überhaupt keine Daten lieferten. Damit vorhandene und neue Zähler dauerhaft verlässliche Werte liefern, wird zunächst eine Plausibilitätsprüfung entwickelt. Diese wird zukünftig sowohl automatisiert in der GLT als auch manuell in den Planungs- und Montageprozess neuer Zähler integriert. Um eine lückenlose Zählerabdeckung aller Gebäude und wichtiger Bereiche zu erreichen, wurde begonnen, den Ist-Zustand als Basis zu ermitteln und abzubilden (Zählpunktstrukturen).

Des Weiteren wurde, wie Kapitel 2.4.2.1 beschrieben, als Lücke ein Werkzeug zum Energiemonitoring festgestellt. Bisher wurden bereits einige Energiedaten gesammelt, jedoch nicht strukturiert ausgewertet. Dies führte, wie oben beschrieben, dazu, dass fehlerhafte Zähler teilweise nicht erkannt wurden. Außerdem wurden technische Anlagen meist nur energieoptimiert betrieben, wenn durch andere Maßnahmen die Anlage im Fokus der Aufmerksamkeit stand. Deshalb wird nach einer geeigneten Softwarelösung dafür gesucht.

#### 3.1.1 Erstellung von Zählerstrukturen für die einzelnen Gebäude

Um den Ist-Zustand, welche Medien in welchen Gebäuden bzw. Bereichen gezählt werden, darstellen zu können, wird ein Schema einer Zählpunktstruktur und damit einhergehend einer Versorgungsstruktur definiert. Als erstes Werkzeug wird hierfür Microsoft Visio verwendet. In Abb. 3-1 ist eine beispielhafte Zählpunktstruktur zu sehen.

Ferner soll eine Schnittstelle zwischen der CAFM-Software und Visio geschaffen werden oder alternativ die Zählpunktstruktur in das bereits verknüpfte CAD-System überführt werden. So sollen Datendopplungen vermieden werden, die durch ein unverknüpftes Abbilden der Zählpunktstruktur in Microsoft Visio zwangsläufig entsteht.

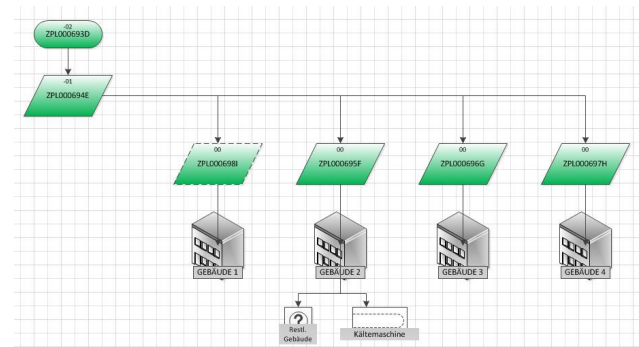


Abb. 3-1 Beispielschema für die Zählerstruktur eines Areals (eigene Darstellung)

##### 3.1.1.1 Bestandsaufnahme

Auf Basis der Zählpunktstruktur, soll der derzeitige Stand der Versorgung und der bisher vorhandenen Zählpunkte aufgenommen und abgebildet werden. Durch die stark heterogene Gebäudestruktur, auch auf das Bau-/Sanierungsalter bezogen, und die unterschiedliche Aufteilung der Verantwortlichkeiten, ist das Wissen über die bisherige Zählpunktsituation auf viele verschiedene Personen verteilt und nicht immer nachvollziehbar. Darüber hinaus sind Bestandsdokumentationen lückenhaft und nicht ausreichend gepflegt.

Im Zuge von vorangegangenen Initiativen wurde in den vergangenen Jahren eine Großzahl an Zählern über die gesamte LMU verteilt installiert. Allerdings existiert keine Dokumentation über die Verteilung,

weshalb eine erneute Überprüfung jeder einzelnen Gebäudeversorgung notwendig ist.

Bevor die Lücken der bestehenden Zählpunktstruktur gefüllt werden, müssen bereits existierende Zähler an aussagekräftigen Schlüsselstellen berichtigt und plausible Ergebnisse sichergestellt werden. Es wird definiert, welche Werte aus den Elektrozählern für den Betrieb und die energetische Auswertung wichtig und daher auf die GLT aufzuschalten sind.

### 3.1.1.2 Weitere Arbeitsschritte

Für ein flächendeckendes Energiemanagement bzw. Energiemonitoring müssen noch eine Vielzahl bestehender Zähler geprüft, berichtigt und viele messtechnische Lücken in der Energiestromerfassung geschlossen werden. Für den Start eines zentralen und strukturierten Energiemonitorings wird im Projektverlauf eine ausreichende Basis an funktionierenden und plausiblen Zählern geschaffen. Weitere Schritte bezüglich Zählpunktstruktur können auf Grundlage der Ergebnisse aus dem Energiemonitoring zielgerichtet aufgedeckt und begleitet werden.

Vergleichbar mit der Korrektur bestehender Elektrozähler, sollen im nächsten Schritt auch die Zähler anderer Gewerke (vor allem Heizung) überprüft und korrigiert werden. Bei Wärmemengenzählern muss dabei zusätzlich auch auf die Einbausituation, insbesondere auf eine ausreichende Beruhigungsstrecke, geachtet werden.

Anschließend sollen mit dem Einbau weiterer Zähler, und in Einzelfällen der Einrichtung virtueller Zähler, die vorhandenen Lücken zur Auswertung des Gebäude- oder Anlagenenergieverbrauchs geschlossen werden. Hierzu wird sich an Vorschlägen der Publikation „EnMess 2001“ des AMEV (AMEV, 2001) bzw. der „Planungsvorgabe Zählerstruktur im Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW“ orientiert (Surrey, U. et al., 2010).

### 3.1.2 Entwicklung einer Energiemonitoringsoftware - EnMoLMU

Um in Zukunft Anlagen nicht nur auf Funktion sondern auch auf einen energieoptimierten Betrieb überwachen zu können, soll eine passende Softwarelösung zum Energiemonitoring eingeführt werden. Weitere Aufgaben der Energiemonitoringsoftware sollen die Auswertung des Energie- bzw. Medienverbrauchs

der Universitätsgebäude und darauf basierend der gesamten Universität sein. Zudem soll die Software später die Möglichkeit zur Nutzerinformation und damit Sensibilisierung bieten.

#### 3.1.2.1 Auswahl einer Softwarelösung

Neben einer allgemeinen Marktrecherche (BAFA, 2014) wurde zusätzlich der Marktspiegel der EnergieAgentur.NRW (EnergieAgentur.NRW, o. J.) zur Suche geeigneter Software verwendet, was aber nach Eingabe der Kriterien für die LMU zu keinem Ergebnis führte.

Eine vielversprechende Lösung stellt die Software Monisoft dar, die aus einem zurückliegenden, Förderprojekt hervorgegangen ist (FIZ Karlsruhe, o. J.) Organisatorische Gründe sprechen jedoch gegen den Einsatz dieser Software.

Nach der Vorstellung und genaueren Betrachtung zweier kommerzieller Softwarelösungen wurde erkannt, dass diese nur mit Kompromissen an der LMU einsetzbar wären, und aufgrund der vielen vernetzten Systeme und unterschiedlichen Gebäudesituationen zusätzlichen Programmieraufwand erfordern würden. Vor diesem Hintergrund soll dieser sowieso notwendige Programmieraufwand durch die Eigenentwicklung einer Software erweitert werden, wodurch Kosteneinsparung und Langfristigkeit erhöht werden.

Um die beim Energiemonitoring anfallenden großen Datenmengen auszuwerten, wurde eine Kooperation mit dem Lehrstuhl für Statistik der LMU angestrebt. An diesem ist es gängig, für Datenauswertungen eine open-source high-level Programmiersprache namens ‚R‘ zu verwenden. ‚R‘ ist ausreichend weit verbreitet und im wissenschaftlichen Bereich tief verankert, was die langfristige Verwendbarkeit der Programmiersprache gewährleistet. Außerdem eröffnet sich (durch studentische Hilfskräfte) die Möglichkeit zur kontinuierlichen Erweiterung und Pflege der Software in der Zukunft.

Für die Erstellung einer ersten gebrauchsfähigen Basisversion wurde die Programmierung der Energie-Monitoring-Software der LMU (EnMoLMU) als Masterarbeit vergeben, deren Ergebnis im Folgenden beschrieben wird.



### 3.1.2.2 Energiemonitoring-Software der LMU (EnMoLMU)

Die spezifische Situation der LMU gibt einer Energiemonitoring-Software gewisse Eingangsgrößen vor, die eingelesen und verarbeitet werden sollen. Auf diese Eingangsgrößen wird nachfolgend näher eingegangen. Da diese Eingangsgrößen aus verschiedenen Quellen stammen, sind dementsprechend mehrere Schnittstellen notwendig (siehe Abb. 3-2). Die CAFM-Software gibt Daten hauptsächlich als .csv- oder .xls-Dateien aus, dies wird auch für EnMoLMU verwendet.

Für die Vielzahl an Daten aus der GLT, die bis zu einer Auflösung im Minutentakt vorliegen, wäre ein Direktzugriff auf die bestehende Datenbank der GLT-Software sinnvoll. Da diese vom Anbieter der GLT-Software für einen Direktzugriff nicht freigegeben wird, wurde eine eigene Datenbank aufgebaut, welche mit Werten aus der GLT gefüttert wird. Sie wird gleichzeitig auch für weitere Rahmendaten, wie Wetterdaten der LMU-Wetterstation, Gradtagszahlen aus dem Internet und Eingabe der Ferienzeiten, verwendet. Die Datenbank läuft auf einem dafür angeschafften Server der LMU, welcher auch als Operationsplattform für EnMoLMU genutzt wird. Außerdem

ermöglicht der Server den Zugriff auf EnMoLMU aus dem gesamten Verwaltungsnetzwerk der LMU.

Um einen Soll-/Ist-Vergleich ziehen und bewerten zu können, ist eine Schnittstelle zum QCT, das innerhalb dieses Forschungsprojektes entwickelt wird, erforderlich. Von dort sollen über die im Hintergrund laufende Referenzraummethode Bedarswerte zu einzelnen Gebäuden geholt werden. Vorgaben zu dieser Schnittstelle aus der Entwicklung des QCT waren zum Zeitpunkt der Programmierung von EnMoLMU noch nicht verfügbar. Aufgrund der modularen Struktur von EnMoLMU ist jegliche Schnittstelle später integrierbar, somit kann auf die Komplettierung des QCT gewartet werden.

Die im Zuge der Masterarbeit entwickelte erste Version von EnMoLMU ist in erster Linie in der statistischen Programmiersprache R implementiert und kann in die Bereiche (I) ‚Daten aufbereiten und speichern‘, (P) ‚Graphiken zur Auswertung erzeugen‘ und (O) ‚Berichte erstellen‘ gegliedert werden. Die Zusammenhänge sind in Abb. 3-3 ersichtlich.

Im Bereich (I) werden die diversen Eingabegrößen eingelesen, aufbereitet und teilweise in der Datenbank gespeichert.

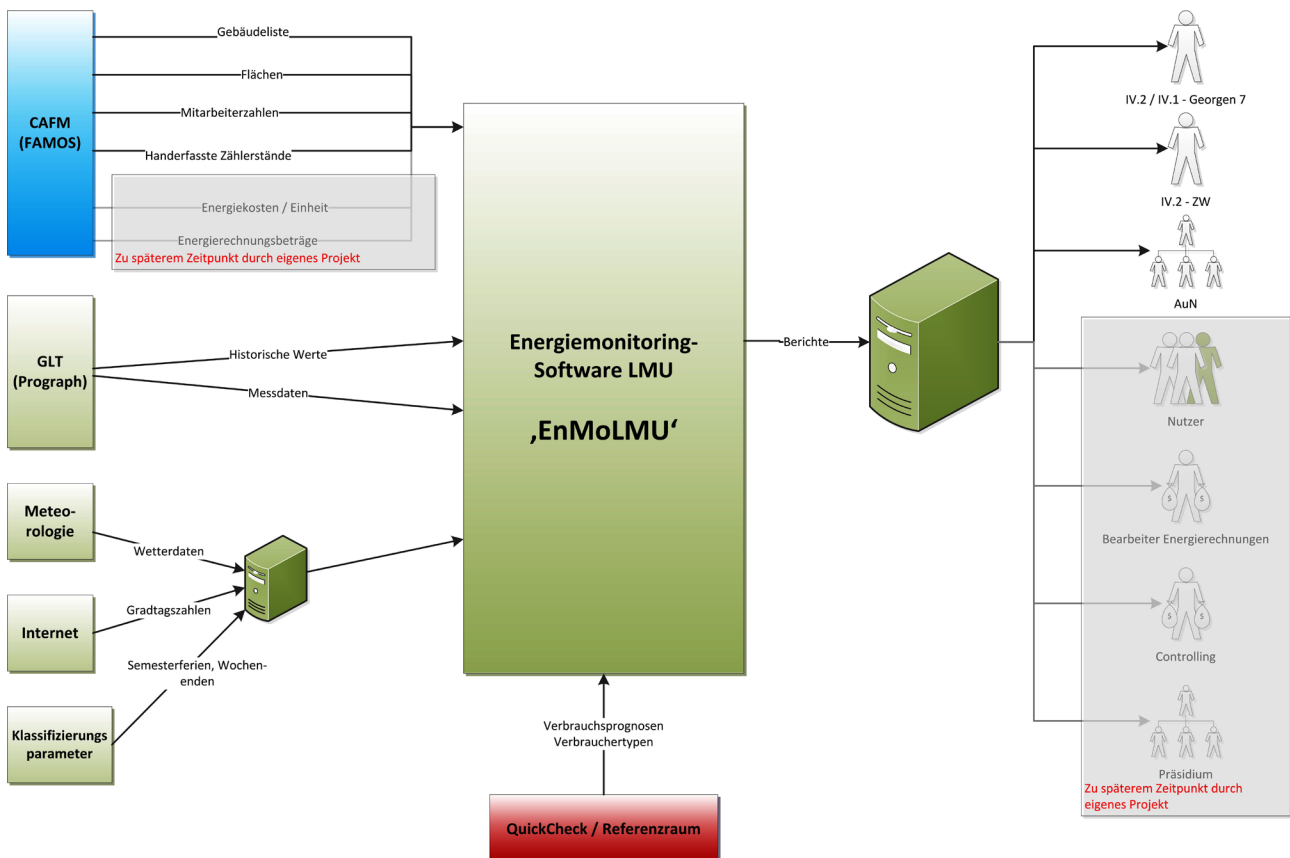


Abb. 3-2 Schnittstellen von EnMoLMU (eigene Darstellung)

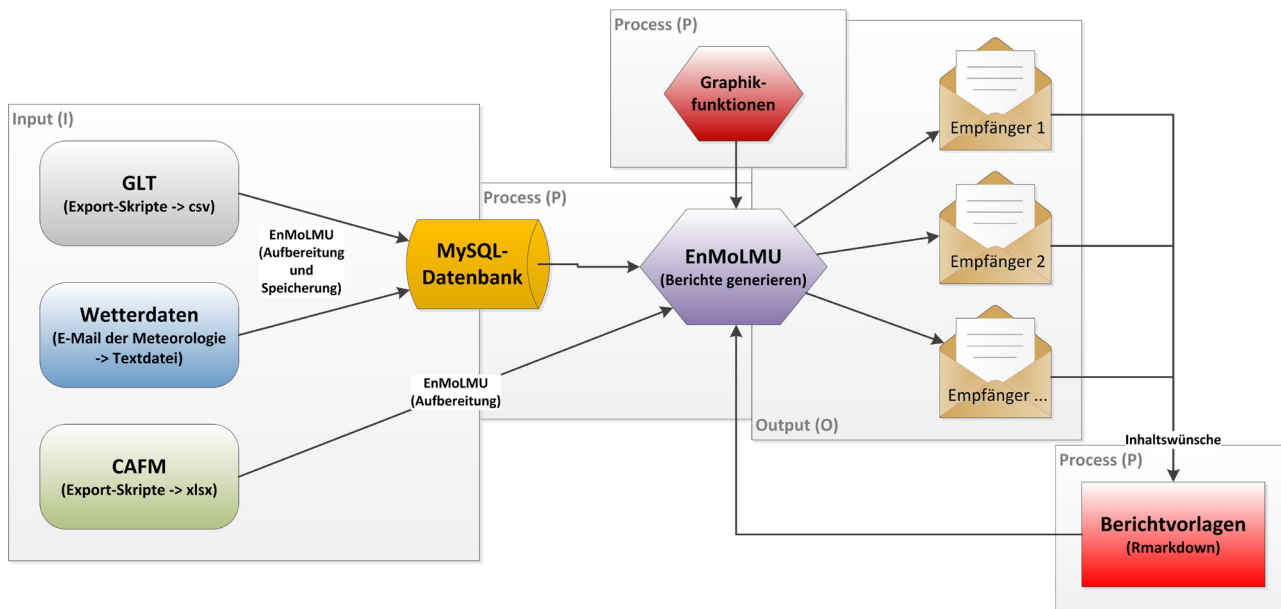


Abb. 3-3 Aufbau von EnMoLMU (eigene Darstellung)

Die Funktionen im Bereich (P) prüfen die Berichts-anforderungen, lesen die entsprechenden Daten aus der Datenbank und erstellen daraus die gewünschten Graphiken.

Die erstellten Graphiken werden schlussendlich im Bereich (O) mit Kommentaren versehen und zu einem Dokument zusammengefasst.

Die Software EnMoLMU bezieht Daten aus verschiedenen Quellen, dem CAFM-System, der GLT, dem Lehrstuhl für Meteorologie (LMU-Wetterstation) und allgemeine Daten aus dem Internet:

- CAFM-System: Mitarbeiterzahlen und Flächen zur Erstellung von energetischen Kenngrößen, handabgelesene Zählerstände
- GLT: Energiemengen, Leistungen, Temperaturen, Schaltzustände, Regelgrößen usw. zur detaillierten Auswertung
- Lehrstuhl für Meteorologie: Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Außenluftfeuchte usw. zur Witterungsbereinigung und in Verbindung mit Daten aus dem Internet zur Berechnung der Gradtagszahlen
- Manuelle Eingabe: Ferienzeiten zur detaillierten Bewertung der Energieverbräuche

Als Ausgabegröße von EnMoLMU werden Berichte in einem wählbaren Format (.pdf oder .html) erstellt. Diese Berichte können variabel aus verschiedenen

Graphikarten zusammengestellt werden, je nachdem welche Auswertungen gewünscht bzw. sinnvoll sind. Die Graphikbausteine, die im ersten Schritt programmiert werden, sind im Folgenden erläutert.

In Zukunft wird sicherlich Bedarf an weiteren Graphikbausteinen aufkommen. Diese können aufgrund des modularen Aufbaus der Software separat programmiert und einfach in EnMoLMU eingebunden werden.

Die individuelle Zusammenstellung eines Berichtes wird über Berichtsvorlagen, gemäß Abb. 3-4, definiert. Diese enthalten Hinweise auf die zu verwendenden Graphikbausteine zusammen mit dem auszuwertenden Gebäude und weiteren beschreibenden Parametern.

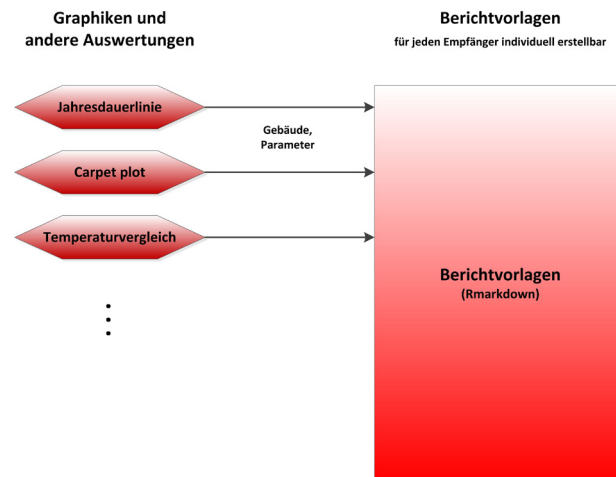


Abb. 3-4 Aufbau der Berichtsvorlagen (eigene Darstellung)

Zur zeitnahen Einordnung des aktuellen Heizenergieverbrauchs, ohne extra eine Gradtagszahlbereinigung durchführen zu müssen, wurde an den Universitäten Mainz und Ulm das Konzept der Energiesignatur entwickelt (Liers, 2014) (Bopp., 2006). Hierbei wird die verbrauchte Heizenergie eines Tages über der mittleren Außentemperatur (AT) dieses Tages aufgetragen. Die Tageswerte für einen langen, zurückliegenden Zeitraum (mit bereinigten Werten) werden als Referenzkurve verwendet, gegen die aktuelle Tageswerte einfach verglichen werden können. Die Vergleichskurve wird verbreitert mit einem Polynom 2. Grades beschrieben.

In Anlehnung daran wird beim Energiesignatur-Modul von EnMoLMU eine zweiteilige Näherungskurve verwendet, da eine zentrale Heizungsfreigabe die statische Heizung aller Gebäude abschaltet, sobald ein Umschaltkriterium (ca. ab Außentemperatur 15°C) überschritten wird (siehe Abb. 3-5).

Um dieses Umschaltkriterium entsteht somit ein Knick in der Kurve des Heizenergieverbrauchs. Die Werte oberhalb des Knickpunktes (hin zu höheren AT) können entweder linear zur oder sogar gleichbleibend gegenüber der Außentemperatur angenähert werden. Unterhalb des Knickpunktes (hin zu niedrigeren AT) ergibt die statistische Auswertung verschiedener Liegenschaften ebenfalls eine sinnvolle lineare Näherung. Dies soll im weiteren Betrieb noch näher untersucht werden; die Programmierung erlaubt eine spätere Änderung der Näherungskurve.

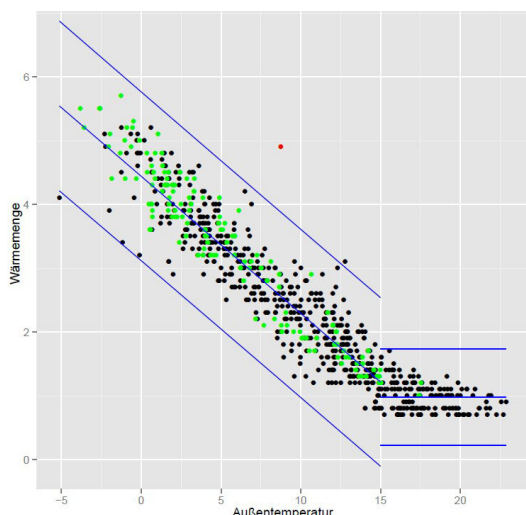


Abb. 3-5 ‚Energiesignatur‘ eines Gebäudes (eigene Darstellung)

Die Standardvisualisierung für Temperaturen in der GLT ist eine historische Auftragung der Temperatur über eine Zeitachse. Diese Darstellung (Abb. 3-6) wird auch in EnMoLMU, mit der Möglichkeit mehrere Temperaturen in einer Graphik gleichzeitig darzu-

stellen, übernommen. Diese Graphik kann z.B. zur Überprüfung des hydraulischen Abgleichs oder der Temperaturregelung einer Heizungsanlage verwendet werden.

Die Visualisierung von Temperaturen oder anderen Daten in feiner zeitlicher Auflösung über längere Zeiträume wird mittels einer normalen Auftragung über der Zeitachse (wie z.B. in Abb. 3-6) schnell unübersichtlich bzw. es lassen sich keine Informationen mehr daraus entnehmen.

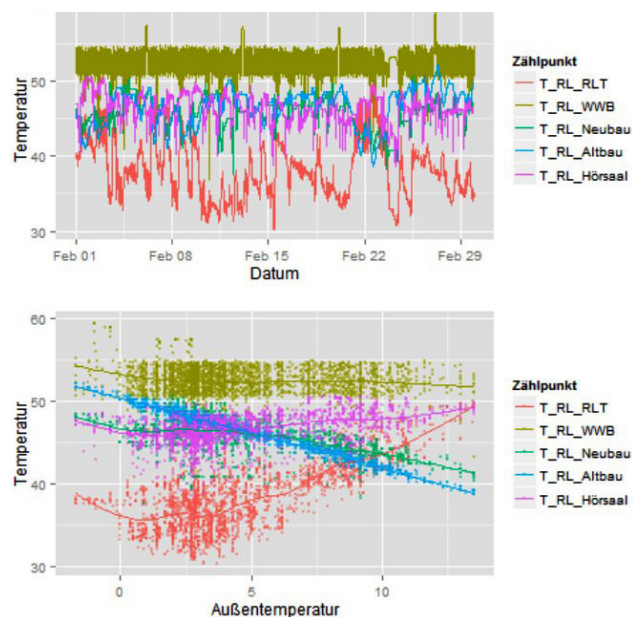


Abb. 3-6 ‚Temperaturvergleich‘ mit verschiedenen Rücklauftemperaturen eines Gebäudes (eigene Darstellung)

Eine gute Möglichkeit, den zeitlichen Verlauf einer großen Datenmenge übersichtlich darzustellen, ist ein Rasterdiagramm (auch „carpet plot“). Hierbei wird die Zeit nach Tag und Stunde aufgeteilt und auf die x- bzw. y-Achse des Diagramms aufgetragen. Die eigentliche Zielinformation (Temperatur, Verbrauchswert/Zeit, Leistung, o.ä.) kann dann in „dritter Dimension“ anhand farblich kodierter Punkte im Diagramm dargestellt werden. Abb. 3-7 zeigt ein Beispiel. Damit können leicht Muster im Anlagenbetrieb oder Jahresverlauf erkannt werden, z.B. Betriebszeiten, Nachtabsenkung usw. Um den Zusammenhang der Heiz- bzw. Kälteverbräuche mit der Außentemperatur und der Sonnenstrahlung (Globalstrahlung) aufzuzeigen, wird auch deren Verlauf unterhalb des Rasterdiagramms angezeigt.

Als Hilfsmittel zur Planung einer Anlage bzw. zur Laufzeitenoptimierung z.B. eines BHKWs eignet sich die Darstellung durch eine Jahresdauerlinie. Hierfür werden auf der Abszisse die Stundenanzahl und auf der Ordinate die zugehörige Leistung, Temperatur o. ä.

dargestellt. In Abb. 3-8 ist somit z.B. zu sehen, dass die zugehörige Kälteanlage an 5000 Stunden im Jahr eine Leistung von 100 kW oder höher erbrachte. Auch ein Vergleich mehrerer Jahresdauerlinien ist möglich.

Die Graphik „Zählervergleich“ (Abb. 3-9) zeigt den Energiebedarf unterschiedlicher Gebäude(-teile) im Vergleich untereinander und innerhalb unterschiedlicher Zeiträume. Die Bedeutung des Zählervergleichs liegt insbesondere darin, dass damit Daten aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt und gemeinsam ausgewertet werden können. Außerdem eignen sich diese Balkendiagramme dazu, den generellen Trend des Energieverbrauchs eines Gebäudes oder der LMU zu erkennen. Zudem können die Gebäude mit dem größten Optimierungspotential identifiziert werden. Um Wärmeverbräuche vergleichen zu können, wird eine Gradtagzahlbereinigung gemäß VDI 3807 Blatt 1:2013-06 integriert. Die hierfür notwendige Gradtagzahl wird zum einen aus dem Internet (IWU, o. J.) bezogen und zum anderen aus der Außentemperatur errechnet.

Im Rahmen des Projekts werden noch zwei weitere Auswertungsarten programmiert, die aufgrund fehlender Daten allerdings noch nicht verwendet werden. Zur Überwachung von Kältemaschinen oder Wärmepumpen wird bei der Graphik „Leistungszahl“ das Verhältnis von erzeugter Kälte/Wärme zum Stromverbrauch auf zwei Arten aufgetragen: über die Zeit und sortiert nach Wochentag.

Als weitere, bisher nicht verwendete Graphik, steht eine Visualisierung zur Auswertung der Funktionsweise von freier Kühlung zur Verfügung. Hierfür werden die Außentemperatur, der Stromverbrauch der gesamten Kälteanlage und die Umschaltvorgänge zwischen freier Kühlung und Maschinenkühlung in einem Diagramm aufgetragen. Zusätzlich wird das Verhältnis zwischen den beiden Betriebsweisen als Kennzahl angezeigt.

### 3.1.3 Weiteres Vorgehen

Innerhalb des Projektes wird eine lauffähige Version einer Energiemonitoring-Software programmiert. Diese weist aber noch einen hohen Bedarf an manuellen Eingriffen auf. Vor einer Breitenanwendung muss in weiteren Schritten der Automatisierungsgrad von EnMoLMU erhöht werden. So sollte zunächst die automatische Übergabe und ein anschließendes automatisches Einlesen der Daten aus der GLT, im ersten Schritt mittels Batch-Dateien, ergänzt werden. Ebenfalls mit Hilfe von Batch-Dateien lassen sich in regelmäßigen Abständen (z.B. monatlich) Berichte

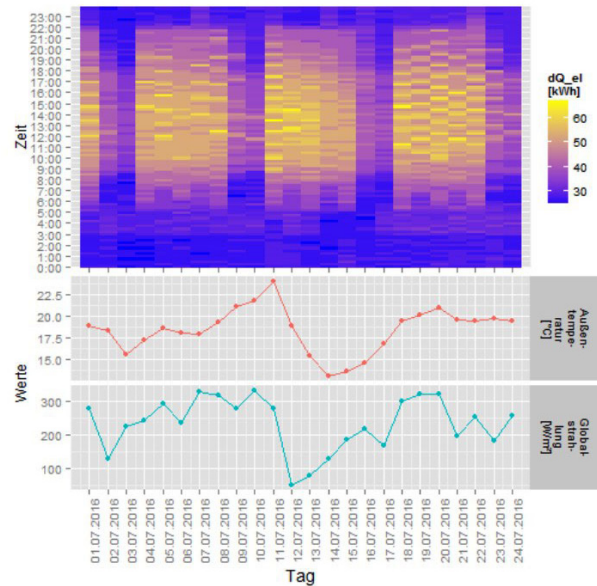


Abb. 3-7 Rasterdiagramm des Stromverbrauchs eines Gebäudes im 15-Min.-Takt (eigene Darstellung)

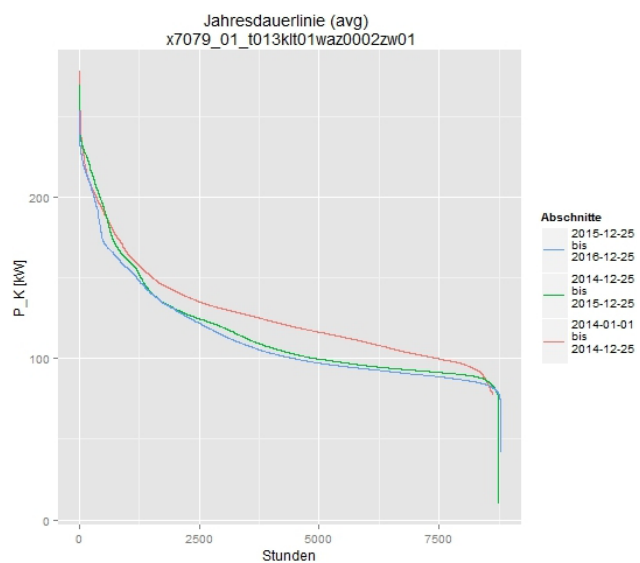


Abb. 3-8 Jahresdauerlinie Kälteerzeugung (eigene Darstellung)

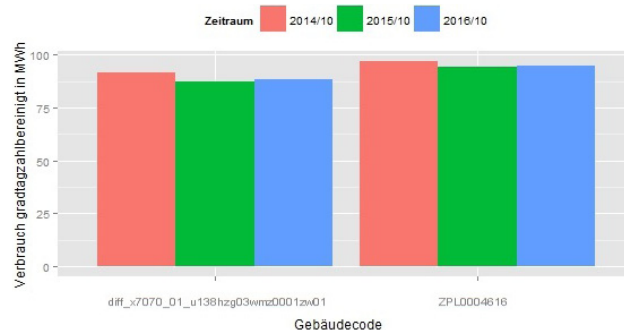


Abb. 3-9 Vergleich zweier Wärmemengenzähler inkl. Gradtagzahlbereinigung (eigene Darstellung)

mit Hilfe der entsprechenden Berichtsvorlagen generieren und evtl. auch automatisiert verschicken.

Schwieriger wird die Automatisierung der Wetterdaten. Hierzu wird in einem nächsten Schritt gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Meteorologie geprüft, wie die Übermittlung angepasst werden kann, so dass die Wetterdaten automatisch von EnMoLMU eingelesen werden können.

Mit fortschreitender Etablierung des Energiemonitoring an der LMU wird auch der Bedarf bzw. Nutzerkreis wachsen. Es wird allerdings nicht für jeden

zukünftigen Anwender sinnvoll sein, Auswertungen in fester (wenn auch in der Zusammenstellung flexibler) Berichtform zu erhalten, stattdessen könnte eine dynamische Anzeige für manche Zwecke passender sein. Hierauf kann in einem weiteren Entwicklungsschritt durch ein Web-Modul von EnMoLMU, z.B. basierend auf dem R-Paket ‚shiny‘ reagiert werden. Ein einfaches Beispiel, wie ein solches Dashboard aussehen könnte, ist in Abb. 3-10 sichtbar. Die Darstellung im Intra- oder Internet bedingt allerdings zusätzliche Änderungen an der IT-Infrastruktur (Web-Server etc.) und sollte über ein eigenes Projekt an der LMU abgedeckt werden.

