

# Querauswertung

Campus-Projekte im BMWi-Forschungsbereich  
Energiewendebauen



Querauswertung  
**Campus-Projekte**  
im BMWi-Forschungsbereich  
**Energiewendebauen**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Campus-Projekte im Förderbereich Energiewendebauen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)</b> .....	5
<b>2 An der Querauswertung teilnehmende Campus-Projekte</b> .....	8
<b>2.1 Campus Roadmap Aachen</b> .....	11
2.1.1 Projektsteckbrief .....	11
2.1.2 Projektbeschreibung.....	15
<b>2.2 HochschulCampus Berlin Charlottenburg</b> .....	25
2.2.1 Projektsteckbrief .....	25
2.2.2 Projektbeschreibung.....	27
<b>2.3 Campus TU Braunschweig</b> .....	34
2.3.1 Projektsteckbrief .....	34
2.3.2 Projektbeschreibung.....	38
<b>2.4 Campus Lichtwiese Darmstadt</b> .....	56
2.4.1 Projektsteckbrief .....	56
2.4.2 Projektbeschreibung.....	60
<b>2.5 CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden</b> .....	70
2.5.1 Projektsteckbrief .....	70
2.5.2 Projektbeschreibung.....	74
<b>2.6 CleanTechCampus Garching</b> .....	95
2.6.1 Projektsteckbrief .....	95
2.6.2 Projektbeschreibung.....	98
<b>2.7 Living Lab Energy Campus Jülich</b> .....	109
2.7.1 Projektsteckbrief .....	109
2.7.2 Projektbeschreibung.....	111
<b>2.8 Intracting an Hochschulen, Kassel</b> .....	122
2.8.1 Projektsteckbrief .....	122
2.8.2 Projektbeschreibung.....	124
<b>2.9 Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg</b> .....	132
2.9.1 Projektsteckbrief .....	132
2.9.2 Projektbeschreibung.....	134

<b>2.10</b>	<b>Energieeffiziente Hochschule - Campus Information Modeling (HoEff-CIM), München</b>	151
2.10.1	Projektsteckbrief	151
2.10.2	Projektbeschreibung	154
<b>2.11</b>	<b>Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam</b>	167
2.11.1	Projektsteckbrief	167
2.11.2	Projektbeschreibung	169
<b>2.12</b>	<b>Rng-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen</b>	179
2.12.1	Projektsteckbrief	179
2.12.2	Projektbeschreibung	182
<b>3</b>	<b>Quervergleich der Campus-Projekte</b>	189
3.1	Gesamtübersicht über die zwölf Campus-Projekte	189
3.2	Campusgrößen	212
3.3	Hauptnutzungen	213
3.4	Baualter	213
3.5	Status der Bestandsgebäude vor dem Projekt	214
3.6	Energieversorgung vor dem Projekt	214
3.7	Projektlaufzeiten	215
3.8	Projektarten	215
3.9	Projektphasen	216
3.10	Energetische Projektziele	217
3.11	Projekthinhalte	219
3.12	Maßnahmen an den Gebäuden	220
3.13	Maßnahmen an der Energieversorgung	221
3.14	Eingesetzte Technologien	223
3.15	Energieverbräuche vor und nach dem Projekt	236
3.15.1	Endenergie	236
3.15.2	Primärenergie	238
3.16	Eingesetzte Planungstools	240
3.17	Bereits erhältliche Projektergebnisse	241
3.18	Umsetzung in die Lehre	241
3.19	Lessons Learned	241

3.19.1	Entscheidungsprozesse .....	241
3.19.2	Hemmnisse .....	242
3.19.3	Energetische Benchmarks .....	242
3.19.4	Technologien .....	243
3.19.5	Planungshilfsmittel .....	243
<b>4</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>244</b>
<b>5</b>	<b>Referenzen</b> .....	<b>245</b>





## 1 Campus-Projekte im Förderbereich Energiewendebauen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Der BMWi-Förderbereich Energiewendebauen umfasst derzeit mehr als 900 geförderte Vorhaben, darunter auch Verbundvorhaben mit zwei oder mehr Teilprojekten. Die Projekte lassen sich in acht Kategorien aufteilen, die von Forschung zu bautechnischen Komponenten, Anlagentechnik, Gebäuden, Quartieren, Versorgungsnetzen, softwarebasierten Tools, Methoden & Konzepten bis hin zu Akzeptanzforschung reichen. Viele Vorhaben bearbeiten mehr als eine Kategorie. Bild 1 zeigt die Verteilung der Forschungskategorien, basierend auf einer Umfrage der Begleitforschung Energiewendebauen aus dem Jahr 2018.

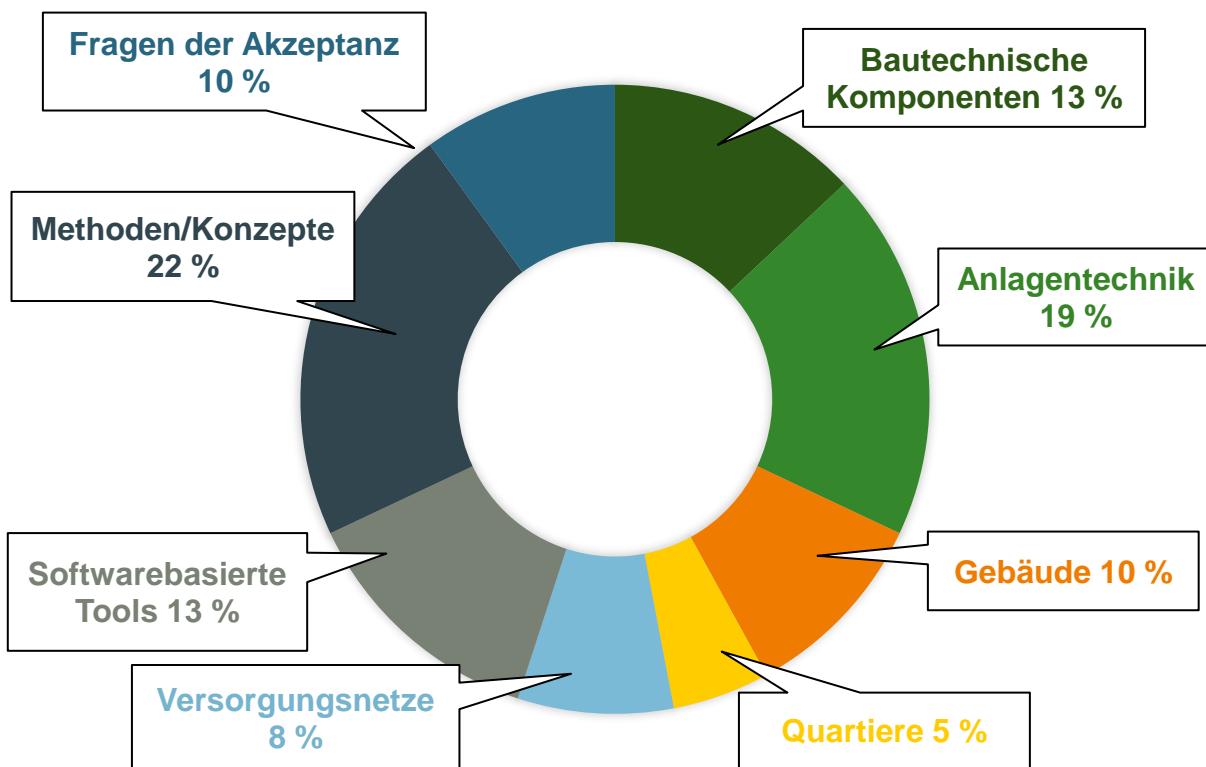


Bild 1: Kategorien von Projekten im Förderbereich Energiewendebauen des BMWi.  
© Begleitforschung Energiewendebauen.

Im Bereich Quartiere sind u. a. auch Campus-Vorhaben enthalten. Diese haben als Untersuchungsgegenstand einen Hochschul- oder Technologiecampus. Tabelle 1 zeigt die vom BMWi bisher geförderten Projekte basierend auf einer EnArgus-Recherche [1]; Bild 2 veranschaulicht, dass die Standorte der Campus-Projekte über fast alle Bundesländer verteilt sind. Ausnahmen sind Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Bremen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der vom BMWi geförderten Campusvorhaben basierend auf einer Recherche in EnArgus [1] aus dem Jahr 2019.

Nr.	Projektname (kurz)	FKZ	Förderzeitraum
1	EnEff:Campus Potsdam Telegrafenberg	03ET1009B/C	06/11 – 06/18
2	CleanTechCampus Garching	03ET1407A/B	05/16 – 10/19
3	Berlin Adlershof darunter: Teilvorhaben EnEff:Campus	03ET1038A-G 03ET1038C	07/11 – max. 07/18 07/11 – 06/13
	Cluster Berlin Adlershof 2020 Umsetzung/Monitoring	03ET1155A/B	01/13 – 08/19
	EnbA-M: Energienetz Berlin Adlershof – Monitoring und Optimierung	03ET1549A-D	04/18 – max. 11/21
4	EnEff:Campus RWTH Aachen/FZ Jülich – integrales Planungshilfsmittel	03ET1004A	01/11 – 12/14
	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	03ET1260A	10/14 – 03/17
5	EnEff:Campus RWTH Aachen/FZ Jülich – integrales Planungshilfsmittel	03ET1004A	01/11 – 12/14
	EnEff:Campus – Living Roadmap FZ Jülich	03ET1352A	01/16 – 03/19
	LLEC - Living Lab Energy Campus, Jülich	03ET1551A	01/18 – 12/21
	LLEC – Verwaltungsbau, Jülich	03EGB0010A	01/18 – 12/22
6	EnEff:Campus – blueMAP TU Braunschweig	03ET1004B	04/12 – 07/15
	EnEff:Campus – EnEff Campus 2020 Monitoring	03ET1307A	09/15 – 03/19
7	Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg	03ET1009A	10/10 – 12/17
	EnEff:Campus Monitoring Neubau Universität Lüneburg	03ET1415A/B	09/16 – 08/20
8	EnEff:Campus Intracting an Hochschulen, Kassel	03ET1323A	10/15 – 05/21
9	EnEff:Campus CAMPER-CAMPus Dresden	03ET1319A	10/15 – 03/19
	CAMPER-MOVE Dresden	03ET1656	04/19 – 03/24
10	EnEff:Campus - Campus Lichtwiese, Darmstadt	03ET1356A	01/16 – 12/18
	Campus Lichtwiese II, Darmstadt	03ET1638	01/19 – 12/22
11	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	03ET1354A/B	04/16 – 08/18
	Hochschulcampus Berlin Charlottenburg (HCBC) Umsetzungsphase	03ET1632A-C	01/19 – 12/23
13	Campus Information Modeling (HoEff-CIM), München	03ET1176A-D	05/13 – max. 06/17
14	Saisonale Energiespeicherung in Aquiferen	03ESP409A-C	12/12 – 11/16
15	Umweltcampus Birkenfeld, Trier	03ET1070A	06/12 – 05/16
	REGENA – Ressourceneffizienz im Gebäudebetrieb	03ET1070B/C	06/12 – 08/16
16	EnergyCampusLab HS Ruhr West	03ET1083A	08/12 – 07/16
17	Grüner Campus Erfurt	03274310	01/10 – 09/15
18	Rng-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen	03ET1373A-B	01/16 – 12/18
19	Energiemustercampus UdS (EULE)	03ET1060A	05/12 – 04/17
20	Plusenergiecampus Ganztagsrealschule Kleve	03ET1075D	06/12 – 05/17

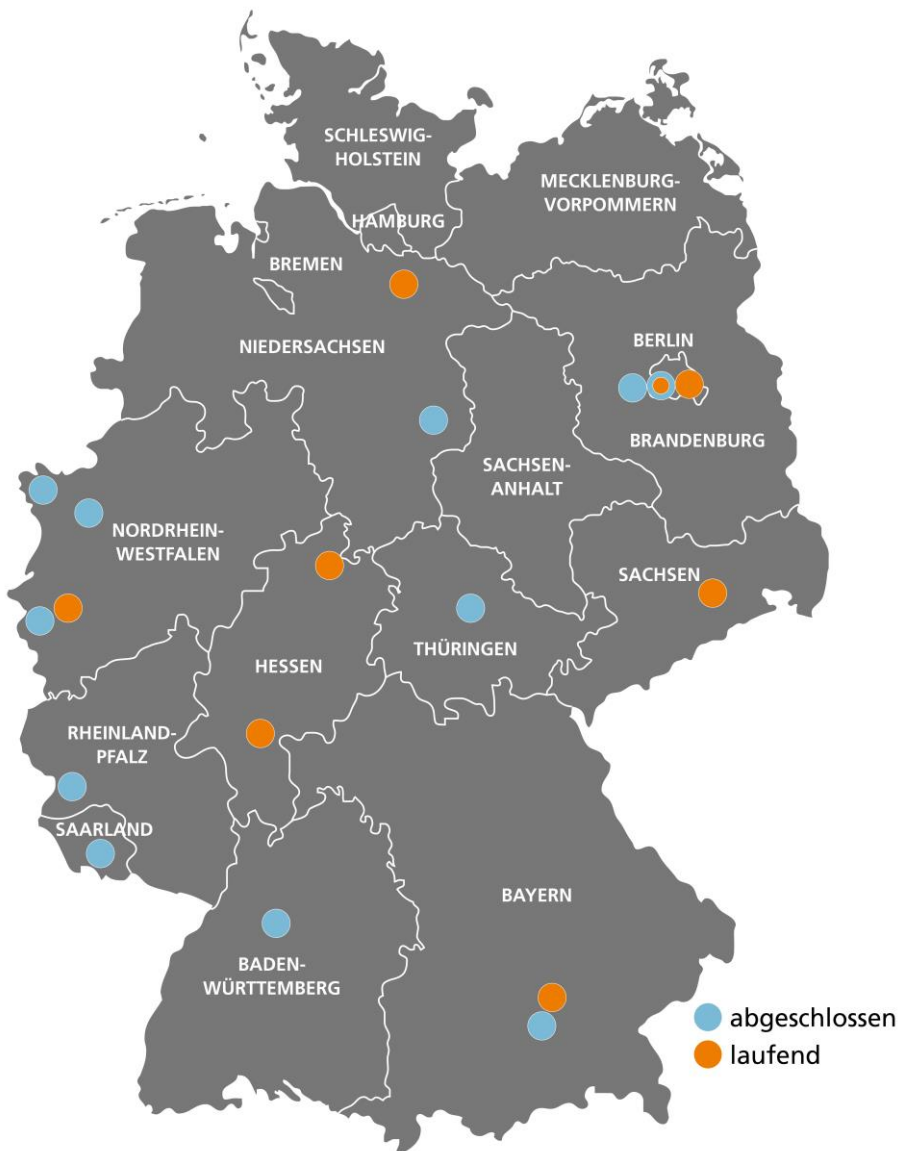


Bild 2: Verortung der vom BMWi geförderten abgeschlossenen und noch laufenden Campus-Projekte. © Begleitforschung Energiewendebauen.

Im Jahr 2016 erfolgte innerhalb der Begleitforschung zum Forschungsschwerpunkt Energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt) eine erste Querauswertung von Campus-Projekten [2] mit Besonderheiten von Universitätskomplexen, einem Fokus auf vier Vorhaben (Roadmap RWTH Aachen, blueMAP TU Braunschweig, klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg und Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam) und einem Ausblick auf drei weitere Vorhaben.

## 2 An der Querauswertung teilnehmende Campus-Projekte

Aus der Liste der Campus-Projekte in Tabelle 1 wurden – nach Rücksprache mit dem Projektträger Jülich – für die hier vorliegende Querauswertung die Vorhaben ausgewählt, die ab dem 6. Energieforschungsprogramm [3] bewilligt wurden, sowie die damit direkt verbundenen Vorläuferprojekte. Um eine Querauswertung zu ermöglichen, wurde ein detaillierter Fragebogen zur Art des Campus, zum Projektinhalt und zu den Projektergebnissen entwickelt, der von den jeweiligen Projektnehmern ausgefüllt wurde. Der Fragebogen fußt unter anderem auf der früheren Querauswertung und auf einem Workshop auf einem Energiewendebauen-Projektleitertreffen im Jahr 2019. Die Inhalte und die geplanten bzw. erreichten Ergebnisse sind je nach Projekt unterschiedlich. Das Ziel der Fragebogenstruktur war es, eine Darstellung aller Projekte zu erlauben.

Letztendlich konnten für die zwölf Vorhaben aus Tabelle 2 bzw. Bild 3 die nachfolgenden Projektinformationen zusammengetragen und querausgewertet werden. Der Dank der Autoren gilt hier den Projektleitern und -bearbeitern für die zusammengestellten Informationen.

Tabelle 2: Übersicht über die Campus-Projekte, die in dieser Studie beschrieben und querausgewertet werden.

Nr.	Projektname (kurz)	FKZ	Förderzeitraum
1	EnEff:Campus Potsdam Telegrafenberg	03ET1009B/C	06/11 – 06/18
2	CleanTechCampus Garching	03ET1407A/B	05/16 – 10/19
3	EnEff:Campus RWTH Aachen/FZ Jülich – integrales Planungshilfsmittel	03ET1004A	01/11 – 12/14
	EnEff:Campus – Living Roadmap FZ Jülich	03ET1352A	01/16 – 03/19
	LLEC - Living Lab Energy Campus, Jülich	03ET1551A	01/18 – 12/21
	LLEC –Verwaltungsbau, Jülich	03EGB0010A	01/18 – 12/22
4	EnEff:Campus – blueMAP TU Braunschweig	03ET1004B	04/12 – 07/15
	EnEff:Campus – EnEff Campus 2020 Monitoring	03ET1307A	09/15 – 03/19
5	Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg	03ET1009A	10/10 – 12/17
	EnEff:Campus Monitoring Neubau Universität Lüneburg	03ET1415A 03ET1415B	09/16 – 08/20
6	EnEff:Campus Intracting an Hochschulen, Kassel	03ET1323A	10/15 – 05/21
7	EnEff:Campus CAMPER-CAMPus Dresden	03ET1319A	10/15 – 03/19
	CAMPER-MOVE Dresden	03ET1656	04/19 – 03/24
8	EnEff:Campus - Campus Lichtwiese, Darmstadt	03ET1356A	01/16 – 12/18
	Campus Lichtwiese II, Darmstadt	03ET1638	01/19 – 12/22
9	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	03ET1354A/B	04/16 – 08/18
	Hochschulcampus Berlin Charlottenburg (HCBC) Umsetzungsphase	03ET1632A-C	01/19 – 12/23
10	Rng-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen	03ET1373A-B	01/16 – 12/18
11	EnEff:Campus RWTH Aachen/FZ Jülich – integrales Planungshilfsmittel	03ET1004A	01/11 – 12/14
	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	03ET1260A	10/14 – 03/17
12	Campus Information Modeling (HoEff-CIM), München	03ET1176A-D	05/13 – 06/17 05/13 – 04/17

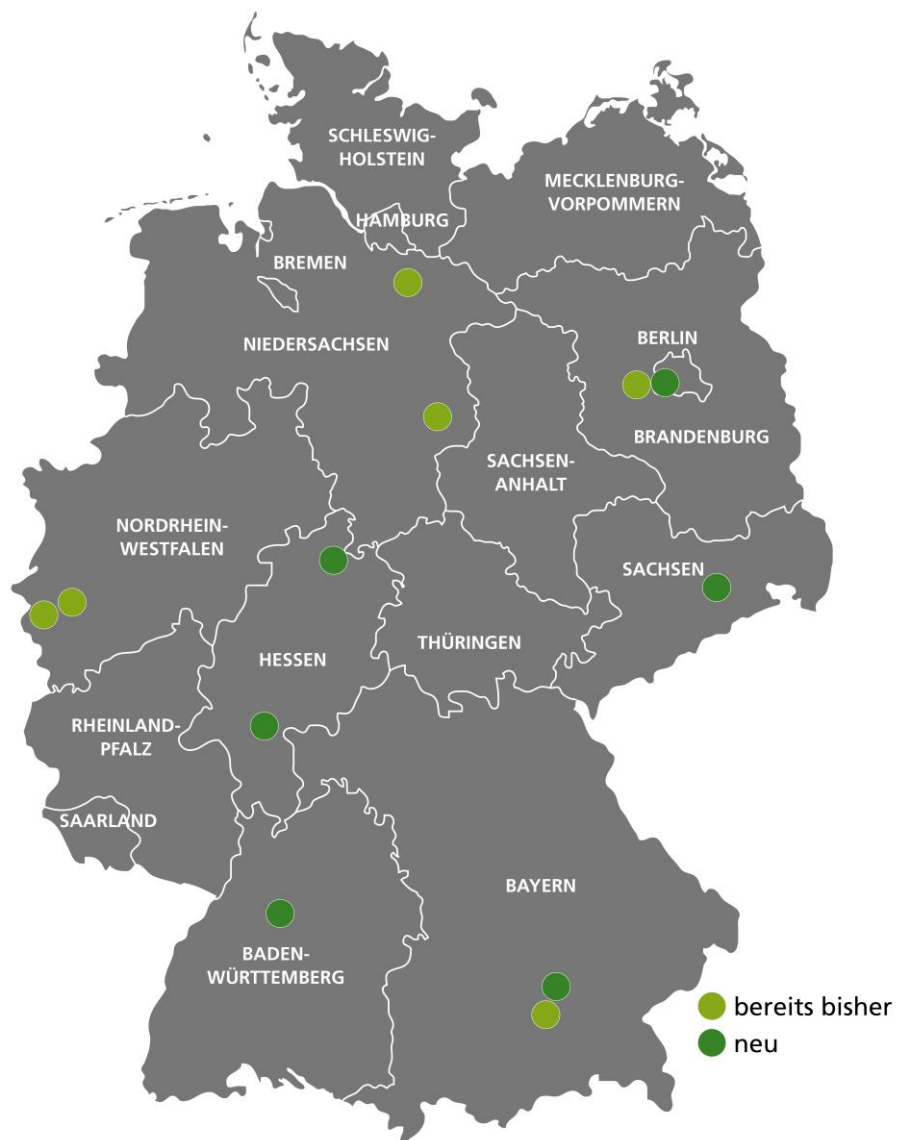


Bild 3: Standorte der in dieser Studie ausgewerteten Campus-Projekte. Die hellgrünen Punkte zeigen die Projekte, die bereits in der ersten Querauswertung mit ihrem damaligen Projektstand enthalten waren, die dunkelgrünen Punkte die neu ausgewerteten Projekte.

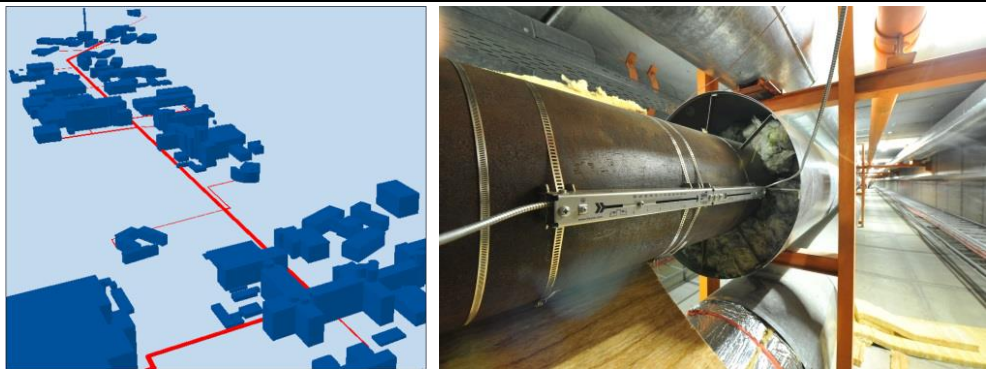
© Begleitforschung Energiewendebauen.

## 2.1 Campus Roadmap Aachen

Autorenteam:

- Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller, Dr.-Ing. Moritz Lauster, Dr.-Ing. Marcus Fuchs, Tobias Blacha, M. Sc., Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Teichmann (RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik (EBC))
- Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck, Dipl.-Ing. Alexander Brüntjen, Christian Fliegner, M. Sc. (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (e3d))
- Prof. Dr.-Ing. Dirk Henning Braun, Dipl.-Ing. Tobias Schell, Franziska Misterek, M. Sc. (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie (gbt))
- Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Dietmar Wenner, Neda Askari, M. Sc., Dipl.-Ing. Alexander Bendziulla (Facility Management RWTH Aachen University (FM))

### 2.1.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II		
<b>Projektbild</b>	 <p>Darstellung eines Ausschnitts der RWTH Aachen in einem Geoinformationssystem (links) und Wärmenetzkanal Campus Melaten (rechts). © RWTH Aachen.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	RWTH Aachen University Templergraben 55 52062 Aachen		
<b>Projektbeteiligte</b>	Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D)	RWTH Aachen Facility Management	Lehrstuhl für Gebäudetechnologie (GBT)
	Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)		
<b>Anzahl und Art der beinhalteten Gebäude</b>	<p>Energetisch relevante Gebäude: 321  Energetisch irrelevante Gebäude z. B. Garagen: ca. 100  Aufteilung energetisch relevanter Gebäude: Verwaltungsgebäude 6,5 %, Rechenzentren 1,1 %, Hörsaalgebäude 4,2 %, Institutsgebäude I 11,8 %, Institutsgebäude II 5,0 %, Institutsgebäude III 24,8%, Institutsgebäude V 10,3 %, Forschung und Untersuchung 14,9 %, Sportbauten 2,7 %, Beherbergungsstätten 2,7 %, Werkstätten 5,7 %, Lager 5,7 %, Technikbauten 2,7 %</p>		

<b>Neubauten im Projekt</b>	Derzeit befinden sich zahlreiche Objekte, die von der RWTH Aachen genutzt werden sollen, im Bau. Als Beispiele sind „Center for Next Generation Processes and Products“ (NGP <sup>2</sup> ) und “Center for Biohybrid Medical Systems” (CBMS) zu nennen. Auch in den folgenden Jahren sind diverse Neubauten geplant. Die versorgte Nettogrundfläche ist seit 2013 um fast 10 % gestiegen.
<b>Baujahr der Gebäude</b>	Das Baujahr der Gebäude erstreckt sich von 1861 bis 2015. Eine genaue Aufteilung der Gebäude gemäß Baujahr befindet sich in Kapitel 2.1.2.1.
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	An der RWTH Aachen wurden bereits einige Sanierungen durchgeführt. Eine detaillierte Aufführung ist hier aufgrund der hohen Anzahl der Gebäude nicht möglich.
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	<p>Die von der RWTH Aachen bewirtschafteten Gebäude werden mit Heizenergie, Prozesswärme, Strom, Kälte und Druckluft versorgt. Die Bereitstellung erfolgt sowohl über zentrale Netze als auch über dezentrale Versorgungseinrichtungen.</p> <p><i>Wärmeversorgung:</i> Im Bereich Melaten wird der Heizenergiebedarf der Hochschulgebäude, des Universitätsklinikums sowie weiterer, nicht von der RWTH genutzter Gebäuden über die 3-Kesselanlage im Heizkraftwerk Nord gedeckt. Die gesamte Nettowärmeleistung der Kesselanlage beträgt 87,45 MW. Zusätzlich werden im Erweiterungsgebiet des Campus Gebäude über ein Low-Ex-Wärmenetz des örtlichen Energieversorgers versorgt. Im Altbereich und Bereich Hörn existieren neben einer zentralen Fernwärmeeinspeisung in das RWTH-eigene Wärmenetz, welches über Wärmeübertrager durch den örtlichen Energieversorger größtenteils mit Fernwärme aus dem Braunkohlegroßkraftwerk Weisweiler versorgt wird, noch vier weitere Stellen, an denen Gebäudekomplexe direkt an das Fernwärmenetz des örtlichen Energieversorgers angeschlossen sind. Zusätzlich werden 14 Gebäude über Kessel durch dezentrale Erdgaseinspeisungen versorgt. Einzelne Gebäude werden durch Wärmepumpen oder Ölheizungen versorgt.</p> <p><i>Kälteversorgung:</i> Die Kälteversorgung der RWTH Aachen wird zum einen durch zahlreiche dezentrale Anlagen in einzelnen Gebäuden und zum anderen über drei Kältenetze sichergestellt. Zur Erzeugung von Kaltwasser werden für das Kältenetz Melaten vier Absorptionskältemaschinen (AKM), welche größtenteils über das BHKW mit einer elektrischen Leistung von 2 MW versorgt werden, sowie zwei elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen (KKM) mit einer Gesamtkälteleistung von 8 MW eingesetzt. Das Kältenetz Hörn wird über zwei AKM und zwei KKM mit jeweils 1 MW Kälteleistung Kälte versorgt. Zusätzlich gibt es ein Kältenetz in der Innenstadt, welches primär über KKM versorgt wird.</p> <p><i>Stromversorgung:</i> Der Stromverbrauch der Liegenschaften der RWTH Aachen wird durch externe Stromversorger und umweltfreundlich durch zwei hocheffiziente erdgasbetriebene BHKWs (28 % des Gesamtverbrauchs 2014) im Bereich Hörn und in Melaten gedeckt. Der Strom wird dabei in zwei universitätseigene Mittelspannungsnetze eingespeist und an die Verbraucher verteilt. Zusätzlich werden 38 Gebäude über dezentrale Einspeisestellen durch das öffentliche Stromnetz versorgt.</p>
<b>Projektlaufzeit</b>	10/2014 – 03/2017