### Energiesignatur

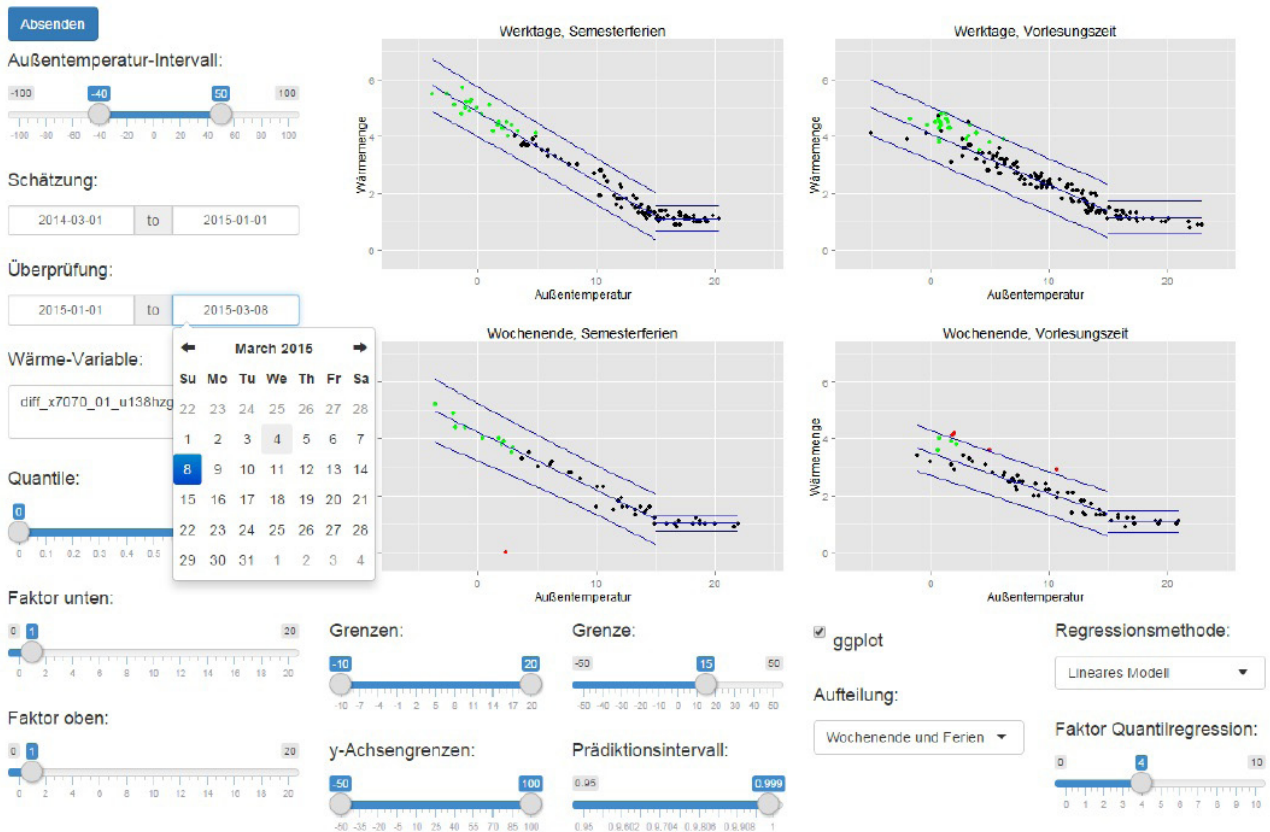


Abb. 3-10 Interaktive Grafik mit R-Erweiterung ‚shiny‘ (eigene Darstellung)

### 3.2 Referenzraummethode (RRM)

Die Vereinfachung der energetischen Bewertung von komplexen Liegenschaften mit Fokus auf Bestandsgebäude ist für diesen Abschnitt zentrales Thema. Als Anwendungsbeispiel dienen Hochschulbauten, die hinsichtlich Baualter, Konstruktion, technischen Lösungen und Nutzungen mit speziellen Anforderungen sehr verschiedenartig sind. In einer energetischen Bewertung sind diese Unterschiede eines Gebäudes zur leichteren Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit

zu berücksichtigen. Die bis dato verwendeten Bewertungsverfahren sind entweder nicht in der Lage einen geeigneten Vergleichswert zu bestimmen oder der erforderliche Aufwand zur Bestimmung eines Vergleichswertes ist zu hoch. Hierbei richtet sich die Komplexität der Bewertungswerkzeuge nach den aus der Fragestellung abgeleiteten Anforderungen. Meistens gilt: Je schwieriger eine Frage zu beantworten oder eine Anforderung nachzuweisen ist, desto komplexer ist meist das Werkzeug zur Bewertung. (Regel & Jensch & Lang, 2013)

### 3.2.1 Bewertungsprozess von Neubauten und Bestandsgebäuden

Gebäude liegen in einem Spannungsfeld bestehend aus einzuhaltenden Regeln und bewertbaren Qualitätsmerkmalen. Veränderbare Merkmale beschreiben Themen der Ökonomie, Ökologie und Funktion. Nicht bzw. schwer veränderbare Merkmale bilden Gesetze oder lokale klimatische Bedingungen. Aus ihnen entwickelt sich für die Bewertung stets ein individueller Satz an Anforderungen an das Gebäude. (Shao, Geyer & Lang, 2014)

Weiterführende Kriteriensysteme bauen darauf auf und definieren die zu erfüllenden Merkmale. Zum einen sind es Planungs- und Bewertungsansätze wie z.B. das Nachhaltige Bauen, das Gebäude ganzheitlich betrachtet und ökologische, ökonomische, soziokulturelle, technische sowie prozessuale Aspekte berücksichtigt (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013). Zum anderen sind es z.B. Gesetze, die Grenzwerte (Energiebedarf, Transmissionskoeffizienten etc.) oder Mindestanteile (den Anteil erneuerbarer Energien an der Wärme- oder Stromerzeugung etc.) vorschreiben.

Die gewählten technischen Lösungen wirken direkt auf die erzielbare Gebäudequalität. Je früher eine Optimierung der Gebäudequalität stattfindet, desto stärker ist das Ergebnis positiv zu beeinflussen; z.B. sind die Gesamtkosten lebenszyklusoptimierter Gebäude geringer, trotz einer moderat teureren Planung (s. (LaSalle, 2008) zit. n. (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013)). Dabei muss das Gebäude als komplexes Konstrukt betrachtet werden. Gebäude haben einen geschichtlichen Hintergrund und sie sind Teil eines interaktiven Systems aus Klima, Standort, Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Gebäudenutzer. Je mehr Interaktionen in einer Bewertung zu berücksichtigen sind, desto schwieriger wird es ein Gebäude als Ganzes zu verstehen. Hierzu bedarf es leistungsstarker Werkzeuge, die in der Lage sind, Qualitäten aus verschiedenen Themenbereichen adäquat ins Verhältnis zu setzen. Die energetische Gebäudeperformance wird nach (Yoshino et al., 2013) hauptsächlich durch die sechs übergeordneten Faktoren Klima, Gebäudehülle, Gebäudetechnik & Energieerzeugung, Betrieb & Wartung, Gebäudenutzung & Nutzerverhalten sowie Komfort beeinflusst. Angedachte Konzepte werden auf die Anforderungen hinsichtlich Energiebedarf, Umweltauswirkungen, Komfort oder Kosten hin optimiert. Darunter versteht man den Wert einer Zielgröße zu minimieren, maximieren oder deren Verhalten innerhalb eines definierten Bereichs zu verbessern. Eine Gebäudeoptimierung kann über den gesam-

ten Lebenszyklus hinweg erfolgen. Aussagekraft und Aufwand einer Optimierung unterscheiden sich je nach Zeitpunkt, Fragestellung und eingesetztem Werkzeug. Vereinfachte Modelle werden oft für wesentliche Entscheidungen und sehr komplexe für Detailuntersuchungen eingesetzt.

Innerhalb der Planung eines Neubaus oder einer Sanierung ergeben sich drei Zeitpunkte für eine Optimierung, um einen hinsichtlich der Anforderungen geeigneten und robusten Entwurf zu entwickeln. Diese sind in der Vor-, Entwurfs- und Ausführungsplanung. Die schrittweise Weiterentwicklung des Modells im Planungsprozess erlaubt dem Planungsteam sowohl flexibel auf die Anforderungen zu reagieren als auch vorhandene Risiken, Unsicherheiten und Sensitivitäten des Konzeptes zu identifizieren, einzuschätzen und ggf. zu minimieren.

Die Optimierung von Bestandsgebäuden weckt eine höhere Erwartung hinsichtlich einer gleichzeitigen Kosteneinsparung, Komfortsteigerung sowie Minimierung des Energieverbrauchs und der Umweltauswirkungen (Ma et al., 2012). Die Identifikation von Maßnahmen soll zudem effektiv und kostengünstig sein. Dafür ist ein sinnvoller Umgang mit der Vielzahl an verfügbaren Gebäudedaten für die Gebäudebewertung erforderlich. Aus diesem Grund folgt der Optimierungsprozess einem anderen inhaltlichen Aufbau als in der Planung und basiert auf einer Sanierungsstrategie. Die Gebäude und Quartiersbewertung entwickelt sich schrittweise und bezieht kostenneutrale bis kostenintensive Sanierungsmaßnahmen mit ein. Danach folgt die Umsetzung der als geeignet eingestuft Maßnahmen und abschließend die Überprüfung der prognostizierten Einsparungen oder Effekte. (Ma et al., 2012) Der Umfang der Bewertung ist von den gesetzten Zielen abhängig und kann in vier Stufen nach (Deru et al., 2011) beschrieben werden:

- Audit-Level 0 (AL0): Gebäudeportfolio-Screening
- Audit-Level 1 (AL1): Potenzialabschätzung
- Audit-Level 2 (AL2): Grobanalyse
- Audit-Level 3 (AL3): Detaillierte Feinanalyse

Die Audit-Level geben dabei Umfang, Eignung einer Maßnahme und finanzielles Risiko an.

Für eine fundierte energetische Optimierung eines Gebäudeportfolios sind Kenntnisse über die einzelnen Gebäude und deren Zusammensetzung hilfreich. Abb. 3-11 zeigt einen Ansatz auf Basis von individu-

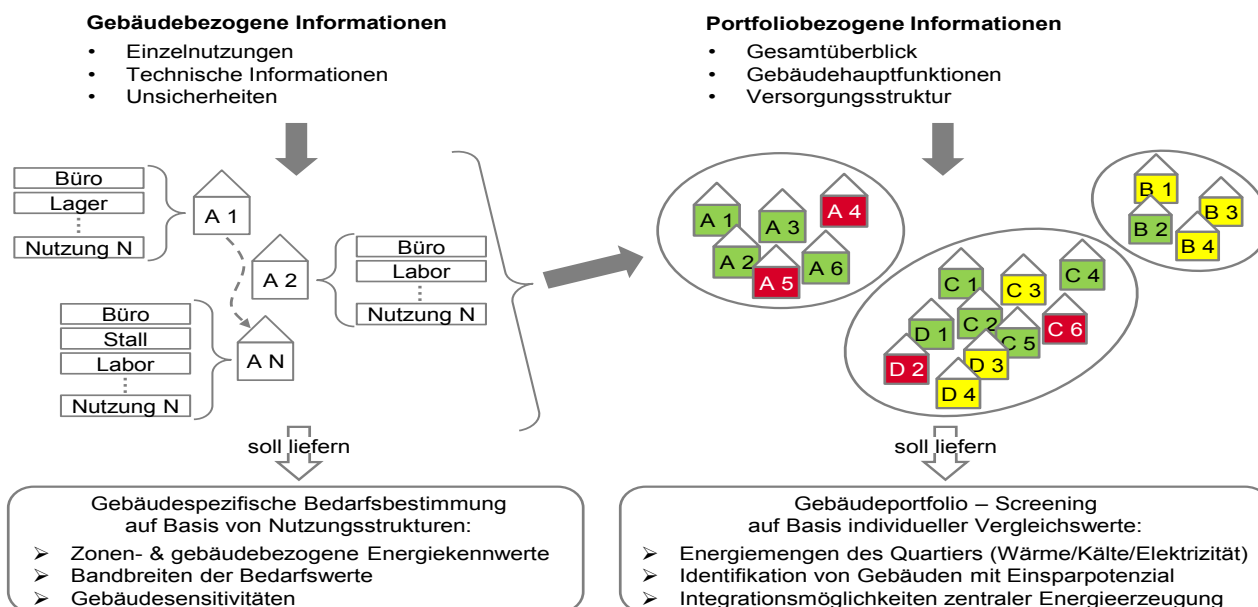


Abb. 3-11 Qualitäten in der Portfoliobetrachtung auf Basis von Gebäudekennwerten (Regel, 2016)

ellen Gebäudevergleichskennwerten, die sich aus den spezifischen Gebäuderandbedingungen wie Nutzungsanforderungen und technischen Anlageninformationen ableiten.

tätsindizes folgen dem Verfahren nach (Backhaus et al., 2011), die quantitativen Sensitivitätsindizes nach (Saltelli & Chan & Scott, 2008) (Saltelli & Ratto et al., 2008) (Sobol, 2001).

### 3.2.2 Statistische Verfahren

In der Gebäudebewertung sind viele Einflüsse, die Unsicherheiten in den Bewertungsmethoden oder Eingabeparametern und insbesondere das Gebäude als energetisch interaktives System zu beachten. Um dieses System besser zu verstehen, kann die Simulation als mathematisches Verfahren eingesetzt werden. Viele der Einflüsse und Eigenschaften sind in der Realität nicht präzise zu beschreiben, sondern nur über Wertebereiche vernünftig abzubilden. Eine scheinbar unendlich große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und Wertabstufungen existiert. Dieser Umstand führt unweigerlich zu Streuungen in den Ergebnissen. Zusätzlich können viele Effekte nicht eindeutig identifiziert und quantifiziert werden. Ergebnisse gelten als unsicher und das daraus resultierende ökologische oder ökonomische Risiko lässt sich nur sehr schwer abschätzen. Darüber hinaus erscheint die Bewertung der Resultate schwierig, vor allem wenn eindeutige Vergleichsgrößen fehlen. Aus diesem Grund sind statistische Verfahren in der Bewertung und auch in der Simulation notwendig. Für die Analysen wurde die Monte Carlo Simulations Technik (s. (Andre, 2013)) eingesetzt und für die Stichprobengenerierung auf das Quasi-Random-Sampling Verfahren nach Sobol (s. (Saltelli et al., 2010)) zurückgegriffen. Die qualitativen Sensitivi-

### 3.2.3 Methodik

Die Referenzraummethode (RRM) wurde dahingehend entwickelt, dass sie den energetischen Gebäudecharakter nachbildet und zugleich statistische Verfahren, wie z.B. die Monte Carlo Simulation und Sensitivitätsindizes zur Bestimmung wesentlicher Parameter und deren Einfluss, einsetzt. Der Prozess ist auf hohe Ausführungsgeschwindigkeit ausgelegt und erlaubt eine hohe Skalierbarkeit bei adäquater Genauigkeit. Die energetische Gebäudebewertung in der Referenzraummethode setzt auf die Verwendung von 1-Zonenmodellen, die unabhängig voneinander berechnet und anschließend in einem Korrekturverfahren, unter Beachtung der Flächenanteile und Orientierungen, summiert werden.

Mit Hilfe des modularen Aufbaus kann die RRM einerseits flexibel auf die bauliche und technische Vielfalt sowie auf die Vielzahl an Nutzungsarten reagieren. Andererseits kann sie einen individuellen Gebäudeenergiebedarf bestimmen und eröffnet die Möglichkeit auch unterschiedliche Dimensionen (Raum-Gebäude-Quartier) in der Bewertung zu adressieren. Das Verständnis über den Zusammenhang zwischen Gebäuden, Gebäudetechnik, Nutzungsarten und resultierendem Energiebedarf erlaubt es, ökonomisch tragfähige Sanierungskonzepte hinsichtlich

Energieeffizienz, Energiebedarfsreduktion, Einsatz erneuerbarer Energien und Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes präziser aufeinander abzustimmen. Die Referenzraummethode bietet somit die Chance ökonomische und ökologische Belange einfach miteinander zu verbinden und den ersten Schritt zu einer energetischen Gebäudebewertung zu erleichtern. Das Konzept der Referenzraummethode ist in Abb. 3-12 gezeigt und wird nachfolgend genauer erklärt.

Die Energiebedarfsschätzung der RRM beruht nur auf den energetisch relevanten Nutzungsarten. Hierzu werden die Flächenanteile einer Nutzungsart berücksichtigt und das energetischthermische Verhalten anhand eines nutzungstypischen Referenzraums abgebildet.

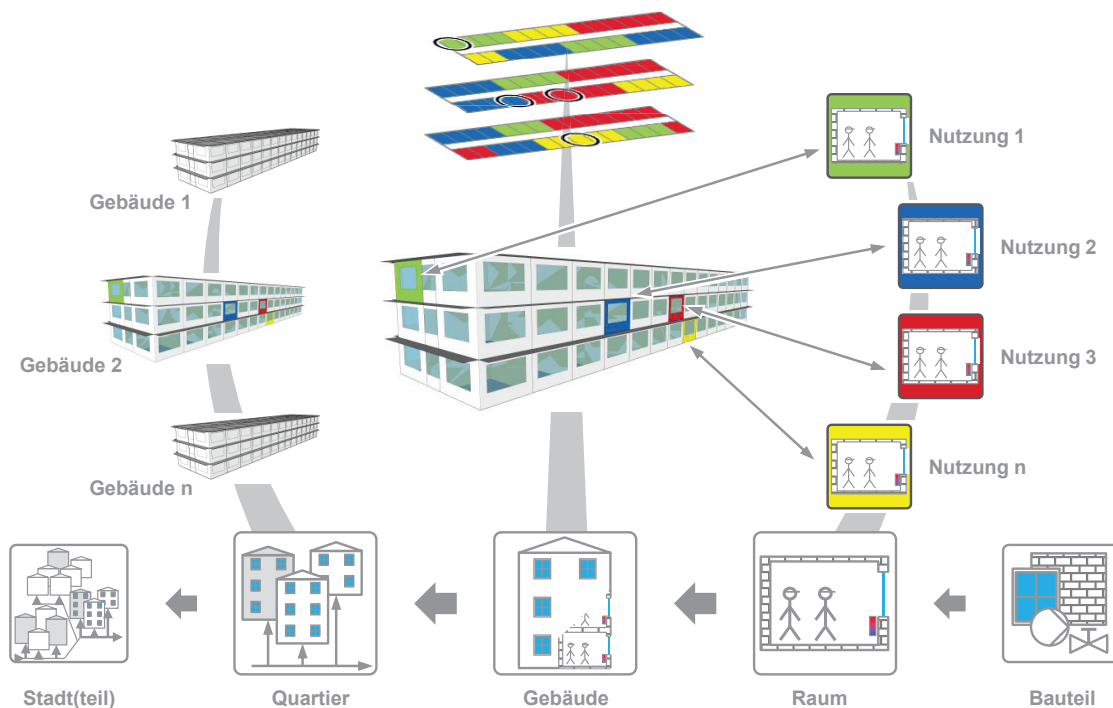


Abb. 3-12 Prinzip der Referenzraummethode (Regel, 2016)

Der Referenzraum bündelt die Informationen einer oder ähnlicher Nutzungsarten (hinsichtlich Belegungsdichte, Nutzungszeit, Geräteausstattung etc.) und ist der Vertreter für alle gleichen Nutzungen im Gebäude. Ein Gebäude entwickelt sich in der RRM aus charakteristischen Räumen und deren Flächenanteilen. Dies führt zu einer Reduktion des Rechenaufwandes und damit zu kürzeren Ausführungszeiten. Der Gewinn an Rechenzeit kann für den Einsatz leistungsstärkerer und zeitaufwendigerer Simulationsrechenkerne und -verfahren verwendet werden, um mit deren Hilfe weiterführende Informationen zum energetischen und thermischen Verhalten in höherer Auflösung zu erlangen. Mit Hilfe des Monte Carlo Simulation Ansatzes können Mittelwerte, Standardabweichungen, Bandbreiten der Ergebnisse und deren Wahrscheinlichkeit bestimmt werden.

Zusätzlich ist es möglich, bei Ähnlichkeit von Nutzung und Raumgeometrie bereits berechnete Ergebnisse wiederzuverwenden und daraus eine hohe Skalierbarkeit zu entwickeln.

Die hohe Ausführungsgeschwindigkeit und insbesondere die Wiederverwendung bereits berechneter Ergebnisse ermöglichen eine schnelle und einfache Erzeugung von Ersatzmodellen der Gebäude. Diese können für die Berechnung höherwertiger Sensitivitätsindizes verwendet werden, um damit die Informationsqualität der Bewertung zu steigern. Daher erleichtern sie die Einschätzung und Bewertung von realen Verbrauchswerten. Insbesondere schwer abbildbare Effekte auf den Energieverbrauch, wie z.B. die des Nutzereinflusses, sind schnell zu erkennen und energetisch einzuschätzen.

Der Aufbau der RRM eröffnet, Gebäude und vorhandene Nutzungen energetisch separat oder als ein Ganzes zu betrachten. Auf Nutzenebene stehen Informationen zu Energiemengen, Verhalten, Sensitivitäten etc. zur Verfügung. Sie können einfach von Zonen auf Gebäudeebene flächengewichtet skaliert werden. Damit kann bereits der Effekt einer einzelnen Parameteränderung in einer Nutzungsart auf



das Gebäude schnell erkannt, diskutiert und bewertet werden. Die flächengewichtete Berechnung des Energiebedarfs erlaubt weiterhin, flexibel und schnell auf Nutzungsänderungen im Gebäude reagieren zu können. Hierfür ist nur eine neue Zuweisung von Flächen zu einem entsprechenden Referenzraum und einer Orientierung erforderlich.

### 3.2.4 Einfluss von Nutzungen

Nutzungen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf. Mit Hilfe der RRM können nutzungsspezifische Randbedingungen abgebildet werden.

#### 3.2.4.1 Raumnutzung: Vorgehen und angesetzte allgemeine Randbedingungen

Tätigkeiten in einem Raum und die dafür notwendige Ausstattung können als Nutzungsarten zusammengefasst werden. Sie stellen unterschiedliche Anforderungen an das zu gewährleistende Raumklima, die für den Prozess erforderliche technische Ausstattung, die variablen Zugangsmöglichkeiten zum Arbeitsplatz und somit auch an die technische Gebäudeausrüstung (TGA), die diese Dienste zur Verfügung stellen und gewährleisten muss. Folglich ist der Energiebedarf direkt mit der vorhandenen Nutzung und Nutzungszeit gekoppelt. Das Gebäude bietet den hierfür erforderlichen Raum. Die Verschiedenartigkeit innerhalb einer Nutzungsart und über andere Nutzungsarten

hinweg erschwert eine eindeutige, nachvollziehbare und sichere Abschätzung des Energiebedarfs auf Raum- und Gebäudeebene.

Nutzungen sind über charakteristische Parameter energetisch zu beschreiben. Mittelwerte und Bandbreiten der charakterisierenden Parameter sind nicht nur erforderlich, um die Vielzahl an Abstufungen einer Nutzung zu beschreiben, sondern auch, um deren unterschiedliche Auslastungen zu berücksichtigen. Neben den spezifischen Nutzungs- und Komfortanforderungen sind für den Energiebedarf auch die charakteristischen Parameter der Gebäudehülle, Gebäudetechnik und deren Betrieb relevant. In ihrer Kombination wirken sie deutlich auf den zu erwartenden Energiebedarf einer Nutzung und somit auch des Gebäudes. Daher werden die Effekte der als energetisch relevant eingestuft Parameter auf den Energiebedarf untersucht, wenn Nutzungseffekte in einer Bewertung mit integriert sind. Technische Parameter sind leichter zu modellieren als das Nutzerverhalten. Bleibt die in der Nutzung enthaltene Unsicherheit in der Bewertung unbeachtet, weisen Parameter falsch gewichtete Effekte bezüglich des Energiebedarfs aus. Negative Folgen sind ggf. die Auswahl von weniger wirkungsvollen Energieeinsparmaßnahmen auf Basis falscher Einsparpotenziale und die einhergehende Notwendigkeit fehlende Einspareffekte dem Kunden zu erklären. Auf Energieeinspareffekte wirkt die Beziehung zwischen Gebäudequalität-TGA-Nutzung stark. Sie wird mittels der Parameterauswahl in Tab. 3-1 untersucht und in vier Kategorien gebündelt.

Tab. 3-1 Untersuchungsparameter für die Analyse von unterschiedlichen Nutzungen (Regel, 2016)

Baukonstruktionsabhängige Parameter		Nutzungsabhängige Parameter	
statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fensterflächenanteil</li> <li>- Fenster U-Wert</li> <li>- Fenster g-Wert</li> <li>- Sonnenschutz fest</li> <li>- Außenwand U-Wert</li> <li>- Außenwand Wärmespeicherkapazität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infiltration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Raumtemperatursollwertanpassung <math>\pm\Delta\theta</math></li> <li>- Raumlufffeuchte max.</li> <li>- Raumlufffeuchte min.</li> <li>- Beleuchtung Anschlussleistung</li> <li>- TGA <math>\Delta t</math> Einschaltzeitpunkt</li> <li>- WRG Wirkungsgrad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Person Belegungsdichte</li> <li>- Person Wärmeabgabe</li> <li>- Person Anwesenheit</li> <li>- Person Frischluft</li> <li>- Luftwechselzahl</li> <li>- Raumtemperatur Heizen</li> <li>- Raumtemperatur Kühlen</li> <li>- Sonnenschutz beweglich</li> <li>- Elektr. Geräte Anschlussleistung</li> <li>- Elektr. Geräte Standby</li> <li>- Nutzungsbeginn</li> <li>- Nutzungsende</li> </ul>
<b>Kurzbezeichnung der Kategorien:</b>			
K1: BauKonstPar_stat	K2: BauKonstPar_dyn	K3: NutzPar_stat	K4: NutzPar_dyn

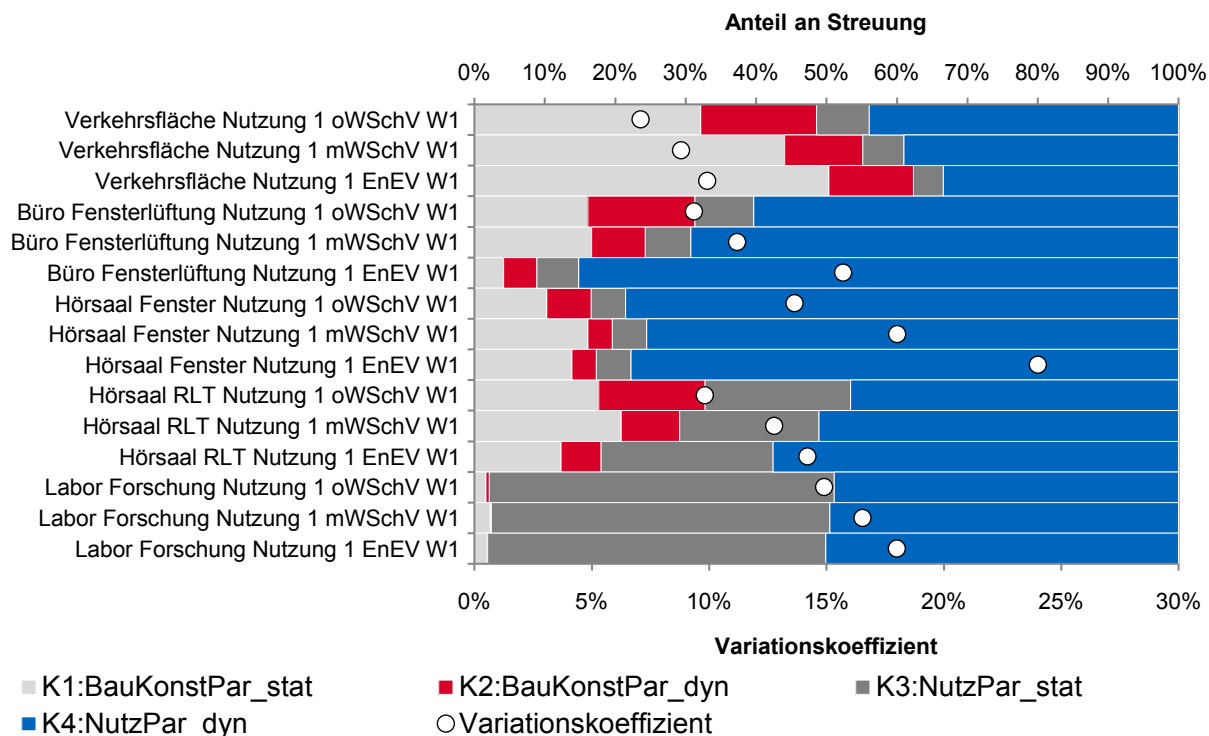


Abb. 3-13 Gewichtung der Effekte bei unterschiedlichen Wärmedämmstandards oWSchV-EnEV und gleichem Fensterflächenanteil W1 (Regel, 2016)

### 3.2.4.2 Einfluss des energetischen Baustandards

Nachfolgend werden beispielsweise bei gleichbleibendem Fensterflächenanteil die Effekte der Eingangsparameter auf den Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom energetischen Baustandard näher betrachtet. Hierzu wurden die Modelle W1 mit dem Fensterflächenanteil 25% bis 45% verwendet. Dieses Raummodell deckt mit der Lochfassade als Außenwand einen Großteil der Fassaden bei Hochschulgebäuden ab. Es wird geklärt, wie sich die Anteile der vier Kategorien (K1: BauKonstPar\_stat, K2: BauKonstPar\_dyn, K3: NutzPar\_stat, K4: NutzPar\_dyn) und die Sensitivität anhand des Variationskoeffizienten abhängig vom energetischen Baustandard verändern. Sind die Auswirkungen bekannt, können einerseits die entscheidenden Parameter ausgewählt werden, die bei einer Begehung oder Bewertung einer Nutzungsart genauer untersucht werden müssen. Andererseits kann für eine Nutzungsart die Effektivität einer geplanten Maßnahmen abgeschätzt werden. Die Abb. 3-13 stellt den unterschiedlichen Einfluss der Kategorien als Anteil der Kategorie an der Gesamtstreuung des Heizenergiebedarfs dar.

Mit einem besseren energetischen Baustandard steigt die Sensitivität des Heizenergiebedarfs gegen-

über den untersuchten Parametern an, die Variationskoeffizienten werden größer. Ist eine Personen-nutzung vorhanden, so ist sie Haupteinflussfaktor auf die Streuung; meist mit einem Anteil von mehr als 50%. Der Einfluss der dynamischen Nutzungsparameter kann mit einer mechanischen Lüftung reduziert werden. Dabei verschieben sich die Anteile der dynamischen in Richtung der statischen Nutzungsparameter. Im Vergleich zur Fensterlüftung sinkt die Sensitivität des Heizenergiebedarfs bei einer vorhandenen mechanischen Lüftung deutlich. Einen weiteren Überblick bietet die Arbeit (Regel, 2016) für den Einfluss des Fensterflächenanteils und eine ausführliche Analyse über die Nutzungen Verkehrsfläche, büroähnliche Nutzung, Hörsaal als Raum für seminaristischen Unterricht und Forschungslabor.

### 3.2.4.3 Übergeordnetes Ergebnis

Wie in (Regel, 2016) gezeigt, verändert sich die Sensitivität nicht wesentlich mit dem Fensterflächenanteil. Sehr wohl verändern sich aber die Anteile der einzelnen Kategorien an der Streuung. Sichtlich steigt der Einfluss der baukonstruktionsabhängigen Parameter mit größerem Fensterflächenanteil an. Bei vorhandener Personenbelegung besitzen die Nutzungseffekte den größten Anteil an der Streuung und erweisen sich folglich als die ausschlaggebenden Parameter.

Die aufgeführten Effekte und deren verschiedene Ausprägungen in den einzelnen Kategorien zeigen die hohe Relevanz, mögliche Unsicherheiten und Parametervariationen in eine Bewertung mit einzubinden. Ihr Einfluss und die Verteilung hängen von der Art der Raumbelüftung, über Fenster oder über Lüftungsanlage, ab. Selbst unter gleichen Anlagentypen verändern sich die Einflussstärken der Untersuchungsparameter. Insbesondere der sehr große Anteil an der Streuung durch das Nutzerverhalten sollte angemessen beachtet werden. Mit Hilfe der Sensitivitätsindizes können energetische Effekte den Untersuchungsparametern klar zugewiesen, mögliche Einsparpotenziale abgeschätzt und der wahrscheinliche Eintritt beurteilt werden. Eine energetische Bewertung wird somit sicherer und leichter nachvollziehbar.

### 3.2.5 Ergebnisvergleich: Referenzraummethode gegenüber vollständigem Gebäudemodell

Die Berechnungsergebnisse werden hinsichtlich ihrer Berechnungsgenauigkeit und Berechnungszeit validiert.

#### 3.2.5.1 Berechnungsgenauigkeit am Beispiel des Heizenergiebedarfs

Zur Beurteilung der Ergebnisqualität wird als Beispiel der berechnete Heizenergiebedarf aus der Referenzraummethode (RRM) mit dem Gebäudemodell als Referenz verglichen. Bereits ohne Korrekturverfahren erreicht die RRM fast den Referenzwert des Gebäudemodells. Die RRM berechnet dabei über alle Case-Studies hinweg einen niedrigeren Heizenergiebedarf. Das auf dem A/V-Verhältnis basierende Korrekturverfahren reduziert die absolute Abweichung, wobei es die Abweichungen, die auf das fehlende Gebäudegeometriemodell zurückzuführen sind, nicht vollständig ausgleichen kann. Die geringen mittleren relativen Abweichungen zeigen, dass die RRM anhand der ausgewählten Untersuchungsparameter und Flächendaten den Heizenergiebedarf in ausreichender Genauigkeit bestimmen kann. Die Streuung und die Sensitivität der Heizenergie werden in der RRM und im Gebäudemodell gleich abgebildet. Hierbei liegt die Standardabweichung der jeweiligen Case-Study auf fast gleichem Niveau. Die RRM weist geringfügig höhere Variationskoeffizienten aus und reagiert folglich etwas sensitiver gegenüber den Variationen der Eingangsparameter.

Neben der Genauigkeit der Berechnung ist die Abbildung des Energieverhaltens ebenso relevant. Das

bedeutet, dass die RRM in der Lage sein muss, die durch Veränderungen der Parameter unterschiedlichen Energiebedarfswerte in gleicher Art und Weise wiederzugeben. Hierzu werden zuerst die Ergebnisse aus der Berechnung der RRM und des Gebäudemodells mit Hilfe einer Regression in Abb. 3-14 gegenübergestellt.

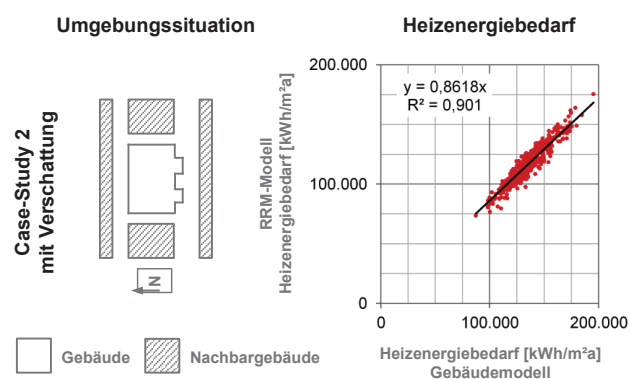


Abb. 3-14 Verhalten des Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit von der Umgebungssituation (Regel, 2016)

Die RRM würde das Verhalten des Gebäudes zu 100% abbilden, wenn Regressionskoeffizient  $b_1$  und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gleich 1 sind. Der Regressionskoeffizient  $b_1$  gibt dabei an, ob die RRM im Vergleich zum Gebäudemodell den Heizenergiebedarf über- ( $b_1 > 1$ ) oder unterbewertet ( $b_1 < 1$ ). Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gibt dabei an, ob die im Gebäudemodell enthaltene Streuung durch die RRM vollständig ( $R^2 = 1$ ) beschrieben werden kann. Als Beispiel wird die Case-Study 2 verwendet. In Abb. 3-14 sieht man anhand der Faktoren, dass die RRM den Energiebedarf und dessen Verhalten angemessen abbilden kann (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,9$ ,  $b_1 = 0,86$ ). Es zeigt sich anhand der weiteren Case-Studies, dass die Ergebnisqualität mit der Ähnlichkeit zum Gebäudemodell des Korrekturverfahrens ansteigt. Die Regressionskoeffizienten  $b_1$  und die Werte für das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nähern sich dem Wert 1 an. Die Berechnung des Kühlenergiebedarfs weist eine ähnliche Qualität auf.

#### 3.2.5.2 Bewertung der Genauigkeit der Sensitivitätsindizes

Die richtige Identifikation der Sensitivitätsindizes ist für eine Bewertung von Interesse. Entscheidend ist dabei, die relevanten Parameter und deren Einfluss auf das Ergebnis zu erkennen. In dieser Arbeit beruht die Herleitung der Indizes auf der Varianz. Sie sollte daher zwischen Gebäudemodell und RRM als gleich angenommen werden können. Für die Case-Studies können im Fall der Heizenergie diese Anforderungen

als erfüllt betrachtet werden, für die Kühlenergie gilt dies nicht durchgehend (vgl. Tabelle 7.4 in (Regel, 2016)).

Für die standardisierten Regressionskoeffizienten der Heizenergie weist die RRM die gleichen Parameter in ähnlicher Stärke wie das Gebäudemodell aus. Es erfolgt sowohl eine Über- als auch eine Unterbewertung einzelner Parameter. Die relative Abweichung in der Gewichtung der Parameter nimmt mit steigendem Einfluss eines Parameters ab. Die Bewertungsdifferenz der RRM liegt dabei überwiegend in dem Bereich  $< \pm 30\%$ . Für den Kühlenergiebedarf zeigt sich ein ähnliches Bild. Bis auf wenige Ausnahmen identifizieren beide Modelle die Parameter mit gleicher Wichtigkeit. Jedoch sind hier vereinzelt bei Parametern mit geringem Einfluss deutlich größere Abweichungen bei den Koeffizienten zu erkennen bis hin zu einer fehlenden Identifikation in der RRM.

Neben der qualitativen Einstufung eines Faktors, ob er wichtiger oder unwichtiger ist, erweist sich eine quantitative Aussage, wie groß z.B. der Anteil eines Parameters an der Streuung ist, als viel aufschlussreicher. Es kann somit eine direkte Verbindung zwischen der Änderung eines Untersuchungsparameters (z.B. Absenkung der Raumtemperatur um  $1^\circ\text{C}$ ) und die energetische Auswirkung (z.B. Heizenergiebedarf  $-10\%$ ) hergestellt werden.

Parameter ermitteln.

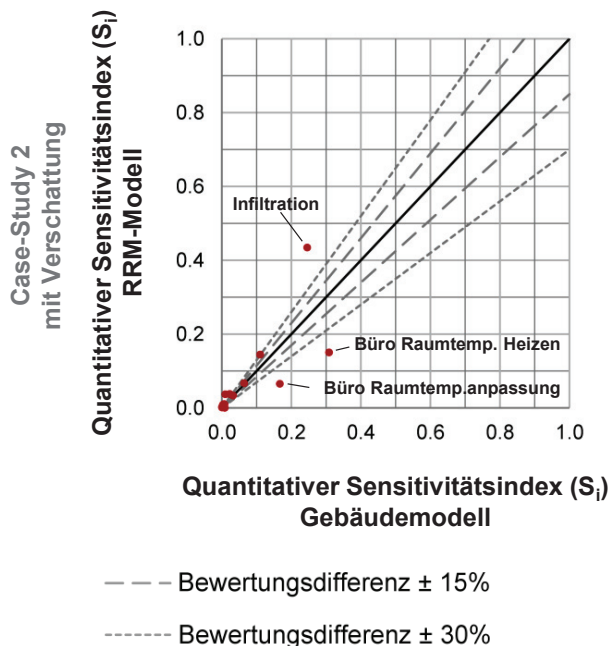


Abb. 3-15 Vergleich der 1st-Order Sensitivitätsindizes  $S_i$  zur quantitativen Bewertung ausgewählter Eingangsparameter der Case-Study 2 (Regel, 2016)

Weiter ist es von Interesse, wie sich bereits die in den standardisierten Regressionskoeffizienten festgestellten Unterschiede auf die Ergebnisqualität der quantitativen Sensitivitätsindizes erster Ordnung auswirken. Die Diskussion erfolgt exemplarisch anhand Abb. 3-15 für die Case-Study 2.

Hinsichtlich des Heizenergiebedarfs kann die RRM mit ausreichender Genauigkeit die gleichen Parameter bestimmen wie das Gebäudemodell. Da in dem angewendeten Verfahren - einfach gesprochen - die Varianz auf die Parameter aufgeteilt wird, zieht eine Überbewertung eines Faktors eine Unterbewertung eines anderen Faktors nach sich. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall. Die jeweils fünf ausschlaggebenden Faktoren können in allen Case-Studies sicher bestimmt werden. Die Identifikation und Gewichtung der Sensitivitätsindizes des Kühlenergiebedarfs gleicht dem Verhalten der Heizenergie. Die RRM kann die Indizes in ansprechender Genauigkeit bestimmen und damit verlässlich die wesentlichen

### 3.2.5.3 Vergleich der Berechnungszeit

Je kürzer die Ausführungszeit einer Methode ist, desto schneller können Ergebnisse diskutiert und bewertet werden. Im Allgemeinen ist der Zeitaufwand zur Berechnung der Ergebnisse in dynamischen Methoden sehr hoch. Ursache sind die vielen zu lösenden Gleichungen im Modell. Dies führt zum einen dazu, dass in der Praxis dynamische Simulationsverfahren für Gebäude, wenn überhaupt, nur für Detailuntersuchungen eingesetzt werden. Zum anderen, dass infolge der hohen Berechnungszeiten statistische Methoden, wie die Monte Carlo Simulation, nur selten angewendet werden, um Eingaben in das Modell zu verifizieren oder deren Auswirkungen auf die Ergebnisse zu bewerten. Gebäudemodelle mit einer hohen Anzahl an einzelnen Zonen benötigen nochmals mehr an Berechnungszeit. Mit der RRM kann dahingehend eine Zeitersparnis von mindestens 85% erreicht werden. Auch wenn für das Gebäudemodell die Berechnungszeiten noch als akzeptabel erscheinen, kann mit Hilfe der RRM viel häufiger eine Überprüfung der Eingaben und der Ergebnisse erfolgen. Eine Fehlerkorrektur ist somit deutlich einfacher möglich. Findet zusätzlich der Aufwand für die Parametrierung Beachtung, dann wird die RRM gegenüber dem Gebäudemodell wegen der viel einfacheren Definition der Modellgeometrien ein weiteres Mal Zeit einsparen. Der Fokus auf einzelne Referenzräume erlaubt somit in der Gebäudebewertung eine erfolgreiche Integration von statistischen Methoden bei gleichzeitig niedrigen Berechnungszeiten.

### 3.2.6 Referenzraummethode: Schlussfolgerungen und Limitierungen

Der Fokus der Referenzraummethode liegt auf Nutzungsarten. Darauf aufbauend wird der Gebäudeenergiebedarf entwickelt. Wie sich der Energiebedarf von Nutzungen auf die Veränderung einzelner Parameter verhält, kann mit Hilfe des Variationskoeffizienten als Maß der Sensitivität ausgedrückt werden. In den durchgeführten Studien wird der Einfluss der Nutzung deutlich. Bereits bei moderaten Veränderungen der Eingangsparameter sind deutliche Veränderungen im Ergebnis festzustellen. Dies zeigt wie essentiell es ist, mögliche Unsicherheiten und Parametervariationen im Rahmen einer Bewertung zu beachten. Die Referenzraummethode kann den Energiebedarf und die wesentlichen Einflussfaktoren schnell und mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stellen. Dabei reagiert sie dank ihres modularen Aufbaus in der Berechnungsmethodik flexibel auf die bauliche und technische Vielfalt sowie auf die Vielzahl an Nutzungsarten. Für jedes Gebäude kann somit auf eine einfache Art und Weise der individuelle Gebäudeenergiebedarf bestimmt werden. Darüber hinaus erlaubt es der modulare Ansatz der Referenzraummethode, die unterschiedlichen Dimensionen, beginnend vom Raum über das Gebäude bis hin zum Quartier, energetisch zu bewerten und die gewonnenen Erkenntnisse in Szenarien zur Erkennung von spezifischen bis hin zu übergeordneten Sanierungsmaßnahmen zu verwenden.

Die Referenzraummethode verzichtet auf ein detailliertes Gebäudegeometriemodell und in der aktuellen Version auf eine Modellierung der Umgebung. Höhere Abweichungen sind bei Gebäuden zu erwarten, deren Entwurf dem solaren Ertrag einen hohen Stellenwert zuweist. Die Genauigkeit der Hochrechnung in der Referenzraummethode profitiert von strahlungsunabhängigen Einflussgrößen, wie sie typischer Weise durch innere Lasten oder bei der Zuluftaufbereitung entstehen. Je größer deren Anteil in der Gesamtenergiebilanz im Energiemodell ist, desto genauer wird die Hochrechnung ausfallen. Zur Bestimmung der quantitativen Sensitivitätsindizes sind lineare Regressionsmodelle als Gebäudeersatzmodell eingesetzt worden. Gebäude besitzen bezüglich des Energiebedarfs kein vollständig lineares Verhalten. In Verbindung mit den Regressionsmodellen kann dies in der Berechnung der Sensitivitätsindizes zu Ungenauigkeiten führen, obwohl die Qualitätskriterien für das Regressionsmodell erfüllt sind. Das entwickelte A/V-Korrekturverfahren erfolgt aktuell auf Basis einer einzigen Gebäudegeometrie, dem Zweibund. Hierbei sind verschiedene Längen-Breite-Höhen-Verhältnisse nur unzureichend berücksichtigt. Sie können sich

aber sehr deutlich in Abhängigkeit von der gewählten Gebäudeform unterscheiden. Das Längen-Breite-Höhen-Verhältnis spielt im Korrekturverfahren mit hinein, denn der energetische Austausch der Referenzzone mit einer einzigen Außenwand wird darüber auf das Gesamtgebäude skaliert.

## 3.3 Energiemanagementprozess und Quick-Check-Tool QCT

Im folgenden Kapitel wird ein Energiemanagementprozess für Liegenschaften erläutert sowie das hierfür entwickelte QuickCheck-Tool vorgestellt.

### 3.3.1 Energiemanagementprozess

Viele Hochschulgebäude werden heute noch intuitiv betrieben. Um die Umstellung auf einen energieorientierten Gebäudebetrieb zu schaffen, soll stufenweise ein Energiemanagement eingeführt werden. Um diese Aufgaben zu bewältigen, bedarf es eines Energiemanagementsystems, das die zur Verwirklichung des Energiemanagements erforderlichen Organisations- und Informationsstrukturen einschließlich der hierzu benötigten technischen Hilfsmittel (z.B. Software und Hardware) umfasst.

Unter Energiemanagement wird entsprechend der Norm DIN EN ISO 50001:2011-12 eine vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung der Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen verstanden. Es geht also um die Gesamtheit miteinander zusammenhängender oder interagierender Elemente zur Einführung einer Energiepolitik und strategischer Energieziele sowie Prozesse und Verfahren zur Erreichung dieser strategischen Ziele.

Das Energiemanagement folgt dem sogenannten PDCA-Kreislauf, (Plan, Do, Check, Act), um einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu ermöglichen. Im Rahmen der Planung (PLAN) werden zunächst Daten gesammelt, wie Energieverbräuche, Anlagenbestand, Nutzungsrahmenbedingungen und Gesetzesvorschriften. Hieraus werden entsprechende Ziele aufgestellt und eine Energiepolitik entwickelt, die in einem Energiemasterplan mit dem Zeithorizont bis 2050 (vgl. Kapitel 5) zusammengefasst werden. In der Do-Phase werden die gestellten Ziele durch konkrete Maßnahmen, Kommunikation, Einbeziehung der Nutzer und Schulung von Energiemanagermitgliedern bzw. des Betriebspersonals umgesetzt. Nach

Ablauf eines während der Planung zur Erreichung der Energieziele festgelegten Zeitraums werden die Ergebnisse überprüft (CHECK) und weitere Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet (ACT). Um Hochschulen bei der Einführung eines Energiemanagements zu unterstützen, werden in einem ersten Schritt differenzierte Energiemanagementniveaus untersucht, die eine Abschätzung des notwendigen Aufwandes ermöglichen. Hieraus wird ein Stufenplan

entsprechend der Abb. 3-16 entwickelt, der einen wiederkehrenden Prozess zur kontinuierlichen Verbesserung ermöglicht. Dieser Energiemanagementstufenplan stellt eine Zusammenfassung der für die Energiemanagementeinführung notwendigen Prozesse und die sinnvolle Reihenfolge zu deren Realisierung dar. Die Rückwirkung der einzelnen Stufen soll fortlaufend Berücksichtigung finden.

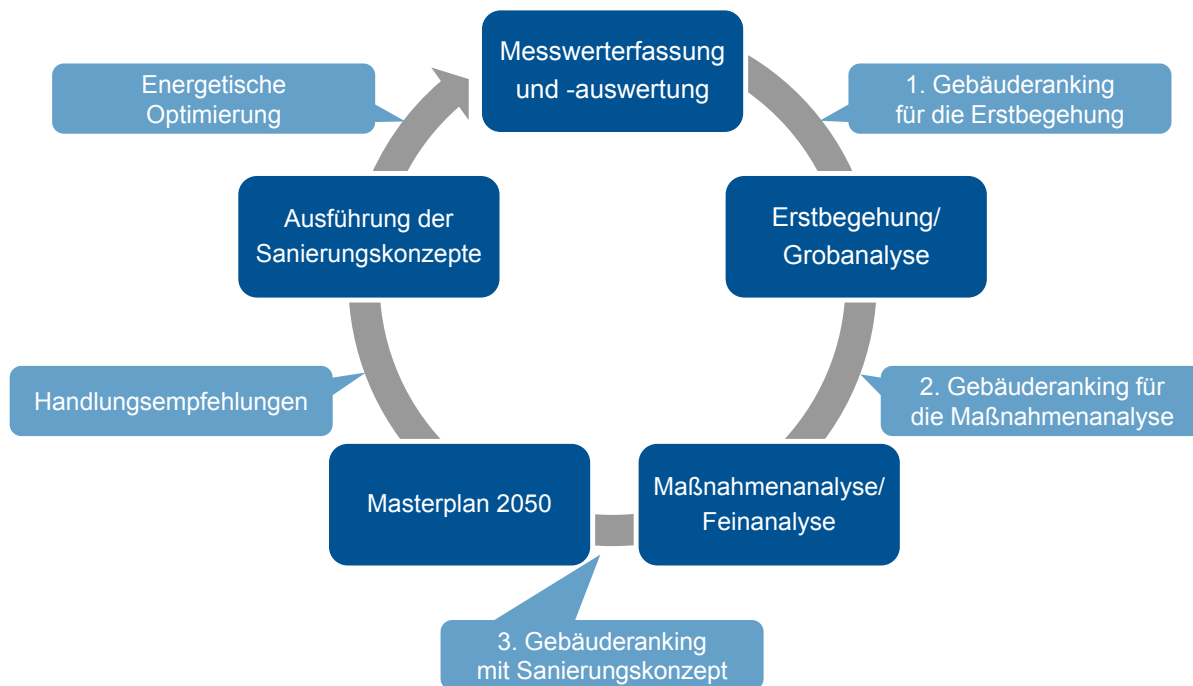


Abb. 3-16 Energiemanagementstufenplan mit kontinuierlichem Verbesserungsprozess (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 3: Energiemasterplan und das erforderliche Management“, Brochier/Assmann)

Für ein erfolgreiches Energiemanagement bedarf es eines organisationsspezifischen Energiecontrolling-Netzwerkes, das eine geeignete Zählerstruktur und technische Infrastruktur beinhaltet. Das Zählerkonzept zur Verbrauchserfassung, die passende Methode der Zählerauslesung, die Gebäudeautomation und auf die Komponenten abgestimmte Energiecontrolling-Software bilden das Fundament für ein funktionierendes Energiemanagement.

auf der zu erwartenden Höhe der Energieeinsparung auf Grund konkreter energetischer Schwachstellen basiert. Für Hochschulgebäude mit schlechten bauphysikalischen und anlagentechnischen Eigenschaften wird daraufhin eine Feindiagnose durchgeführt, um Energie- und Kosteneinsparungen genau zu berechnen. Diese Untersuchung bietet eine Grundlage für die Erstellung eines energetischen Sanierungskonzeptes.

Nach dem Ausbau des Energiecontrolling-Netztes und Auswertung der Ergebnisse können im Rahmen des ersten Gebäuderankings die Gebäude mit dem höchsten Verbrauch herauskristallisiert werden. Diese werden anschließend einer Begehung und Grobdiagnose unterzogen. Die Ursachen der hohen Energieverbräuche können identifiziert und erste Energiesparmaßnahmen beschrieben werden. Hieraus entwickelt sich ein zweites Gebäuderanking, das

Die energetischen Sanierungskonzepte werden anschließend mit den Zielen des Energiemasterplan 2050 (vgl. Kapitel 5) abgeglichen und insbesondere die Abhängigkeiten zu Zeit- und Ressourcenplanung geprüft. Hieraus werden Handlungsempfehlungen als Entscheidungsvorlage für die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen aufgestellt, die den entsprechenden Entscheidungsträgern bereitgestellt werden.

Der Energiemanagementstufenplan ist so aufgebaut, dass die Anzahl der zu untersuchenden Gebäude mit steigendem Untersuchungsaufwand sinkt. Nach einer erfolgreichen Einführung des Energiemanagements ist es sinnvoll, die Vorgehensweise des Stufenplans regelmäßig zu wiederholen. Dies dient einer sukzessiven Anpassung des Energiecontrolling Netzes an die Anforderungen des Hochschulenergiemanagements, ständigen Überwachung der Verbräuche und Energiekosten und ermöglicht eine kontinuierliche Steigerung der Gebäudeeffizienz.

Als Voraussetzung für ein erfolgreiches Energiemanagement ist die Berufung eines Energieteams erforderlich, das die Einführung und die Umsetzung des Energiemanagements begleitet. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Hochschulleitung, die für die erforderlichen Ressourcen (Finanzbudget, Personal etc.) zuständig ist und der Energiemanager, der von der Hochschulleitung ernannt wird und als verantwortlicher Projektleiter agiert. Die beiden Akteure werden außerdem von weiteren Mitarbeiter aus den Fachbereichen unterstützt. Im Rahmen der Teambildung werden die Befugnisse und Aufgaben der Teammitglieder geklärt und dokumentiert.

Für die Analyse des Gebäudebestandes gemäß des Energiemanagementstufenplanes im Rahmen der

1. Auswertung von Messwerten,
2. Erstbegehung und
3. Maßnahmenanalyse

wurde das QuickCheck-Tool als unterstützendes Werkzeug entwickelt. Dabei werden Berichte für verschiedene Stufen dieses Gebäuderankings und seiner Nutzergruppen erstellt.

### 3.3.2 QuickCheck-Tool

Die im Projekt entwickelten Werkzeuge und Methoden für das Energiemanagement werden mit dem Ziel erstellt, die Daten Aus- und Bewertung sowie die Datenerhebung zu beschleunigen und zu erleichtern. Das QuickCheck-Tool stellt die Umsetzung der Methoden in einer Softwareumgebung dar. Im Verlaufe der Projektlaufzeit werden die Ergebnisdarstellungen im QCT mit der betroffenen Fachabteilung der LMU entwickelt und dabei an deren Bedarf und Arbeitsabläufe angepasst.

Zu jeder Stufe des Energiemanagementprozesses wird eine Rangordnung der Gebäude innerhalb des Werkzeugs QuickCheck-Tool entwickelt. Das Quick-

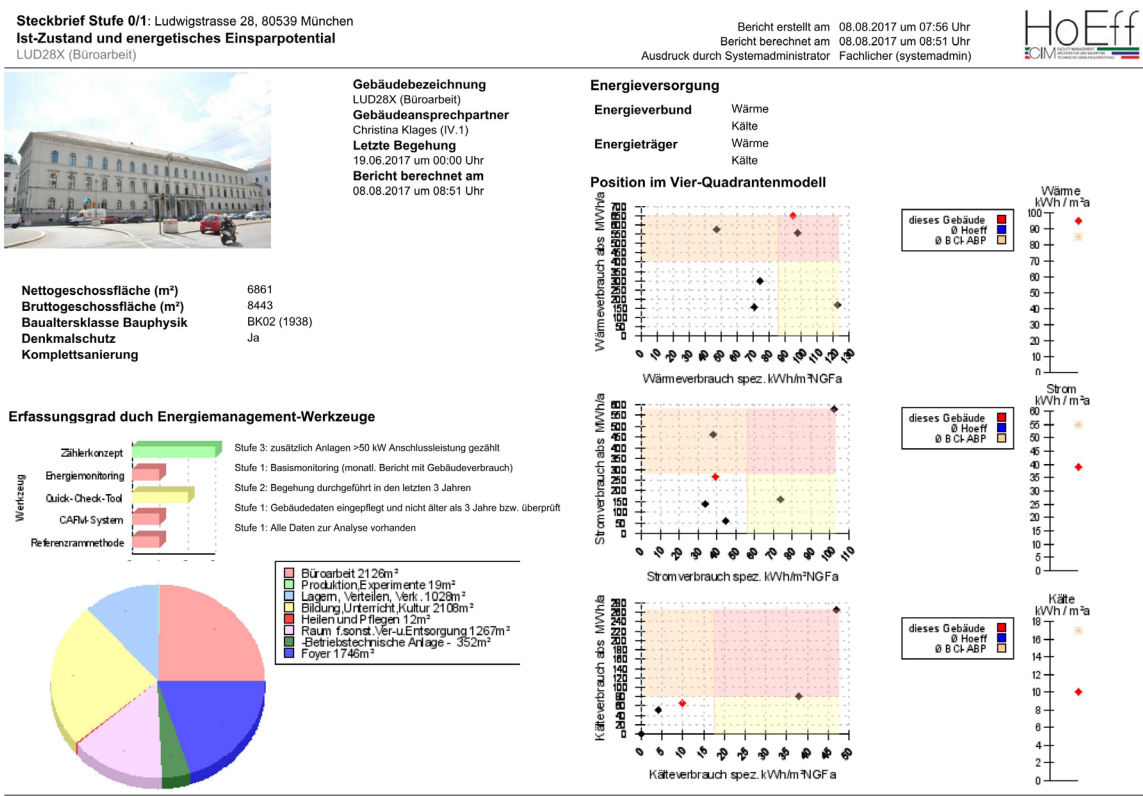
Check-Tool ist so aufgebaut, dass es auf den ersten beiden von drei Stufen des Energiemanagement-Stufenplans die Gebäudedatenerfassung unterstützt, Daten speichert und automatisiert einen Bericht erstellt. In jeder Stufe der Bewertung gibt es einen gebäudespezifischen und einen campusübergreifenden Bericht. Der Campus-Bericht macht eine Eingrenzung der weiter zu betrachtenden Gebäude und Gebäudegruppen möglich.

Die Darstellung der Ergebnisse der ersten Ebene erfolgt auf Gesamt-Gebäudeniveau. Die Daten aus der CAFM-Software FAMOS der LMU werden dafür ausgewertet und dargestellt. Im Gebäudesteckbrief der ersten Stufe werden insbesondere die wichtigsten energetischen Daten des Gesamtgebäudes zusammengefasst dargestellt. Ihr Verlauf über die Zeit wird analysiert. Dabei wird nach den verschiedenen Energieformen Wärme, Kälte und Strom unterschieden. In einem Scatterplot der spezifischen über den absoluten Wärmeverbrauchswertes aller Gebäude des Campus wird das betrachtete Gebäude farblich hervorgehoben. Das Diagramm wird zudem farblich in vier Quadranten eingeteilt. Die spezifischen Energieverbrauchskennwerte werden mit den durch die Referenzmethode berechneten Werten für alle erfassten und ausgewerteten Jahre verglichen. Ein Beispiel für einen Gebäudesteckbrief der ersten Stufe ist in Abb. 3-17 dargestellt.

Der Steckbrief dokumentiert zudem den Erfassungsgrad durch Energiemanagement-Werkzeuge. Dabei wird der Status des Zählerkonzepts, des Energiemonitorings, der Daten im CAFM-System, sowie die Erfassung und Abbildung im Rahmen der Referenzraummethode und QCT vermerkt. Die Nutzungsarten werden nach Flächenanteil gewichtet als Tortendiagramm abgebildet. Allgemeine Daten des Gebäudes, wie Adresse, Fläche, Baualtersklasse, Sanierungszeitpunkte und Denkmalschutz, werden zusammengefasst. Das Gebäude wird über ein Foto dargestellt.

In den beiden automatisiert erstellten Campus-Rankings werden alle erfassten Gebäude über die 4-Quadranten-Methode miteinander verglichen. Beim ersten Campus-Ranking wird der absolute Endenergieverbrauch dem spezifischen Energieverbrauch gegenübergestellt. So können Gebäude mit einem hohen absoluten Energieverbrauch und einem hohen spezifischen Energieverbrauch identifiziert werden. Ungeachtet der Ursache für den hohen Verbrauch ist hier eine hohe Wirksamkeit von Einsparmaßnahmen zu erwarten. Alle erfassten Gebäude werden zudem in einer Listenansicht geordnet nach ihrer Einordnung in die 4 Quadranten dargestellt (siehe Abb. 3-18). In der Liste werden zudem Energieverbrauchsdaten,

### 3 Werkzeuge zur Datenaufnahme und Bewertung von Campus-Liegenschaften | Energiemanagementprozess und QuickCheck-Tool QCT



Seite 1 von 3

Abb. 3-17 Beispiel für einen Gebäudesteckbrief der ersten Stufe im QCT (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann)

Informationen zu einem geplanten Abriss, laufende Sanierungen sowie der Erfassungsgrad durch Energiemanagement-Werkzeuge vermerkt.

Im HoEff-CIM Gebäudebewertungsprozess findet auf der zweiten Ebene eine Gebäudebegehung statt. Diese Begehung erfolgt aufgrund der Auswahl von Gebäuden aus der ersten Campus-Rangordnung. Ziel von Ebene Zwei der Gebäudebegutachtung ist das Bilden einer Rangfolge der Gebäude nach einer Ist-Analyse für eine anschließende detaillierte Maßnahmenanalyse. Im Anschluss an die Begehung mit dem QuickCheck-Tool wird automatisiert eine Bewertung von typischen Schwachstellen vorgenommen. Diese zweite Rangfolge dient der Identifikation, Visualisierung und Vergleichbarkeit von energetischen Optimierungspotentialen und bietet zudem eine erste quantitative Abschätzung des Einsparpotentials. Die Gebäudeanalyse mit dem QCT ermöglicht somit die komprimierte Dokumentation der Begehung sowie eine Identifikation der Schwachstellen.

Der Gebäudesteckbrief der zweiten Stufe fasst die Abschätzung des energetischen Einsparpotentials eines begangenen Gebäudes zusammen. Das energetische Einsparpotential wird in einer farblichen Skala eingezeichnet. Auf derselben Skala wird zum

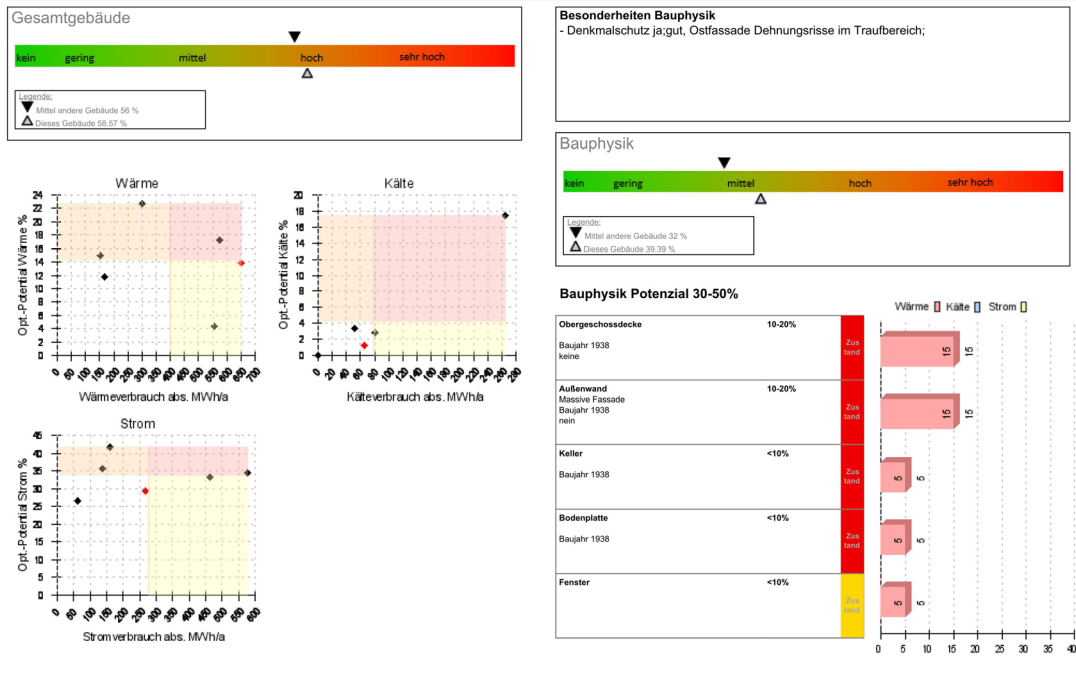
Vergleich der Mittelwert des Einsparpotentials aller im QCT erfassten Gebäude markiert. Diese Darstellung wird auch für die potentiellen Einsparungen bei der Bauphysik oder Anlagentechnik verwendet. Zusätzlich wird in einem Scatterplot das energetische Einsparpotential aller erfassten Gebäude des Campus über den absoluten Energieverbrauch aufgetragen und das betrachtete Gebäude dabei farblich hervorgehoben. Diese Darstellung wird getrennt für die Energieformen Wärme, Kälte und Strom abgebildet (siehe Abb. 3-19).

Der Steckbrief stellt zudem die potentiellen Einsparungen bei einer Sanierung einzelner Aspekte des Gebäudes dar. Diese sind einsortiert in die Bereiche Bauphysik oder Anlagentechnik. Die Bauphysik wird in die Aspekte obere Geschossdecke, Außenwand, Keller, Bodenplatte und Fenster unterteilt. Die Anlagentechnik unterscheidet die Bereiche Heizung, Kälte, Lüftung und sonstiges Potential. Der Bereich Heizung wird untergliedert in Wärmeerzeuger, Wärmespeicher, Verteilung und Übergabe. Kälte umfasst Kälteerzeugung, Kälteverteilung und Kälteübergabe. Der Bereich Lüftung wird unterschieden in Lüftungsanlage/Luffförderung, Luftverteilsystem und Luftaufbereitung.



Steckbrief Stufe 2: Ludwigstrasse 28, 80539 München  
 Ist-Zustand und energetisches Einsparpotential  
 LUD28X (Büroarbeit)

Bericht erstellt am 08.08.2017 um 07:56 Uhr  
 Bericht berechnet am 08.08.2017 um 08:51 Uhr  
 Ausdruck durch Systemadministrator Fachlicher (systemadmin)



Seite 2 von 3

Abb. 3-18 Beispiel für eine Campus-Rangordnung der ersten Stufe im QCT (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann)

Steckbrief Stufe 2: Ludwigstrasse 28, 80539 München  
 Ist-Zustand und energetisches Einsparpotential  
 LUD28X (Büroarbeit)

Bericht erstellt am 08.08.2017 um 07:56 Uhr  
 Bericht berechnet am 08.08.2017 um 08:51 Uhr  
 Ausdruck durch Systemadministrator Fachlicher (systemadmin)



Seite 3 von 3

Abb. 3-19 Beispiel für einen Gebäudesteckbrief der zweiten Stufe im QCT - Darstellung der gebäudetechnischen Sanierungspotentiale (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann)

Die Aspekte Beleuchtung und Gebäudeautomation sind im Bereich Sonstiges zu finden. Für die potentielle Energieeinsparung in allen Bereichen sowie die einzelnen Aspekte werden ein Balkendiagramm sowie eine farbliche Hervorhebung in einem Ampelsystem dargestellt. In den Balkendiagrammen wird das Einsparpotential zusätzlich in die Energieformen Wärme, Kälte und Strom unterteilt. Für die einzelnen Aspekte werden zudem die wichtigsten Eingaben im QCT aufgelistet, die für die Abschätzung des Potentials verwendet wurden.

Die zweite Campus-Rangordnung bietet eine Listenansicht aller erfassten Gebäude, für die eine Auswertung entsprechend der zweiten Ebene des entwickelten Managementsystems durchgeführt wurde. Grundlage für die Bewertung ist eine Gebäudebegehung und Dateneingabe in das QCT. Die Gebäude werden in der Listenansicht entsprechend des ermittelten gesamten Energieeinsparpotentials sortiert. Diese Liste enthält im Vergleich zur Campus-Rangordnung der ersten Stufe zusätzliche Einträge zum Einsparpotential für die Bereiche der Anlagentechnik

Wärme, Kälte, Lüftung und Sonstiges sowie die Aspekte Obergeschosdecke, Außenwand, Keller, Bodenplatte und Fenster des Bereichs Bauphysik. Ergänzt wird die Listenansicht durch eine 4-Quadranten-Darstellung der spezifischen Energieverbräuche über das Optimierungspotential aller Gebäude.

Eine Übersicht des Ablaufs des Bewertungsmechanismus zur ersten Quantifizierung des energetischen Einsparpotentials ist in Abb. 3-20 dargestellt. Prinzipiell wird dafür zunächst der Endenergiebedarf des betrachteten Gebäudes abgeschätzt. Dazu werden Eingaben im QCT zu Nutzung, Zustand der Bauphysik und Anlagentechnik verwendet. Für die Bewertung von einzelnen Optimierungsmaßnahmen wird anschließend der Endenergiebedarf des Gebäudes nach Sanierung erneut berechnet. Dabei wird ceteris paribus eine durch die Optimierung erfolgte zusätzliche Energieeinsparung bzw. Wirkungsgradverbesserung berücksichtigt. Die Differenz des Endenergiebedarfs für den Ist-Zustand und für den Zustand nach Sanierung entspricht der Endenergieeinsparung durch die Sanierungsmaßnahme.