<b>Projektart</b>	Masterplan/Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nahwärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Gebäudesanierung	Betriebsoptimierung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/Toolentwicklung	Finanzierungsmethode	Nutzersensibilisierung
	X (beinhaltet)	XX (Fokus)		XX		XX	X	
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umsetzung	Messung				
	XX	XX						
<b>Projekthalt</b>	<p>Für die Liegenschaft der RWTH Aachen soll ein ganzheitliches und innovatives Gesamtkonzept für die energetische Sanierung entwickelt werden. Ziel ist eine Reduktion des nutzflächenbezogenen Primärenergieverbrauchs um 50 % bis 2025. Zu Beginn des Projekts werden die relevanten Daten gesammelt und zusammengeführt. Dazu wird das Konzept des Building Information Modeling (BIM) auf das ganze Quartier ausgeweitet (City District Information Model). Mit Hilfe der Daten wird eine dynamische Simulation der gesamten Energieversorgungskette aufgebaut. Auf Basis von Messdaten und Simulationsergebnissen werden einzelne Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Nach der Bewertung möglicher Einzelmaßnahmen werden daraus schlüssige Optimierungsstrategien erarbeitet. Im begleitenden Monitoring werden die Verbrauchsdaten und Energieströme aufbereitet. Die Messwerte werden dazu den Beteiligten über eine Web-Nutzer-Schnittstelle zugänglich gemacht und übersichtlich dargestellt. Als Grundlage soll ein GIS-basiertes dreidimensionales grafisches Modell des Campus entwickelt werden, das die dynamischen Energieströme und ihre Emittenten rückblickend und vorausschauend simulierend darstellt.</p>							
<b>Projektmittel</b>	<p>Insgesamt: 834.610 € (bewilligte Fördersumme für das Vorhaben EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II, FKZ 03ET1260A) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €</p>							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	<p>Da es sich bei dem Projekt um ein Simulations- und Planungsprojekt handelt, finden keine Maßnahmen an Gebäuden und der Energieversorgung im Rahmen des Projektes statt.</p>							
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>								
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt				Nach dem Projekt			
	<p>457.600 m<sup>2</sup> elektrisch versorgt: 638.000 m<sup>2</sup></p>				<p>Beispielszenario: reduzierte Flächen durch Abriss und Flächenverdichtung um 1,5 %. 432.000 m<sup>2</sup> elektrisch versorgt: 612.400 m<sup>2</sup></p>			

Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt (gemessen 2014)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	108.461	237	100.440 *	216	6.268.000
	Kälte **	33.380	nicht sinnvoll bestimmbar	23.940 (ohne PE für Strom)	nicht sinnvoll bestimmbar	3.632.000 ***
	Strom	109.000	171	247.620	388	13.700.000
	Summe	250.980		372.000		23.600.000
	* Annahmen: PE-Faktor BHKW-Wärme: 0,7; Netzverluste: 5 %; PE für Kälte bereits in Strom enthalten, daher nur Wärme für AKM aufgeführt					
	** Fernkälte (Melaten und Horn)					
	*** Annahme: Kosten für Kälte entsprechen Differenz der Gesamtkosten und der Kosten für Wärme und Strom					
Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt (berechnet, Roadmap 1)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	74.000	171	96.200 ***	222 ***	5.470.000 ***
	Kälte **	21.900	nicht sinnvoll bestimmbar ****		nicht sinnvoll bestimmbar ****	
	Strom	47.300 *	77 *	48.900 ****	80 *****	4.770.000 ****
	Summe	143.200 *		145.100 *		10.240.000 *
	* andere energetische Bilanzierung, um forschungsgebundenen Stromverbrauch zu berücksichtigen (dieser wurde mit 54.600 MWh/a abgeschätzt und ist nicht enthalten)					
	** Fernkälte (Melaten und Hörn)					
	*** umfasst Fernwärme und Gas für Kessel- und BHKW-Betrieb					
	**** beinhaltet Eigenstromproduktion durch BHKWs und PV sowie Kältebereitstellung					
	***** Zu kühlende Nettogrundfläche für den Campus nicht bestimmbar					
Eingesetzte Planungstools	MODELICA für Gebäude-, Anlagen und thermische Netzsimulation TEASER als Open-Source Software für die Parametrierung der Gebäudesimulationen IDA ICE für detaillierte Gebäudesimulationen PostgreSQL als Datenbanklösung in Kombination mit pgModeler zum Datenbankentwurf QGIS Wien zur Visualisierung von Liegenschaftsdaten					
Bereits erhältliche Projektergebnisse	AixLib - MODELICA Modell Bibliothek: <a href="https://github.com/RWTH-EBC/AixLib">https://github.com/RWTH-EBC/AixLib</a> TEASER - Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit: <a href="https://github.com/RWTH-EBC/TEASER">https://github.com/RWTH-EBC/TEASER</a> RoadMap RWTH Aachen: Schlussbericht [6]					

## 2.1.2 Projektbeschreibung

Die 1870 gegründete RWTH Aachen gehört mit ihren 260 Instituten in neun Fakultäten zu den führenden europäischen Wissenschafts- und Forschungseinrichtungen. Die Liegenschaften der RWTH erstrecken sich im Aachener Stadtbezirk hauptsächlich über die drei Campusse Melaten, Mitte und Hörn, wie in Bild 4 zu sehen ist. Des Weiteren gibt es einige Gebäude, die im Aachener Stadtgebiet verteilt sind.

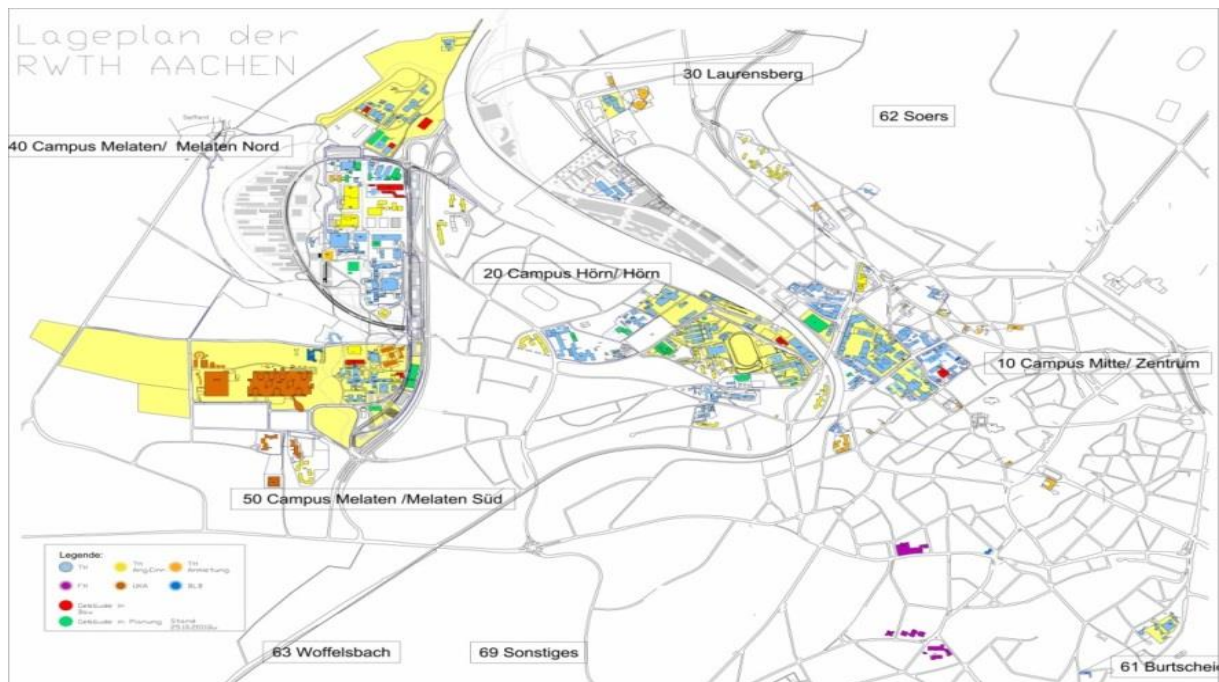


Bild 4: Lageplan der RWTH. © RWTH Aachen.

Zusätzlich befindet sich ein Erweiterungsgebiet mit einer Gesamtfläche von 0,8 km<sup>2</sup> am Campus Melaten als Low-Ex-Cluster im Aufbau. Die Energieerzeugungs-, Verbrauchs- und Verteilungsstrukturen variieren von Campus zu Campus und sind unter anderem zentraler Betrachtungspunkt des Projektes „EnEff:Campus – RoadMap RWTH Aachen“. Ziel ist es, den nutzflächenbezogenen Primärenergieverbrauch der Liegenschaften der RWTH Aachen um 50 % bis 2025 auf Basis der gemessenen Werte 2013/14 zu reduzieren. Dieses Ziel soll für den Gebäudebestand über ein ganzheitliches und innovatives Gesamtkonzept bei minimalem Aufwand erreicht werden. Um eine Verringerung des Primärenergieverbrauchs bei den bestehenden Gebäuden zu erreichen, kann neben der oft unwirtschaftlichen Dämmung einzelner Gebäude eine wirtschaftlich sinnvolle Maßnahme die Verbesserung der Versorgungssysteme unter Ausnutzung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Energieformen (Strom, Wärme, Kälte) sein. Dieses betrifft sowohl die Erzeugung als auch die Verteilung der einzelnen Energieträger. Daher soll im Rahmen des Projektes ein interdisziplinärer und integraler Ansatz entwickelt werden, der sowohl die Änderung der Nutzung, die Sanierung und den Neubau von

Gebäuden als auch die Potentiale der verschiedenen Erzeugungs- und Verteilsysteme für Strom, Wärme und Kälte berücksichtigt.

### 2.1.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Die Liegenschaften der RWTH Aachen beinhalten eine Vielzahl von Gebäuden und Gebäudetypen. Darunter fallen zum Beispiel Verwaltungsgebäude, Hörsaalgebäude, Institutsgebäude, Werkstätten, Sportbauten oder Beherbergungsstätten. Neben den RWTH-intern genutzten Gebäuden zählen das Universitätsklinikum Aachen oder zahlreiche An-Institute, wie das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, zu den jeweiligen Campusstrukturen. Die Anzahl der von der RWTH genutzten, energetisch relevanten Gebäude beläuft sich auf 321. Die Baujahre erstrecken sich über einen Zeitraum von 1861 bis dato, eine prozentuale Übersicht der Gebäudealtersverteilung ist in Bild 5 zu sehen.

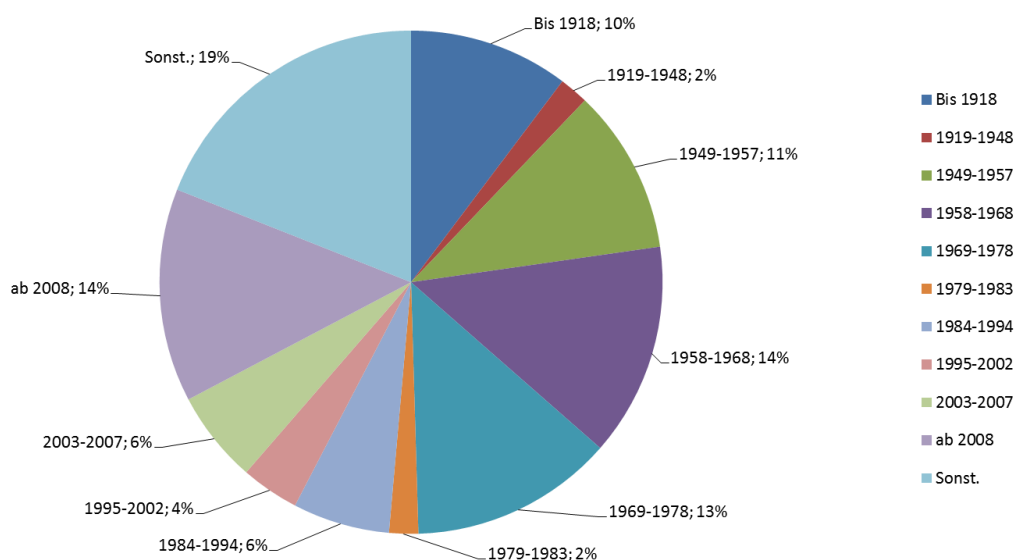


Bild 5: Prozentuale Aufteilung der Gebäudealtersstruktur der RWTH Aachen. © RWTH Aachen.

Anhand der Verteilung der Baujahre auf den jeweiligen Campussen, Mitte, Hörn und Melaten, wird deutlich, dass die Gebäude auf dem Campus Mitte die ältesten Gebäude sind. Diese wurden teilweise um 1900 errichtet und durch einige Neubauten ergänzt. Der Campus Hörn sowie der Campus Melaten sind mit Gebäuden der Baujahre 1970 bis heute bebaut. Aufgrund dieser Vielfalt variieren die Baustandards der zwischen 1900 und 2015 erbauten Gebäude der RWTH Aachen sehr stark. Der durchschnittliche spezifische Heizenergieverbrauch der letzten 5 Jahre beträgt 253 kWh/m<sup>2</sup>a [1], woraus ein erheblicher Sanierungsbedarf vieler Gebäude dieser Liegenschaften abzuleiten ist. Die für die Wärme- und Kältebereitstellung eingesetzten Energieträger sind gebäudeabhängig Gas, Fernwärme, Heizöl EL und Strom. So bezog die RWTH im Jahr 2014 137,4 GWh Erdgas, 49,7 GWh Fernwärme, 0,3 GWh Erdöl und 78,0 GWh Strom. Das

Erdgas wurde nicht nur zur Bereitstellung von Wärme eingesetzt, sondern in umweltfreundlicher Kraftwärmekältekopplung (KWKK) zur Erzeugung von rund 31 GWh Strom und (unter Unterstützung von Kompressionskältemaschinen) von den Absorptionskältemaschinen zu 33,38 GWh Kälte eingesetzt. Die hier erwähnten Energiemengen betreffen mit Ausnahme der Kälte nur die RWTH-eigenen Gebäude, sodass An-Institute oder das Universitätsklinikum Aachen, welche ebenfalls über die Versorgungsstrukturen der RWTH versorgt werden, nicht berücksichtigt werden.

Die RWTH Aachen verfügt über mehrere, teilweise nicht miteinander verbundene Nahwärmenetze zur Versorgung mit Heiz- und Prozesswärme sowie über Kältenetze, die für Kühl- und Entfeuchtungsaufgaben eingesetzt werden. Die Wärme wird über das universitätseigene Heizwerk mit Fernwärme aus dem Braunkohlekraftwerk Weisweiler durch das örtliche Energieversorgungsunternehmen oder durch lokale Wärmeerzeugung wie beispielsweise Heizkessel versorgt. Der zum Teil in KWKK-Anlagen selbst produzierte Strom wird über eigene Mittel- und Niederspannungsstromnetze zu RWTH-internen Endverbrauchern transportiert.