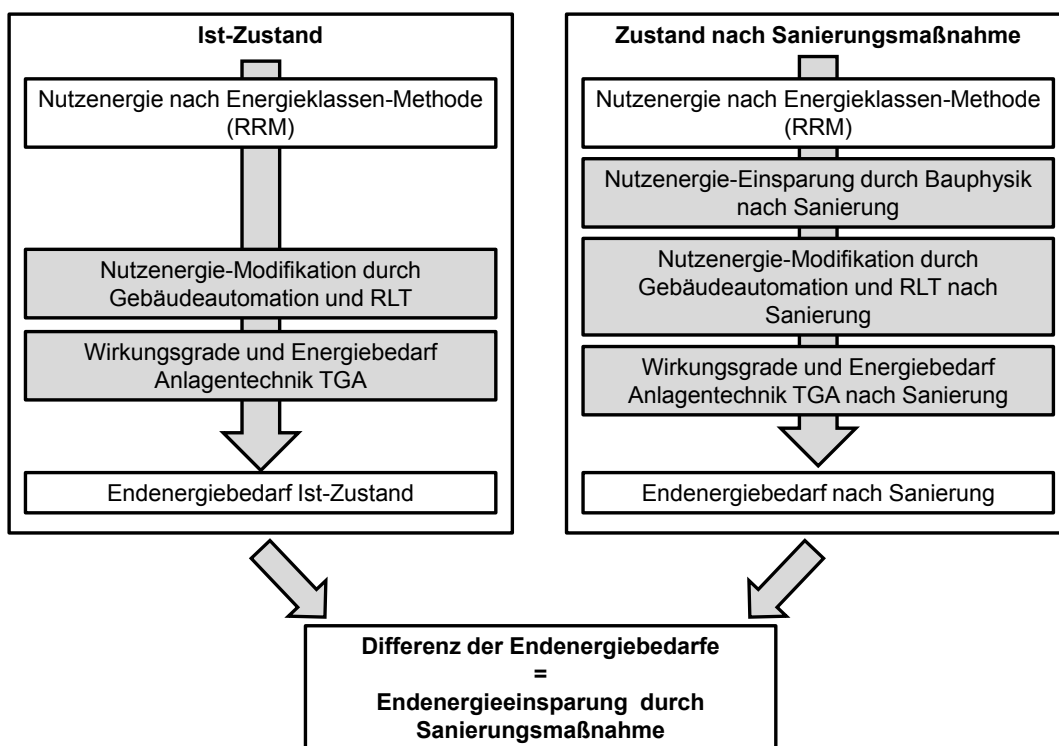


Abb. 3-20 Mechanismus der energetischen Bewertung von Sanierungsmaßnahmen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann)

Zur Ermittlung des Nutzenergiebedarfs im Ist-Zustand wird zunächst der generelle Nutzenergiebedarf des betrachteten Gebäudes mit der im Projekt entwickelten Referenzraummethode auf der Basis der Nutzung abgeschätzt. Die ermittelte Nutzenergie für Heizen wird entsprechend des Verhältnisses der Leistungen von Heizung zu Heizregister der RLT auf Wärme und Wärme in RLT aufgeteilt. Analog wird die Nutzenergie Kälte entsprechend des Verhältnisses der Leistungen von Kälteanlage zu Kühlregister der RLT in Kälte und Kälte in RLT differenziert.

Entsprechend der Eingaben im QCT wird aus diesem Nutzenergiebedarf der Endenergiebedarf errechnet. Dabei werden zunächst Modifikationen des Nutzenergiebedarfs durch Gebäudeautomation und Raumlufttechnik berücksichtigt. Anschließend werden Wirkungsgrade und Verluste in Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe eingerechnet. Für den Zustand nach Sanierung wird eine analoge Berechnung durchgeführt. Dabei werden zusätzlich Nutzenergieeinsparungen durch Sanierung der Bauphysik berücksichtigt. Der Endenergiebedarf und daraus abgeleitet die Endenergieeinsparung wird ausgewiesen für Wärme, Kälte und Strom. Unter „Wärme“ werden dabei Wärme, Wärme (RLT) und Trinkwarmwasser zusammengefasst. „Kälte“ umfasst Kälte und Kälte (RLT). Unter Strom werden RLT und Strom sowie Hilfsenergien zusammengefasst.

Das QuickCheck-Tool liefert dem Nutzer als Ergebnis eine Bewertung aller Baugruppen des Gebäudes hinsichtlich ihres energetischen Optimierungspotentials. Es gibt darüber Auskunft, welchen energetischen Standard die betrachtete Baugruppe im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik besitzt. Dieses Optimierungspotential dient als erste Abschätzung eines energetischen Einsparpotential ceteris paribus, da Maßnahmen auf einzelne Bauteile die Performance einer anderen Baugruppe beeinflussen und deren Einsparpotential reduzieren. Baugruppen oder Bauteile, die im 2.Ranking besonders hervorgehoben werden, sollten in der 3. Ebene des Gebäudescreenings einer detaillierten Betrachtung durch einen Experten unterzogen werden.

Bei der Ermittlung des Energieeinsparpotentials ist der Fokus auf das Wesentliche zu richten. Auf der einen Seite führen zu detaillierte Berechnungen, einhergehend mit einer hohen Anzahl an benötigten Eingaben, zu umfangreichen Gebäudebegehungen. Auf der anderen Seite erhöhen oberflächliche Betrachtungen die Ungenauigkeit des Ergebnisses, was wiederum zu einer starken Minderung der Aussagekräftigkeit des Reports führen kann. Die im QCT eingesetzten Berechnungen basieren in der Regel

auf DIN-Normen sowie technischen Verordnungen. Im Falle eines zu großen Umfangs mit zahlreichen für eine Berechnung nötigen Eingabewerten, wurden diese mithilfe gezielter Vorplanung auf ihre einflussreichsten Faktoren gekürzt, vereinfachende Annahmen getroffen und somit das Verhältnis aus einer sinnvollen Anzahl von Eingabewerten sowie einer ausreichenden Genauigkeit des Endergebnisses bewahrt. Je nach untersuchter Komponente führen die Eingaben zu Einsparungen im Bereich der Wärme, der Kälte und/oder der Lüftung. Das vorgestellte QCT und die angesetzten energetischen Einsparpotentiale werden im Berichtsanhang zur Gebäudetechnik detailliert erläutert.

Mit dem dargestellten Berechnungsansatz und der Art der Ergebnisdarstellung im QCT steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem CAFM-Daten und Erkenntnisse aus der Begehung gezielt für die Auswahl detaillierter zu betrachtender Gebäude eines Campus aufbereitet werden. Im den folgenden Schritten des Energiemanagementprozesses wird für die genaue Analyse der Baugruppen ein Fachplaner hinzugezogen. Die tatsächliche Performance einer Anlagentechnik, und damit die Energieeinsparung und die Amortisation einer Sanierung als komplexes System aus Einzelkomponenten verschiedener Stände der Technik kann nicht allein und abschließend durch Angabe eines Bau- oder Sanierungsjahres bewertet werden. Stattdessen muss ein fachplanerischer Entwurf inklusive Kostenschätzung erarbeitet werden. Die Übertragbarkeit eines Maßnahmenpaketes auf eine andere Ausgangssituation ist nur in gewissem Maße gegeben. Das QCT liefert für das große Gebäudeportfolio eines Campus in dem Spannungsfeld von notwendigen Informationen zu einzelnen Gebäuden und Belastbarkeit der Ergebnisse die Ansatzpunkte für die eingehenden Untersuchungen durch einen Fachplaner.



## 4 Entwicklung und Ranking von Sanierungsmaßnahmen

Der Arbeitskreis Hochschulbau hat gemeinsam mit der HIS-Hochschulentwicklung im Rahmen einer Studie herausgefunden, dass an staatlichen Hochschulen bereits ein Sanierungsstau von ca. 30 Mrd. € vorliegt (Stibbe & Stratmann, 2014, S.3). Dieser Wert bezieht sich auf Angaben zum Bauunterhalt, zur baulichen Anpassung sowie zu kleinen und großen Baumaßnahmen in den Jahren 2008 bis 2012. Neu erstellte Flächen wurden nicht berücksichtigt. Dem gegenüber steht eine durchschnittliche Jahresausgabe von rd. 1 Mrd. €. Allein in den Jahren 2008 bis 2012 entstand ein bundesweites Finanzierungsdefizit von 3,14 Mrd. €. (ebd., S.36-38)

Der Studierendenzuwachs von 19% und der Flächenzuwachs von 35% von 2008 bis 2012 lässt die Erhöhung der Sanierungsraten bis 2050 erahnen (ebd., S.43). An Hand dieser Angaben zeigt sich die Notwendigkeit eines Sanierungsrankings, um Maßnahmen mit dem größten Wirkungspotential identifizieren und die vorhandenen Mittel gezielt einsetzen zu können.

### 4.1 Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen

Ziel ist die Identifizierung nachhaltiger Sanierungsmaßnahmen, die sowohl aus energetischer als auch aus ökologischer sowie ökonomischer Sicht sinnvoll erscheinen. Wirkungspotentiale signifikanter Sanierungsmaßnahmen sollen übersichtlich vorgestellt werden, um die effizientesten Maßnahmen ermitteln zu können.

Als Energieziele werden der EnEV-Standard 2014 sowie der Niedrigstenergiestandard (NE) definiert, der in Anlehnung an den Passivhausstandard festgelegt wird. Der Niedrigstenergiestandard, der ab 2020 eingeführt werden soll, ist bisher nicht allgemeingültig festgelegt. Aus diesem Grund dient dieser Standard als Ausblick zur Einhaltung der Vorgaben der Bundesregierung, um einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 zu erlangen.

Das Sanierungsranking soll Liegenschaften, wie die der LMU München, bei der Wahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen unterstützen und vorab mögliche Potentiale je Baualtersklasse und Bauteil ausweisen. Es soll als Leitfaden dienen, um zukünftig die Wirkungsfaktoren schneller abschätzen und einordnen zu können.

Die Sanierungsmaßnahmen werden je Bewertungskriterium (Energie, Ökologie und Ökonomie) in fünf Wirkungskategorien unterteilt (sehr gut – gut – mittel – mangelhaft – schlecht). Die spezifische Einteilung der Kategorien und die jeweiligen Bewertungskriterien werden in Kapitel 4.1.1.1, 4.1.1.2 bzw. 4.1.1.3 vorgestellt. Detaillierte Informationen zum Sanierungsranking, seine Anwendungsbereiche und die Methodik können dem Teilbericht „Bericht Arbeitspaket 4: Ranking Sanierungsmaßnahmen“ der TU München entnommen werden.

Ferner werden die Sanierungsprioritäten in Abhängigkeit des konstruktiven Zustands der Bausubstanz festgelegt. Dazu werden im Projekt typische Konstruktions- und Bauschäden kategorisiert und in einer Schadensdokumentation zusammengefasst (vgl. Kapitel 4.1.6 bzw. Teilbericht „Bericht Arbeitspaket 3: Schadensdokumentation“ der TU München).

#### 4.1.1 Erarbeitung der Sanierungsmaßnahmen – Grundlagen

Auf Grundlage einer Daten- und Literaturrecherche werden je Baualtersklasse typische Bauteilkonstruktionen in Massiv- und Leichtbauweise identifiziert (ZUB, 2009a; ZUB, 2009b; ZUB, 2010; www.dataholz.at) und mögliche Sanierungsmaßnahmen in Abhängigkeit der konstruktiven und bauphysikalischen Rahmenbedingungen (BMWl & BMUB, 2015) festgelegt:

- Außenwand – Außen- und Innendämmung bzw. Zwischendämmung
  - Massivbau (ein- und zweischalig),
  - Holzbau
- Kellerwand (Massivbau) – Außen- und Innendämmung
- Bodenplatte (Massivbau) – Innendämmung
- Oberste Geschossdecke (Massiv- und Holzbau) – Dämmung von oben oder unten und/oder Zwischendämmung
- Fenster - Komplettsanierung oder Glas austausch

Die Maßnahmen werden auf den m<sup>2</sup> Bauteilfläche bezogen, untersucht und bewertet.

4.1.1.1 Ermittlung des energetischen Einsparpotentials

Das energetische Einsparpotential wird anhand des HoEff-CIM-Modellgebäudes (Abb. 4-1) ermittelt und bewertet.

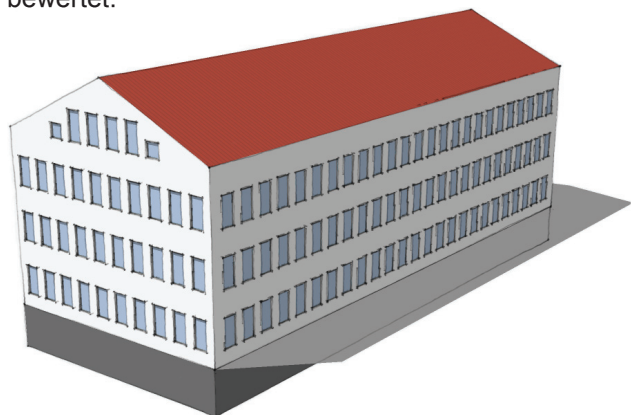


Abb. 4-1 HoEff-CIM Modellgebäude (eigene Darstellung)

Die Definition dieses Modellgebäudes resultiert aus den architektonischen Erhebungsdaten, die im Rahmen des Forschungsprojektes für die gesamte

LMU-Liegenschaft (198 Gebäude) zusammengestellt wurden und den Literaturangaben zu typischen Hochschulgebäuden (BMVBS, 27/2013).

Hierbei wurden folgende Typologien ermittelt:

- Gebäudeform (Riegelbau, Flügelbau, Würfelbau, Blockbau, Kammbau, Sonderformen und Sonstiges)
- Fassadenart (Lochfassade, Bandfassade, Pfosten-Riegel-Fassade und Sonderformen)
- Anzahl der Vollgeschosse
- Gebäudebreite und -länge

Tab. 4-1 zeigt die festgelegten Eigenschaften des Modellgebäudes auf.

Das Referenzgebäude besitzt ein beheiztes Kellergeschoss sowie drei Vollgeschosse mit unbeheiztem Dachgeschoss (Steildach). Je Baualtersklasse werden den einzelnen Bauteilen typische U-Werte zugeordnet und mit den Anforderungen nach EnEV 2014 und NE verglichen.

Tab. 4-1 Festgelegte Eigenschaften des HoEff-CIM Modellgebäudes (eigene Darstellung)

Modellgebäude	Gebäudebreite [m]	Gebäudelänge [m]	Geschossanzahl [-]	Geschosshöhe [m]	Fensterflächenanteil [%]
Hochschulen und Forschung (BMVBS, 27/2013)	20	39,55	3	4	30
LMU-Liegenschaften im Innenstadtbereich (Eigene Ermittlung)	16,9	42,32	4,8	4,08	28,79
Festlegung HoEff-CIM-Modellgebäude	17	42,5	KG+III+DG	4	30

Die energetische Bilanzierung der unterschiedlichen Varianten wird mit Hilfe der Software ZUB Helena® Ultra durchgeführt. Hierbei wird ein Ein-Zonen-Modell nach DIN V 18599 aufgebaut. Um Aussagen über den Einfluss der Gebäudehülle auf den Energiebedarf zu erhalten, werden die gebäudetechnischen Parameter konstant gehalten.

Abb. 4-2 veranschaulicht die bilanzierten Heizwärmebedarfe (Nutzenergie) des Referenzgebäudes in Abhängigkeit der gewählten Baualtersklasse. Die grüne Linie gibt dabei den Heizenergiebedarf vor, der bei einer Komplettisanierung nach NE-Standard erwartet werden könnte, die orange Linie den nach EnEV 2014-Standard. Dabei stellen sie je nach energetischem Ausgangszustand theoretische Einsparpotentiale von bis zu 72 % für eine Komplettisanie-

rung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche ein. Übertragen auf die einzelnen Bauteile und die definierte Hüllflächenverteilung ergeben sich spezifische Einsparpotentiale nach Abb. 4-3. Weitere Angaben zur Ableitung des Gebäudes, die Festlegung der energetischen Kennwerte und der Umfang der energetischen Variantenuntersuchung (insgesamt 429 Varianten) können dem „Bericht Arbeitspaket 2: Entwicklung des HoEff-CIM-Modellgebäudes und energetische Bilanzierung“ der TU München entnommen werden.

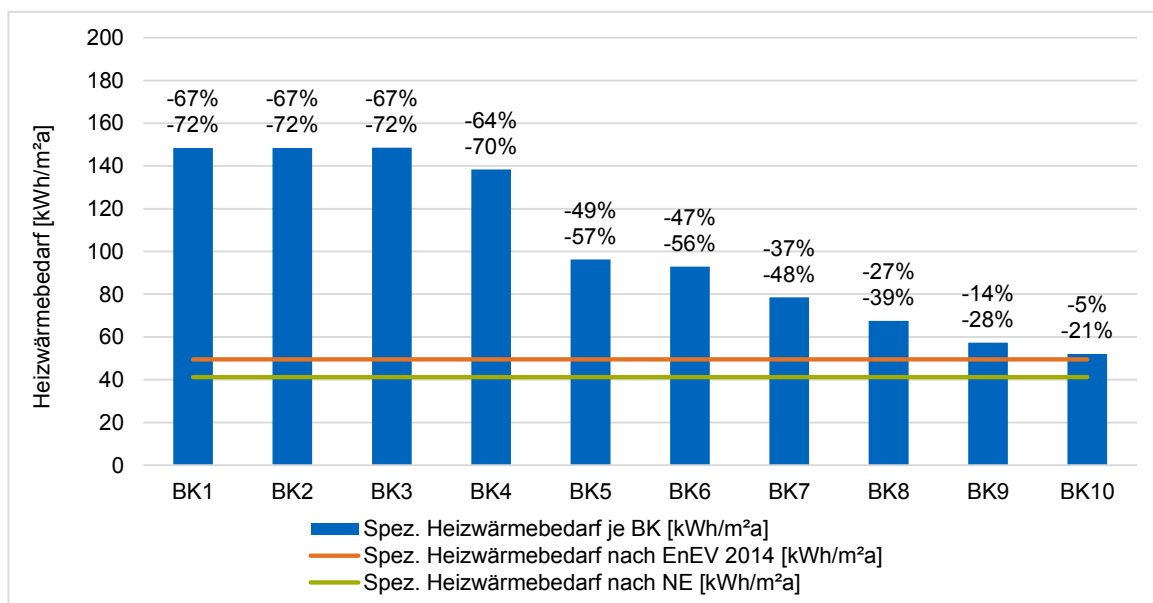


Abb. 4-2 Heizwärmebedarf des HoEff-CIM-Modellgebäudes in Abhängigkeit der Baualtersklasse (Ausgangsfall) und des energetischen Sanierungsstandards (EnEV 2014 bzw. NE) (eigene Darstellung)

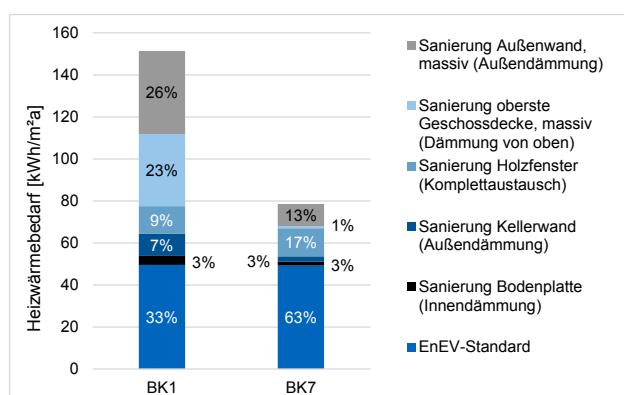


Abb. 4-3 Einsparpotential der Einzelmaßnahmen in BK 1 und BK7 nach EnEV 2014 (eigene Darstellung)

Es ist zu beachten, dass die Simulationsergebnisse nur einen Teil der vielfach möglichen Sanierungsvarianten und lediglich ihre Tendenzen abbilden sollen. Die mit ZUB Helena® durchgeführte Variantenuntersuchung beschränkt sich auf einen Gebäudetyp mit einer vordefinierten Hüllflächenverteilung und Gebäudedekubatur. Die Simulation wird statisch durchgeführt. Für eine dynamische Bedarfsermittlung der einzelnen Universitätsliegenschaften ist die parallel entwickelte Referenzraummethode (RRM; vgl. Kapitel 3.2) vorgesehen. Hierbei können die charakteristischen Raumvolumina der Gebäude und die nutzungsspezifischen Eigenschaften detaillierter berücksichtigt werden.

Zudem werden bei den Ausgangsfällen je Baualtersklasse in ZUB Helena® keine vorangegangenen Teilsanierungen miteinbezogen. Dies würde dem Ziel

entgegenstehen, die maximal zu erreichenden Einsparpotentiale zu berechnen. In der Praxis wurden die Einzelgebäude sicherlich in einem 30 bis 50 Jahre-Zyklus zumindest einer Teilsanierung unterzogen. Die Einzeldatenerfassungen je Gebäude wird allerdings über das QCT berücksichtigt und der Bilanzierung in der RRM hinterlegt.

#### 4.1.1.2 Ökobilanzierung

Eine Ökobilanz ist die Zusammenstellung und Beurteilung der stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges (DIN EN ISO 14044, 2006, Abschnitt 3.2). Zur Ermittlung der ökologischen Qualität einer Sanierungsmaßnahme wird eine Ökobilanz-Studie nach den vier Phasen der DIN EN ISO 14044:2006-10 bzw. DIN EN ISO 14040:2009-11 (vgl. Abb. 4-4) durchgeführt. Ebenfalls dargestellt sind die für das Projekt erforderlichen Arbeitsschritte, die je nach Zielsetzung festgelegt werden müssen.

Je Sanierungsmaßnahme werden sowohl der Anteil an Grauer Energie als auch die jeweiligen Umweltwirkungen untersucht.

Als Hauptindikatoren wurden für dieses Projekt der nicht erneuerbare und erneuerbare Primärenergieanteil sowie das Treibhauspotential (GWP) festgelegt. In die Betrachtung werden die Herstellungsphasen (A1-3) und Entsorgungsphasen (C1-4) nach DIN EN 15804:2014-07 einbezogen.

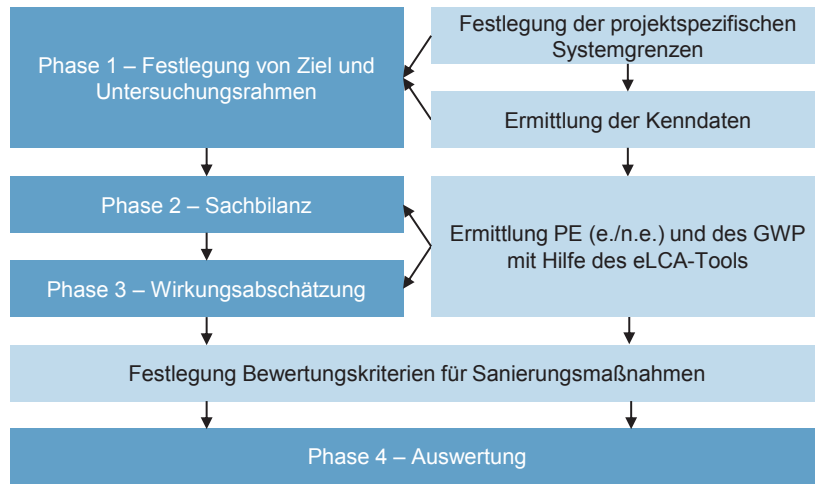


Abb. 4-4 Phasen einer Ökobilanz mit durchzuführenden Arbeitsschritten (eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14044, 2006)

Ferner wird ein Vergleich zwischen nachwachsenden Dämmmaterialien, Dämmung aus recycelten und herkömmlichen bzw. innovativen Baustoffen angestrebt. Je nach Einsatzfähigkeit werden jeweils zwei Ausführungsbeispiele nach folgenden Materialien gegenübergestellt.

Tab. 4-2 Wahl der Dämmmaterialien für die ökologische Betrachtung (eigene Darstellung)

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder Recyclingmaterial	Dämmstoffe aus nicht nachwachsenden Rohstoffen
Holzfaserdämmung	Mineralwolldämmung
	Vakuum-Isolationspaneel (VIP-Paneele)
	PUR-Hartschaum, alukaschiert
	Polystyrol Partikelschüttung
Schaumglasdämmung aus Recyclingglas	Polystyrol (XPS)

Dämmstoffe aus Holzfasern stellen grundsätzlich eine nachwachsende Alternative zu anderen marktüblichen Dämmstoffen dar (geeignet für Innen- und Außendämmung). Voraussetzung ist allerdings, dass die Materialgewinnung nachhaltig, also ohne Zerstörung und Degradierung von Wäldern erfolgt. (BMVBS, 2015)

Die Mineralwolldämmung ist derzeitiger Standard. Interessant ist auch der Vergleich mit innovativen VIP-Paneelen und PUR-Hartschaum, alukaschiert bei der Wandinnendämmung. Bei der Perimeterdämmung stellt Schaumglas die einzige Alternative zur druckfesten XPS-Dämmung dar. Für Kerndämmun-

gen von Außenwänden gibt es bisher keine bauaufsichtlich gesicherten Alternativen zur Polystyrol Partikelschüttung.

Die Berechnung der Grauen Energie und der Umweltwirkungen je Sanierungsmaßnahme wird mit Hilfe des eLCA-Tools des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung ([www.bauteileeditor.de](http://www.bauteileeditor.de)) durchgeführt. Die Definition der projektspezifischen Systemgrenzen, der herangezogenen Kenndaten und die detaillierte Bewertung und Auswahl der Dämmmaterialien kann dem Kapitel 2.3 des Teilberichts „Bericht Arbeitspaket 4: Ranking Sanierungsmaßnahmen“ der TU München entnommen werden.

#### 4.1.1.3 Berechnung der ökonomischen Amortisation

Die ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen bezieht sich auf die Gesamtkosten einer Sanierungsmaßnahme, welche gemäß des Baukostenindex ermittelt werden (BKI, 2014). Die Amortisationszeit  $n_A$  der jeweiligen Sanierungsmaßnahme wird in Abhängigkeit der jährlichen Energiepreissteigerung und des jährlichen Zinssatzes mit der Kapitalwertmethode nach nachfolgender Formel ermittelt. (Holm, 2015). So wird der Investition der Sanierungsmaßnahme eine alternative Geldanlage gegenübergestellt.

$$n_A = \frac{\ln \frac{1}{1 - \frac{K}{k} * (q - y)}}{\ln \frac{q}{y}} \quad \text{Gl. (4-1)}$$

- $k$  gibt die jährlichen Rückflüsse bzw. die jährliche Einsparung in [€] an. Diese Rückflüsse werden durch die ermittelten Energieeinsparungen in



Abhängigkeit der Ausgangs-U-Werte, Ziel-U-Werte und der Gradtagzahl anhand 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche generiert.

- q gibt den jährlichen Zinssatz an, zu dem ein fester Betrag gewinnbringend angelegt werden kann. Bedingt durch die aktuelle Niedrigzinsphase wird hier von einem Zinssatz von 2% ausgegangen (d.h.  $q = 1,02$ ).
- y gibt die jährliche Energiepreissteigerung an. In dieser Betrachtung wird die durchschnittliche Energiepreissteigerung mit 5,1%/a angesetzt (d.h.  $y = 1,051$ ). Dieser Wert wurde mit Hilfe der Daten zur Energiepreisentwicklung des Statistischen Bundesamts ermittelt (Destatis, 2016).
- K gibt die Investition [€] an. Sie ist im Wesentlichen von der Art der Sanierung, sowie von der Dämmdicke abhängig. Die Daten über die Höhe der Investitionskosten werden mit Hilfe des Baukostenindex (BKI, 2014) ermittelt.

Dabei erhöht sich die Amortisationszeit mit zunehmenden Baustandard und gleichzeitig nimmt die Rentabilität der Sanierungsmaßnahme wegen der geringer zu erreichenden energetischen Einsparung ab.

Um aussagekräftige Daten zur energetischen Sanierung treffen zu können, werden die Kosten des Materialeinsatzes bei der Sanierungsmaßnahme berücksichtigt (Abbruch und (Wieder-)Herstellung). Die Kosten für Arbeitszeit, Gerüst, etc. weichen im Einzelfall stark voneinander ab bzw. gibt es hierfür nur wenige statistische Werte. So sind die tatsächlichen Amortisationszeiten im Einzelfall zu prüfen.

#### 4.1.2 Energetische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen

Mit Hilfe der Simulation des Modellgebäudes in ZUB Helena® Ultra wird die prozentuale Energieeinsparung (Nutz-, End- und Primärenergie) je Sanierung des Einzelbauteils ermittelt.

Die Bewertung erfolgt auf der Ebene der Nutzenergie, da bei der Simulation zunächst die Gebäudetechnik unberücksichtigt bleibt. Der Einfluss der Gebäudetechnik auf End- und Primärenergiebedarf wird vom Projektpartner Brochier Consulting + Innovation GmbH (vgl. Kapitel 4.2) untersucht.

Als Bewertungskriterium dient die prozentuale, auf die Nettogrundfläche (NGF) bezogene Heizenergieeinsparung.

Zur Festlegung der qualitativen Bewertungsgrenzen wird die kumulierte Häufigkeitsverteilung über alle Sanierungskombinationen gebildet (Abb. 4-5).

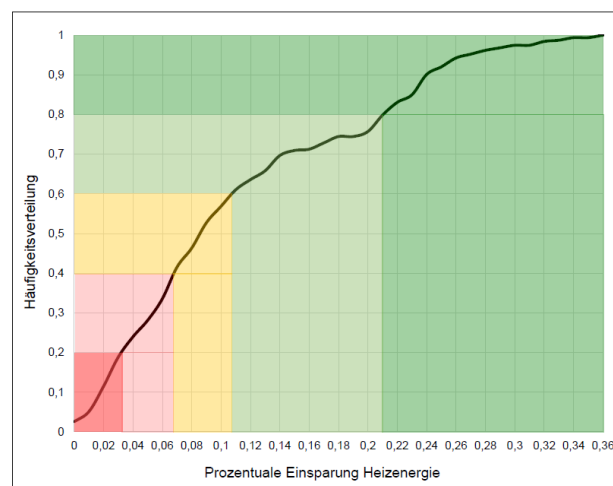


Abb. 4-5 Häufigkeitsverteilung der prozentualen Heizenergieeinsparung aller betrachteten Sanierungsmaßnahmen (eigene Darstellung)

Dabei kann die prozentuale Heizenergieeinsparung je Bauteil in den unterschiedlichen Baualtersklassen voneinander abweichen, obwohl sich die absolute Einsparung des Bauteils gleich verhält. Dennoch wird die Bewertung auf Grundlage der prozentualen Einsparung gewählt, da dadurch die maßgebenden energieverbrauchenden Bauteile einer Baualtersklasse identifiziert werden können (vgl. Tab. 4-3).

Tab. 4-3 Beispiel für den Vergleich des prozentualen und absoluten energetischen Einsparpotentials von Bauteilsanierungen in Abhängigkeit der Baualtersklasse (eigene Darstellung)

Sanierungsmaßnahme	Neuer Energiestandard	Heizenergieeinsparung (prozentual und absolut)	
		BK 4	BK5
Alu- oder Stahlfenster, Isolierverglasung: Glasaustausch mit 2-Scheibenisolierverglasung	EnEV	10%	14%
		16,0 kWh/m <sup>2</sup> a <sup>1</sup>	16,1 kWh/m <sup>2</sup> a <sup>1</sup>
Sanierung oberste Geschossdecke (massiv): Dämmung von oben	EnEV	24%	7%
		33,9 kWh/m <sup>2</sup> a <sup>1</sup>	6,3 kWh/m <sup>2</sup> a <sup>1</sup>

<sup>1</sup> auf NGF bezogen

## 4 Entwicklung und Ranking von Sanierungsmaßnahmen | Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen

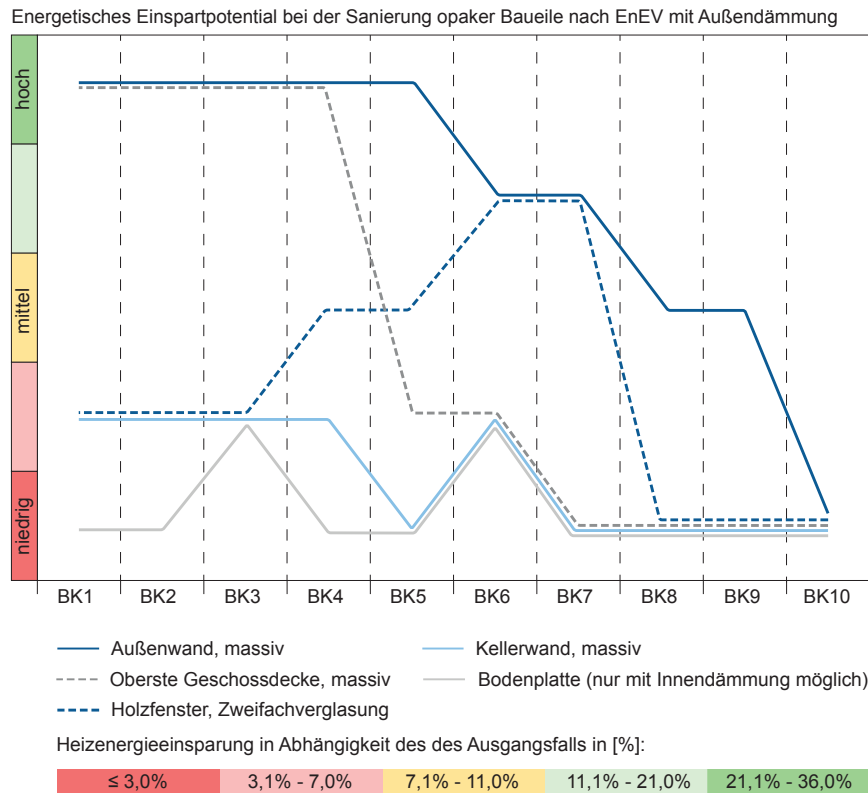


Abb. 4-6 Bewertung des energetischen Einsparpotentials in Abhängigkeit der Bauteilsanierung nach EnEV 2014 und NE (eigene Darstellung)

Die maximal zu erreichende prozentuale Nutzenergieeinsparung für eine Bauteilsanierung ist 36% in Abhängigkeit des Ausgangsfalls. Abb. 4-6 stellt darauf aufbauend die Verteilung des energetischen Einsparpotentials je Bauteil dar.

Die Abbildung macht deutlich, dass die Sanierung der Bodenplatte nur geringe Nutzenergieeinsparungen mit sich bringt. Demgegenüber sollte die Sanierung einer massiven Außenwand, außer in BK 10, immer in Betracht gezogen werden, da mittlere bis hohe Einsparungen erzielt werden können.

### 4.1.3 Ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen

Analog zum energetischen Einsparpotential wird die ökonomische Amortisation in fünf Stufen bewertet. Ausgehend von den minimal und maximal zu erwartenden Amortisationszeiten erfolgt die Bewertung allerdings bauteilbezogen (vgl. Abb. 4-7), da die ökonomische Amortisation mit Hilfe der durchschnittlich zu erwarteten Lebensdauer des einzelnen Bauteils verifiziert wird.