Ein Großteil der Gebäude im Campus Mitte wird über das eigene RWTH Wärmenetz versorgt, das über Wärmeübertrager mit Fernwärme vom örtlichen Energieversorgungsunternehmen gespeist wird. Gleiches gilt für den Campus Hörn, auf dem eine RWTH eigene Kältezentrale mit angeschlossenem Kältenetz installiert ist, wobei die Kälte zum großen Teil mit umweltfreundlicher Kraftwärmekältekopplung erzeugt wird. Auf dem Campus Melaten verfügt die RWTH Aachen über je ein eigenes Nahwärme-, Kälte- und Stromnetz, die die Gebäude mit ähnlicher Altersstruktur wie die des Campus Hörn versorgen. Das Wärmenetz ist als Dreileitersystem ausgeführt und versorgt über eine 1,5 km lange Hauptleitung sowohl die Gebäude mit Heizwärme als auch das Universitätsklinikum und zwei Institute mit Prozesswärme (180 °C). Zurzeit wird die Wärme durch Heizkessel bereitgestellt. Parallel zu dem Nahwärmenetz ist auf dem Campus Melaten ein Kältenetz installiert, welches ebenfalls durch Kraftwärmekältekopplung und Kompressionskältemaschinen versorgt wird.

### **2.1.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Die RWTH Aachen ist Nutzer, aber nicht Eigentümer der Liegenschaften und mietet diese vom Bau- und Liegenschaftsbetrieb (BLB NRW) an. Die Verwaltung und das Betreiben und Realisieren von Verbesserungsmaßnahmen der Gebäude und energetischen Strukturen müssen aber von der RWTH Aachen durchgeführt werden. Hierfür ist die Abteilung Facility Management zuständig, die sich in die sechs Unterabteilungen mit speziellen Aufgabengebieten aufgliedert. Im Rahmen des Projektes sind vor allem die Abteilungen Kaufmännisches Gebäudemanagement, Baumanagement, Elektrotechnik und Maschinenteknik, die direkter Projektpartner sind, von Bedeutung. Energetische Verbesserungsmaßnahmen sowie Neubauten werden in einem abteilungsübergreifenden Prozess durchgeführt.

Die Abteilung Maschinenteknik beschäftigt sich mit allen Gewerken der thermischen Energieversorgung und auch mit dem Energiemanagement. Somit ist sie die direkte Schnittstelle zu den im Projekt benötigten Grundlagen wie Prozessabläufe, Gebäude-

und Anlagenschemata, sowie zu den Verbrauchsdaten. Insbesondere stellt sie den Kontakt zu den anderen Abteilungen des Facility Managements her und beschafft benötigte Daten und Unterlagen, die nicht in der Abteilung Maschinentechnik vorliegen. Die Finanzierung von größeren Bau- und Modernisierungsprojekten aus Landes- und RWTH Aachen-eigenen Mitteln müssen durch das Rektorat genehmigt werden. Um eine Realisierung von Maßnahmen zu erreichen, wird daher auch das Rektorat durch Vorstellung der Projekt(zwischen)ergebnisse aktiv miteinbezogen.

### b) am Projekt

Das interdisziplinäre Projektteam setzt sich aus drei wissenschaftlichen Einrichtungen aus den Fakultäten Maschinenwesen, Bauingenieurwesen sowie Architektur und einer Abteilung des Facility Managements der RWTH Aachen zusammen. Zu den wissenschaftlichen Einrichtungen gehören das Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC), welches im Rahmen des Projektes für die technische Gebäudeausrüstung, wie zum Beispiel die Anlagentechnik, thermische Netze oder Simulationsmodelle für Anlagenkomponenten verantwortlich ist; der Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (e3d), der zum Beispiel für die Abbildung bauphysikalischer Vorgänge und die Gebäudemodelle verantwortlich ist und der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie (GBT), der die Aufgaben in Bezug auf Architektur, Gebäudetechnologie und Gebäudenutzung sowie für die Visualisierung im Geoinformationssystem (GIS) bearbeitet. Das Facility Management stellt unter anderem aufbereitete Daten zur Verfügung und führt die Kostenschätzung der entwickelten Maßnahmen durch. Weiterhin werden die Simulation, Auswertungen und die zu erarbeitenden Sanierungskonzepte gemeinsam von allen Projektteilnehmern bearbeitet.

### c) Organisationsstruktur



- Anlagentechnik
- Thermische Netze
- Simulationsmodelle für Anlagenkomponenten



- Bauphysik
- Datenmodelle
- BIM/GIS
- Gebäudemodelle



- Architektur
- Flächennutzung
- Neubau



- Verwaltung und Aufbereitung von Planungs- und Messdaten
- Monitoring
- Kosten

Bild 6: Aufgabenverteilung im Projekt. © RWTH Aachen.

### **2.1.2.3 Der Projektinhalt**

#### **a) Projektziele**

Das zentrale Ziel des Projektes „EnEff:Campus – RoadMap RWTH Aachen“ ist eine Reduktion des nutzflächenbezogenen Primärenergieverbrauchs der Liegenschaften der RWTH Aachen um 50 % bis 2025 auf Basis der gemessenen Werte 2013/14. Dieses Ziel soll für den Gebäudebestand über ein ganzheitliches und innovatives Gesamtkonzept bei minimalem Aufwand erreicht werden.

Im Rahmen des Projekts werden bestehende Ansätze an der Hochschule, sowohl in der Liegenschaftsverwaltung als auch in der wissenschaftlichen Konzeptentwicklung, zu einer interdisziplinären Projektarbeitsgruppe zusammengeführt. Es soll eine umfassende, übertragbare Methodik zur energetischen Optimierung von universitären Campus-Liegenschaften entwickelt und angewandt werden. Der Ist-Zustand wird dabei in einer Datenbank systematisch erfasst und in einer dynamischen Quartierssimulation abgebildet. Gemeinsam mit einem integralen Datenmanagement schafft dies die Grundlage zur Ableitung der effizientesten und wirtschaftlichsten Optimierungsmaßnahmen und -maßnahmenpaketen. Aus diesen Maßnahmenpaketen werden drei Sanierungsvarianten für die Campusse der RWTH Aachen entwickelt, die als Entscheidungsgrundlage zur energetischen Optimierung der Campusse dienen und das angestrebte Ziel der Primärenergieeinsparung ermöglichen sollen.

Das Projekt „RoadMap RWTH Aachen“ schließt an das bereits abgeschlossene Projekt „Energetische Systemoptimierung campusartiger Liegenschaften - RWTH Aachen und Forschungszentrum Jülich“ an, dass u. a. Werkzeuge entwickelt hat, die in dieser Phase im großen Maße angewendet werden.

#### **b) Projektarbeiten**

Die Projektarbeiten lassen sich grob in folgende Bereiche aufteilen: Modellbildung, Maßnahmen und Maßnahmenpakete, Sanierungsvarianten, begleitendes Monitoring und Dokumentation. Im Folgenden werden die Arbeitspakete detailliert erläutert.

Zu Beginn des Projekts werden alle relevanten Daten, die zur Beschreibung des thermisch-energetischen Verhaltens der Campusse dienen, gesammelt. Darunter fallen geografische Daten, geometrische Daten, bauphysikalische Daten, Nutzungsart, etc. Weiterhin wird das energetische Verhalten von Gebäuden und das der thermischen Netzwerke gemonitort. Alle gesammelten Liegenschaftsdaten der RWTH Aachen werden in einer Datenbank gespeichert. Hierfür ist es notwendig, eine geeignete und umfangreiche Datenbankstruktur zu erstellen. Anhand der gesammelten Daten und einer strukturierten Datenbank ist es möglich, den Ist-Zustand der RWTH Standorte in einem Geoinformationssystem (GIS), hier QGIS Wien, zu visualisieren (siehe Bild 7).



Bild 7: In QGIS visualisierte LOD2 Daten der RWTH Standorte in Aachen. © RWTH Aachen

Weiterhin werden auf Basis dieser Daten mehrere thermische, dynamische Simulationsmodelle erstellt, um den Ist-Zustand der Energieversorgungssysteme abzubilden. Zu den Simulationsmodellen gehören die Gebäude mit ihrer Gebäudetechnik, die Verteilnetze sowie Erzeugeranlagen, die alle durch eine vereinfachte Modellierung beschrieben werden. Diese Gebäude- und Anlagenmodelle werden anschließend mit Netzmodellen gekoppelt. So kann das gesamte Energiesystem mit seinen gegenseitigen Wechselwirkungen erfasst und simuliert werden. Mithilfe dieser gekoppelten Modelle werden alle Optimierungsmaßnahmen bewertet und die Sanierungsvarianten entwickelt.

Bei dem begleitenden Monitoring wird darauf geachtet, dass die wichtigsten Messgrößen wie die Verbrauchsdaten der Gebäude, sowie die erzeugten und in den Netzen übertragenen Energieströme und Energiemengen aufgezeichnet werden. Sollten bestehende Messpunkte nicht ausreichend sein, werden weitere Messpunkte eingerichtet. Diese Daten werden in der entwickelten strukturierten Datenbank abgelegt und dienen der Überprüfung und Kalibrierung der Simulationsergebnisse sowie der Auswirkungen von Verbesserungsmaßnahmen. Ein weiterer Anwendungsfall stellt die routinemäßige Überwachung der Energiesysteme dar, wobei im täglichen Betrieb Unregelmäßigkeiten und Verbesserungspotentiale erkannt werden können.

Auf Basis der Analyse von Monitoringdaten und Simulationsergebnissen werden einzelne Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet und iterativ verifiziert durch die der Primärenergiebedarf sowie die Treibhausgasemissionen gesenkt werden können. Dabei



werden neben Maßnahmen an der Gebäudesubstanz, der technischen Gebäudeausrüstung oder der Netzstrategie/-typologie, also der Versorgung mit Wärme, auch Einsparpotentiale im Nutzerverhalten und die veränderte Nutzung von Bestandsgebäuden und der strategische Neubau untersucht. Hierfür soll die bauliche Eignung der Bestandsgebäude für eine oder mehrere veränderte Nutzungsarten mit dem klimatologischen Kontext des Standorts und den Nutzungsanforderungen der RWTH in Bezug gesetzt und ggf. mit der Errichtung von Neubauten („strategischer Neubau“) an gleicher oder anderer Stelle verglichen werden. Alle diese Optimierungsansätze werden hinsichtlich ihrer Auswirkung, Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet. Dazu wird eine Kostenschätzung durchgeführt.

Nach der Bewertung möglicher Einzelmaßnahmen werden daraus schlüssige Sanierungsvarianten erarbeitet. Dabei werden verschiedene Maßnahmen und Maßnahmenpakete unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen kombiniert, simuliert und bewertet. Durch die Simulation mehrerer Szenarien können Sanierungsvarianten unter verschiedenen Bedingungen getestet und auf ihre Praxistauglichkeit überprüft werden. Auf diese Weise können unerwünschte Konsequenzen ausgeschlossen oder nachteilige Effekte minimiert werden. Dabei beziehen sich die zu entwickelnden Sanierungsvarianten nicht nur auf gebäudetechnische Maßnahmen beim geplanten Ausbau des Campus, sondern es werden auch aktuelle energietechnische Konzepte und Entwicklungen berücksichtigt. Aus diesen entwickelten Szenarien werden die dynamischen Energieströme und ihre Emittenten rückblickend und vorausschauend simulierend mit einem dreidimensionalen GIS-basierten grafischen Modell des Campus dargestellt.

Für die Formulierung der Sanierungsansätze werden alle bereits vorhandenen Ressourcen berücksichtigt. Besonders die Energieerzeugung aus eigenen Anlagen spielt eine bedeutende Rolle und dient als Grundlage für die Sanierungsansätze. Weiterhin werden geplante oder besprochene Erweiterungen integriert werden, falls diese einen wesentlichen Beitrag zu der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und der Einsparung von Emissionen leisten.

### **c) Projektmittel**

Die beantragten Fördermittel beim BMWi beliefen sich auf 834.610 €. Die hauptsächlichsten Kosten entstanden durch personellen Einsatz, da sowohl die Datenerfassung, das Monitoring, die Modellbildung und die Auswertungen und Erarbeitungen von Sanierungsmaßnahmen mit hohem personellen Einsatz verbunden waren. Die Finanzierung von Umsetzungsmaßnahmen war nicht Teil dieses Projektes.

### **d) Projektstand**

Das Projekt wurde am 31.03.2017 erfolgreich abgeschlossen.

### **Die Projektergebnisse**

#### **a) Geplante Ergebnisse**

Da das Projekt bereits abgeschlossen ist, sind alle Projektergebnisse in b) gelistet.

## **b) Bereits erhältliche Ergebnisse**

Als Kernergebnis des Projektes wurde ein Abschlussbericht erstellt, in dem drei Sanierungsvarianten, die eine Reduktion des flächenspezifischen Primärenergieverbrauchs der RWTH-Liegenschaften um bis zu 50 % bis 2025 auf Basis der gemessenen Werte 2013/14 ermöglichen, beschrieben werden. Die einzelnen Maßnahmen dieser Konzepte sind durch integrale Betrachtung der Maßnahmenpakete aufeinander abgestimmt und gesamtheitlich wirtschaftlich bewertet worden. Der Abschlussbericht wurde in der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover veröffentlicht [6].

Die entwickelten Methoden und die konzeptionelle Ausarbeitung zur energetischen Aufwertung eines Campusareals können auf andere campusartige Strukturen übertragen werden. Durch die Vielfältigkeit des Campusareals der RWTH Aachen wurde in den Simulationen und Konzepten eine differenzierte Auswahl an Eigenschaften abgebildet. Hierdurch wird eine reibungslose Übertragbarkeit auf ähnliche Campus- oder Stadtviertel-Projekte gewährleistet. Die erarbeiteten Methoden und Berechnungsverfahren können so an anderen Hochschulen oder Quartiersstrukturen zum Einsatz kommen.

Neben den veröffentlichten Erfahrungen im energetischen Bereich kann die entwickelte Datenbankstruktur zur systematischen Ablage und Analyse von energetischen dreidimensionalen Stadtquartiersdaten in anderen Projekten genutzt werden. Die Kompatibilität mit CityGML-Daten erlaubt es, verfügbare Gebäudegeometriedaten einfach und ohne großen Aufwand zu nutzen. Eine dreidimensionale Visualisierung der Gebäude und Energieströme für unterschiedliche Sanierungsvarianten ist dadurch möglich. Die entwickelte Datenbankstruktur wurde bereits im Projekt „EnEff:Campus: LivingRoadmap“ genutzt und weiterentwickelt.

Folgende Open Source-Werkzeuge wurden innerhalb des Projektes erweitert und verbessert:

TEASER – zur automatisierten Generierung von dynamischen Archetyp-Gebäudemodellen (geschrieben in Python, generiert Modelle für die Modelica-Bibliotheken AixLib und IBPSA Project 1), <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>

AixLib – Modelica Bibliothek mit Modellen für Gebäude, Gebäude- und Quartiersenergiesysteme (geschrieben in Modelica), <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>

Diverse im Rahmen des Projekts publizierte Veröffentlichungen sind in den Referenzen gelistet [6] – [12].

### **2.1.2.4 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Dies wurde in diesem Projekt nicht explizit betrachtet.

### **2.1.2.5 Umsetzung in die Lehre**

Obwohl Studenten in mehreren Lehrveranstaltungen regelmäßig die zentralen Versorgungsanlagen der RWTH Aachen besichtigen, wurde das Projekt nicht aktiv in Lehrveranstaltungen miteinbezogen.

Allerdings bot das Projekt in allen drei beteiligten Fakultäten ausgezeichnete Möglichkeiten zur Anfertigung studentischer Abschlussarbeiten. Aus diesem Grund wurden innerhalb des Projektes sowohl Projektarbeiten, Bachelor-, als auch Masterarbeiten in den Bereichen der Datenerfassung, der Modellbildung und der Konzeptentwicklung, der Erfassung des Ist-Zustandes eines Gebäudes und der darauf beruhenden Ableitung von Sanierungsmaßnahmen sowie der Umnutzung durchgeführt.

#### **2.1.2.6 Lessons Learned**

An diesem Projekt arbeitete ein interdisziplinäres Team verschiedener Fachrichtungen und Hintergründe zusammen, so dass unterschiedliche Verständlichkeiten von Begriffen und Zielsetzungen vorlagen. Aus diesem Grund wurden die meisten möglichen Missverständnisse bereits am Projektstart durch genaue Absprache und Klärung der Begrifflichkeiten sowie Zielsetzungen behoben.

Weiterhin muss ein solches Team, um Aufgaben in der vorgegebenen Zeit lösen zu können, im Vorhinein die Aufgaben klar gliedern, so dass Stärken und Schwächen von allen Teammitgliedern erkannt und deren Potential ausgenutzt bzw. abgebaut werden können. Dazu haben sich regelmäßige Treffen zur Kontrolle des Projektfortschrittes und Absprache der zu erledigenden Arbeiten bewährt.

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Im Projektverlauf war es nicht erforderlich, nennenswerte Entscheidungen zu treffen.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Das größte Hemmnis im Projekt stellte die teilweise für das Projekt unzureichende oder sich widersprechende Datenlage insbesondere bezüglich dynamischer Messdaten und statischer Campusdaten dar. Beispielsweise konnten teilweise große Unterschiede zwischen den in den statischen Campusdaten vorhanden und den tatsächlich gemessenen Höhen von Gebäuden festgestellt werden. Aus diesem Grund mussten Daten häufig manuell durch Vorortbegehung erfasst oder validiert werden. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes zusätzlich ein Leitfaden für die detaillierte Erfassung des Ist-Zustandes von Gebäuden durch Vorortbegehung erstellt, um ein einheitliches Vorgehen verschiedener beteiligter Personen zu gewährleisten. Die detaillierte Erfassung des Ist-Zustandes einzelner Gebäude hat sich im Rahmen des Projektes trotzdem als sehr zeitintensiv herausgestellt, sodass diese Arbeit nur für ausgewählte Gebäude durchgeführt wurde. Zusätzlich installierte oder auf die Gebäudeleittechnik aufgeschaltete Sensoren, konnten zudem den Mangel an Messdaten verringern.

#### **c) Energetische Benchmarks**

Als energetischer Benchmark für die Bewertung einzelner Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen diente der nutzflächenbezogene Primärenergieverbrauch der Liegenschaften der RWTH Aachen im Jahre 2013. Zur Berechnung der primärenergie-

tischen Einsparung wurden die in DIN V 18599-1 definierten Primärenergiefaktoren verwendet. Hierbei hat sich eine starke Abhängigkeit der Ergebnisse vom Primärenergiefaktor des deutschen Strommix gezeigt, da dieser innerhalb der Projektlaufzeit von 2,4 auf 1,8 herabgesetzt wurde.

Für die energetische Bewertung von Gebäuden wurden der spezifische und der absolute Heizenergieverbrauch der Gebäude verwendet. Als Vergleichsmaßstab diente hierbei die über alle Gebäude der Liegenschaften der RWTH gemittelten spezifischen und absoluten Heizenergieverbräuche. Zudem wurde die Fassadengüte aller Gebäude anhand von U-Werten bewertet.

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Da es sich bei dem Projekt um ein Simulations- und Planungsprojekt handelt, wurden keine Technologien eingesetzt.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Das im Vorgängerprojekt entwickelte integrale Planungshilfsmittel konnte gut integriert und für den Projektfortschritt genutzt werden.


Das Arbeiten mit einer cloudbasierten Lösung und einer Versionierungssoftware hat sich als hilfreich erwiesen, um redundante Daten zu vermeiden und den Zugriff von unterschiedlichen Institutionen auf gleiche Daten zu ermöglichen.

## 2.2 HochschulCampus Berlin Charlottenburg

Autorenteam:

Dipl.-Ing. Diana Stanica, Dr.-Ing. Arda Karasu, Dipl.-Ing. Nikolai Kononenko, Dr.-Ing. Stefan Brandt, Prof. Dr. Martin Kriegel (Technische Universität Berlin)

### 2.2.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	EnEff: HCBC HochschulCampus Berlin-Charlottenburg		
<b>Projektbild</b>	 <p>Modell des HochschulCampus Berlin-Charlottenburg. © Projekt EnEff: HBC.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Technische Universität Berlin & Universität der Künste Berlin Straße des 17. Juni 135 10623 Berlin		
<b>Projektbeteiligte</b>	TU Berlin FG Gebäude-Energie-Systeme (Hermann-Rietschel-Institut) FG Gebäudetechnik und Entwerfen FG Maschinen- und Energieanlagentechnik FG Ingenieurgeologie	UdK Berlin FG Versorgungsplanung und Versorgungstechnik	Vattenfall Wärme Berlin AG
<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	1 Verwaltungsgebäude, 1 Bibliothek, 46 Institutsgebäude (Seminarräume, Büros, Versuchslabore, Hörsäle) In Summe: 48 Gebäude		
<b>Neubauten im Projekt</b>	Neues Mathematikgebäude Interdisziplinäres Zentrum für Modellierung und Simulation (IMOS)		
<b>Baujahr der Gebäude</b>	1883 - 2012		
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	entsprechend des Baualters; bereits durchgeführte energetische Sanierungen		

<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	<p>Zentrale Wärmeversorgung durch Fernwärme (33,9 MW Anschlussleistung)          Strom aus dem allgemeinen Stromnetz          Die Kälteleistung von ca. 160 installierten Kälteerzeugern beträgt ca. 11,4 MW. Davon sind ca. 86 % im Gebäude zentral installierte Kaltwassersätze. Bis auf eine vernachlässigbar kleine Kältezentrale sind alle anderen Kälteerzeuger elektrisch angetrieben.</p>							
<b>Projektlaufzeit</b>	<p>1. Phase: 03/2016 – 08/2018          2. Phase: 01/2019 – 12/2023</p>							
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betriebsoptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung
	XX	X		XX	X	X		
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung				
	XX	X	XX	X				
<b>Projekthalt</b>	<p>Ziel des EnEff:HCBC-Projekts ist es, die Klimaschutzziele der Bundesregierung für 2050 am Beispiel des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg bereits 2035 zu demonstrieren. Dies geschieht durch eine energetisch und ökonomisch sinnvolle Kombination aus Energieeinsparung durch energetische Gebäude- und Anlagensanierung, lokale Gewinnung von erneuerbaren Energien sowie Wärmeverbundnetzen. Entscheidendes Merkmal ist dabei die Verschiebung der Wärmeenergiebilanzgrenze vom Gebäude weg hin zum Quartier. Dazu wurde in der ersten Phase des Projektes ein Masterplan Energie entwickelt, dessen Umsetzung in der zweiten Phase des Projektes beginnen soll.</p>							
<b>Projektmittel</b>	<p>HCBC I: bewilligte Forschungsmittel insgesamt: 820.382 € (FKZ 03ET1354A/B)          davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): keine          HCBC II: bewilligte Forschungsmittel insgesamt: 5.502.203 € (FKZ 03ET1632A-C),          Projektgelder insgesamt 10.500.000 €          davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): bis 4.500.000 €</p>							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	<p>In der ersten Phase wurden alle Maßnahmen an einem Gebäude und für das Areal untersucht, um Potentiale von erneuerbare Energien, Abwärme, der Sanierung der Gebäudehülle und der Anlagentechnik zu identifizieren.</p>							
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	<p>Innovatives Kälteverbundnetz          Innovatives Mehrleiter-Wärmenetz auf dem Ostareal mit Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien</p>							
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt				Nach dem Projekt			
	417.040 m <sup>2</sup>				450.151 m <sup>2</sup>			

Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt (gemessen im Jahr 2016)	Endenergie		Primärenergie		Energiekos- ten
	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
Wärme	63.361	133,8	28.512	60,2	k. A.
Kälte	12.925	27,3	7.755	16,4	k. A.
Strom	39.536	83,5	71.164	150,3	k. A.
Summe	115.822	244,6	107.431	226,9	k. A.
Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt	Endenergie		Primärenergie		Energiekos- ten
	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
Wärme	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Kälte	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Strom	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Summe	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Die Zielwerte hängen von der jeweiligen ausgewählten Teilmaßnahme pro Gebäude ab. Generell war es das Ziel, zu zeigen, dass das klimapolitische Ziel von 2050 schon 2035 erreicht werden kann, ohne jedes Gebäude einer Vollsanierung nach EnEV zu unterwerfen, wenn die Arealgrenze vom Gebäude auf den Campus verschoben wird.					
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MODELICA für die Gebäude- und Netzsimulationen</li> <li>• DesignBuilder und IDA ICE für detaillierte Gebäudeanalysen</li> <li>• Polysun und SunnyDesign für die Potentialanalyse und Dimensionierung der Solaranlagen und anderen energetischen Maßnahmen</li> <li>• eigenes Tool für Maßnahmenauswertung und Erstellung des Masterplans</li> <li>• eigene Datenbank für Datenverwaltung</li> </ul>				
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methodik für Sanierungsfahrplanentwicklung (Berechnung und Auswertung von Maßnahmen)</li> <li>• Gebäudeübergreifende Sanierungs- und Effizienzsteigerungsmaßnahmen</li> </ul> Beides enthalten in [13].				

## 2.2.2 Projektbeschreibung

### 2.2.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Der HochschulCampus Berlin Charlottenburg besteht aus 48 Gebäuden mit unterschiedlichen Baujahren und Nutzungen. Darunter sind viele Gebäude unter Denkmalschutz. Der wesentliche Teil der Gebäude ist in der Nachkriegszeit entstanden und nicht saniert. Ein paar wenige neuere Gebäude und zwei geplante Neubauten auf dem Ost-Gelände runden das Bild des Gebäudezustands ab. Der spezifische Endenergieverbrauch liegt im Schnitt bei 200 kWh/m<sup>2</sup>a, wobei 140 kWh/m<sup>2</sup>a wärmebezogen sind. Die Wärmeversorgung des Gebiets erfolgt derzeit zu fast 100 % über Fernwärme. Die Kühlung erfolgt zum größten Teil über dezentrale Kompressionskältemaschinen, ein kleiner Teil über Absorptionskältemaschinen.

Es besteht ein hohes Sanierungspotential, sowohl für die Hüllen als auch für die technischen Anlagen. Außerdem wurden wesentliche Potentiale zur Nutzung von Umweltenergien identifiziert. Bei idealer Umsetzung der energetischen Maßnahmen und Nutzung der regenerativen Potentiale können über 80 % des derzeitigen Primärenergiebedarfs, der für die Wärme- und Kältebereitstellung nötig ist, eingespart bzw. durch Umweltenergien gedeckt werden.

### **2.2.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Die Verantwortung für das Energiemanagement der Gebäude und die Entscheidungskraft über die umzusetzenden Maßnahmen liegt bei der Facility Management Abteilung der jeweiligen Universitäten (TU & UdK Berlin). Die Forscher im HCBC Projekt arbeiten in enge Kooperation mit dem Facility Management, sowohl bei der Bestandsaufnahme als auch bei der Planung der Umsetzungsmaßnahmen.

Folgende Berliner Senatsverwaltungen sind als Bauherr und Mittelgeber der Universitäten in den Planungsprozess eingebunden:

- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen
- Senatsverwaltung für Finanzen

#### **b) am Projekt**

Antragssteller des Projekts sind die Technische Universität Berlin, die Universität der Künste Berlin und Vattenfall Wärme Berlin AG.

Die Technische Universität Berlin ist mit den Fachgebieten „Gebäude-Energie-Systeme“ (Hermann-Rietschel-Institut (HRI)), „Maschinen- und Energieanlagentechnik“ (ETA), „Gebäudetechnik und Entwerfen“ (GtE) und „Ingenieurgeologie“ auf der wissenschaftlichen Seite vertreten, wobei das HRI die Projektleitung innehat. Das FG Gebäude-Energie-Systeme deckt den Part der Wärmeerzeugung und -verteilung ab, das FG Maschinen- und Energieanlagentechnik den entsprechenden Part für die Kälte. Das FG Gebäudetechnik und Entwerfen (GtE) ist zuständig für die Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Das FG Ingenieurgeologie beschäftigt sich mit der Modellierung und Betriebsoptimierung des Erdwärmekollektors des Bibliotheksgebäudes.

Auf Seiten der Universität der Künste Berlin ist der Lehrstuhl für „Versorgungsplanung und Versorgungs-technik“ (VPT) maßgeblich für die Modellierung des Campus zuständig.

Die Vattenfall Wärme Berlin AG ist zuständig für den Umbau des Wärmenetzes auf dem Ostareal des Campus, wo die zwei Neubauten gebaut werden und unterstützt das HRI bei der Konzeption des Wärmeemulators, der die Einspeisung von dezentralen Quellen in Fernwärmenetze emulieren soll.