Aus Abb. 4-7 wird ersichtlich, dass die Sanierung einer obersten Geschossdecke (Holzbalkendecke)

aus ökonomischer Sicht sehr sinnvoll ist, denn der Sanierungsaufwand kann gering gehalten werden. In Abhängigkeit der gewählten Rahmenbedingungen (vgl. 4.1.1.3) amortisiert sich die Sanierung in jeder Baualterklasse in weniger als acht Jahren, wohingegen bei der Sanierung der Kellerwand bei Ergänzung einer Perimeterdämmung hohe Kosten durch die Freilegung der Außenseite (Erdaushub) entstehen können.

Deutlich muss auch hervorgehoben werden, dass die ökonomische Amortisation stark von der Definition der Energiepreissteigerung und dem jährlichen Zinssatz abhängig ist. Je nach Wahl unterliegt die Amortisation extremen Schwankungen und kann demnach nicht allgemeingültig definiert werden (vgl. Abb. 4-8). Für das Projekt werden deshalb Mittelwerte festgelegt: jährlicher Zinssatz von 2% und Energiepreissteigerung von 5,1%. Die Annahme der Energiepreissteigerung beruht auf einer statistischen Auswertung der Kosten (2000-2015) für Fernwärme nach Destatis (Destatis, 2016). Der jährliche Zinssatz von 2% ist der Basiswert der LMU München.

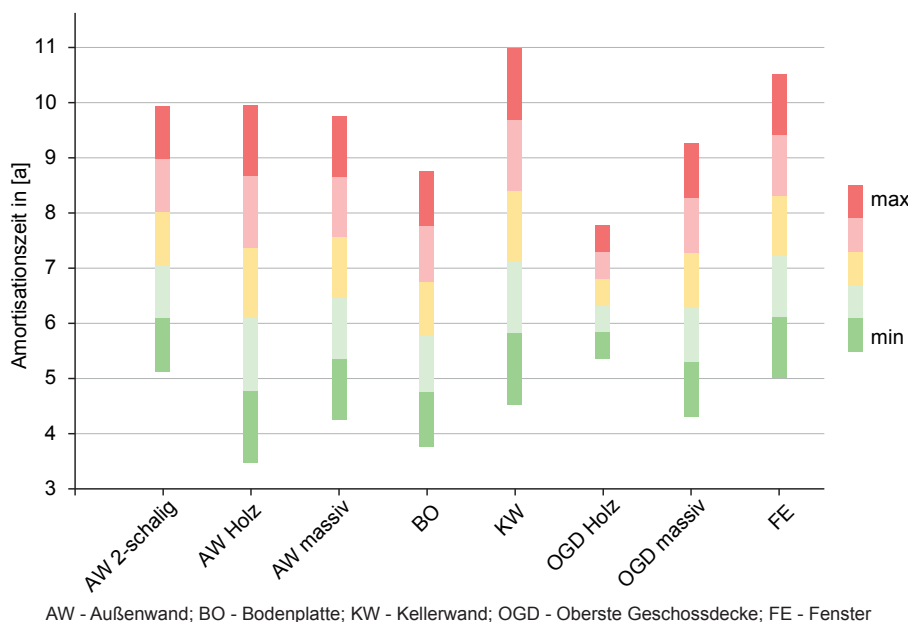


Abb. 4-7 Bauteilbezogene Bewertung der ökonomischen Amortisation in Abhängigkeit der Sanierungsmaßnahme (eigene Darstellung)

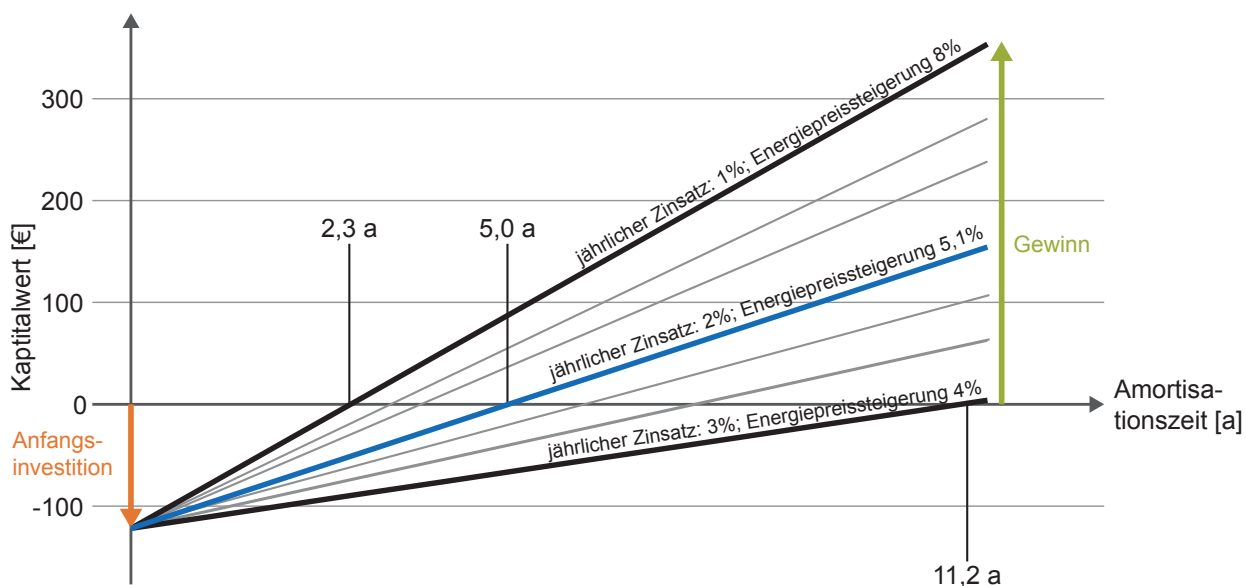


Abb. 4-8 Amortisation einer Sanierungsmaßnahme in Abhängigkeit des jährlichen Zinssatzes und der Energiepreissteigerung (eigene Darstellung)

#### 4.1.4 Ökologische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen

Die ökologische Bewertung folgt dem Ansatz der BNB-Kriterien (vgl. Bedeutungsfaktoren; BMUB, 2014). Wie in 4.1.1.2 bereits erwähnt, werden als ökologische Hauptbewertungskriterien der Einsatz der gesamten Primärenergie  $[(PE_{n.e.}) + (PE_{e.})]$ , der Anteil an erneuerbarer Primärenergie am Gesamtenergieeinsatz  $[(PE_{e.}) / (PE_{n.e.} + PE_{e.})]$  und das Treibhauspotential (GWP) gewählt.

Die Umweltkategorien Eutrophierungspotential (EP), Bildungspotential für troposphärischen Ozon (POCP), Versauerungspotential von Boden und Wasser (AP), das Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP), das abiotische Ressourcenabbaupotential für fossile Brennstoffe sowie das abiotische Ressourcenabbaupotential für Elemente (ADP) fließen ebenfalls nicht in die Bewertung mit ein, da ihre stofflichen Auswirkungen schwer einheitlich zu bilanzieren sind. Diese müssen im Einzelfall direkt gegenübergestellt werden bzw. besteht hier weiterer

#### 4 Entwicklung und Ranking von Sanierungsmaßnahmen | Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen

Forschungsbedarf.  
Nachfolgende Abbildungen verdeutlichen die Bewer-

tungskriterien der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahmen der Bauphysik (PE und GWP).

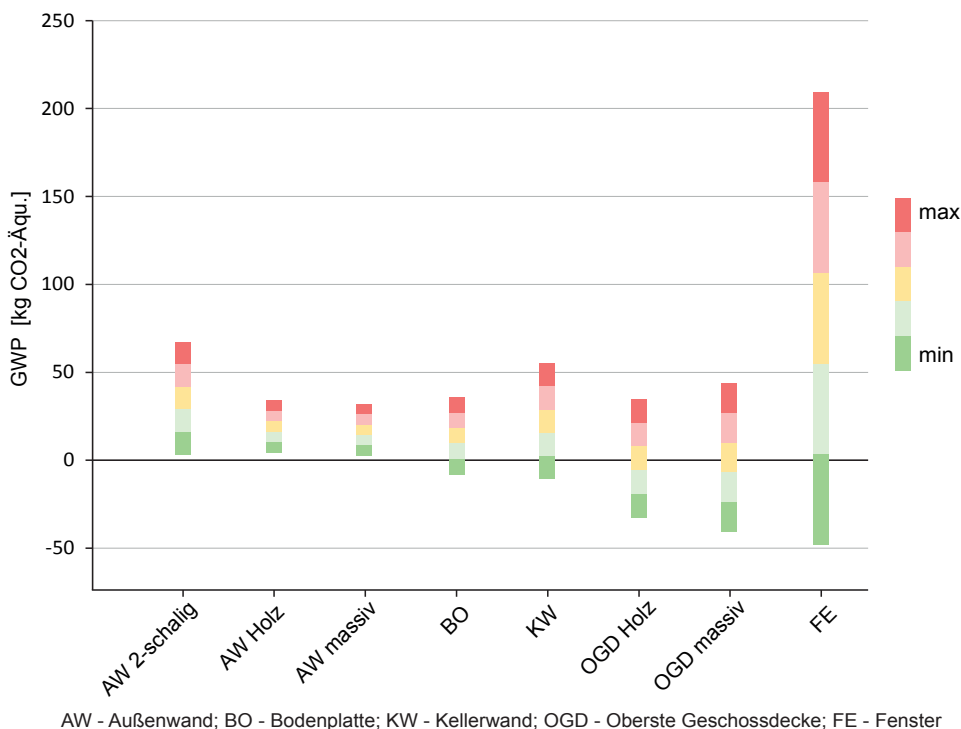


Abb. 4-9 Bauteilbezogene Bewertung der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahme - Treibhauspotential (GWP) (eigene Darstellung)

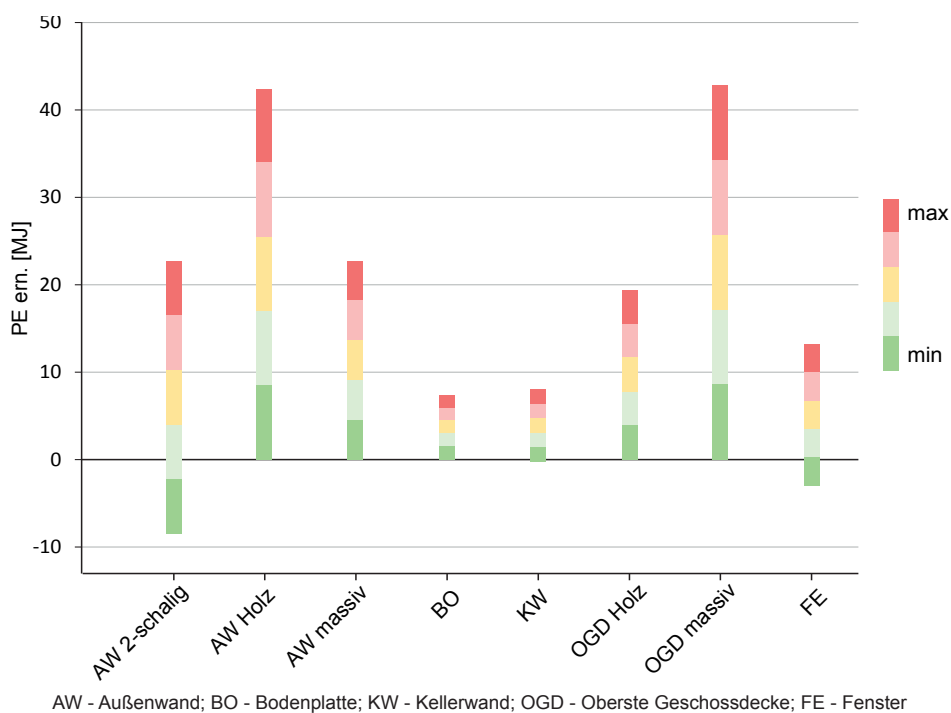
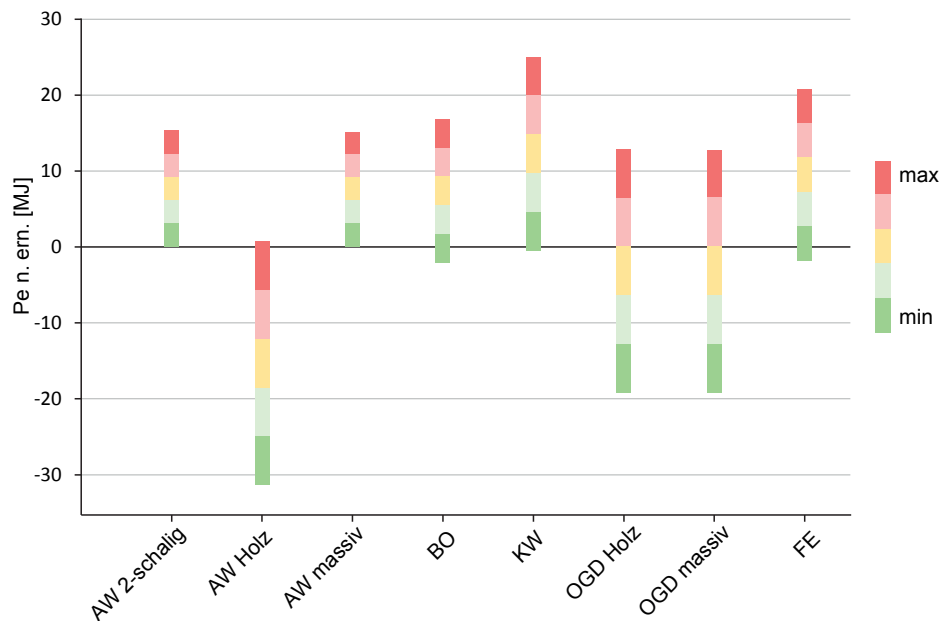


Abb. 4-10 Bauteilbezogene Bewertung der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahme - Erneuerbare Primärenergie (PE e.) (eigene Darstellung)



AW - Außenwand; BO - Bodenplatte; KW - Kellerwand; OGD - Oberste Geschossdecke; FE - Fenster

Abb. 4-11 Bauteilbezogene Bewertung der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahme - Nicht erneuerbare Primärenergie (PE e.) (eigene Darstellung)

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass die ökologische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen für eine erste Vorauswahl dienen soll. Die berücksichtigten Stoffprozesse (Herstellung, Nutzung und End-of-Life) sollten immer im Einzelfall überprüft werden. Besonders Gutschriften bei der energetischen Verwertung am Ende des Lebenszyklus sind im Sinne der Nachhaltigkeit nicht dauerhaft zielführend. Diese Vergleichsrechnung verliert bei stetigem Anstieg des erneuerbaren Energieanteils an der Wärme- und Stromerzeugung bis 2050 immer mehr an Relevanz. Diese intransparente Darstellung der energetischen Ressourceninanspruchnahme wird durch die Betrachtung des GWP kompensiert.

#### 4.1.5 Sanierungskatalog

Auf Basis der Nachhaltigkeitsbewertung wird ein Sanierungskatalog für ausgewählte Sanierungsmaßnahmen erstellt. So findet man je Sanierungsmaßnahme und Baualtersklasse auf einem DIN-A4-Datenblatt detaillierte Informationen über den Bauteilaufbau vor und nach der Sanierung sowie die ökologische, ökonomische und energetische Qualität der Sanierungsmaßnahme. Detaillierte Informationen zur Entwicklung der Wirkungskriterien sind dem Teilbericht „Bericht Arbeitspaket 4: Ranking Sanierungsmaßnahmen“ der TU München zu entnehmen. Der Sanierungskatalog, der nachfolgend mit Hilfe eines Beispiels vorgestellt wird (Abb. 4-12), wird in das Berichtswesen des QCT integriert.

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Sanierung einer massiven Außenwand der Baualtersklasse 6 nach NE-Standard mit einem WDVS mit Mineralfaserdämmplatte. Hierbei wird ein neuer U-Wert  $\leq 0,15$  W/m<sup>2</sup>K angestrebt. In Abhängigkeit der Bestandskonstruktion müssen die gelb eingefärbten Bauteilschichten entfernt und die rot eingefärbten Schichten ergänzt werden. Schwarz eingefärbt sind diejenigen Bauteilschichten, die bestehen bleiben.

Hinsichtlich der ökonomischen Amortisation und des energetischen Einsparpotentials kann die Maßnahme empfohlen werden (Wirkungskategorie: „gut“). Ökologisch gesehen besitzt die Maßnahmen zwar einen geringen Grauen-Energie-Anteil (PE ges. „gut“), jedoch ein hohes GWP sowie einen niedrigen Anteil an erneuerbarer Primärenergie. Hier sollten ökologischere Dämmmaterialien angedacht werden.

#### 4.1.6 Schadensdokumentation

Das Sanierungspotential wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Es nimmt nicht nur der energetische Bauteilzustand Einfluss sondern auch der konstruktive Zustand (vgl. Abb. 4-13). Der Gebäudezustand kann durch den Beeinträchtigungsgrad der Funktion (Verlust der Tragfähigkeit, Schädigung der Bausubstanz durch Feuchte oder Schädlinge) bzw. durch die Bedeutung der Gebrauchstauglichkeit (Erscheinungsbild, Durchbiegungen, schwingende Decken) definiert werden (Tab. 4-4).

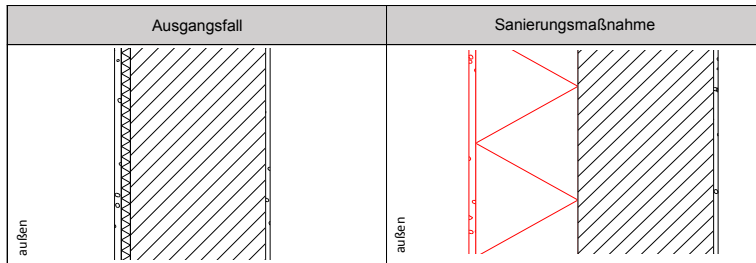
## 4 Entwicklung und Ranking von Sanierungsmaßnahmen | Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen

HoEff-CIM

Sanierungskatalog

Baualterklasse:	BK06
Bauteil:	Außenwand (massiv)
Sanierungsvariante:	Außendämmung nach NE-Anforderungen
Dämmmaterial:	Mineralfaser

Allgemeine Informationen



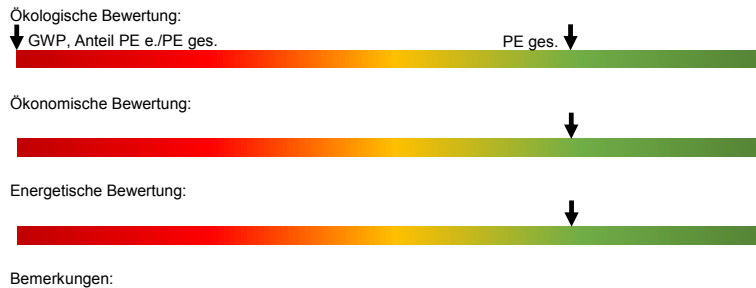
Detailschnitt  
Bauteilaufbau vor  
und nach der Sanierung

Schichtenaufbau (von außen nach innen)	Dicke [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	U-Wert [W/(m²·K)]
Putz (Kalk- und Kalkzementputz)	15	1,00	≤ 0,15
Mineralfaserdämmplatte mit Klebe- und Spachtelputz	220 / 6	0,035 / 1,00	
Putz (Kalk- und Kalkzementputz)	15	0,87	
Mineralfaserdämmplatte	20	0,04	
Hochlochziegel	300	0,58	
Putz (Kalk-Gipsputz)	10	0,70	

Schichtenaufbau der Sanierungsmaßnahme (Dicke; Wärmeleitfähigkeit; U-Wert):  
rot: neuer Konstruktionsaufbau  
gelb: Abbruch  
schwarz: Bestandskonstruktion

rot: neuer Konstruktionsaufbau  
gelb: Abbruch  
schwarz: Bestandskonstruktion

Quelle: in Anlehnung an ZUB, 2009, S.61



Darstellung der ökologischen, ökonomischen und energetischen Bewertung

In der Putzschicht des WDVS fällt Tauwasser aus. Dies kann durch abgestimmte WDV-Systeme reduziert oder verhindert werden.

Weitere Bemerkungen zur Sanierungsmaßnahme (z.B. Hinweise, die im Einzelfall zu beachten sind, Hinweise zum Feuchteschutz)

Abb. 4-12 Beispiel Sanierungskatalog - Output QCT (eigene Darstellung)

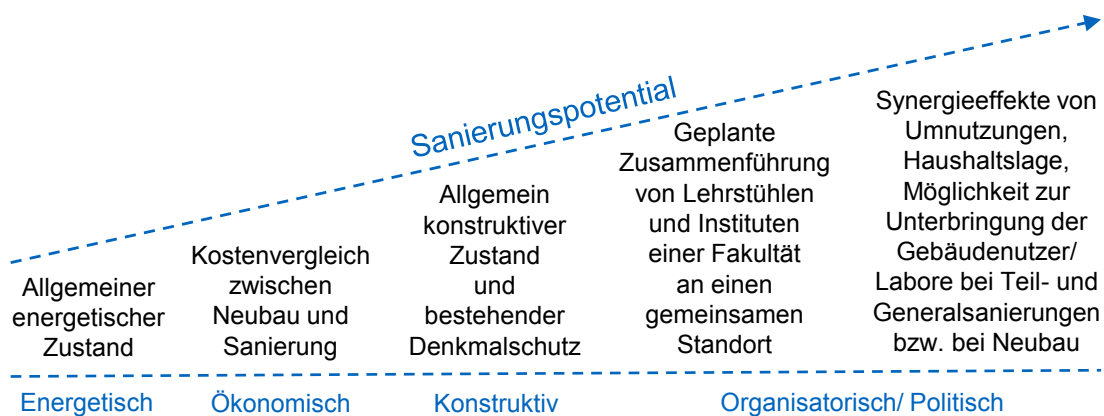


Abb. 4-13 Entscheidungskriterien bei der Ermittlung des Sanierungspotentials

Im Rahmen von HoEff-CIM soll ein Rankingsystem für Sanierungsmaßnahmen entstehen, bei dem die Sanierungsmaßnahmen nicht nur aus energetischer Sicht sondern auch aus der Sicht des konstruktiven Zustands beurteilt und priorisiert werden sollen.

Der Leitfaden „Schadensdokumentation“ (siehe „Bericht Arbeitspaket 3: Schadensdokumentation“ der TU München) ermöglicht es dem Gebäudeerfasser eine übersichtliche Darstellung von möglichen Schadensfällen je Bauteil zu erstellen, um diese richtig beurteilen zu können. Bei der Gebäudebegehung kann er so typische Bauschäden identifizieren und bewerten sowie im QuickCheck-Tool (QCT) als Information hinterlegen. Die Liegenschaftsverwalter und das Planungsreferat werden nicht nur über energetische Einsparpotentiale informiert sondern sie erhalten auch einen Überblick über die Dringlichkeit von Maßnahmen, um den Nutzer vor weiteren Gefahren oder Beeinträchtigungen zu schützen und Sanierungsmaßnahmen adäquat zu planen.

In der Schadensdokumentation werden bauteilspezifisch typische Schadensbilder festgehalten. Sie enthält ferner Informationen über die Erscheinungs-

merkmale, die möglichen Ursachen und Prüfmöglichkeiten (vgl. Abb. 4-14).

Tab. 4-4 Zustandskategorien von Bauschäden (eigene Darstellung)

Grad der Beeinträchtigung der Funktion	Bedeutung des Merkmals für die Gebrauchstauglichkeit			
	sehr bedeutend	bedeutend	eher unbedeutend	unbedeutend
sehr stark	+++	++	++	++
deutlich	++	++	+	+
mäßig	+	+	+	o
keiner oder geringfügig	+	o	o	o
<b>Gut</b>	<b>Keinen Einfluss auf Sanierungsmaßnahmen</b>			
<b>Mittel</b>	<b>Einfluss auf Sanierungsmaßnahmen</b>			
<b>Schlecht</b>	<b>Starken Einfluss auf Sanierungsmaßnahmen</b>			
<b>k.o.</b>	<b>Sanierung zwingend erforderlich</b>			


STEILDACH				
	Wo?	Prüfung	Erscheinungsmerkmale	Ursachen
k.o. Zustand	Holzkonstruktion Dachstuhl	Sichtprüfung nach Beispielen, Sofortiges Hinzuziehen eines Fachmanns	Verfärbungen der Oberfläche bis ins schmierig Schwarze, Einfallen der Holzoberfläche, Würfelbruch des Holzes, Deutlich sichtbares Myzel, Fruchtkörper, faseriger Holzerfall in großen Teilbereichen	 Dachstuhl von Pilzen angegriffen oder zerstört

Abb. 4-14 Auszug Schadensdokumentation (eigene Darstellung)

#### 4.1.7 Ausblick: Bayes'sches Netz

Ein Großteil der gewählten Baustoffe und Konstruktionsausführungen basieren auf statistischen Erhebungen im deutschen Gebäudebestand. Auf Grund der unzureichenden Datenlage im Untersuchungsgebiet stellen diese Daten die einzige Möglichkeit dar, Simulationen durchzuführen, Potentiale abzuleiten und Empfehlungen zu geben. Um die notwendige Transparenz zu schaffen und die Prozesse in ihrer ganzen Tiefe zu erfassen, wurden die Parameter mit so genannten Bayes'schen Netzwerken abgebildet. Mit Hilfe dieser Netzwerke können die Unsicherheiten, die sich durch die angewandte Statistik und die Verwendung von Vereinfachungen ergeben, abge-

bildet, sowie eine Entscheidungsstruktur bezüglich der „sichersten“ und effizientesten Sanierungsmaßnahmen erarbeitet werden. Mit Hilfe der entwickelten Modelle hat der verantwortliche Entscheider die Möglichkeit, die Hintergründe hinter den Annahmen sowie die statistischen Verteilungen von Eigenschaften und Bauteilen zu bewerten. Die möglichen Einsparpotentiale können anschließend in direkter Abhängigkeit dieser statistischen Verteilungen ausgewertet werden. Anhand von Amortisationszeiten werden die komplexen Zusammenhänge abschließend verständlich zusammengefasst, um eine schnelle Entscheidung des Verantwortlichen herbeizuführen. In der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie werden die statistischen Verteilungen von baukonstruktiven

Annahmen und dazugehörige energetische Potenziale in kausale Zusammenhänge gesetzt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit neue Erkenntnisse dynamisch einzubinden, um somit die Wahrscheinlichkeiten auf einen bestimmten, evidenten Gebäudebestand anzupassen.

Ein Beispiel wäre die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Gebäude aus Baualtersklasse 1 Holzfenster verbaut sind. Diese Datenmenge hat Auswirkungen auf die Sanierung. Geht man davon aus, dass Holzfenster mit einem niedrigen energetischen Standard verbaut wurden, erhöht sich das Einsparpotenzial durch den Austausch dieser Fenster. Allerdings nur zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Begibt man sich nun aber vor Ort und begeht das Gebäude, weiß man ggf. mit Sicherheit, dass Holzfenster verbaut wurden. Diese Erkenntnis verändert das Netzwerk, da nun davon ausgegangen werden kann, dass die gewünschte Einsparung zu 100% erzielt werden kann. Das vorgestellte Beispiel stellt allerdings nur einen Teil des Netzwerks dar. Weitere Varianten und Möglichkeiten werden über Knoten und Datenbanken mit den beschriebenen Ereignissen verknüpft und je nach Kenntnisstand aktualisiert.

Der Einsatz dieser Methodik macht es den Entscheidern sofort ersichtlich, bei welchen Parametern hohe Unsicherheiten zu erwarten sind und bei welchen Eigenschaften Klarheit herrscht. Auf diese Weise lassen sich bei Entscheidungen Risiken eindämmen und mögliche Kombinationen von Maßnahmen mit größtmöglicher Transparenz verstehen. Die Darstellung in kausalen Zusammenhängen mittels Graphen und Knoten erleichtert zudem das Verständnis und trägt zu einer schnellen Entscheidungsfindung bei.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde zur Erstellung der Modelle auf die Software "GeNIe (Graphical Network Interface)" zurückgegriffen, welche von den Decision Systems Laboratorien an der University of Pittsburgh entwickelt wurde. GeNIe erlaubt die Modellierung von Bayes'schen Netzwerken sowie Entscheidungsnetzwerken. Die Darstellung in der Software ist stark vereinfacht und zeigt die zu modellierenden Knoten (je Typ eine andere Darstellung) und verbindende Pfeile, welche die kausalen Zusammenhänge symbolisieren. Das Netzwerk in Abb. 4-15 ist ein Auszug aus dieser Software und beschreibt das eben genannte Beispiel eines Fenstertauschs. Es stellt ein Gebäude dar, von dem keine Daten bekannt sind. Einzig das Baualter und damit die statistisch häufigsten Baukonstruktionen und Materialien sind bekannt.

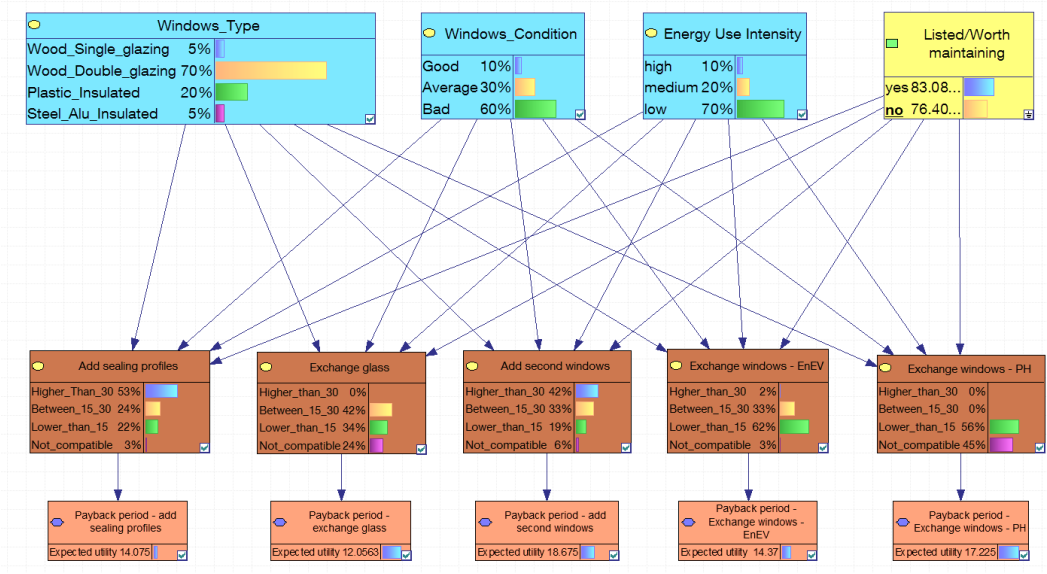


Abb. 4-15 Bayes'sches Netzwerk am Beispiel eines Fenstertauschs (Screenshot GeNIe)

Das vorgestellte Modell wurde entwickelt, um in Entscheidungsprozessen für die nötige Transparenz und Sensibilität bei der Verwendung von statistischen Daten zu sorgen. Bayes'sche Netzwerke können ein wirkungsvolles und vor allem sehr intuitives Werkzeug zur effizienten Entscheidungsfindung sein. Durch die Möglichkeiten einer dynamischen Anpassung des Modells an aktuelle Erkenntnisse, die Neu-

berechnung von Energieeinsparpotenzialen sowie der Integration von Amortisationszeiten je Sanierungsmaßnahme und vom aktuellen Begehungsstand kann es von Portfolio-Managern als umfassendes Analysewerkzeug verwendet werden und stellt eine gute Argumentationsgrundlage für die Auswahl von Sanierungsmaßnahmen dar.



#### 4.2 Gebäudetechnische Sanierungsmaßnahmen

Basis für die Berechnung der im QCT identifizierten Schwachstellen sind auf DIN 18599 basierende Berechnungen für die wichtigsten Komponenten der verschiedenen Gewerke. Diese Berechnungen werden entsprechend der während der Gebäudebegehungen getätigten Eingaben im QCT angepasst.

Zusätzlich werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um für potentielle Sanierungsmaßnahmen der Hochschulgebäude die Einsparpotentiale zu quantifizieren und verifizieren. Dabei wird ein Fokus darauf gelegt, die energetischen Wechselwirkungen verschiedener Maßnahmen zu berücksichtigen.

Ziel ist es, eine Aussage darüber zu treffen, mit welchen Maßnahmenkombinationen in welchem Zeitraum wie viel Energie durch den Einsatz von effizienten Technologien und durch eine Bedarfsreduktion eingespart werden kann. Die Untersuchung beruht auf der Simulation einzelner Maßnahmen mit der Software SolarComputer in der Version 05.14 mit dem Modul B55 „Energieeffizienz Gebäude EnEV 2014 / DIN V 18599“, einem Softwareprogramm zur energetischen Bewertung von Gebäuden, sowie einer ergänzenden Literaturanalyse. Die Simulation wird dabei für ein gewähltes Referenzgebäude der LMU mit definierter Baualterklasse und Techniklevel durchgeführt (siehe Teilbericht Brochier/Assmann „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“).

Die Gebäudetechnik umfasst die Bereiche Raumlufttechnik, Kälte, Beleuchtung, Gebäudeautomation Sanitär, Heizung und Elektrotechnik. Diese Bereiche werden bei der folgenden Darstellung der Maßnahmen unterschieden. Dabei wird zu Beginn die Ausgangssituation des Gebäudes mit seiner Zonierung und Anlagentechnik abgebildet. Anschließend können Alternativsituationen dargestellt werden. Hier werden alle Einzelmaßnahmen zur energetischen Optimierung nach ihrer jeweiligen Anlagentechnik aufgeteilt und die Änderung der entsprechenden Parameter vorgenommen.

Jede Maßnahme wird in einer einzelnen Alternativsituation abgebildet. Im Anschluss können der Energieverbrauch der Alternativen mit dem Istzustand verglichen und mögliche Energieeinsparungen identifiziert werden. Um die Wechselwirkung zwischen mehreren Maßnahmen sichtbar zu machen, werden ausgehend vom Ist-Zustand Alternativen zu möglichen Maßnahmen erstellt. Hier wird nicht wie bei den Einzelmaßnahmen nur ein Parameter verändert, sondern

mehrere variable Parameter miteinander kombiniert. Das Potential zur Energieeinsparung aufgrund von Maßnahmenkombinationen wird so deutlich und es kann festgestellt werden, welche Kombination am meisten Energie gegenüber dem Ist-Zustand einspart. Dazu werden Ergebnisdiagramme und Tabellen von Ist-Zustand und Variante gegenübergestellt und zueinander ins Verhältnis gesetzt. Wechselwirkungen hinsichtlich Energieeinsparung und Investitionsvolumen werden dabei bei Einzelmaßnahmen und bei Maßnahmenkombinationen in einzelnen Teilbereichen behandelt.

Da bei Sanierungen nur ein bestimmtes Investitionsvolumen vorhanden ist, sind Maßnahmen zu priorisieren, bei denen mit möglichst geringem finanziellem Aufwand möglichst viel Energie eingespart wird.