### c) Organisationsstruktur

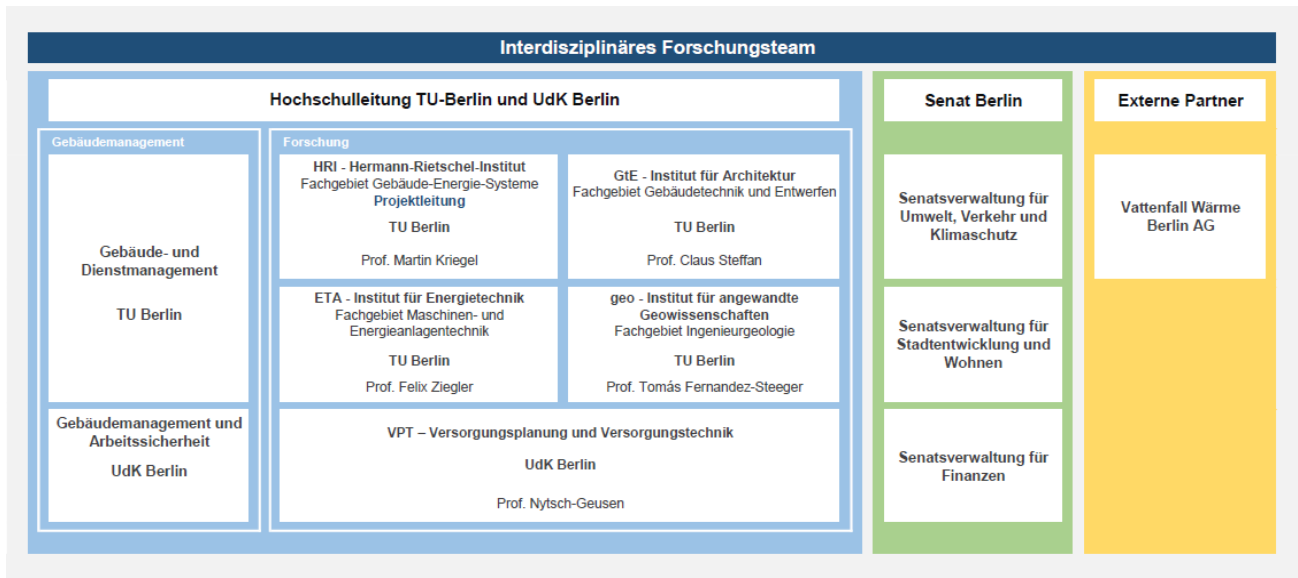


Bild 8: Das interdisziplinäre Forschungsteam des Projekts HochschulCampus Berlin Charlottenburg. © Projekt EnEff: HBC.

#### 2.2.2.3 Der Projektinhalt

##### a) Projektziele

Übergeordnetes Ziel des EnEff:HCBC-Projekts ist es, am Beispiel des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg, die Klimaschutzziele der Bundesregierung für 2050 bereits 2035 zu demonstrieren. Dazu wurde in der ersten Phase des Projektes (2016-2018) am Beispiel des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg eine Methode entwickelt, wie in einem bestehenden Stadtquartier schneller und mit geringeren finanziellen Mitteln hohe thermische Energieeinsparungen realisiert werden können, als dies mit bisherigen Methoden im Rahmen einer Sanierung nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) möglich ist.

In Rahmen des ersten Umsetzungsprojektes (Laufzeit Januar 2019 - Dezember 2023), soll diese Planungsmethode getestet und weiterentwickelt werden, so dass in den nächsten 10 Jahren Primärenergieeinsparungen oder -substitutionen auf dem gesamten Campus in Höhe von zunächst 40 % realisiert werden. Um dieses Ziel erreichen zu können erfordern die Vielfalt und Menge der Gebäude im Campus alternative Lösungen zu Standardsanierungsmaßnahmen am Gebäude. Diesbezüglich werden integrative Fassadenkonzepte erforscht und entwickelt, die quartiersbezogen sind und Netzintegrität im Vordergrund haben und Energieeinsparung mit Energiesubstitution kombinieren.

Es soll auch parallel zu den Sanierungsmaßnahmen ein Reallabor entstehen, in dem die gebäudeübergreifende Nutzung von erneuerbaren Energien und Abwärme über ein Mehrleiter-Wärmenetz, gepaart mit einem Erdwärmespeicher, getestet und optimiert wird. Der Kernpunkt des Labors wird ein Wärmeemulator sein, mit dem es möglich sein

wird, verschiedenste zeitvariante Wärmeströme in das Netz zu speisen. Ein Wärmeemulator ist ein Speicher, mit dessen Hilfe auf unterschiedlichen Temperaturniveaus Wärme bereitgestellt wird und somit die Hydraulik und Wärmeverschiebung in Mehrleiternetzen real erprobt werden kann. Damit wird eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet, da dieser Wärmeemulator generische Erzeugerprofile von z.B. Solarthermie und Abwärmeprozessen erzeugen kann.

Weiterhin ist es ein elementares Ziel des Forschungsvorhabens, dass aus den Ergebnissen des EnEff:HCBC-Projektes Handlungsempfehlungen entwickelt werden, die auf andere Stadtgebiete übertragen werden können.

## **b) Projektarbeiten**

Die Planungsphase des Projektes ist bereits abgeschlossen. Die Umsetzungsphase des Projektes ist in sieben Teilprojekte aufgeteilt:

### *1) Weiterentwicklung Planungsmethode*

In diesem TP soll die Planungsmethode für die Erstellung eines energetischen Masterplans validiert und weiterentwickelt werden. Es werden, wenn nötig, Detailsimulationen durchgeführt und eine Teilautomatisierung der Prozessschritte implementiert. Eine Sensitivitätsanalyse, die die Übertragbarkeit der Planungsmethode und der gebäudeübergreifenden Maßnahmen auf andere Stadtgebiete überprüft, wird ebenso durchgeführt.

### *2) Energetische Gebäudeteilsanierung*

Es werden Detailanalysen der umzusetzenden Maßnahmen durchgeführt, die bei der wissenschaftlichen Begleitung der Planung und Umsetzung angewendet werden sollen. Innovative Hüllsanierungsmaßnahmen werden (weiter-)entwickelt.

### *3) Innovativer Wärmenetz-Demonstrator*

Im Rahmen dieses APs soll ein innovatives Wärmenetz für das Ostareal geplant, umgesetzt und optimiert werden. Herzstück des Demonstrators wird einen Wärmeemulator in Form eines Wärmespeichers sein, der die Netzeinspeisung von unterschiedlichen erneuerbaren Wärmelastprofilen emulieren kann. Dieser wird zunächst mittels dynamischer Simulationen konzipiert und dimensioniert und im Anschluss errichtet und betriebsoptimiert. Teil dieses APs ist auch die Untersuchung und Betriebsoptimierung des Erdkollektors der Bibliothek, der zurzeit wegen zu hoher Untergrundtemperaturen nicht in Betrieb ist.

### *4) Transformation Bestandswärmenetz*

Hier werden die Absenkung der Netztemperaturen und eine dezentrale Abwärmennutzung auf dem Campusareal untersucht.

### *5) Kälteverbund Nord und Süd*

Auf dem Nordareal des Campus soll ein Kälteverbund konzipiert, geplant und umgesetzt werden. Auch ist es geplant, ein bestehendes Nahkältenetz auf dem Süd-Gelände des Campus durch den Anschluss von weiteren Gebäuden mit eigenen Kältezentralen zu erweitern. Es sollen übergeordnete Managementstrategien zum Betrieb von Kälteverbänden mit mehreren örtlich voneinander getrennten Abnehmer- und Erzeugergruppen erarbeitet und evaluiert werden. Dafür werden mathematische Modelle der

Kälteverbände erstellt. Mittels dynamischer Simulationen werden verschiedene Betriebsszenarien evaluiert. Damit wird eine Datengrundlage erschaffen, die zur Erstellung und Optimierung von entworfenen Regelalgorithmen notwendig ist. In der Zusammenarbeit mit den Planern werden notwendige Voraussetzungen zur Integration von neuen Regelalgorithmen erarbeitet. Das andere Ziel dieses Teilprojekts ist die Untersuchung der weiteren Betriebsoptimierungsmöglichkeiten von Kälteverbänden in Kurz- und Langzeitbetrieb.

#### *6) Wissenschaftliche Begleitung Neubauten*

Auf dem Ost-Gelände des TU Berlin werden zwei neue Gebäude gebaut (Mathematik und IMOS). In diesem Arbeitspaket soll eine wissenschaftliche Begleitung der Planung dieser zwei Gebäude stattfinden. Es werden Detailsimulationen durchgeführt, die zur Abstimmung des Monitoring-Konzepts, zur Evaluation der Nachweismethoden sowie zu Raumklimaanalysen dienen sollen.

#### *7) Energetisches Monitoring*

Es werden Monitoringkonzepte für die Maßnahmen der Teilprojekte 2, 3, 5 und 6 entwickelt und umgesetzt. Die Monitoringdaten sollen ausgewertet und zur Betriebsoptimierung und Bewertung der Maßnahmen dienen.

### **c) Projektmittel**

In der ersten Phase (HCBC I) ohne konkrete Umsetzungsmaßnahmen standen Forschungsmittel des BMWi von insgesamt 820.382 € zur Verfügung. In der zweiten Phase (HCBC II) betragen die gesamten Projektmittel 10.500.000 € (insgesamt 5.502.203 € vom BMWi), davon sind für Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400) bis zu 4.500.000 € geplant.

### **d) Projektstand**

In der ersten Phase des Projektes wurde zunächst eine Bestandsaufnahme aller Gebäude durchgeführt. Daten aus Messungen, Unterlagen und Begehungen wurden zusammengefasst und in einer Datenbank gespeichert, die als Grundlage für die Gebäudesimulation dient. Die Gebäudemodelle wurden optimiert und für die Berechnung des Einsparungspotentials von einzelnen Gebäudesanierungsmaßnahmen angewendet. Im Bereich der Gebäude- und Anlagentechnik wurden Potentialanalysen durchgeführt und Energieeinsparungs- und -substitutionsmaßnahmen abgeleitet. Somit sind über 1000 Einzelmaßnahmen entstanden und bewertet worden. Grundlage der Auswertung ist ein dafür entwickeltes Software-Tool, welches die Maßnahmen nach Einspar- und/oder Kostenvorgaben filtert und sortiert.

Die zweite Phase des Projektes (1. Umsetzungsphase) hat im Januar 2019 begonnen. Die Projektpartner sind dabei, die Planungsmethode weiterzuentwickeln, die Facility Management-Abteilungen bei der Entscheidung der Umsetzungsmaßnahmen zu unterstützen und die Planung der Neubauten und der Wärme- und Kältenetze wissenschaftlich zu begleiten.

#### **2.2.2.4 Die Projektergebnisse**

##### **a) Geplante Ergebnisse**

Geplant sind die Weiterentwicklung der Planungsmethode aus der Projektphase I, eine möglichst weitreichende Umsetzung der energetischen Gebäudeteilsanierung am Campus und der Aufbau eines innovativen Wärmenetz-Reallabors am Campus. Untersucht werden soll die Transformation des Bestandswärmenetzes in ein Wärmenetz 4.0. Im Projekt werden für den Kälteverbund Nord und Süd die Regelung modelliert, die Planung und eine wissenschaftliche Begleitung sowie eine Optimierung durchgeführt. Für die Neubauten ist eine wissenschaftliche Begleitung mit dem Ziel der Evaluation der Nachweismethoden geplant. Insgesamt wird ein energetisches Monitoring aufgebaut und umgesetzt.

##### **b) Bereits erhältliche Ergebnisse**

- Methodik für Bestandsaufnahme, Potentialanalyse und energetische Masterplanentwicklung für Universitätscampus [1]
- Methodik für architektonisch-geometrische Vereinfachung von Mehrzonengebäude-modellen [14]
- Vereinfachte Methode zur Abschätzung des Kältebedarfs eines Quartiers mit unterschiedlichen Kälteerzeugern [15]

#### **2.2.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Das Projekt beinhaltet keine gesonderten Maßnahmen zur Nutzerintegration oder Nutzersensibilisierung.

#### **2.2.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Im Rahmen des Projektes wurden Bachelor- und Masterarbeiten durchgeführt.

#### **2.2.2.7 Lessons Learned**

##### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Der Aufbau persönlicher Kontakte und Vertrauensverhältnisse zu verschiedensten Stellen, wie z. B. dem Gebäudemanagement in der Anfangsphase des Projekts, erwies sich, trotz des hohen Zeitaufwands, gerade auch im letzten Jahren als extrem vorteilhaft, sowohl bei der konkreten Festlegung von Maßnahmen und Preisen als auch bei der Entwicklung von Umsetzungsprojekten für die nächste (Umsetzungs-)Phase des Projekts.

##### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Das Auffinden sowie der Zugang zu den benötigten Daten stellte eine wesentlich größere Herausforderung dar als angenommen. Das liegt zum einen an den Baualtern

(1883-2011) der Universitätsbauten. In dieser langen Zeitspanne gingen viele Dokumente verloren, wurden in den Weltkriegen zerstört bzw. in unterschiedlichsten Formaten an unterschiedlichsten Orten von Generationen von Mitarbeitern abgelegt. Zum anderen sind viele der Informationen vertraulich, weshalb neben zahlreichen Genehmigungen auch der Aufbau persönlicher Kontakte und Vertrauensverhältnisse zu verschiedensten Stellen den Zugang erst Schritt für Schritt ermöglichte.

Hinzu kommt die knappe personelle Besetzung im Bereich des Gebäudemanagements, gerade auch auf operativer Ebene, die eine übermäßige Inanspruchnahme durch die Forschung nicht zulässt.

Eine weitere Schwierigkeit ist die Kostenbewertung der Einzel- und Kombinationsmaßnahmen auf Gebäude- und Anlagenebene sowie im Bereich der regenerativen Energien. Zum einen existieren oft hohe Preisspannen für ein und dieselbe Maßnahme, zum anderen sind preisbestimmende Details, wie Einbausituation, Platzbedarf usw., nicht im Projektumfang dieser Konzeptionsphase enthalten und können deshalb nur grob geschätzt werden.

### **c) Energetische Benchmarks**

Im Rahmen dieses Projektes wurde für die Bewertung der Maßnahmen der Benchmark €/kWh<sub>PE</sub> (Euro pro kWh eingesparte Primärenergie) benutzt. Klassische energetische und wirtschaftliche Benchmarks wie CO<sub>2</sub>-Einsparung und Amortisationszeit wurden ebenso berechnet, so dass die Bewertung der Maßnahmen flexibel gestalten werden kann. Dynamische CO<sub>2</sub>- und Primärenergiefaktoren für Strom und Wärme und eine umfangreiche CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Datenbank würden die Auswertung der Maßnahmen und die Genauigkeit der Ergebnisse deutlich verbessern.

Derzeit stehen noch keine übertragbaren Benchmarks zur Verfügung.

### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Noch keine.

### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Für die Erstellung eines Monitoringkonzepts für den „Kälteverbund Nord“ wurden zusätzlich zu einem typischen an die DIN V 18599 angelegten Messkonzept noch weitere Messstellen evaluiert, die zur Erfolgskontrolle und Fehleranalyse der später eingesetzten Regelalgorithmen notwendig werden. Daher wurde in der ersten Phase mit Hilfe des kommerziellen Tools „Polysun“ ein Modell entwickelt, das alle notwendigen Komponenten zur einfachen und schnellen Abbildung des Kälteverbunds beinhaltet.


Aufgrund einer beschränkten Modelltiefe und festgesetzten Randbedingungen der Simulationsumgebung von „Polysun“ wird das entwickelte Modell nur sehr beschränkt die vorgeplanten Simulationsszenarien abdecken können.

## 2.3 Campus TU Braunschweig

Autorenteam:

Dipl.-Ing. Tanja Wenhake, Dipl.-Ing. Stephan Schulze (TU Braunschweig)

### 2.3.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	EnEff:Campus:blueMAP TU Braunschweig, EnEff:Campus: EnEff Campus 2020 - wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung und Monitoring		
<b>Projektbild</b>	 <p>Zentralcampus TU Braunschweig. © IGS.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	TU Braunschweig Mühlenpfordtstraße 23 38106 Braunschweig		
<b>Projektbeteiligte Phase 1</b>	Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)	Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik (ISE)	Institut für Psychologie (IfP)
	Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia)	Gebäudemanagement der TU Braunschweig (GB3)	Institut für Transportation Design (ITD) der Hochschule für Bildende Künste (HBK)
	HIS – HE GmbH Hochschulentwicklung	Synavision GmbH Aachen	BS I Energy, Braunschweiger Versorgungs-AG & Co. KG
<b>Projektbeteiligte Phase 2</b>	Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)	Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik (ISE)	Institut für Psychologie (IfP)
	Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia)	Gebäudemanagement der TU Braunschweig (GB3)	BS I Energy, Braunschweiger Versorgungs-AG & Co. KG
	Institut für Nachrichtentechnik	Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund	Steinbeis Innovationszentrum energie+ (SIZ e+)

<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	<p>Einteilung der Gebäude nach Hauptnutzungsart (Nutzungszuweisung nach DIN 277-2):</p> <p>Nicht genutzte Flächen (NF 0): 4 Gebäude          Wohnen und Aufenthalt (NF 1): 4 Gebäude          Büroarbeit (NF 2): 39 Gebäude          Experimente und Forschung (NF 3): 46 Gebäude          Lagern, Verteilen, etc. (NF 4): 14 Gebäude          Kultur, Unterricht, etc. (NF 5): 19 Gebäude          Sonstige (NF 7): 7 Gebäude          Technikfläche: 3 Gebäude          In Summe: 136 Gebäude</p>
<b>Neubauten im Projekt</b>	<p>Im Zeitraum des aktuellen Forschungsprojekts werden einige Neubauvorhaben der TU Braunschweig umgesetzt, die nicht im direkten Zusammenhang mit diesem Projekt stehen. So entstanden in der Zeit von 2012 bis 2014 am Campus Forschungsflyghafen, der im Projekt <i>blueMAP</i> TU Braunschweig keine intensive Betrachtung findet, das Niedersächsische Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik (NFF) sowie das Niedersächsische Forschungszentrum für Luftfahrt (NFL). Im innerstädtischen Campus-Bereich werden aktuell drei weitere Forschungszentren umgesetzt. Der Neubau des Braunschweiger Zentrums für Systembiologie (BRICS) wird auf dem Areal des Zentralcampus umgesetzt, das Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik (PVZ) sowie das Laboratory for Emerging Nanometrology and Analytics (LENA) werden im Bereich des Campus Ost errichtet.</p>
<b>Baujahr der Gebäude</b>	<p>bis 1918: 23 Gebäude, davon 7 unter Denkmalschutz          1919-1948: 23 Gebäude, davon 4 unter Denkmalschutz          1949-1957: 7 Gebäude, davon 3 unter Denkmalschutz          1958-1968: 37 Gebäude, davon 5 unter Denkmalschutz          1969-1978: 20 Gebäude, davon 4 unter Denkmalschutz          1979-1983: 5 Gebäude          1984-1994: 8 Gebäude          1995-2002: 6 Gebäude          2003-2007: 3 Gebäude          ab 2008: 4 Gebäude          im Bau: 3 Gebäude</p>
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	<p>Auf dem Hochschulgelände befinden sich eine Vielzahl typischer Universitätsgebäude mit unterschiedlichen Nutzungen (Vortragsräume, Bibliothek, Mensa, Büro, Labor, Hallenbauten, Verwaltung etc.) und Gebäude aller Baualtersklassen (historische Gebäude 18./19. Jhd., Gründerzeit, Moderne der 1950er Jahre, Funktionsbauten der 1960er und 1970er Jahre, Neubauten).</p> <p>Ein Großteil der Gebäude stammt aus der Phase erhöhter Bautätigkeit der Jahre zwischen 1950 und 1980. Viele der Gebäudekomponenten wie Gebäudehülle und Anlagentechnik haben das Ende ihrer Lebensdauer erreicht und entsprechen nicht mehr dem heutigen Stand der Technik. Darüber hinaus treten altersbedingte Mängel und Schäden sowie Ermüdungserscheinungen am Tragwerk auf.</p>

<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	<p>Die TU Braunschweig zählt zu den landeseigenen öffentlichen Liegenschaften Niedersachsens, deren Strom- und Gasversorgung öffentlich ausgeschrieben werden muss. Die Oberfinanzdirektion (OFD) eines Bundeslandes ist für die Auswahl des jeweils wirtschaftlichsten Strom- bzw. Gasanbieters in Form einer Pool-Ausschreibung zuständig. Der jeweils ausgewählte Versorger wird für die Vertragslaufzeit von zwei Jahren bestimmt.</p> <p>Bei der thermischen Energieversorgung erfolgt eine Unterteilung in die Nutzung von Erdgas und Fernwärme. Ca. 99 % des Campus der TU Braunschweig wird über das Fernwärmenetz der Stadt Braunschweig mit Wärme versorgt. Das Erdgas wird neben der Verwendung in Laboren vereinzelt in Gaskesseln zu Heizzwecken, zur Warmwasseraufbereitung und zur Dampferzeugung, vor allem jedoch für ein Blockheizkraftwerk im Chemiezentrum genutzt.</p>								
<b>Projektlaufzeit</b>	<p>Phase 1: 04/2012 bis 03/2015 Phase 2: 09/2015 bis 03/2019</p>								
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betriebsoptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung	<p>XX (Phase 1)</p> <p>XX (Phase 2)</p> <p>XX (Phase 1+2)</p>
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung					<p>XX</p> <p>X</p> <p>X (Betriebs- optimie- rung)</p> <p>X</p>
<b>Projekthalt</b>	<p>Am Beispiel des innerstädtischen Campus der TU Braunschweig wurden in der ersten Projektphase im Forschungsprojekt „EnEff Campus:blueMAP TU Braunschweig“ beispielhaft Planungs- und Optimierungsmethoden zur Verbesserung der Energieeffizienz von Stadtquartieren entwickelt und erprobt. Aufbauend auf der evaluierten Ausgangssituation (Flächen-, Energie-, Kosten-Kennzahlen etc.) wurden Szenarien zur Reduzierung des Energieverbrauchs auf Gebäudeebene, dem rationellen Energieeinsatz und der Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf dem Hochschulcampus unter ökologischen und ökonomischen Randbedingungen untersucht. Zielwerte waren die mittelfristige Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um 40 % und die langfristige Versorgung des Campus mit ausschließlich regenerativer Energie.</p> <p>Die Umsetzung des Masterplans startete im September 2015 mit dem Projekt „EnEff Campus 2020“, in dessen Rahmen in den nächsten drei Jahren ein mehrdimensionales Sanierungskonzept zur energetischen Optimierung des Campus realisiert, wissenschaftlich begleitet und im Betrieb vermessen wurde.</p>								



<b>Projektmittel</b>	Phase I: 1.140.845 € bewilligte Fördersumme für die wissenschaftliche Bearbeitung (FKZ 03ET1004B) Phase II: 1.431.125 € Fördermittel für die wissenschaftliche Bearbeitung (FKZ 03ET1307A) davon keine Mittel für Maßnahmen 21,5 Mio. € Eigenmittel der TU Braunschweig davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 21,5 Mio. €					
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Verbesserung der Gebäudehülle (Dachflächen, Fassade) Beleuchtungsaustausch (Verkehrsflächen, Laborräume, Büroräume) Austausch technischer Ausstattung (Kühl- und Gefrierschränke) Betriebsoptimierung von raumlufttechnischen Bestandsanlagen (RLT-Anlagen) Erhöhung der gebäudeweisen Flächeneffizienz durch Verdichtung der Büroraumflächen					
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	Installation von Photovoltaik-Anlagen auf untersuchten Campusedächern					
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	Ca. 401.000 m <sup>2</sup>		Ca. 402.904 m <sup>2</sup>			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt</b> (2011 gemessen, witterungsbereinigt)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	39.259	97,9	21.200	52,9	3,8 Mio.
	Kälte	-	-	-	-	-
	Strom	35.505	88,5	92.313	230,2	5,5 Mio.
	Summe	74.764	186,4	113.513	283,1	9,3 Mio.
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b> (bereits durchgeführte Betriebsoptimierungen, gemessen 2018)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	35.377	87,8	19.103	47,4	2,9 Mio.
	Kälte	-	-	-	-	-
	Strom	25.694	63,8	66.804	165,8	5,9 Mio.
	Summe	61.071	151,6	85.907	213,2	8,8 Mio.
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b> (Planung für 2020, gerechnet)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	24.879	62,0	13.435	33,4	1,8 Mio.
	Kälte	-	-	-	-	-
	Strom	20.948	52,3	54.465	135,2	3,8 Mio.
	Summe	45.827	114,3	67.900	168,6	5,6 Mio.

<b>Eingesetzte Planungstools</b>	PV Sol für die Dimensionierung der Photovoltaik-Anlagen Energieberater (DIN V 18599) für die Bewertung der Gebäudesanierung und Energieausweise eigenes Tool für Bestandsaufnahme und Berechnung von Sanierungsmaßnahmen auf MS Excel-Basis
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	Interaktive Campuskarte mit Gebäuden und Maßnahmen CO <sub>2</sub> -Challenge: ein Wettbewerb zur Einsparung von CO <sub>2</sub> -Emissionen unter den Gebäuden Diverse Veröffentlichungen und Events Siehe Projektwebsite: <a href="https://www.tu-braunschweig.de/igs/forschung/eneffcampus2">https://www.tu-braunschweig.de/igs/forschung/eneffcampus2</a>

### 2.3.2 Projektbeschreibung

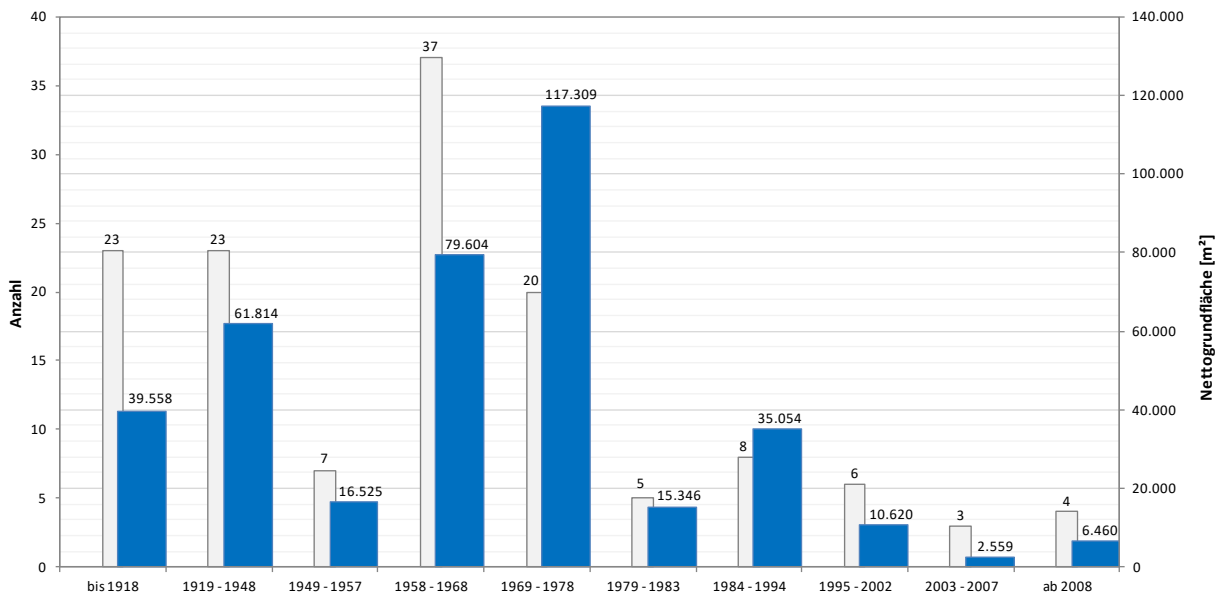
#### 2.3.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Die Technische Universität Braunschweig wurde im Jahre 1745 gegründet und gehört heute dem TU9-Verband führender Technischer Universitäten Deutschlands an. Das Campus-Areal der TU Braunschweig befindet sich im innerstädtischen Bereich und besteht aus vier Arealen: Zentralcampus, Campus Ost (Langer Kamp), Campus Ost Beethovenstraße und Campus Nord. Die insgesamt ca. 200 Gebäude nehmen eine Gesamt-Nettogrundfläche von ca. 400.000 m<sup>2</sup> ein. Der größte Anteil dieser Gebäude und Flächen beherbergt Verwaltungs- und Büroräume sowie Laboreinrichtungen. Ein weiterer Teilbereich des Campus-Areals am Flughafen nördlich von Braunschweig findet in der Projektbearbeitung aufgrund der standortspezifischen Besonderheiten keine Berücksichtigung.

#### *Energetische Ausgangssituation*

Auf dem Hochschulgelände befindet sich eine Vielzahl typischer Universitätsgebäude mit unterschiedlichen Nutzungen (Vortragsräume, Bibliothek, Mensa, Büro, Labor, Hallenbauten, Verwaltung, usw.) aus allen Baualtersklassen (historische Gebäude aus dem 18./19. Jahrhundert, Gründerzeit, Moderne der 50er Jahre, Funktionsbauten der 60er und 70er Jahre, Neubauten). Ein Großteil der Gebäude stammt aus der Phase erhöhter Bautätigkeit der Jahre zwischen 1950 und 1980. Insgesamt wurden 82 % des Gebäudebestands vor 1980 und damit vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung von 1977 errichtet.

**Anzahl der Gebäude und Gesamt-NGF der jeweiligen Baualtersklassen**



Baualtersklassen nach den Regeln der Datenaufnahme von Nichtwohngebäuden gem. BMVBS

Bild 9: Anzahl der Gebäude und Gesamt-NGF der jeweiligen Baualtersklassen. © IGS.