Verschiedene Sanierungsmaßnahmen der Hochschulgebäude werden hinsichtlich ihres endenergetischen Potentials untersucht. Dabei wird ein Fokus darauf gelegt, die energetischen Wechselwirkungen verschiedener Maßnahmen zu berücksichtigen. Tab. 4-5 stellt eine Übersicht aller behandelten Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen im Beleuchtungsbereich dar. Dabei wird neben der Einsparung der Endenergie, bezogen auf die Gesamtbilanz, auch die Investition und Amortisationszeit aufgezeigt. Zusätzlich ist für die Einsparung die Quelle des Wertes als Simulation (S) oder Literaturwert (L) angegeben. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass lediglich die Erneuerung und Nachrüstung von effizienten Leuchten sowie der Einsatz von Energiesparreflektoren einen erheblichen Einfluß auf die Energieeinsparung haben. Ebenso kann der Einsatz von elektronischen Vorschaltgeräten im Vergleich zu konventionellen Vorschaltgeräten die Effizienz von Beleuchtungsanlagen verbessern.

Betrachtet man die Amortisationszeiten wird deutlich, dass sich nur wenige Maßnahmen zeitnah amortisieren. Eine Übersicht zu allen behandelten Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen im Bereich Heizung ist in Tab. 4-6 dargestellt.

Gerade im Heizungsbereich lassen sich durch geringe Investitionen für den Einsatz einer optimierten Regelung und von effizienten Anlagenkomponenten große Energieeinsparungen erzielen. Bei älteren Anlagen bietet sich zudem eine Betrachtung und Verbesserung der Wärmeerzeugung an.

Tab. 4-5 Sanierungsmaßnahmen im Bereich Beleuchtung, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann)

Maßnahmen Beleuchtung	Einsparung	Investition	Amortisationszeit	Quelle
Erneuerung und Nachrüstung von effizienten Leuchten	-10 % - 10 %	mittel	> 10a	S
Einsatz von Energiesparreflektoren	30 % -50 %	gering	< 3 a	L
Einsatz von EVG statt KVG	- 10 %	mittel	>10a	S
Lichtlenkung über Sonnenschutzsystem	< 1 %	hoch	> 10a	S
Koppelung Sonnenschutz und Kunstlichtsteuerung	< 1 %	hoch	> 10a	S
Einsatz von Dimmern	< 1 %	sehr gering	< 3 a	S
Einsatz Präsenzkontrollen / Zeitschaltuhren	< 1 %	mittel	> 10a	S
Konstantlichtregelung und lichtlenkende Systeme	< 1 %	hoch	> 10a	S
Konstantlichtregelung, lichtlenkende Systeme, Präsenzmelder	< 1 %	hoch	> 10a	S
Konstantlichtregel., autom. Sonnenschutzsys., Präsenzmelder	< 1 %	hoch	> 10a	S
Konstantlichtregelung und und Präsenzmelder	< 1 %	mittel	> 10a	S
Konstantlichtregelung und und Präsenzmelder und LED	5 %	hoch	> 10a	S
Konstantlichtregelung und und Präsenzmelder und EVG	< 1%	hoch	> 10a	S

Mit Hilfe von Rohrleitungsdämmungen, die geringe Investitionskosten besitzen, lässt sich vor allem in älteren Baualterklassen erheblich Energie einsparen. Auch die Amortisationszeit ist mit < 5 Jahren verhältnismäßig gering. Das höchste Einsparpotential in Kombination mit der geringsten Amortisationszeit sowie der geringsten Investition hat jedoch die Anlagenoptimierung mit Hilfe des hydraulischen Abgleichs. Hierbei wird die Heizungsanlage dahingehend optimiert, dass der Rücklauf jedes Heizkörpers die gleiche Temperatur hat. Dadurch wird gewährleistet, dass jeder Raum die optimale Versorgung in Abhängigkeit seiner Heizlast erfährt. Andere Maßnahmen, wie zum Beispiel die Dämmung der Heizkörpernische haben hohe Amortisationszeiten sowie einen erhöhten Umsetzungsaufwand und werden im Vergleich zu anderen Sanierungsmaßnahmen nicht notwendigerweise zur Effizienzsteigerung der Gesamtanlage empfohlen.

Es ist sinnvoller die Nutzung und vor allem die Nutzungszeiten mit in die Optimierung bestehender Anlagen aufzunehmen. So können zum Beispiel mit Hilfe einer Einzelraum- oder Zonenregelung die Innentemperaturen einzelner Bereiche zeitweise (bei Nichtnutzung der Zone) heruntergeregelt und somit Energie eingespart werden. Hochschulliegenschaften bieten sich, bedingt durch lange vorlesungsfreie Zeiten, an dies durchzuführen. Allerdings sollte stets darauf geachtet werden, dass die Innentemperaturen nicht zu tief fallen und somit keinen negativen

Einfluss auf die Komfortbedingungen angrenzender Zonen haben. Auch die Gefahr der Schimmelbildung der Umfassungsflächen sollte ausgeschlossen werden können.

Eine Zusammenfassung aller Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen im Trinkwarmwasserbereich ist in Tab. 4-7 dargestellt. In diesem Bereich führt ein Großteil der Maßnahmen eher zu geringen energetischen Einsparungen. Aus energetischer Sicht am effektivsten ist offensichtlich die Dämmung von Trinkwarmwasserspeicher und Rohrleitungen.

Im Bestand lassen sich hier tendenziell eher geringe Einsparpotentiale aufdecken. Es ist jedoch sinnvoll, die dezentrale Trinkwassererwärmung mit Hilfe von elektrischen Durchlauferhitzern bei Neubauten anzudenken. Dies hat den Vorteil einer bedarfsgerechten Warmwasserbereitstellung ohne eine zentrale Warmwasserbevorratung. Die Investitionskosten für ein solches System sind höher gegenüber einer herkömmlichen Trinkwarmwasserinstallation, bedingt durch lange Abwesenheitszeiten würden sich diese Maßnahmen allerdings zeitnah amortisieren. Ein weiterer Vorteil dieser Varianten ist die geringere Wahrscheinlichkeit von Legionellen im Wasserverteilungssystem. Gebäude mit langen Abwesenheitszeiten der Gebäudenutzer, wie zum Beispiel Hochschulgebäude, sind für den Befall von Legionellen sehr anfällig.

Tab. 4-6 Sanierungsmaßnahmen im Bereich Heizung, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann)

Maßnahmen Heizung	Einsparung	Investition	Amortisationszeit	Quelle
Verbesserung des Wärmeerzeugers	2 % - 12 %	mittel	< 10 a	S
Brenneraustausch	0%	gering	-	S
Reduzierung der Brennerleistung	5%	sehr gering	< 3 a	L
Außerbetriebnahme einzelner Kessel	15%	gering	< 5 a	L
Hydraulischer Abgleich des Verteilernetzes	5%	sehr gering	< 3 a	S
Anpassung der Heizgrenztemperatur	5%	sehr gering	< 3 a	L
Optimierung der Heizzeiten durch Abschaltbetrieb	5%	sehr gering	< 3 a	S
Witterungssabhängige Steuerung der Kesseltemperatur	0%	sehr gering	-	S
Nachrüstung programmierbarer Thermostatventile	12 % - 20 %	gering	< 5 a	S
Einzelraum- / Zonenregelung	5 % - 35 %	mittel	< 10 a	L
Leistungs- / druckabhängige Pumpensteuerung	5 %	gering	< 5 a	S
Dämmung von Rohrleitungen und Armaturen	9 % - 20 %	gering	< 5 a	S
Versperrung von Heizkörpern vermeiden	3 %	sehr gering	< 3 a	L
Dämmung der Heizkörpernische	5 %	hoch	> 10 a	L
Einsatz wärmereflektierende Folie hinter den Heizkörpern	5 %	gering	< 5 a	L
Abschaltbetrieb, Thermostatventile und witterungsbed. Steuer.	> 20 %	gering	< 3 a	S
Hydr. Abgleich und Abschaltbetrieb	< 10 %	sehr gering	< 3 a	S
Hydr. Abgleich, Abschaltbetrieb und Thermostatventile	< 35 %	gering	< 3 a	S
Hydr. Abgleich, Abschaltbetrieb, Thermostatventile, Brennwert statt Standard-Gebläse-Kessel	< 35 %	mittel	< 5 a	S

Tab. 4-7 Sanierungsmaßnahmen im Bereich Trinkwarmwasser, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann )

Maßnahmen Trinkwarmwasser	Einsparung	Investition	Amortisationszeit	Quelle
Dimensionierung des Trinkwarmwasserspeichers	5%	mittel	< 10 a	L
Reduzierung der Temperatur im Trinkwarmwasserspeicher	5 % - 10 %	sehr gering	< 3 a	L
Dämmung des Trinkwarmwasserspeichers	< 20 %	gering	< 5 a	L
Umstellung zentrale auf dezentrale TWW-Bereitung	-3 % - 0 %	hoch	> 10 a	S
Verkleinerung TWW Verteilernetz	< 1 %	hoch	> 10 a	S
Hydraulischer Abgleich im Trinkwarmwassernetz	5 %	sehr gering	< 3 a	L
Leistungs- / Druckabhängige Pumpensteuerung TWW	5 %	gering	< 5 a	S
Zirkulationspumpen an den Bedarf angepasst	0 %	gering	-	S
Dämmung des Trinkwarmwassernetzes	0 % - 5 %	gering	< 10 a	S
Dämmen der Rohrleitungen und Verkleinerung Verteilernetzes durch Änderung des Netztypes	18%	hoch	> 10 a	S
Verbesserung Dämmung von 1980-1995, Verkl. Netztyp	< 1 %	hoch	> 10 a	S
Verbesserung Dämmung von bis 1980, Verkl. Netztyp	< 5 %	hoch	> 10 a	S
Mischung zentrales und dezentrales Netz und Dämmung	> 10 %	hoch	> 10 a	S

Eine Übersicht der behandelten Maßnahmen im Bereich Raumluftechnik ohne Kühlung ist in Tabelle 4-8 dargestellt. Der Einsatz einer Wärmerückgewin-

nung sowie einer Laufzeitkontrolle der RLT-Anlage führen in diesem Bereich zu hohen energetischen Einsparungen mit kurzen Amortisationszeiten.

Tab. 4-8 Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Raumluftechnik (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann)

Maßnahmen RLT / Kälte	Einsparung	Investition	Amortisationszeit	Quelle
Einsatz Freie Kühlung	0%	mittel	-	S
Austausch Trockenrückkühler gegen Verdunstungskühler	< 1 %	mittel	> 10 a	S
Einstellung der Kühlgrenze	5 % - 10 %	sehr gering	< 3 a	L
Anpassung der Nutzungszeiten	< 5 %	sehr gering	< 3 a	L
Änderung der Raumtemperatur	< 5 %	sehr gering	< 3 a	L
Hydraulischer Abgleich RLT	< 1 %	sehr gering	< 3 a	S
Bedarfsgerechte Pumpen RLT	0 %	gering	-	S
Dämmung der Rohrleitungen im Kältenetz	< 5 %	gering	< 10 a	L
Hydr. Abgleich und Pumpenregelung	< 1 %	sehr gering	< 3 a	S
WRG und Einsatz von Verdunstungskühler	< 55 %	hoch	< 3 a	S
WRG und Einsatz von Verdunstungskühler und Präsenzmelder	< 70 %	hoch	< 3 a	S

Tab. 4-9 Sanierungsmaßnahmen im Bereich Klimatisierung, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann)

Maßnahmen RLT	Einsparung	Investition	Amortisationszeit	Quelle
Einsatz von WRG	< 55 %	mittel	< 5 a	S
Einsatz von Frequenzumformer für den Ventilatorbetrieb	10 % - 20 %	gering	< 5 a	L
Einsatz von CO <sub>2</sub> -Sensoren im Abluftkanal	5 % - 10 %	gering	< 5 a	L
Laufzeitkontrolle der RLT-Anlage	< 35 %	mittel	< 5 a	S
WRG und Einsatz einer Laufzeitkontrolle der RLT-Anlage	< 70 %	hoch	< 5 a	S

Tab. 4-9 fasst ergänzend dazu die Ergebnisse der Einzelmaßnahmen im Bereich Klimatisierung zusammen. Zusätzlich werden die Maßnahmenkombinationen im Bereich Kälte und RLT aufgelistet.

Eine energetische Bewertung von Maßnahmen der Gebäudeautomation (GA) und des technischen Gebäudemanagements wird in DIN EN 15232:2012-09 vorgenommen. Dafür werden Gebäude entsprechend der umgesetzten Maßnahmen aus diesen Bereichen in die Effizienzklassen A-D eingeordnet. Als GA werden dabei „Produkte, Software und technischen Dienstleistungen für die automatische Steuerung und Regelung, Überwachung und Optimierung, für das menschliche Eingreifen und das Management, mit deren Hilfe die Gebäudeausrüstung energieeffizient, wirtschaftlich und sicher bedient werden kann“ bezeichnet. Die GA ist daher eine

notwendige Voraussetzung für die Regelung und somit für die Umsetzung vieler der für die einzelnen Gewerke beschriebenen Effizienzmaßnahmen. In der Norm werden Maßnahmen bzw. Regeleinrichtungen unterschieden in Heizbetrieb, Kühlbetrieb, Lüftung und Klima, Beleuchtung, Sonnenschutz, Hausautomationssystem/Gebäudeautomationssystem sowie Technisches Haus- und Gebäudemanagement. In Tab. 4-10 sind die potentiellen Einsparungen nach DIN EN 15232:2012-09 bei Erreichen der GA-Effizienzklasse A aufgelistet. Die Höhe der Einsparung hängt von der bisherigen GA-Effizienzklasse ab und wird für verschiedene Nichtwohngebäude ausgewiesen.

Tab. 4-10 Einsparfaktoren für die GA-Effizienzklassen (eigene Darstellung nach DIN EN 15232)

GA-Effizienzklassen	D	C	B	A
Büros	54%	30%	13%	-
Hörsäle	60%	50%	33%	-
Bildungseinrichtungen	33%	20%	9%	-
Krankenhäuser	34%	14%	5%	-
Hotels	48%	32%	20%	-
Restaurants	45%	32%	12%	-
Gebäude Handel	62%	40%	18%	-

Im Teilbericht von Brochier/Assmann „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ werden die hier aufgelisteten Maßnahmen und ermittelten Einsparungen im Detail erläutert.

### 4.3 Vergleich Sanierungsmaßnahmen Bauphysik und Gebäudetechnik

Bei der Auswahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen für Hochschulgebäude sind die Wechselwirkungen zwischen den beiden Teilbereichen Bauphysik und Gebäudetechnik zu beachten.

Der Nutzenergiebedarf wird dabei insbesondere durch die Güte der Bauphysik bestimmt. Bei der Zielsetzung Reduktion des Primärenergiebedarfs ist ein Ansetzen auf der ersten Stufe, also dem Nutzenergiebedarf sinnvoll. Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen weisen jedoch in der Regel höhere Investitionskosten auf und stellen häufig eine stärkere Belastung der Nutzer dar. Demgegenüber besitzen sie nach der Sanierung, im Vergleich zu technischen Maßnahmen, längere Lebensdauern. Sanierungsmaßnahmen der technischen Gebäudeausrüstung müssen genau auf den Nutzungsbedarf ausgerichtet werden. Spätere Sanierungen der Baukonstruktion ohne geeignete Anpassungen, zumindest der Regelung der TGA, können durch die Nutzenergieänderungen die Einsparungen der TGA-Sanierungen schmälern.

Daher ist bei der Auswahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen stets ein angepasstes und kombiniertes Sanierungskonzept, bestehend aus bauphysikalischen und technischen Maßnahmen, zu Grunde zu legen, welches zudem das zur Verfügung stehende Kapital sowie eine klare energetische Zielsetzung berücksichtigt.



## 5 Energiemasterplan

Im Rahmen des Projekts wurde eine Energiemasterplan für die LMU erstellt. Ziel war es, die Potentiale eines klimaneutralen und energieeffizienten Campusbetriebs zu ermitteln und diese in einem Masterplan für die Liegenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) zusammenzufassen. Die Potentiale regenerativer Energien spielen hierbei ebenso eine wichtige Rolle wie die Ermittlung der Energieeffizienzsteigerung von Bestandsgebäuden (Sanierung der Gebäudehülle, Optimierung der TGA). Der Energiemasterplan fasst die Ausgangssituation der Universitätsliegenschaft zusammen und bildet die Grundlage für die detaillierte Betrachtung mit Hilfe des QCT.

Hierbei soll am Beispiel der LMU aufgezeigt werden, wie große und heterogene Liegenschaften strukturiert analysiert werden können. So werden Einzelmaßnahmen, wie auch Quartierslösungen zur Realisierung eines energieeffizienteren und ressourcenschonenderen Betriebs in die Betrachtung mit aufgenommen. Abschließend soll auf Basis von Quartierslösungen die Umsetzbarkeit der nationalen und liegenschaftsbezogenen Klimaziele diskutiert werden.

### 5.1 Zieldefinitionen und Fragestellungen

Die Zieldefinitionen für den klimaneutralen Campus werden aus den nationalen bzw. internationalen Klimazielen abgeleitet.

Die Bundesregierung strebt basierend auf dem EEG bis 2050 an, den Bruttoendenergieverbrauch mit mindestens 60% aus erneuerbaren Energien zu decken. Der Strombedarf soll dabei bereits bis zum Jahr 2035 zu 60% aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Die Steigerung der Energieeffizienz muss zum einen durch die Erhöhung des Wirkungsgrades bei der Energieerzeugung ermöglicht werden. Zum anderen können die Energieziele nur erreicht werden, wenn die gewonnene Endenergie auch effizient genutzt wird. Ziel ist es somit, den Primärenergieverbrauch bis 2050 gegenüber 2008 um 50% zu senken. Die Reduktion des Stromverbrauchs wird dabei mit 25% berücksichtigt. Ferner wird beabsichtigt, die Sanierungsrate für Gebäude bezogen auf den gesamten Gebäudebestand pro Jahr auf 2% zu steigern. (BMUB, 2014)

Für das Projekt und den klimaneutralen Campus 2050 der LMU München wurden auf Basis der nationalen

Bestrebungen folgende Energieziele festgelegt:

- Senkung des Primärenergiebedarfs um 50% und des Strombedarfs um 25% bis 2050

Ausgangssituation dieser Betrachtung sind die Ergebnisse der Hochrechnung aus der Referenzraummethode (RRM) der Hochschule München, die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wird. Ziel ist es, den Primärenergiebedarf der Liegenschaften der LMU München um mindestens 50% und den Strombedarf ebenfalls um 25% bis 2050 zu reduzieren.

- Steigerung der Sanierungsrate auf 2% pro Jahr bis 2050.

Die Umsetzbarkeit der Sanierungssteigerung auf 2% bis 2050, die von der Bundesregierung vorgegeben wird, wird anhand der Liegenschaften der LMU München untersucht.

- Deckung des Endenergiebedarfs zu 60% aus erneuerbaren Energien bis 2050

Darüber hinaus sollen die Potentiale einer rein auf regenerativen Energien basierenden Energieversorgung dargestellt werden.

Im Folgenden soll integrativ analysiert werden, ob im Anbetracht des definierten Ausgangsfalls die Energieziele bis 2050 erreicht werden können. Damit würden sich auch die Treibhausgasemissionen entsprechend senken lassen.

Die Analyse der universitären Liegenschaft basiert auf einer bedarfsorientierten Hochrechnung mittels der RRM. Eine auf Verbrauchsdaten basierende Hochrechnung wäre zwar praxisgerechter, konnte aber leider auf Grund der aktuellen unzureichenden Zählerstruktur nicht realisiert werden.

Abschließend wird die Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen mit den Energiezielen 2050 verglichen und die Umsetzbarkeit des Masterplans nach aktueller Liegenschaftsorganisation geprüft. Die detaillierte Ausarbeitung des Energiemasterplans kann dem „Bericht Arbeitspaket 5: Energiemasterplan“ der TU München entnommen werden.

## 5.2 Energiebedarfsreduktion und Sanierungspotentiale der Einzelgebäude

Um Aussagen über das energetische Sanierungs- bzw. Optimierungspotential des Einzelgebäudes treffen zu können, werden die Hauptverbraucher, die sowohl einen überdurchschnittlichen Wärme- als auch Kälte- und Strombedarf besitzen, in Abhängigkeit ihrer Nutzungsverteilung unter Bildung statistischer Kennwerte ermittelt.

Abb. 5-1 zeigt die Häufigkeitsverteilung aller Heizenergieeinsparpotentiale der betrachteten Gebäude nach EnEV 2014. Hierfür werden vier Bewertungsstufen entwickelt, die Auskunft über die theoretischen Einsparpotentiale der Gebäude geben. Ein geringes Einsparpotential wird mit einer roten Farbe, hohes Einsparpotential mit einer grünen Farbe dargestellt. Die farbliche Darstellung findet sich in den folgenden Betrachtungen wieder.

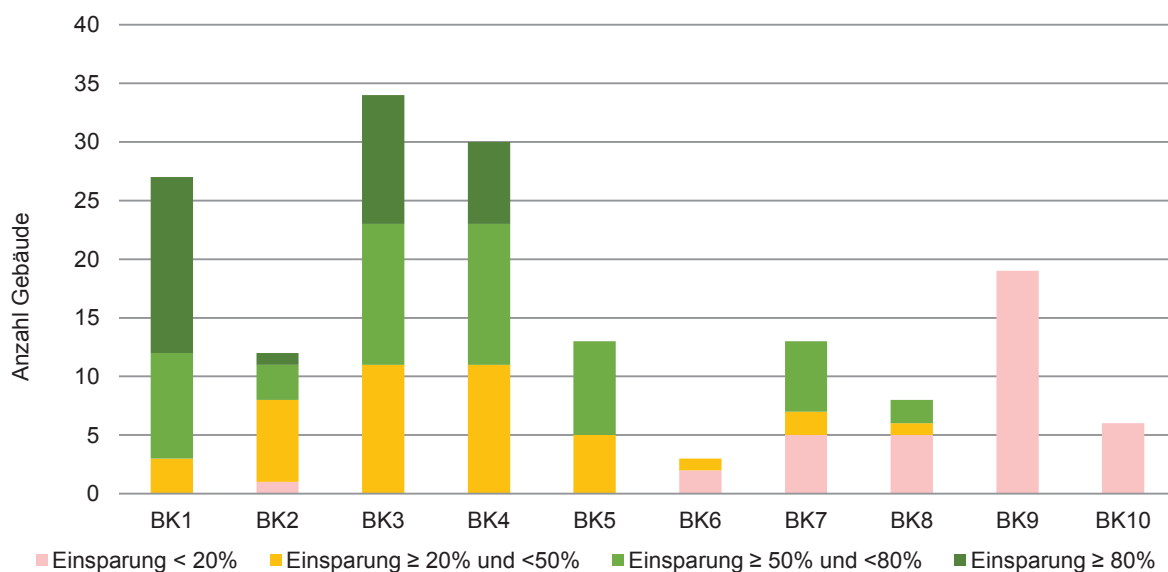


Abb. 5-1 Häufigkeitsverteilung der Einsparpotentiale an Heizenergie bei einer Sanierung nach EnEV-Anforderungen (eigene Darstellung)

Die Gebäude und ihre Bedarfe werden in Relation zueinander gesetzt, indem die absoluten und spezifischen Energiebedarfe die jeweiligen Mediane und die 25 bzw. 75% Quantile errechnet werden. Als überdurchschnittlicher Bereich werden die Bedarfe oberhalb des 75% Quantils definiert.

Von den 168 untersuchten Gebäuden werden insgesamt 14 Gebäude ermittelt, auf welche diese Eigenschaft zutrifft. Hierbei handelt es sich zu 93% um Laborgebäude. Hier sollte nun der Sanierungsstufenplan ansetzen: diese Gebäude sollten in der ersten Stufe genauer betrachtet und deren energetisches Sanierungspotential ausgeschöpft werden, um zeitnah den absoluten Energieverbrauch der LMU zu senken (vgl. Abb. 5-2). Sobald diese Gebäude niedrigere Verbrauchsdaten aufweisen, wird sich die Verteilung des Energiebedarfs bezogen auf die Gesamtliegenschaft entsprechend ändern. In einer zweiten Stufe können so die neuen Großverbraucher ermittelt und bearbeitet werden. Diese Vorgehensweise wird so lange wiederholt, bis die Sanierungsziele 2050 sukzessiv erreicht werden.

Abb. 5-3 zeigt, wie sich die Verteilung der Heizenergiebedarfe für die Gesamtliegenschaft nach einer EnEV-Komplettanierung verändern könnte. Der Median des absoluten Heizenergiebedarfs kann im Rahmen dieser Maßnahmen um 58,3% reduziert, der Median des spezifischen Heizenergiebedarfs sogar um 67,5% gesenkt werden. Je nach Wahl der Energieversorgung sinken parallel der End- und somit auch der Primärenergiebedarf. Die Reduktion der klimaschädlichen Einflussfaktoren (Umweltwirkungen) kann zudem durch die Wahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen erhöht werden (vgl. Kapitel 4.1.4).

Die Analyse zeigt allerdings auch, dass energieintensive Nutzungen (z.B. Laborgebäude) zwar effizienter betrieben werden können, allerdings auch nach einer Optimierung oberhalb des 75% Quantils liegen.



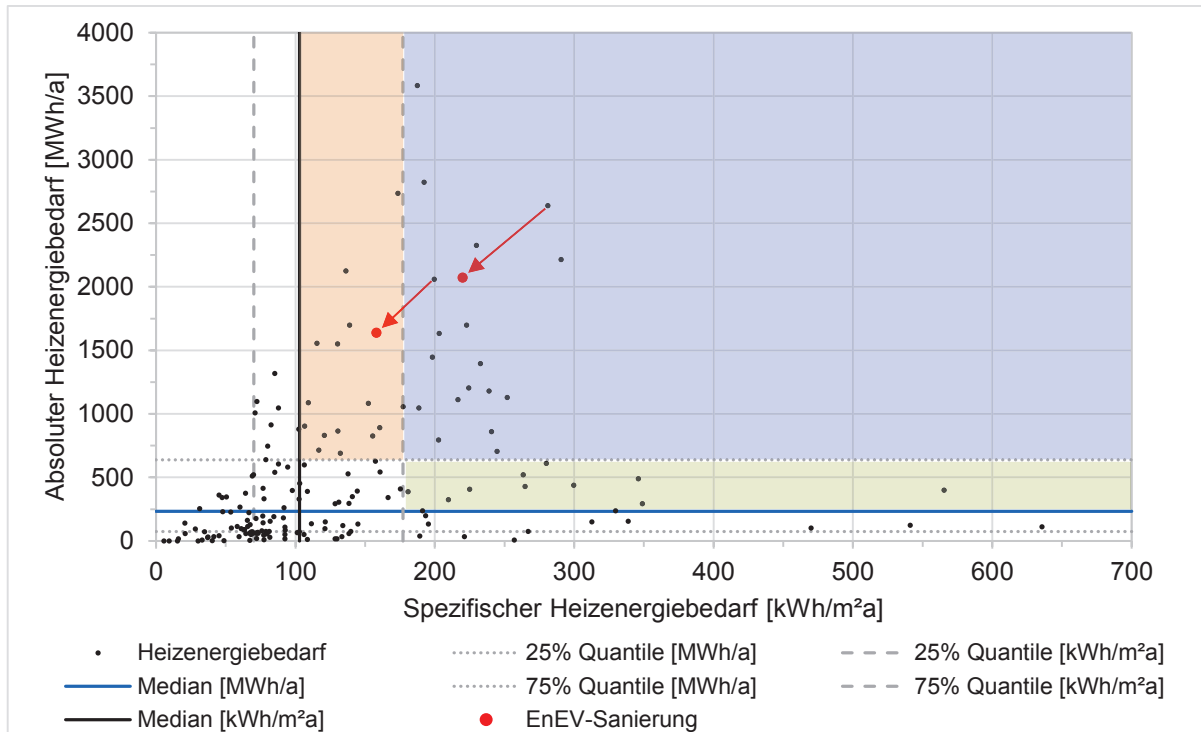


Abb. 5-2 Einfluss der Sanierung nach EnEV auf den Heizenergiebedarf am Beispiel von zwei Hauptverbrauchern (eigene Darstellung)

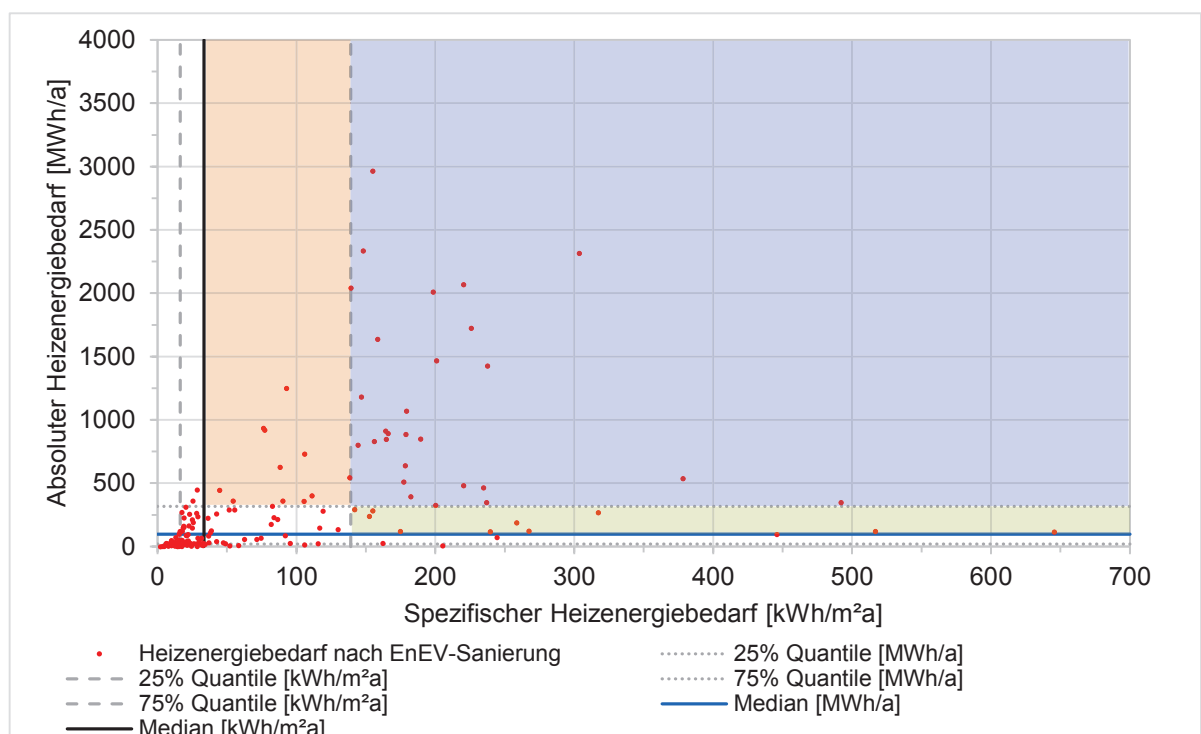


Abb. 5-3 Verteilung der Heizenergiebedarfe nach EnEV-Sanierung (eigene Darstellung)

Da der Großteil der Liegenschaften jedoch unterhalb des Medians liegen, können diese Großverbraucher von den Gebäuden mit niedrigerem Verbrauch statistisch getragen werden.

### 5.3 Technische Gebäudeausrüstung und Energiemanagement

Energieeinsparungen durch Maßnahmen in der technischen Gebäudeausrüstung sind sowohl beim Heizenergieverbrauch als auch beim Strom- und Kälteverbrauch von Bedeutung. Dabei übernimmt die Gebäudeautomation eine zentrale Rolle bei der Betriebsoptimierung.

Für alle in der ersten Phase des Projekts begangenen Gebäude wird ein hohes Potential für Einsparungen durch eine Verbesserung der Gebäudeautomation (GA) ausgewiesen, da sie auf Grund der aktuellen Datenlage der Gebäudeautomation-Effizienzklasse C nach DIN EN 15323 zugeordnet werden. Als Gebäudeautomation werden dabei „Produkte, Software und technischen Dienstleistungen für die automatische Steuerung und Regelung, Überwachung

und Optimierung, für das menschliche Eingreifen und das Management, mit deren Hilfe die Gebäudeausrüstung energieeffizient, wirtschaftlich und sicher bedient werden kann“ bezeichnet. Die GA ist daher eine notwendige Voraussetzung für die Regelung und somit für die Umsetzung vieler Effizienzmaßnahmen bzw. Regeleinrichtungen

Für die Potentialabschätzung im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung sind daher je Gebäude vor allem drei Bereiche von Bedeutung:

- Funktionsumfang und Größe von raumlufttechnischen Anlagen,
- Anzahl und Größe der Kältebereitstellung,
- Funktionsumfang und Anzahl der Datenpunkte einer Gebäudeautomation.

Hierbei handelt es sich um technische Bereiche, die im Rahmen des Energiemanagementsystems sehr gut überwacht, bewertet und mit dem erforderlichen kontinuierlichen Verbesserungsprozess, stetig optimiert werden können.

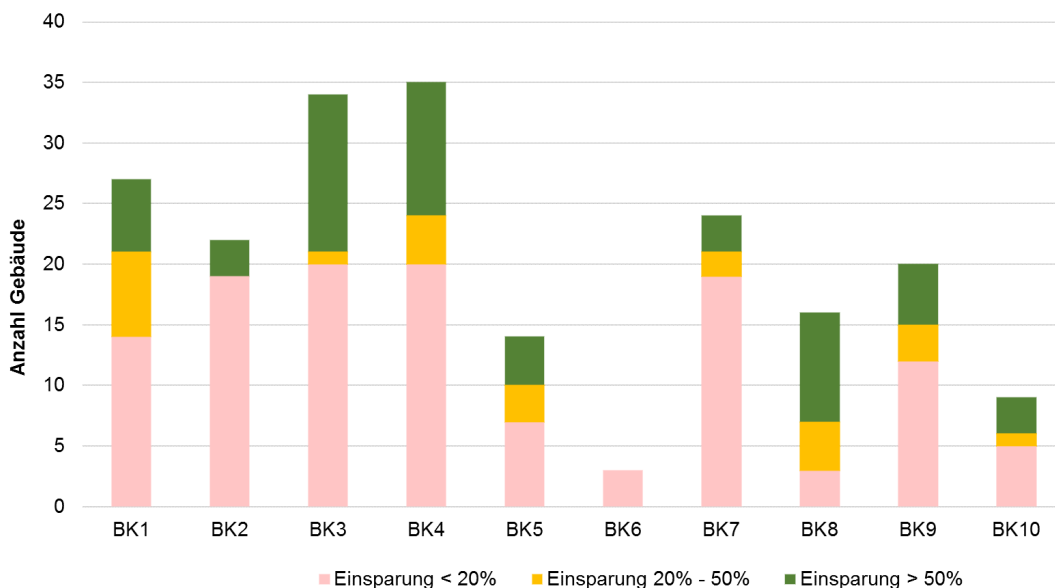


Abb. 5-4 Häufigkeitsverteilung der Einsparpotentiale am Gesamtenergieverbrauch bei einer Sanierung der Technischen Gebäudeausrüstung (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 1: Bewertung des Ist-Zustands, Identifizierung von Handlungsfeldern“, Brochier/Assmann)

Auf Grund der im Verhältnis zur Baukonstruktion geringeren Austauschzyklen der technischen Gebäudeausrüstung, ist eine Kategorisierung in Baualtersklassen nicht möglich. Dennoch ist festzustellen, dass insbesondere Gebäude der Baualtersklasse drei, vier und acht ein überdurchschnittlich hohes Energieeinsparpotential im Bereich der technischen Ausstattung aufweisen. Allgemein lässt sich ableiten, je komplexer die technischen Anlagen, desto größer ist das vorhandene Einsparpotential eines Gebäudes.

#### 5.4 Optimierungspotentiale im Quartier

Die in Kapitel 5.2 vorgestellte Sanierungsstrategie, sukzessive die Hauptverbraucher zu identifizieren und zu sanieren ist zwar sinnvoll, jedoch geht eine Sanierung immer unter Berücksichtigung aller Energiebedarfe einher. So sind Heiz-, Strom- und Kühlenergiebedarf eng an die Nutzungsart gekoppelt. Um den Energiebedarf und die -effizienz steigern zu können, reicht es z.B. nicht aus, lediglich die wärmeübertragende Umfassungsfläche energetisch zu verbessern. Parallel muss die Nutzung optimiert, die technischen Anlagen erneuert und vermehrt eine regenerative Energieversorgung angestrebt werden. Um Synergieeffekte zu verdeutlichen werden deshalb die Gebäude nicht als Einzeleigenschaften betrachtet, sondern in einen Gebäudeverbund, als Quartierslösung, integriert.

#### 5.5 Einsatz erneuerbarer Energien

Um die Wärme-, Kälte- und Stromversorgung von Gebäuden möglichst effizient und umweltschonend zu gestalten, muss auf das Potential regenerativ gewonnener Energie erhöhtes Augenmerk gelegt werden.

##### 5.5.1 Solare Energiegewinnung

Bedingt durch den Denkmalschutz sind nicht alle Gebäude zur Gewinnung von solarer Energie geeignet. Insgesamt könnten auf den Dächern der Liegenschaften der LMU ca. 25.800 m<sup>2</sup> PV-Kollektorfläche installiert werden. Daraus ergibt sich eine mögliche Peak-Leistung von 3.850 kW<sub>Peak</sub>. Dies entspricht einem Stromertrag von 4000 MWh pro Jahr. So können 2.600 t CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart werden. Bei dieser Kalkulation liegt der deutsche Strommix mit einer einhergehenden CO<sub>2</sub>-Erzeugung von 0,649 CO<sub>2</sub> je kWh zugrunde (LH München, 2015).

Prozentual kann der Strombedarf einzelner Gebäude sehr gut gedeckt werden. Ausschlaggebende Parameter sind hier im Wesentlichen die Orientierung sowie die Verschattung der Liegenschaften. Die energetische Einsparung hängt allerdings stark von der Nutzung des Gebäudes ab. Auch hier kann in Laborgebäuden nur ein Bruchteil des Bedarfs gedeckt werden. Energieintensive Nutzungen können meist kaum durch den solaren Energieertrag gedeckt werden. Ebenso können Gebäude mit einem schlechten Verhältnis aus Nutzfläche zu Dach- bzw. Fassadenfläche nur bedingt den Energiebedarf aus solarer Energie decken. Aus diesem Grund bietet es sich an, Betrachtungen auf Quartiersebene durchzuführen, um so eventuelle Schwankungen in den Betriebs- und Nutzungszeiten ausgleichen zu können. Die prozentualen Deckungsraten der einzelnen Quartiere werden in Abb. 5-5 angegeben.

##### 5.5.2 Biogas

Der Biogasertrag hängt stark von der Wahl der Biomasse ab. Darüber hinaus variiert der Methananteil pro m<sup>3</sup> deutlich. Um den Energiebedarf der LMU München rein aus Biogas decken zu können, müssen beispielhaft ca. 100.000 Milchkühe zur Biogasnutzung angeschafft werden. Diese benötigen eine Fläche von ca. 50.000 ha. Da dies aus organisatorischen Gründen kaum umsetzbar ist, sollte die Kombination einzelner Maßnahmen im Rahmen von Quartierslösungen angedacht werden. So bietet es sich beispielsweise an, in Oberschleißheim einen Teil der Bedarfe durch Biogas zu decken, da hier entsprechende Flächen zur Verfügung stehen und bereits Milchkühe bzw. eine Tierhaltung im Allgemeinen vorhanden sind.

##### 5.5.3 Windkraft

Auf Grund der geographischen Lage sind nur sehr hohe Windkraftanlagen im Großraum München effizient betreibbar. Darüber hinaus sind Windkraftanlagen im innerstädtischen Bereich nicht realisierbar. Theoretisch kann in München von 1.488 Volllaststunden pro Jahr bei einer Höhe von 160 m ausgegangen werden. Onshore-Anlagen können heutzutage einen Leistungsbereich von bis zu 5 MW erreichen. Nimmt man diese Zahlen vereinfacht an, würde die LMU 16 Windkraftanlagen benötigen, um ihren Energiebedarf rein aus Windenergie decken zu können. Hierbei werden allerdings keine Umwandlungsverluste betrachtet. Mit Beachtung der Umwandlungsverluste, die im Schnitt bei 33% liegen, würde sich die Anzahl der Windkraftanlagen auf ca. 22 Anlagen erhöhen.

#### 5.5.4 Oberflächennahe- und Tiefengeothermie

Die Potentiale in Bayern aus Sicht der Geothermie sind sehr groß. Allerdings bietet die oberflächennahe Geothermie auf Grund der großen Energieverbraucher und der Größe der Liegenschaften für die LMU nur wenig Potential. Sinnvoller wäre hier, gezielt Synergieeffekte einzelner Liegenschaften zu ermitteln und diese durch Tiefengeothermie sinnvoll zu unterstützen.

### 5.6 Visualisierung

Um dies am Beispiel der LMU München zu verdeutlichen, werden die Liegenschaften in vier Quartiere unterteilt und die Sanierungspotentiale der Gebäudehülle und der TGA sowie die Bedarfsdeckung durch Solarenergie grafisch aufbereitet (siehe Abb. 5-5, Seite 58). Zudem kann den Plänen entnommen werden, welche Gebäude unter Denkmalschutz stehen, da dadurch die Sanierung eingeschränkt werden kann.

Die Illustration der Einsparpotentiale bzgl. des Heizwärmebedarfs wird durch die farbliche Codierung der Gebäudeumrandungen der Einzelliegenschaften im Lageplan visualisiert. Die Einsparpotentiale werden in Bezug auf den EnEV-Standard (2014) dargestellt. Ein geringes Einsparpotential ( $\leq 20\%$ ) wird mit einem rosa Farbton dargestellt. Ein hohes Einsparpotential ( $> 80\%$ ) wird mit einem dunkelgrünen Farbton dargestellt. Die flächige Farbcodierung bezieht sich auf die energetischen Optimierungspotentiale der Gebäudetechnik. Ein rosa Farbton zeigt ein geringes, ein dunkelgrüner Farbton ein hohes Optimierungspotential auf. Darüber hinaus werden die mögliche prozentuale Bedarfsdeckung durch solar gewonnene Wärme sowie alternativ durch photovoltaisch gewonnene elektrische Energie der einzelnen Quartiere dargestellt. Der Einflussfaktor „Denkmalschutz“ wird in dem Lageplan mit einem roten Punkt visualisiert. Liegenschaften, die nicht bewertet werden konnten, werden mit einem schwarzen Rand dargestellt.

#### 5.6.1 Bewertung der Optimierungspotentiale im Quartier

Grundsätzlich sollte stets darauf geachtet werden, dass Synergieeffekte zwischen einzelnen Gebäuden genutzt werden können. Die grafische Auswertung der Quartiere ergibt, dass die innerstädtischen Areale im Raum Schwabing/Bogenhausen, Maxvorstadt sowie Sendling das größte Sanierungspotential besit-

zen. Die Gebäude stammen mehrheitlich aus frühen Baualtersklassen und die Sanierung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche birgt somit zunächst hohes Sanierungspotential. Allerdings ist hier der Denkmalschutz zu beachten, der die Sanierung der Gebäudehülle einschränken kann. Beispielsweise ist hier auf Grund des Denkmalschutzes keine Fassadendämmung möglich. Alternativ können Innendämmungen angewendet werden, welche allerdings die Nutzung während der Bauphase und den späteren Komfort (Deaktivierung der thermischen Speichermasse der Außenwand) beeinträchtigen können.

Der thermische Energiebedarf des Areals aus Abb. 5-5 könnte zu 56% aus solar gewonnener Energie gedeckt werden, wenn alle Dachflächen aktiv genutzt werden könnten. Die Deckung des Strombedarfs könnte zu 28% durch PV-Module gewährleistet werden.

Für den außerstädtischen Bereich, wo unter anderem Tierhaltung betrieben wird, könnte eine Biogasanlage die Nutzung regenerativer Energien unterstützen. Weitere quartiersspezifische Optimierungspotentiale können dem „Bericht Arbeitspaket 5: Energiemasterplan“ der TU München entnommen werden.

### 5.7 Bewertung der Ziele 2050 und Schlussfolgerungen

Nachfolgend werden die Zieldefinitionen (vgl. Kapitel 5.1) auf ihre Umsetzbarkeit hin betrachtet.

- Senkung des Primärenergiebedarfs um 50% und des Strombedarfs um 25% bis 2050

Mit den angesprochenen Sanierungsmaßnahmen ist es möglich den Primärenergiebedarf der Liegenschaften der LMU um mindestens 50% zu senken. Dieses Ziel kann mit Einhaltung des Sanierungsstufenplans erreicht werden. Sollte die LMU in der Lage sein den Sanierungsstufenplan bis 2050 zu verfolgen, kann wesentlich mehr Primärenergie eingespart werden. Allerdings werden einige Gebäude trotz Sanierung überdurchschnittliche Verbräuche aufweisen. Dies ist im Wesentlichen auf energieintensive Nutzungen zurückzuführen. Der Einsatz energieeffizienter Gerätschaften wird hier empfohlen. Auch bei der Betrachtung des Strombedarfs kann mit Einhaltung des Sanierungsstufenplans mit mehr als 25% Einsparung gerechnet werden. Dies bezieht sich im Wesentlichen auf die Effizienzsteigerung im Betrieb der Liegenschaften.

- Steigerung der Sanierungsrate auf 2% pro Jahr

Mit einer geforderten Sanierungsrate von 2% können am Beispiel der LMU lediglich vier Gebäude pro Jahr saniert werden. Bis 2050 würde man somit nur 66% der Liegenschaften energetisch betrachten und sanieren. Erhöht man die Sanierungsrate auf 3% (dies entspricht sechs Gebäuden pro Jahr), können alle Gebäude bis 2050 energetisch saniert werden. Durch die Anwendung des Sanierungsstufenplans werden jedoch sukzessive die größten energetischen Verbraucher auf einen effizienteren Gebäudebetrieb umgestellt. Dieses Vorgehen sollte auch 2050 nicht eingestellt werden, sondern stets weiter verfolgt werden. Nur so kann dauerhaft ein klimaneutraler Gebäudebetrieb umgesetzt werden, der den Anforderungen der Bundesregierung entspricht und als öffentlicher Bereich eine Vorbildfunktion einnehmen kann.

- Deckung des Endenergiebedarfs zu 60% aus erneuerbaren Energien

Die Betrachtung der Solar- und Biomassepotentiale zeigen deutlich, dass der Endenergiebedarf der Liegenschaften der LMU theoretisch regenerativ gedeckt werden kann. Jedoch ist eine ganzheitliche Umstellung auf dezentral erzeugte erneuerbare Energie nicht praktikabel, da sowohl bei der solaren Energienutzung wie auch bei der Nutzung von Biogastechnologien immense Flächen zur Deckung des Bedarfs der LMU München nötig wären. Eine kollektive Umstellung auf eine dezentrale Energieversorgung bzw. einen einzigen Energieerzeuger ist zudem zu riskant. Demnach sollten die Bedarfe einzelner Gebäude bzw. Quartiere nur teilweise über das solare Energieangebot gedeckt werden, soweit dies aus Gründen des Denkmalschutzes möglich ist. Abgesehen davon stellen auch öffentliche Netzbetreiber ihre Energieerzeugung sukzessiv auf erneuerbare Energien um. So planen die Stadtwerke München in ihrer „Ausbauoffensive Erneuerbare Energien“ bis 2025 eine 100%ige Bedarfsdeckung mit Ökostrom bezogen auf das Stadtgebiet München. Bis 2040 soll die Fernwärme in der Stadt ebenfalls zu 100% aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. (SWM, 12. April 2017) So sollte jede Universitätsliegenschaft natürlich zunächst den Bezug an regenerativer Energie aus dem öffentlichen Netz überprüfen, bevor eine weniger wirkungsvolle, aber mit einem großen Aufwand verbundene, dezentrale Energieerzeugung forciert wird.

### Liegenschaft Schwabing / Bogenhausen 1

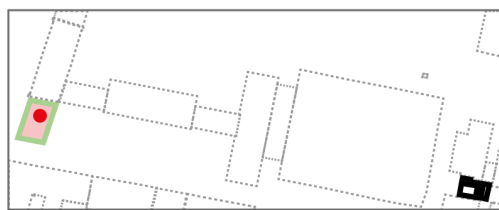
Sanierungspotentiale Gebäudehülle/  
Optimierungspotentiale TGA/  
Bedarfsdeckung durch Solarenergie



56 % 28 %



74 % 27 %



182 % 96 % (Bedarfsdeckung LMU Nutzung)

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #f8d7da; margin-right: 5px;"></span> Geringes Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV <math>\leq 20\%</math></li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #fff3cd; margin-right: 5px;"></span> Niedriges Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV <math>\leq 50\%</math></li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4edda; margin-right: 5px;"></span> Mittleres Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV <math>\leq 80\%</math></li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #c6e0b4; margin-right: 5px;"></span> Hohes Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV <math>&gt; 80\%</math></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #f8d7da; margin-right: 5px;"></span> Geringes Optimierungspotential TGA <math>&lt; 20\%</math></li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #fff3cd; margin-right: 5px;"></span> Niedriges Optimierungspotential TGA 20 - 50 %</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4edda; margin-right: 5px;"></span> Mittleres bis hohes Optimierungspotential TGA <math>&gt; 50\%</math></li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Keine Bewertung</li> <li><span style="display: inline-block; width: 0; height: 0; border-left: 5px solid transparent; border-right: 5px solid transparent; border-bottom: 8px solid red; margin-right: 5px;"></span> Denkmalschutz</li> </ul> |
|---|---|

Abb. 5-5 Beispiel einer Quartiersbeschreibung der LMU München mit Darstellung der Sanierungs- und Optimierungspotentiale sowie der Bedarfsdeckung durch Solarenergie (eigene Darstellung)

## 6 Ausbau bzw. Integration Energiemanagement an der LMU

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Werkzeuge (siehe Kapitel 3) sollen zukünftig an der LMU zum Einsatz kommen und zum Ausbau des Energiemanagements beitragen. Dafür ist aber auch die Umgestaltung einiger organisatorischer Abläufe notwendig.

Des Weiteren muss die dafür notwendige Infrastruktur (z.B. Zähler, technische Hilfsmittel) aufgebaut werden. Erste Schritte wurden dabei bereits innerhalb der Projektlaufzeit zurückgelegt.

### 6.1 Ausbau der erforderlichen Infrastruktur

Um das Energiemanagement an der LMU ausbauen zu können, musste auch die dafür erforderliche Infrastruktur an der LMU erweitert werden. Im Rahmen des Projektes HoEff-CIM wurden daher Messgeräte zur Zählerüberprüfung und Anlagenoptimierung, mobile Geräte für den Einsatz des QuickCheck-Tool (QCT) sowie Server für die Energiemanagementwerkzeuge beschafft, die im Folgenden kurz erläutert werden.

#### 6.1.1 Mobile Messgeräte zur Zählerüberprüfung und Anlagenoptimierung

Häufig können die geeichten Verbrauchszähler der Energieversorgungsunternehmen nicht oder nur mit großem Aufwand an die Gebäudeleittechnik (GLT) angebunden werden, um ein Fernauslesen der Zählerstände zu ermöglichen. Die LMU rüstet daher sukzessive eigene digitale Zähler nach, die ihre Daten an die GLT liefern (siehe Kapitel 2.4.2). Diese Zähler sind allerdings nicht geeicht und müssen nach dem Einbau bzw. in regelmäßigen Abständen geprüft werden, um verlässliche Daten zu erhalten.

Nicht nur die Verbrauchszähler müssen regelmäßig geprüft werden, sondern auch die Einstellungen der technischen Anlagen. Dazu braucht es ebenfalls Messgeräte, mit denen sich z.B. die Temperaturen in Räumen erfassen lassen, um bei Bedarf die Heizkurve entsprechend anpassen zu können. Im Rahmen des Projektes HoEff-CIM wurden hierfür ein Ultraschalldurchflussmessgerät, ein Netzanalysator sowie diverse Temperatur- und Feuchtedatenlogger angeschafft.

#### 6.1.2 Mobile Geräte für den Einsatz des Quick-Check-Tool QCT

Für die notwendige Datenerfassung vor Ort (z.B. Aufnahme von Zählerständen) und die Gebäudebegehung mit dem QCT, mussten mobile Geräte beschafft werden. Da die Begehung bei den teilweise großen und komplexen Universitätsgebäuden mehrere Stunden dauern kann, wurde Wert auf gute Transportabilität und lange Akkulaufzeiten gelegt. Als Testgeräte wurden deshalb mehrere Tablet-PCs mit Android-Betriebssystem angeschafft.

Diese haben sich auch im täglichen Arbeitsalltag als nützliche Hilfe erwiesen. Mit der Kamerafunktion können z.B. schnell Zustandsbilder von Gebäudebauteilen oder technischen Anlagen aufgenommen werden. Außerdem können z.B. auf dem Tablet hinterlegte Gebäudepläne als nützliche Hilfe bei der Gebäudebegehung dienen.

#### 6.1.3 Server für die Energiemanagement-Werkzeuge

Die entwickelte Energiemonitoringsoftware EnMoLMU erforderte einen eigenen Server, auf dem die Software läuft und die Daten zusammenfließen. Dort kann die Software und deren Schnittstellen zu anderen Programmen ausgiebig getestet werden, ohne die täglich von der Liegenschaftsverwaltung benötigten Anwendungen zu stören oder zu beeinflussen.

## 6.2 Energiedatenprojekt

Im Zuge der Überprüfung, welche Lücken bzw. Optimierungsmöglichkeiten innerhalb des Energiemanagement der LMU existieren, wurde auch festgestellt, dass nicht nur ein großes Potential an Energieeinsparung durch Anlagenbetrieb o.ä. vorhanden ist, sondern ebenso im wirtschaftlichen Energiebereich (Rechnungen, Verträge, etc.) effizientere Prozesse möglich wären. Dies wird die Fehleranfälligkeit reduzieren und kann zu teils großen monetären Einsparungen führen.

Während der Projektlaufzeit wurde daher der Prozess der Energiedatenverarbeitung aufgenommen, analysiert und umstrukturiert. Insgesamt wurde der

Gesamtprozess zur Energiedatenverarbeitung in sechs Teilprozesse aufgeteilt, „Energiefieferverträge“, „Zählererfassung“, „Zählerwertübermittlung (EVU)“, „Energierrechnungen“, „Weiterverrechnung“ und „Anfragen zu Energiedaten“. Das Hauptaugenmerk des zukünftigen Prozesses liegt darauf, den Prozess auf weniger Personen zu verteilen, um Schnittstellen und Kommunikationswege zu verkürzen und paralleles Arbeiten zu verhindern. Dies wurde an verschiedenen Stellen erreicht, indem energiebezogene Daten ins CAFM-System aufgenommen wurden und entsprechende Prozesse zur Ermittlung und Eingabe der Daten etabliert wurden. In den zwei Bereichen, die hauptsächlich mit der Kommunikation mit Externen (EVUs, Bauämter, Energiestellen, etc.) befasst sind, ist das Problem der wechselseitigen Datenverarbeitung nicht ausschließlich durch eine standardisierte und gemeinsame Datenhaltung behoben. Um auch in diesen Bereichen Mehrarbeit durch paralleles Arbeiten zu verhindern, soll eine zentrale Energiestelle der LMU geschaffen werden und als Sammel- und Verteilstelle von Informationen fungieren.

### 6.3 Vorbereitung einer zentralen Stelle

Wie im Kapitel 2.2.1 beschrieben, wurde als erste Maßnahme der Prozess der Energiebeschaffung und die damit verbundene Rechnungsprüfung umgestellt. Im Folgenden soll zuerst die bisherige Organisation des technischen Personals und anschließend die Umstrukturierung beschrieben werden.

#### 6.3.1 Organisation des technischen Personals an der LMU

Der Aufbau der Zentralen Universitätsverwaltung (ZUV) wird im Kapitel 2.3.1 erläutert. Nachfolgend sind die Referate des Dezernates IV Liegenschaften und Technik beschrieben:

- Referat IV.1 Planung, Bau, Bewirtschaftung
- Referat IV.2 Betriebstechnik Stammgelände, Zentralwerkstatt
- Referat IV.3 Geräte- u. Nachrichtentechnik
- Referat IV.4 Hausverwaltung Stammgelände
- Referat IV.5 Hausverwaltung u. Betriebstechnik Areal Sendlinger Tor

- Referat IV.6 Hausverwaltung Großhadern/Martinsried
- Referat IV.7 Betriebstechnik Großhadern/Martinsried

Während die Referate IV.1 und IV.3 für alle Standorte der LMU zuständig sind, sind die Technikbereiche und die Hausverwaltungen für die einzelnen Bereiche (Stammgelände, Areal Sendlinger Tor, Großhadern/Martinsried) aufgesplittet. Aufgrund der Größe gibt es in den Bereichen Stammgelände und Großhadern/Martinsried jeweils eigene Betriebstechniken und Hausverwaltungen während diese im Areal Sendlinger Tor in einem Referat zusammengeführt sind.

#### 6.3.2 Umstrukturierung Referat IV.2

Nicht nur die Schaffung einer zentralen Energiestelle gab Anlass zu der Umstrukturierung des „Referates IV.2 Betriebstechnik Stammgelände, Zentralwerkstatt“ sondern auch die zuvor vorhandene strikte Trennung der Gewerke Elektrotechnik und Heizung, Klima, Lüftung, Sanitär (HKLS). Außerdem wurde die alte Organisationsstruktur den heutigen vielfältigen Aufgabengebieten nicht mehr ganz gerecht.

##### 6.3.2.1 Aufgabengebiete

Das Referat IV.2 ist in erster Linie für die Planung, den Bau und den Betrieb (Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung) der betriebstechnischen Anlagen, z.B. Heizung- und Lüftungsanlagen, Sanitäranlagen, Elektrotechnische Anlagen, im Bereich Stammgelände und Oberschleißheim verantwortlich.

Da das Referat IV.2 die größte technische Abteilung an der LMU darstellt, wird von diesem aber nicht nur die oben beschriebene technische Betreuung der Liegenschaften rund um das Hauptgebäude übernommen, sondern auch noch andere zentrale Aufgaben, welche alle Gebäude der LMU betreffen. Dazu gehört z.B. der Abschluss von Energiefieferverträgen, die Betreuung der Gebäudeautomation auf Managementebene oder die Bearbeitung des Projektes HoEff-CIM. Diese Arbeiten erfolgen dabei stets in Abstimmung mit den anderen Technikreferaten.



### 6.3.2.2 Alte Organisationsstruktur

Vor der Umstrukturierung war das Referat IV.2 nach Aufgabengebieten getrennt (siehe Abb. 6-1). Innerhalb dieser Aufgabengebiete wurden die Liegenschaften den entsprechenden Sachbearbeitern zugeteilt. So war jeder Sachbearbeiter für eine feste Anzahl an Gebäuden zuständig. Wurden in einem Gebäude also Maßnahmen (Sanierungen, Umbau-

ten, usw.) umgesetzt, die mehrere Gewerke betroffen haben, so waren auch mehrere Aufgabengebiete des Referates IV.2 für die Bearbeitung zuständig. Außerdem gab es zwar eine Stelle für den Abschluss von Energielieferverträgen, die Prüfung und Bezahlung der Energierechnungen für den Bereich Stammgelände wurde aber in den Referaten IV.1 und IV.4 vorgenommen.

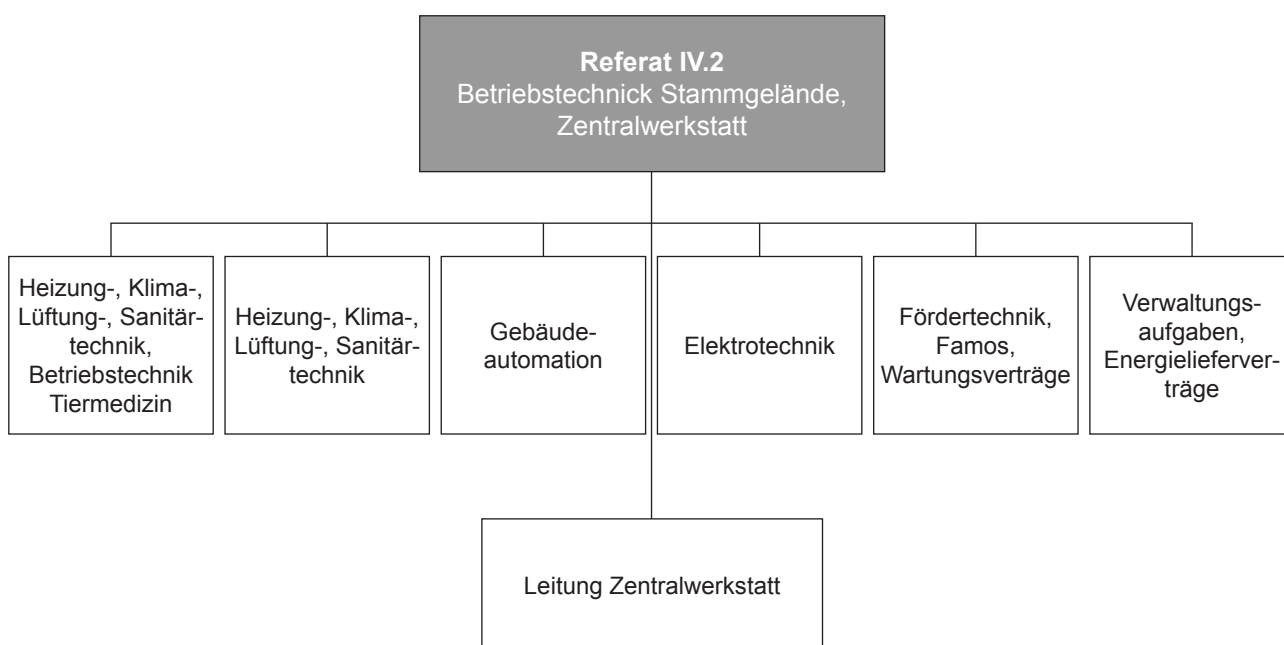


Abb. 6-1 Organigramm Referat IV.2 auf Ingenieurebene vor der Umstrukturierung (eigene Darstellung)

### 6.3.2.3 Neue Organisationsstruktur

Aufgrund oben beschriebener Nachteile erfolgte eine Umstellung des Referates IV.2 auf Sachgebiete (siehe Abb. 6-2). Die Sachgebiete 1 bis 4 kümmern sich fortan um die Gewerke HKLS und Elektrotechnik. Jedes Gebäude im Bereich Stammgelände ist einem dieser vier Sachgebiete zugeordnet. Es erfolgt somit eine engere Verknüpfung dieser beiden Gewerke, die besonders häufig zusammenhängen.

Sachgebiet 6 betreut die Liegenschaften außerhalb Münchens und ist außerdem für die Bereiche Fördertechnik und den Abschluss und die Pflege von Wartungsverträgen zuständig.

Das neue Sachgebiet 8 stellt die neue zentrale Stelle für Energie dar. Von hier aus sollen zukünftig Verbrauchsdaten überwacht, Energierechnungen kontrolliert und Anlagen optimiert werden. Außerdem kümmert sich dieses Sachgebiet um die gesamten Zähler und Messstellen der Gebäude im Bereich Stammgelände. Derzeit erfolgt durch diese Stelle bereits die Prüfung und Bezahlung der Energierech-

nungen und ein Ausbau bzw. eine Überprüfung der Verbrauchszähler der LMU. Für ein effizientes Energiemanagement ist bei der Größe der LMU und der Vielzahl und Komplexität der Gebäude allerdings mehr Personal notwendig. Mit dem Schritt der Einführung dieses Sachgebietes, wurde aber bereits die Organisationsstruktur geschaffen, falls sich die Hochschulleitung der LMU zu einem Ausbau der Tätigkeiten im Bereich Energiemanagement entschließen sollte.

Das Sachgebiet 9 kümmert sich um allgemeine Verwaltungsaufgaben und den Abschluss von Energielieferverträgen und arbeitet eng mit dem Sachgebiet 8 zusammen.

Die Sachgebiete 5 und 7 bleiben unverändert und sind weiterhin für den Bereich Zentralwerkstatt bzw. Gebäudeautomation zuständig.

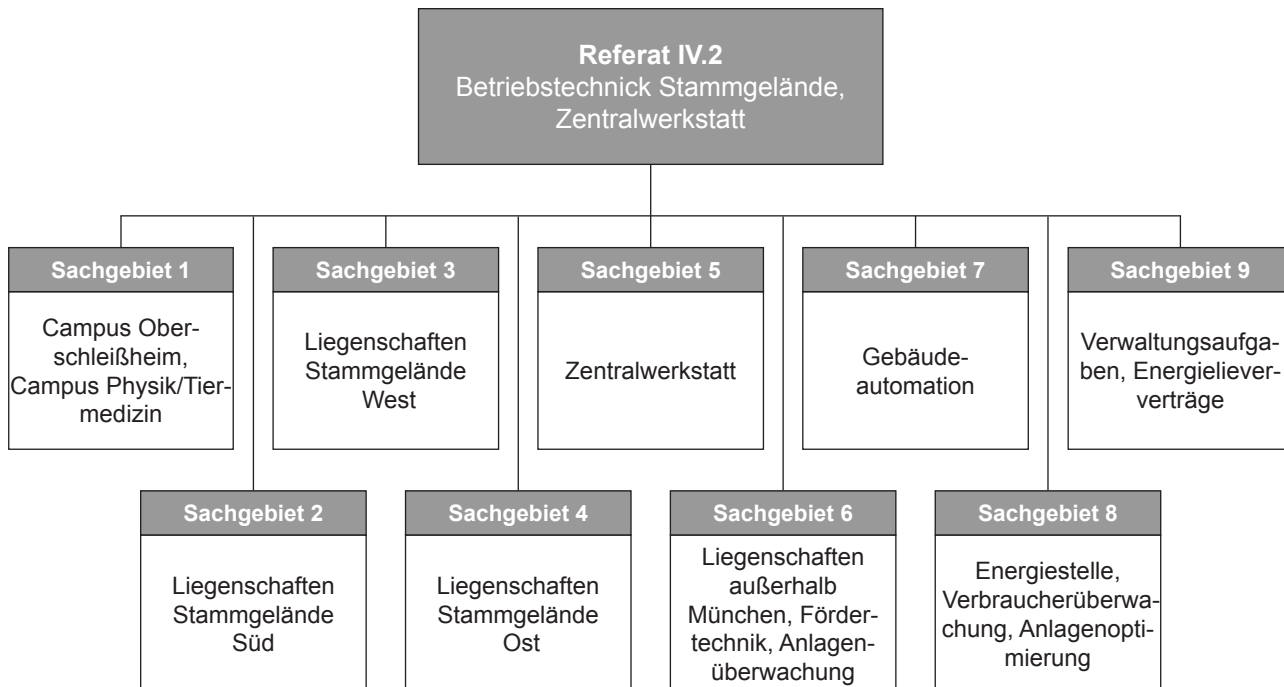


Abb. 6-2 Organigramm Referat IV.2 auf Ingenieursebene nach der Umstrukturierung (eigene Darstellung)

#### 6.3.2.4 Ansprechpartner und Vorschlagswesen für Gebäudenutzer

Maßgeblich hängt der Energieverbrauch der Liegenschaften allerdings auch vom Nutzerverhalten in den Gebäuden ab. Um interessierten LMU-Mitarbeitern die Chance zu geben, sich über die Verbrauchsdaten ihrer Gebäude zu informieren, wurde die Kontaktdaten der Mitarbeiter des Sachgebietes 8 auch im Serviceportal der LMU veröffentlicht. Dieses stellt eine Art Intranet dar, auf das alle Mitarbeiter Zugriff haben. Über diesen Weg können auch Optimierung- und Verbesserungsvorschläge zur Energieeinsparung eingereicht werden. Langfristig wäre hier auch eine Veröffentlichung der Energieverbräuche denkbar.

### 6.4 Integration Energiemonitoring in die Planungsphase bei Baumaßnahmen

Bei der oben beschriebenen zentralen Energiestelle liegt auch die Entwicklung und Betreuung der Energiemonitoring-Software EnMoLMU (siehe Kapitel 3.1.2). Die erste Verwendung von EnMoLMU zeigte nicht nur den sehr großen Bedarf an solch einem Tool zur Anlagenüberwachung sondern bestätigte auch, dass der Aufwand zur energetischen Anlagenoptimierung, die Anpassung des Anlagenbetriebs oder auch die Änderung des Nutzerverhaltens in bereits etablierten Gebäuden deutlich höher ist, wenn die Infrastruktur und technischen Anlagen nicht von der

Planungsphase an im Blickwinkel der Energieeffizienz und -transparenz betrachtet werden.

Hieraus resultierend sollen zum einen Aspekte der Energieeffizienz stärker mit in die Planung von Neubauten bzw. größeren Sanierungsmaßnahmen einfließen und zum anderen die messtechnische Infrastruktur für ein mögliches Energiemonitoring angelegt werden. Ein Teil dieser Mess-Infrastruktur kann mittels generellen Vorgaben in die Planung eingebracht werden. Dazu wurden Angaben zu Zählerstellen, Messstrecken, Zählertypen und dem Vorgehen zur Zählerplausibilisierung in den LMU Leitfadens Bau (siehe Kapitel 6.5.1) eingefügt.

Bei großen Sanierungsmaßnahmen bis hin zu Neubauten soll die zentrale Energiestelle im Planungsprozess vor der HU-Bau (Entwurfsplanung) und vor der AFU-Bau (Ausführungsplanung) beratend hinzugezogen werden, um die Planung der Ingenieurbüros auf eine geeignete Mess-Infrastruktur zu prüfen und gegebenenfalls weitere Messpunkte zu definieren.

Diese Vorgehensweise wurde während der Projektlaufzeit anhand einer konkreten Neubaumaßnahme getestet und soll zukünftig bei allen größeren Umbaumaßnahmen und Neubauten Anwendung finden.

## 6.5 Weitere Maßnahmen bzw. Bemühungen

Neben dem Projekt HoEff-CIM gibt es noch weitere Projekte bzw. Bemühungen an der LMU, um Energie einzusparen. Da diese nicht unerwähnt bleiben sollen, werden sie im Folgenden kurz vorgestellt.

### 6.5.1 Leitfaden Bau

Zusätzlich zu den gültigen gesetzlichen Vorgaben und Vorschriften, hat die LMU eigene Standards für die Planung und den Bau ihrer Gebäude erarbeitet. Der Leitfaden Bau enthält neben allgemeinen Vorgaben auch Hinweise für die Ausführung der Baukonstruktion, der technischen Anlagen, der Außenanlagen sowie der Ausstattung. Außerdem wurden zusätzliche Anforderungen an die unterschiedlichen Raumtypen (z.B. Hörsäle, Labore, Büroräume, usw.) definiert. Der Leitfaden wird jährlich aktualisiert und dem Staatlichen Bauamt München 2 sowie den beteiligten Architektur- und Ingenieurbüros ausgehändigt.

Der Leitfaden Bau wird allerdings auch dafür genutzt, energierelevante Themen zu kommunizieren. So gibt es z.B. die Vorgabe der LMU, bei Planungsentscheidungen immer die Gebäudelebenszykluskosten, also neben den Erstellungskosten auch die Folgekosten der Gebäudenutzung, zu berücksichtigen. Oder das bei Lüftungsanlagen nur zertifizierte Luftfilter mit besonders niedrigen Druckverlusten eingebaut werden dürfen.

Die Erkenntnisse die im Rahmen des Projektes HoEff-CIM gewonnen wurden, flossen in die Überarbeitung dieser Planungshinweise mit ein. So wurde z.B. definiert, wo überall Verbrauchszähler eingebaut werden müssen und welche Messstrecken dafür einzuplanen sind.

### 6.5.2 Ökoprofit

Die LMU beteiligt sich regelmäßig mit verschiedenen Liegenschaften an dem ÖKOlogischen PROjekt Für Integrierte Umwelt-Technik – kurz ÖKOPROFIT – der Stadt München. Hierbei handelt es sich um ein Projekt zwischen Kommunen und Betrieben bzw. Unternehmen (z.B. Dienstleister, Gewerbebetriebe, öffentliche Einrichtungen, usw.). Dabei werden neben Workshops und Vor-Ort-Beratungen auch hilfreiche Arbeitsmaterialien angeboten (LfU, 2015).

Zuletzt hat die LMU 2015/2016 mit einem Gebäude an dem Modul Ökoprofit Energie teilgenommen,

bei dem der Fokus auf die Identifikation und Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen gelegt wurde. Neben Workshops z.B. zu den Themen Energiedatenerhebung, Mitarbeitersensibilisierung, Beleuchtungsanlagen usw. wurden auch Vor-Ort-Termine durchgeführt, bei denen externe Berater Tipps für die Verbesserung der Energieeffizienz der Liegenschaften gaben. Des Weiteren profitierte die LMU aus dem Erfahrungsaustausch mit den anderen Teilnehmern des Programms.

## 6.6 Ausblick

Für ein funktionierendes Energiemanagement sind nicht nur technische Arbeitshilfen notwendig, sondern auch entsprechende Stellen, die sich darum kümmern und diese Hilfsmittel nutzen. Im Rahmen von HoEff-CIM wurde deshalb die Organisationsstruktur für eine solche zentrale Stelle, die sich mit dem Thema Energie beschäftigt, geschaffen. Voraussetzung für die Ausweitung des Energiemanagements an LMU ist allerdings die Besetzung dieser Stelle mit einer ausreichenden Personalstärke.

Mit der Überarbeitung des Ablaufs der Energiedatenverarbeitung und der Integration von Energiemonitoringmaßnahmen in die Planungsphase von Baumaßnahmen, wurden außerdem bereits erste energierelevante Prozesse optimiert. Hier werden zukünftig aber sicher noch weitere Anpassungsarbeiten notwendig sein bzw. noch andere energierelevante Arbeitsabläufe überarbeitet werden müssen.



## 7 Fazit und Ausblick

### 7.1 Fazit

Um die Umstellung auf einen energieorientierten Gebäudebetrieb zu erreichen, muss ein Energiemanagement eingeführt werden. Für ein erfolgreiches Energiemanagement bedarf es eines organisations-spezifischen Energiecontrolling-Netzwerkes, das eine geeignete Zählerstruktur und technische Infrastruktur beinhaltet. Das Zählerkonzept zur Verbrauchserfassung, die passende Methode der Zählerauslesung, die Gebäudeautomation und auf die Komponenten abgestimmte Energiecontrolling-Software bilden das Fundament für ein funktionierendes Energiemanagement.

Mit einem Energiemanagementstufenplan wird eine Zusammenfassung der für die Energiemanagementeinführung notwendigen Prozesse und die sinnvolle Reihenfolge zu deren Realisierung aufgestellt. Die Rückwirkung der einzelnen Stufen muss fortlaufend Berücksichtigung finden.

Für die Analyse des Gebäudebestandes gemäß des Energiemanagementstufenplanes wurde das Quick-Check-Tool als unterstützendes Werkzeug entwickelt. Dabei werden Berichte für verschiedene Stufen dieses Gebäuderankings und seiner Nutzergruppen erstellt.

Das Energiemanagement für einen Hochschulcampus ist ein komplexer Prozess, an dem eine Vielzahl von Beteiligten mit verschiedenem Kenntnisstand auf einer Vielzahl von Handlungsfeldern aktiv ist. Um für diesen Prozess geeignete Hilfsmittel wie das in diesem Projekt entwickelte QCT zu erstellen, müssen die zukünftigen Anwender in die Weiterentwicklung der Werkzeuge mit einbezogen werden. Eine ausführliche Praxiserprobung ist zudem notwendig, damit ein tatsächlicher Einsatz in der Praxis nicht durch fehlenden Komfort oder schlechte Anpassung an die Handlungsabläufe der Anwender verhindert wird. Bei der Vielzahl der Informationen über ein Gebäude, die für verschiedene Fragestellungen im Rahmen eines Energiemanagements von Hochschulen notwendig sind, ist eine übersichtliche Zusammenfassung der notwendigen Information von höchster Priorität.

Der Energiemasterplan stellt mögliche Sanierungspotentiale dar. Die Umsetzung ist allerdings von der allgemeinen Flächenplanung der Universität abhängig. Dabei spielen hochschulpolitische Entscheidungen und die strategische Ausrichtung der universitären Liegenschaft eine übergeordnete Rolle. Zudem

existieren organisatorische Barrieren, die den Fokus auf die Erstellung eines klimaneutralen Campus erschweren. Die Budgettrennung von Betriebskosten und Bauunterhaltsmaßnahmen verhindert den Anreiz und die Amortisationsbetrachtung von energetischen Mehrkosten. So werden technische Anlagen nicht auf Grund der Energieeinsparung ausgetauscht sondern auf Grund des Zustands. Die Liegenschaftsverwaltung bemüht sich zwar um energetisch sinnvolle Varianten, muss aber das Kosten/Nutzen-Verhältnis und die Budgetverteilung beachten. Für eine Steigerung der energetischen Sanierungsrate müssen neben den reinen Baukosten zukünftig dringend die gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes mehr berücksichtigt werden. Ferner verhindern fehlende personelle Kapazitäten die Verwaltung von effizienzsteigernden Bau- und Sanierungsmaßnahmen in öffentlichen Einrichtungen.

Ein weiterer, erheblicher Grund für die Verzögerung von energetischen Sanierungsmaßnahmen ist die notwendige Aufrechterhaltung des Universitätsbetriebes. So sind parallel dazu zwar Teilsanierung und insbesondere der Austausch von technischen Anlagen möglich, bei einer Generalsanierung des Gebäudes bedarf es aber geeigneter Ausweichflächen, die nur unter hohem Aufwand auf die speziellen Nutzungsarten wie der Tierhaltung abgestimmt werden können. Bei einer jährlichen Sanierungsrate von 3% müssten die Nutzer von sechs Gebäuden vorübergehend in einer alternativen Liegenschaft untergebracht werden, was auf Grund der Platzproblematik im derzeitigen Gebäudebestand nicht umsetzbar ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Energiemasterplan eine gute Methodik zur Identifizierung der größten Energieverbraucher der LMU liefert. Diese geraten somit in den Fokus der Liegenschaftsverwaltung und können in den Flächenmasterplan eingearbeitet werden. Des Weiteren werden die Potentiale zur Erhöhung der Nutzung erneuerbarer Energien aufgezeigt. Eine teilweise Umsetzung und somit eine teilweise Deckung des Energiebedarfs der LMU durch regenerative Energien ist dabei durchaus denkbar. So trägt der Energiemasterplan zur Entwicklung eines klimaneutralen Campus bei. Um einen klimaneutralen Gebäudebetrieb zukünftig sicherzustellen, sollten politischen Entscheidungswege kritisch betrachtet und überdacht werden.

Für ein flächendeckendes Energiemanagement bzw. Energiemonitoring müssen noch eine Vielzahl bestehender Zähler geprüft, berichtigt und viele mess-

technische Lücken in der Energiestromerfassung geschlossen werden, was kontinuierlich fortgeführt werden soll.

Für den Start eines zentralen und strukturierten Energiemonitorings wird im Projektverlauf eine ausreichende Basis an funktionierenden und gut strukturierten Zählern geschaffen. Ziel ist es, alle Gebäudeverbräuche einzeln erfassen zu können. In Einzelfällen soll durch die Ergänzung von virtuellen Zählern der gänzliche Lückenschluss erfolgen. Zur Überwachung der Anlagen auf Funktion und Energieeffizienz ist eine passende Softwarelösung zwingend erforderlich. Zudem soll die verwendete Energiemonitoringsoftware eine Auswertung der Energie- und Medienverbräuche ermöglichen. Auch wäre es wünschenswert, wenn die Ergebnisausgabe der Software so weiterentwickelt wird, dass der Nutzereinfluss direkt erkennbar ist und dieser dadurch zur Energieeinsparung angeregt wird.

## 7.2 Weiterer Forschungsbedarf

Nach wie vor gibt es Abweichungen zwischen in der Planung berechneten Energiebedarfswerten und später im realen Betrieb gemessenen Verbrauchswerten. Der reale Betrieb eines Gebäudes stellt immer nur eine der vielen Möglichkeiten dar, wie Gebäude betrieben werden können. Daher muss die komplexe Thematik der Nutzungseffekte in die Planung mit geeigneten Methoden beachtet werden und die wesentlichen Einflussgrößen müssen klar in Erscheinung treten können. Der Nutzereinfluss steigt mit dem immer besser werdenden energetischen Baustandard drastisch an. Dabei benötigen nach heutigem energetischem Standard errichtete Gebäude für ihre Betriebsbereitschaft ein Minimum an Energie.

Viel stärker beeinflussen die Nutzung und die individuellen Ansprüche des Menschen an die Raumqualität den Gebäudeenergieverbrauch. Darüber hinaus muss die eingesetzte Gebäudetechnik die gestellten Raumklimaanforderungen während der Nutzungszeit sicherstellen und gleichzeitig die notwendige Energie effizient erzeugen sowie im Gebäude verlustarm verteilen.

In der Planung können Nutzungseffekte nur mit aufwendigen Verfahren berücksichtigt und quantifiziert werden. Während des Gebäudebetriebs sind sie kaum zu identifizieren und damit nicht zu bewerten. Eine datenbasierte Analyse des Energieverbrauchs

von Gebäuden wird bisher nur durch detaillierte Messungen durchgeführt. Dies bedeutet jedoch, dass mit steigender Komplexität der Gebäudestruktur der Mess- und Datenanalyseaufwand und damit die Kosten erheblich steigen. Die geforderte Wirtschaftlichkeit ist nicht mehr gegeben. Bisherige Ansätze zur Energieverbrauchsoptimierung erfolgen selten automatisiert und datenbasiert. Eine holistische, systematische Erfassung des Gebäudeenergieverbrauchs und dazugehöriger nutzerinduzierter Handlungen wird bisher nicht durchgeführt. Viele schwer zugängliche Informationen, wie z.B. Raumnutzungsdaten, werden meist durch Befragungen erhoben und nur die großen Verbraucher werden auf ihre Effizienz hin untersucht. Effizienzmaßnahmen werden basierend auf einer Kombination von Mess- und Erfahrungswerten ermittelt. Eine ganzheitliche Evaluierung und Nachweisführung der Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen ist kaum möglich.

Der Einfluss des Nutzerverhaltens, der sich in der im Projekt entwickelten Methode sehr gut abbilden lässt, sollte durch weitergehende Untersuchungen mit validierten Eingangswerten optimiert werden. Zusätzlich sollte die Methode um einen passenden, automatisierten Baustein zur dynamischen Bewertung der Anlagentechnik erweitert, um fundierte Aussagen zu End- und Primärenergiebedarf zu generieren.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Arbeitspakete und Aufgabenverteilung des HoEff-CIM-Projektes (eigene Darstellung) .....	2
Abb. 2-1	Verteilung der LMU Standorte im Stadtgebiet (eigene Darstellung nach(LMU, o.J.)).....	4
Abb. 2-2	Organigramm der LMU (eigene Darstellung nach (LMU, o.J.)) .....	5
Abb. 2-3	Energiemanagementwerkzeuge und deren Zusammenspiel (eigene Darstellung) .....	8
Abb. 2-4	LMU-Liegenschaften - Beispiele für unterschiedliche Baualtersklassen (Bild oben links/unten links: eigenes Bild, Bild oben rechts/unten rechts: LMU).....	10
Abb. 3-1	Beispielschema für die Zählerstruktur eines Areals (eigene Darstellung).....	11
Abb. 3-2	Schnittstellen von EnMoLMU (eigene Darstellung).....	13
Abb. 3-3	Aufbau von EnMoLMU (eigene Darstellung).....	14
Abb. 3-4	Aufbau der Berichtsvorlagen (eigene Darstellung) .....	14
Abb. 3-5	„Energiesignatur“ eines Gebäudes (eigene Darstellung).....	15
Abb. 3-6	„Temperaturvergleich“ mit verschiedenen Rücklauftemperaturen eines Gebäudes (eigene Darstellung).....	15
Abb. 3-7	Rasterdiagramm des Stromverbrauchs eines Gebäudes im 15-Min.-Takt (eigene Darstellung) .	16
Abb. 3-8	Jahresdauerlinie Kälteerzeugung (eigene Darstellung) .....	16
Abb. 3-9	Vergleich zweier Wärmemengenzähler inkl. Gradtagszahlbereinigung (eigene Darstellung).....	16
Abb. 3-10	Interaktive Grafik mit R-Erweiterung ‚shiny‘ (eigene Darstellung).....	17
Abb. 3-11	Qualitäten in der Portfoliobetrachtung auf Basis von Gebäudekennwerten (Regel, 2016).....	19
Abb. 3-12	Prinzip der Referenzraummethode (Regel, 2016) .....	20
Abb. 3-13	Gewichtung der Effekte bei unterschiedlichen Wärmedämmstandards oWSchV-EnEV und gleichem Fensterflächenanteil W1 (Regel, 2016) .....	22
Abb. 3-14	Verhalten des Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit von der Umgebungssituation (Regel, 2016) .....	23
Abb. 3-15	Vergleich der 1st-Order Sensitivitätsindizes $S_i$ zur quantitativen Bewertung ausgewählter Eingangsparameter der Case-Study 2 (Regel, 2016) .....	24
Abb. 3-16	Energiemanagementstufenplan mit kontinuierlichem Verbesserungsprozess (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 3: Energiemasterplan und das erforderliche Management“, Brochier/Assmann) .....	26
Abb. 3-17	Beispiel für einen Gebäudesteckbrief der ersten Stufe im QCT (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann).....	28
Abb. 3-18	Beispiel für eine Campus-Rangordnung der ersten Stufe im QCT (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann).....	29
Abb. 3-19	Beispiel für einen Gebäudesteckbrief der zweiten Stufe im QCT - Darstellung der gebäude-technischen Sanierungspotentiale (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann).....	29
Abb. 3-20	Mechanismus der energetischen Bewertung von Sanierungsmaßnahmen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement“, Brochier/Assmann) .....	30
Abb. 4-1	HoEff-CIM Modellgebäude (eigene Darstellung) .....	34
Abb. 4-2	Heizwärmebedarf des HoEff-CIM-Modellgebäudes in Abhängigkeit der Baualtersklasse (Ausgangsfall) und des energetischen Sanierungsstandards (EnEV 2014 bzw. NE) (eigene Darstellung).....	35
Abb. 4-3	Einsparpotential der Einzelmaßnahmen in BK 1 und BK7 nach EnEV 2014 (eigene Darstellung).....	35
Abb. 4-4	Phasen einer Ökobilanz mit durchzuführenden Arbeitsschritten (eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14044, 2006).....	36
Abb. 4-5	Häufigkeitsverteilung der prozentualen Heizenergieeinsparung aller betrachteten Sanierungsmaßnahmen (eigene Darstellung) .....	37
Abb. 4-6	Bewertung des energetischen Einsparpotentials in Abhängigkeit der Bauteilsanierung nach EnEV 2014 und NE (eigene Darstellung).....	38

Abb. 4-7	Bauteilbezogene Bewertung der ökonomischen Amortisation in Abhängigkeit der Sanierungsmaßnahme (eigene Darstellung) .....	39
Abb. 4-8	Amortisation einer Sanierungsmaßnahme in Abhängigkeit des jährlichen Zinssatzes und der Energiepreissteigerung (eigene Darstellung).....	39
Abb. 4-9	Bauteilbezogene Bewertung der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahme - Treibhauspotential (GWP) (eigene Darstellung) .....	40
Abb. 4-10	Bauteilbezogene Bewertung der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahme - Erneuerbare Primärenergie (PE e.) (eigene Darstellung).....	40
Abb. 4-11	Bauteilbezogene Bewertung der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahme - Nicht erneuerbare Primärenergie (PE e.) (eigene Darstellung) .....	41
Abb. 4-12	Beispiel Sanierungskatalog - Output QCT (eigene Darstellung).....	42
Abb. 4-13	Entscheidungskriterien bei der Ermittlung des Sanierungspotentials .....	42
Abb. 4-14	Auszug Schadensdokumentation (eigene Darstellung) .....	43
Abb. 4-15	Bayes'sches Netzwerk am Beispiel eines Fenstertauschs (Screenshot GeNie).....	44
Abb. 5-1	Häufigkeitsverteilung der Einsparpotentiale an Heizenergie bei einer Sanierung nach EnEV-Anforderungen (eigene Darstellung).....	52
Abb. 5-2	Einfluss der Sanierung nach EnEV auf den Heizenergiebedarf am Beispiel von zwei Hauptverbrauchern (eigene Darstellung).....	53
Abb. 5-3	Verteilung der Heizenergiebedarfe nach EnEV-Sanierung (eigene Darstellung).....	53
Abb. 5-4	Häufigkeitsverteilung der Einsparpotentiale am Gesamtenergieverbrauch bei einer Sanierung der Technischen Gebäudeausrüstung (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 1: Bewertung des Ist-Zustands, Identifizierung von Handlungsfeldern“, Brochier/Assmann).....	54
Abb. 5-5	Beispiel einer Quartiersbeschreibung der LMU München mit Darstellung der Sanierungs- und Optimierungspotentiale sowie der Bedarfsdeckung durch Solarenergie (eigene Darstellung).....	58
Abb. 6-1	Organigramm Referat IV.2 auf Ingenieursebene vor der Umstrukturierung (eigene Darstellung).....	61
Abb. 6-2	Organigramm Referat IV.2 auf Ingenieursebene nach der Umstrukturierung (eigene Darstellung).....	62



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Untersuchungsparameter für die Analyse von unterschiedlichen Nutzungen (Regel, 2016).....	21
Tab. 4-1	Festgelegte Eigenschaften des HoEff-CIM Modellgebäudes (eigene Darstellung) .....	34
Tab. 4-2	Wahl der Dämmmaterialien für die ökologische Betrachtung (eigene Darstellung).....	36
Tab. 4-3	Beispiel für den Vergleich des prozentualen und absoluten energetischen Einsparpotentials von Bauteilsanierungen in Abhängigkeit der Baualtersklasse (eigene Darstellung) .....	37
Tab. 4-4	Zustandskategorien von Bauschäden (eigene Darstellung) .....	43
Tab. 4-5	Sanierungsmaßnahmen im Bereich Beleuchtung, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann).....	46
Tab. 4-6	Sanierungsmaßnahmen im Bereich Heizung, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann).....	47
Tab. 4-7	Sanierungsmaßnahmen im Bereich Trinkwarmwasser, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann ).....	47
Tab. 4-8	Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Raumluftechnik (eigene Darstellung, siehe Teil- bericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten“ von Brochier/Assmann).....	48
Tab. 4-9	Sanierungsmaßnahmen im Bereich Klimatisierung, Einsparung auf Endenergie bezogen (eigene Darstellung, siehe Teilbericht „Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzept- ten“ von Brochier/Assmann).....	48
Tab. 4-10	Einsparfaktoren für die GA-Effizienzklassen (eigene Darstellung nach DIN EN 15232) .....	49

## Quellenverzeichnis

AMEV (Hrsg.). (2001). *Messgeräte für Energie und Medien: EnMess 2001*. Abgerufen am 24.04.2017 von <http://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Betriebsfuehrung/Energie%20und%20Medien/EnMess%202001/enmess2001.pdf>

AMEV Energie (Hrsg.). (2010). *Hinweise zum Energiemanagement in öffentlichen Gebäuden*. Berlin: Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen.

Andre, P. (Nov, 2013). Total energy use in buildings: Analysis and evaluation methods. Institute for Building Environment and Energy Conservation (Hrsg.), *Energy Performance Analysis: Separate Document Volume 6*. Abgerufen am 12.3.2015 von [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/images/Pictures/EBC\\_Annex\\_53\\_Appendix\\_Volume\\_6.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Appendix_Volume_6.pdf). ISBN: 978-4-9907425-7-7.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. (2011). *Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung* (13. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-16490-3. DOI: 10.1007/978-3-642-16491-0.

BAFA (Hrsg.). (2014). *Energiemanagementsysteme: Liste förderfähiger Energiemanagementsoftware*. Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.) (2015). *Ökoprofit: ÖKOlogisches PROjekt Für Integrierte Umwelt-Technik*. Abgerufen am 30.01.2017 von [http://www.izu.bayern.de/fachwissen/detail\\_fachwissen.php?pid=0205010100210](http://www.izu.bayern.de/fachwissen/detail_fachwissen.php?pid=0205010100210)

BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.). (2014). *BKI Baukosten Bauelemente 2014: Statistische Kostenkennwerte Teil 2*. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammer GmbH.

BMUB (Hrsg.). (2014). *Nationale Klimapolitik*. Abgerufen am 10.10.2016 von <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/>

BMUB (Hrsg.). (2016). *Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Abgerufen am 02.02.2017 von [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf).

BMWl. (o.J.). *Gesetzeskarte für das Energieversorgungssystem*. Abgerufen am 02.02.2017 von [http://www.bmw.de/SiteGlobals/BMWl/Forms/Listen/Gesetzeskarte/Gesetzeskarte\\_Formular.html?resourceId=286178&submit=Filter+Anwenden&cl2Categories\\_Thema.GROUP=1&input\\_=286186&cl2Categories\\_Ebene.GROUP=1&pageLocale=de&cl2Categories\\_Thema=thema-verbrauch&cl2Categories\\_Regelung.GROUP=1&cl2Categories\\_Regelung=regelungsgesetze](http://www.bmw.de/SiteGlobals/BMWl/Forms/Listen/Gesetzeskarte/Gesetzeskarte_Formular.html?resourceId=286178&submit=Filter+Anwenden&cl2Categories_Thema.GROUP=1&input_=286186&cl2Categories_Ebene.GROUP=1&pageLocale=de&cl2Categories_Thema=thema-verbrauch&cl2Categories_Regelung.GROUP=1&cl2Categories_Regelung=regelungsgesetze).

BMWl. & BMUB (Hrsg.). (2015). *Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand vom 07.04.2015*. Abgerufen am 01.03.2015 von [http://www.zukunft-haus.info/fileadmin/media/01\\_energieberatung\\_planung/Expertenserviceportal/Bekanntmachung\\_NWG\\_Datenaufnahme\\_2013.pdf](http://www.zukunft-haus.info/fileadmin/media/01_energieberatung_planung/Expertenserviceportal/Bekanntmachung_NWG_Datenaufnahme_2013.pdf)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). (Apr, 2013). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Abgerufen am 19.5.2014 von [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/leitfaden\\_nachhaltiges\\_bauen\\_2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/leitfaden_nachhaltiges_bauen_2013.pdf?__blob=publicationFile).

BMVBS (Hrsg.). (27/2013). *Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude: Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzialen*. Abgerufen von [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL\\_ON272013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL_ON272013.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

Bopp, R. (2006). *Verbrauchsüberwachung Wärme und Kälte* [Vortrag]. TU Clausthal: HIS Praxisseminar vom 19.06.2006 bis 21.06.2006.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). (Hrsg.). (2015). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Büro- und Verwaltungsgebäude, Ökologische Qualität, Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt, Nachhaltige Materialgewinnung / Biodiversität*. Abgerufen am 05.09.2016 von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v\\_2015/BNB\\_BN2015\\_117.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_117.pdf)

Deru, M., et al. (2011). *Procedures for Commercial Building Energy Audit*. Second. T. Circle (Hrsg.), 2. N.E. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ISBN: 978-1-936504-09-1.

Destatis. (2016). *Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung*. Wiesbaden. Erschienen am 29.11.2016.

EnergieAgentur.NRW GmbH (Hrsg.). (o. J.). *EMS.Marktspiegel*. Abgerufen am 24.02.2017 von <http://www.energieagentur.nrw/energieeffizienz/unternehmen/ems.marktspiegel>

FIZ Karlsruhe (Hrsg.). (o. J.). *Monisoft: Software für Monitoring und energetische Betriebsoptimierung*. Abgerufen am 24.04.2017 von <http://www.enob.info/de/software-und-tools/projekt/details/monisoft-software-fuer-monitoring-und-energetische-betriebsoptimierung/>

Holm, A., Mayer, C. & Spengard, C. (2015). *Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen*. Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München. Bericht FO-2015/02. Gesamtverband Dämmstoffindustrie (GDI) e. V.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) (Hrsg.). (o. J.). *Gradtagszahlen in Deutschland*. Abgerufen am 24.04.2017 von <http://www.iwu.de/downloads/tools/>

LaSalle, J. L. (2008). *Green Building: Nachhaltigkeit und Bestandserhalt in der Immobilienwirtschaft*.

LH München (Hrsg.). (2015). *Zusätzliche Informationen der LMH zur Solarpotentialkarte*. Abgerufen am 16.12.2016 von [https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:276aa613-3921-4be2-b305-9eb2d681935c/datenblatt\\_solarpotenzialkarte.pdf](https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:276aa613-3921-4be2-b305-9eb2d681935c/datenblatt_solarpotenzialkarte.pdf)

Liers J. (2014). *Verwendung von Energiesignaturen zur Betriebsüberwachung von Gebäuden*. Hannover: HIS Hochschul-Informationen-System GmbH.

LMU. (2015). *Zahlen und Fakten*. Abgerufen am 16.02.2017 von [https://www.uni-muenchen.de/ueber\\_die\\_lmuzahlen\\_fakten/index.html](https://www.uni-muenchen.de/ueber_die_lmuzahlen_fakten/index.html)

LMU. (o. J.). *Innenstadt- und HighTechCampus*. Abgerufen am 16.02.2017 von [http://www.uni-muenchen.de/ueber\\_die\\_lmuzahlen\\_fakten/index.html](http://www.uni-muenchen.de/ueber_die_lmuzahlen_fakten/index.html)

Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*. Bd. 55, S. 889–902. Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018.

Regel, R., Jensch, W., & Lang, W. (Apr. 2013). The Pareto Principle for the Energy Assessment of Heterogeneous and Complex University Buildings - A Comparison. In Fraunhofer IRB (Hrsg.), *Sb13 munich - Implementing Sustainability - Barriers and Chances*, S. 1212-1221. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN: 978-3-8167-8982-6.

Regel, R. (2016). *Die Referenzraummethode als eine vereinfachte Bewertung komplexer Liegenschaften im Quartier am Beispiel von Hochschulen* (Dissertation). Technische Universität München, Deutschland. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160511-1293442-1-7>.

Saltelli, A., Chan, K., & Scott, E. (2008). *Sensitivity Analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd.. ISBN: 978-0-470-74382-9.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-05997-5.

Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output: Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*. Bd. 181. Nr. 2, S. 259–270. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.

Shao, Y., Geyer, P., & Lang, W. (2014). Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies. *Energy and Buildings*. Bd. 82, S. 356–368. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.030.

Sobol, I. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*. Bd. 55. Nr. 1-3, S. 271–280. The Second {IMACS} Seminar on Monte Carlo Methods. DOI: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6.

StBAM2. (o. J.). *Wir über uns*. Abgerufen am 16.02.2017 von [http://www.stbam2.bayern.de/wir\\_ueber\\_uns/](http://www.stbam2.bayern.de/wir_ueber_uns/)

Stibbe, J., & Stratmann, F. (2014). *Bau- und Instandsetzungsbedarf in den Universitäten*. Forum Hochschule 5/2014. Abgerufen am 21.03.2016 von [http://www.his-he.de/pdf/pub\\_fh/fh-201405.pdf](http://www.his-he.de/pdf/pub_fh/fh-201405.pdf)

Surrey, U., Ramm, H., Rehe, H., & Reise, P. (2010). *Planungsvorgabe Zählerstruktur im BLB NRW*. Düsseldorf: Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW.

SWM. (12. April 2017). *Ausbauoffensive Erneuerbare Energien*. Abgerufen am 12.04.2017 von <https://www.swm.de/privatkunden/unternehmen/engagement/umwelt/ausbauoffensive-erneuerbare-energien.html>

Yoshino, Y. et al. (Nov, 2013). Total energy use in buildings: Analysis and evaluation methods. Institute for Building Environment and Energy Conservation (Hrsg.), *Final Report Annex 53*. Abgerufen am 23.2.2015 von [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/images/Pictures/EBC\\_Annex\\_53\\_Main\\_Report.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf). ISBN 978-4-9907425-1-5

Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) (Hrsg.). (2009a). *Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualterklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten* (2. berichtigte Version). [Gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Aktenzeichen Z6-10.07.03-06.13/II 2-80 01 06-13]

ZUB (Hrsg.). (2009b). *Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualterklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten* (2. berichtigte Version). [Gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Aktenzeichen Z6-10.07.03-06.13/II 2-80 01 06-13]

ZUB (Hrsg.). (2010). *Deutschlandkarte: Altbaumaterialien und -konstruktionen*. Abgerufen am 28.01.2016 von <http://www.altbaukonstruktionen.de/index.php>

## Normen und Verordnungen

DIN EN 15232. (2012). *Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 15804. (2014). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 16247-1. (2012). *Energieaudits – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 14040. (2009). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 14044. (2006). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 50001. (2011). *Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Merkblatt für Energieaudits nach den gesetzlichen Bestimmungen der §§8 ff. EDL-G. Fassung vom 08.07.2015. Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

RLBAU. (2011). *Richtlinien für die Durchführung von Hochbauaufgaben des Freistaates Bayern*. München: Bayerisches Staatsministerium des Innern und Bayerisches Staatsministerium der Finanzen.

VDI 3807 Blatt 1. (2013). *Verbrauchskennwerte für Gebäude: Grundlagen*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

## Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojektes

Dotzler, C., Regel, R. & Kierdorf, D. (2016). *HoEff-CIM - Campus Information Modeling: Concepts and Tools for a Climate-Neutral Campus*. BEHAVE 2016 - 4th European Conference on Behaviour and Energy Efficiency. Coimbra, 8-9 September 2016.

Kierdorf, D., Botzler, S. & Dotzler, C. (2016). *Assessings Sustainable Retrofits of Public Non-Residential Buildings*. BEHAVE 2016 - 4th European Conference on Behaviour and Energy Efficiency. Coimbra, 8-9 September 2016.

Kierdorf, D., Dotzler, C. & Botzler, S. (2016). *Energy Demand Reduction of Public Properties. New Concepts in Energy Science and Engineering*. 6th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering Hamacher, T. (Hrsg.). p. 61

Kierdorf, D., Dotzler, C. & Botzler, S. (2016). *Energy Efficient Campus HoEff-CIM (Campus Information Modeling)*. Smart Energy Regions International Conference Cardiff. COST Action TU1104. Posterbeitrag.

Jensch, W., Lang, W., Häufle, U., Buchholz, S., David, R., Dotzler, C., Eichel, P., Hofbauer, J., Jainta, O., Kierdorf, D. & Regel, R. (2014). *Energieeffiziente Hochschule Campus Information Modeling: HoEff-CIM*. Energieinnovationen im Neubau und Sanierung: EnOB-Symposium. S. 242. Hrsg. Projektträger Jülich (PTJ).

## **Verwendete Software**

Adobe Indesign CS5.5

Energy Plus 8.7.0 (<https://energyplus.net/>)

Lawrence Berkeley National Laboratory THERM 7.3 (<https://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>)

Microsoft Office 2013

Solarcomputer, Version 05.14, Modul B55 „Energieeffizienz Gebäude EnEV 2014 / DIN V 18599“

Statistiksoftware R for Statistical Computing (<https://www.r-project.org/>)

ZUB Helena Ultra

## **Teilberichte zu den einzelnen Themen**

Technische Universität München:

- Bericht Arbeitspaket 1: Projektgrundlagen und Datenerfassung
- Bericht Arbeitspaket 2: Entwicklung des HoEff-CIM-Modellgebäudes und energetische Bilanzierung
- Bericht Arbeitspaket 3: Schadensdokumentation
- Bericht Arbeitspaket 4: Ranking Sanierungsmaßnahmen
- Bericht Arbeitspaket 5: Energiemasterplan

Ludwig-Maximilians-Universität München:

- AP1: Darstellung der Liegenschaften und Verwaltung (Ist-Zustand LMU)
- AP2: Werkzeuge
- AP3: Ausbau bzw. Integration Energiemanagement an der LMU

Brochier / Assmann:

- Arbeitspaket 1: Bewertung des Ist-Zustands, Identifizierung von Handlungsfeldern
- Arbeitspaket 2: Entwicklung von Sanierungskonzepten
- Arbeitspaket 3: Energiemasterplan und das erforderliche Management
- Arbeitspaket 4: Einfach handhabbare Werkzeuge für das Energiemanagement

*(Für nähere Infos zu den Teilberichten kontaktieren sie bitte die jeweiligen Projektpartner)*