### Nutzungsgruppen nach DIN 277

Nach Flächenverteilung der Nutzungsgruppen gemäß DIN 277 liegt der Schwerpunkt der TU Braunschweig mit ca. 40 % der Gesamtfläche im Bereich Forschung. Eine weitere Aufschlüsselung dieser Fläche von insgesamt 259.554 m<sup>2</sup> nach den Nutzflächenarten NF 1-6 zeigt, dass davon 91.968 m<sup>2</sup> bzw. 35,4 % auf Laborflächen entfallen. Diese Zahlen verdeutlichen anschaulich die räumlichen Besonderheiten einer technischen Universität. Weitere 30 % verteilen sich auf die Büroarbeit, die restlichen Nutzungsgruppen liegen ebenfalls bei insgesamt ca. 30 %.

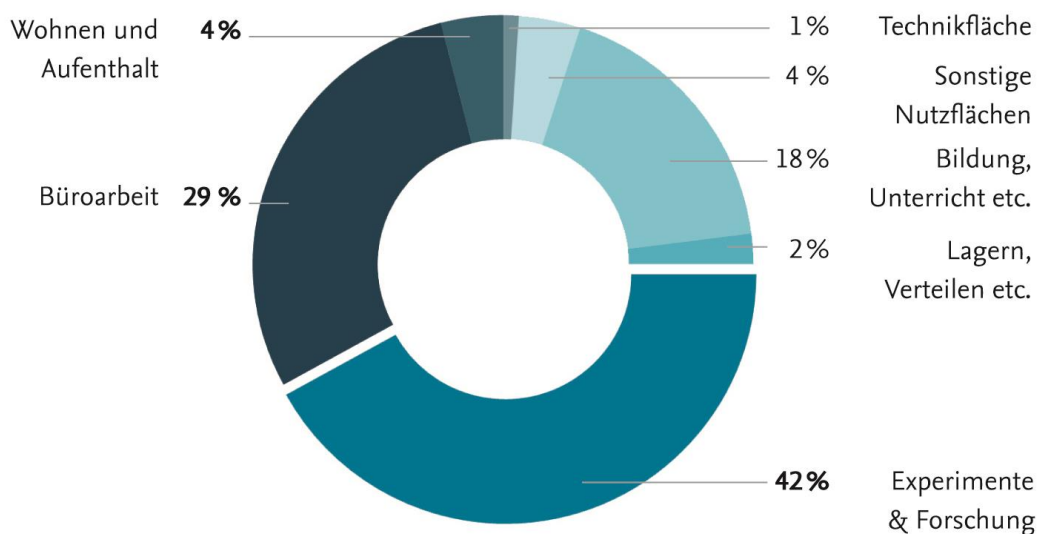


Bild 10: Verteilung der Nutzungsgruppen nach DIN 277-2. © IGS.

#### *Energieversorgung*

Die TU Braunschweig zählt zu den landeseigenen öffentlichen Liegenschaften Niedersachsens, deren Strom- und Gasversorgung öffentlich ausgeschrieben werden muss. Die Oberfinanzdirektion (OFD) eines Bundeslandes ist für die Auswahl des jeweils wirtschaftlichsten Strom- bzw. Gasanbieters in Form einer Pool-Ausschreibung zuständig. Der jeweils ausgewählte Versorger wird für die Vertragslaufzeit von zwei Jahren bestimmt.

Bei der thermischen Energieversorgung erfolgt eine Unterteilung in die Nutzung von Erdgas und Fernwärme. Ca. 99 % des Campus der TU Braunschweig wird über das Fernwärmenetz der Stadt Braunschweig mit Wärme versorgt. Das Erdgas wird neben der Verwendung in Laboren vereinzelt in Gaskesseln zu Heizzwecken, zur Warmwasseraufbereitung und zur Dampferzeugung, vor allem jedoch für ein Blockheizkraftwerk im Chemiezentrum genutzt.

#### *Energieverbrauch*

Der jährliche Wärmeenergieverbrauch summiert sich im Basisjahr 2011 auf ca. 39,3 GWh, der jährliche Stromverbrauch auf ca. 35,5 GWh, die Energiekosten liegen insgesamt bei ca. 9,5 Mio. Euro. Zur Deckung der Energiekosten wendet die TU Braunschweig 5 % ihres Gesamtbudgets auf, dabei macht der Hauptkostenpunkt Strom 50 % der Gesamtkosten aus. Da die Landeszuschüsse für die Energiekosten auf dem Niveau von 2009 bei 6 Mio. Euro stagnieren, müssen die Universitäten die Kostensteigerungen der letzten Jahre alleine zu Lasten der eigenen Haushalte finanzieren.

### **2.3.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

##### *Akzeptanzbewertung TU Braunschweig*

Das Präsidium der TU Braunschweig identifiziert sich in besonderer Weise mit dem Campusprojekt blueMAP der TU Braunschweig und engagiert sich bereits im Vorfeld für das Folge- und Pilotprojekt „Energieeffizienter Campus 2020“, damit die vorbereitete energetische Masterplanung für die Standortentwicklung des Campus in diesem Schritt weiter forciert und zielgerichtet vorangetrieben werden kann. Aus diesem Grund beteiligt sich die TU Braunschweig auch weiterhin am Projekt „Energieeffizienter Campus 2020“ sowohl inhaltlich als auch personell, um die Grundlagen für die weitere Umsetzung zu schaffen. Dabei wird ausdrücklich die interdisziplinäre Ausrichtung der Institute der TU Braunschweig im Forschungsteam begrüßt.

##### *Datenbasis*

Die TU Braunschweig verfügt dank des Gebäudemanagements (GB3) der Universität über eine umfassende, zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Gebäude-Energieverbräuche auf Basis von über 500 Messstellen mit Zuordnung zu Flächen gem. DIN 277, Nutzungen sowie zur zukünftigen Bedarfsentwicklung. Weiterhin ist ein Großteil der Gebäude-Bestandspläne der TU Braunschweig durch das GB3 digital archiviert und kann jederzeit bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden. Ein zentral eingerichtetes Energiemanagementsystem ermöglicht die Überwachung und Steuerung der gebäudetechnischen Anlagen, die zum Großteil mithilfe von Gebäudeleittechnik in das System integriert sind. Durch die Montage von Zähl- und Messeinrichtungen ließen sich deshalb schnell und einfach Teilenergiekennwerte in den Gebäuden ermitteln. Sie sind eine wichtige Grundlage für die Optimierung der Energieverbräuche. Diese werden im Rahmen des Forschungsschwerpunkts „Energieeffiziente Betriebsoptimierung“ (EnBop) von verschiedenen Forschergruppen in einer Datenbank zentral erfasst und können somit auch in Campus-Projekten genutzt werden. Durch die Struktur und Leistungsfähigkeit des Gebäudemanagements bietet der Campus der TU Braunschweig die Möglichkeit, die im Forschungsprojekt entwickelten Konzepte zur energetischen Sanierung und zum langfristigen Umbau der Energieversorgung auch in der sich anschließenden Umsetzungsphase durchzuführen.

Aufbauend auf der Datenlage des Gebäudemanagements werden zudem Strukturen geschaffen, um die entwickelten Maßnahmen im Folgeprojekt „EnEff Campus 2020“ gezielt in die Umsetzung zu bringen sowie den stetig ansteigenden Energieverbräuchen und damit verbundenen Kosten entgegenzuwirken. So wurde von der Strategiekommision der TU Braunschweig eine Arbeitsgruppe zum Thema „Energiekostenbudgetierung“ einberufen. Die Arbeitsgruppe hat u. a. Einsparpotenziale identifiziert, eine transparente zeitnahe Darstellung der Verbräuche und Kosten für die Nutzer gefordert und eine „Erfolgs“-Beteiligung der Nutzer an den von ihnen in Zukunft generierten Einsparungen empfohlen.

Mit Einführung und Umsetzung der Energiekostenbudgetierung an der TU BS findet eine differenzierte Umlegung der Energiekosten auf die Fakultäten und Institute statt.

Jede Kostenstelle mit Flächennutzung hat einen verantwortlichen Energienutzungskordinator (EnKo) benannt, der als Schnittstelle zwischen dem Gebäudemanagement und der eigenen Einrichtung fungiert. Zudem wurden Anfang 2014 zwei Energieberater (EB) eingestellt, die die Energienutzungskordinatoren in allen Fragen zum Thema Energie beraten und bei der Durchführung ihrer Aufgaben unterstützen.

Für die transparente Darstellung der Verbräuche stellt die TU Braunschweig seit März 2014 ein Informationssystem (Energie-Web-Portal „conject“) zur Verfügung, in dem die Strom- und Heizwärmeverbräuche monatlich dargestellt werden. Damit erhalten alle Institute und Einrichtungen die Kostenverantwortung für den Energieverbrauch und können durch ein energiebewusstes Handeln oder durch die Förderung von energieeffizienten Maßnahmen direkt von der Kosteneinsparung profitieren.

### **b) am Projekt**

Die fachliche Bearbeitung findet durch ein interdisziplinäres Forschungsteam aus Instituten der TU Braunschweig und externen Projektpartnern, wie beispielsweise dem lokalen Energieversorger, statt, um die gesamte Bandbreite der relevanten Themenstellungen für die Entwicklung eines ganzheitlichen energetischen Masterplans zu bearbeiten. Für die Projektleitung und -koordination ist das Institut für Gebäude- und Solartechnik unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch zuständig.

Eine enge Abstimmung der Arbeitspakete wird durch regelmäßige Projekttreffen gewährleistet. Darüber hinaus wird der inhaltliche Austausch durch Fachdiskussionen in flexibel organisierten Kleingruppen vertieft. Die Einbindung in eine hochschulübergreifende Perspektive wird durch die Hochschulentwicklung (HIS-HE) hergestellt.

Innerhalb des Projekts werden von dem interdisziplinären Forschungsteam fünf verschiedene Schwerpunktthemen bearbeitet:

- Städtebau
- Gebäude: Architektur, Bauphysik, Gebäudetechnik
- Energieversorgung, -erzeugung, -speicherung
- Verkehr und Mobilität
- Nutzerverhalten

Die Themen Energieerzeugung und -verteilung bilden den Arbeitsbereich des Instituts für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia). Das Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik (ISE) widmet sich dem Schwerpunkt Städtebau. Unter dem Schwerpunkt Verkehr und Mobilität werden vom Institut für Transportation Design (ITD) der Hochschule für Bildende Künste Mobilitäts- und Verkehrskonzepte erstellt. Als fünftes Schwerpunktthema wird das Nutzerverhalten vom Institut für Psychologie (IfP) untersucht.

### c) Organisationsstruktur

#### Masterplan

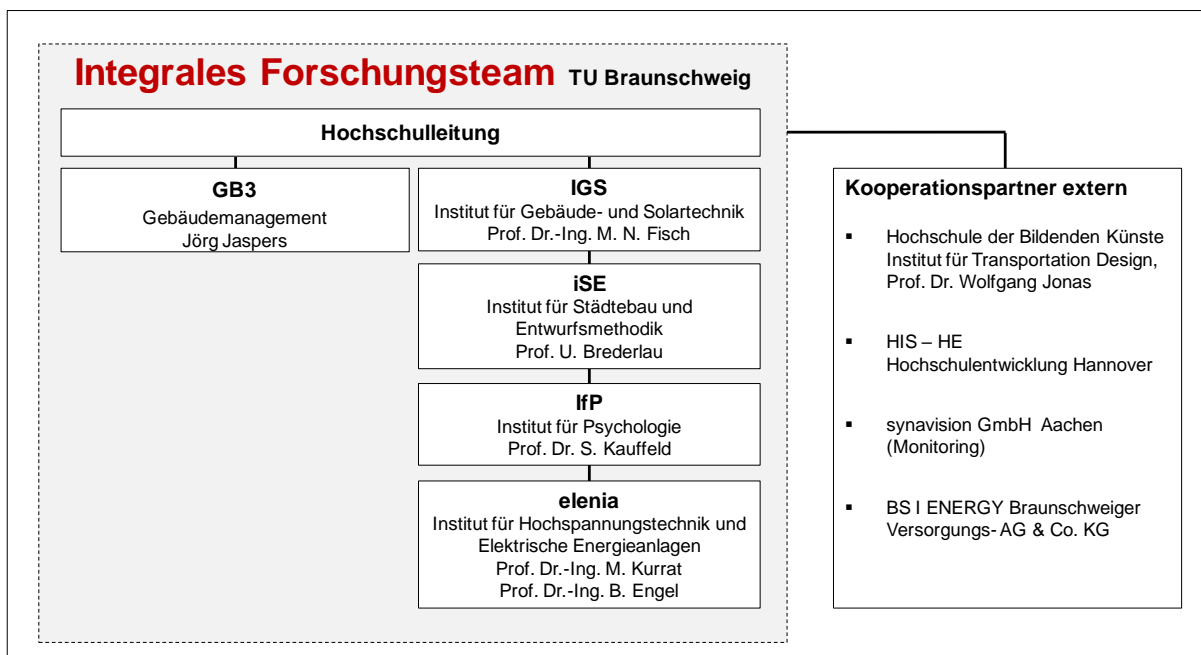


Bild 11: Organisationsstruktur für den Masterplan. © IGS.

#### Umsetzung



Bild 12: Organisationsstruktur für die Umsetzung. © IGS.

### 2.3.2.3 Der Projektinhalt

#### a) Projektziele

In vielen Projekten auf Quartiersebene bestehen methodische Defizite hauptsächlich im Bereich der Energiebilanzierung auf Quartiersebene, der Identifikation von konkreten Handlungsfeldern, der Ableitung langfristiger Strategien und vor allem der Umsetzung dieser in vorhandenen Projekten auf Quartiersebene. Ziel des Forschungsprojektes „EnEff Campus 2020“ ist es, sich dieser Aufgabe zu stellen und die gegebenen Potentiale aus der ersten Phase „EnEff Campus:blueMAP TU Braunschweig“ durch einen

intelligenten Einsatz und Vernetzung neuer Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz auf Quartiersebene systematisch zu nutzen und umzusetzen.

Auf Basis des „Integralen Energetischen Masterplans“ werden bis 2020 konkret definierte Maßnahmen für einen Großteil der rund 200 Gebäude (ca. 400.000 m<sup>2</sup> NGF) mit einem (Teil-) Zielwert von 40 % Primärenergie-Reduzierung bis 2020 realisiert, wissenschaftlich begleitet und im Betrieb vermessen. Diese umfassen die Aufgabenfelder „Neubautätigkeit, Sanierung und Instandhaltung“, „Erneuerbare Energieversorgung“, „Information und Motivation der Nutzer“ und „Ganzheitliche städtebauliche Entwicklung“.

In der Umsetzung geht es vorrangig um hochwirtschaftliche Maßnahmen, wie die Verbesserung der Flächeneffizienz, Betriebsoptimierung sowie die Nutzermotivation und -information. Kostenintensive Sanierungen wie z. B. großflächige Dämmmaßnahmen werden erst in zweiter Linie betrachtet.

Parallel erfolgt eine präzise Variantenuntersuchung mit dem langfristigen Ziel eines weitgehend CO<sub>2</sub>-neutralen Campus, der vielschichtig mit der Stadt vernetzt sein wird und eine Rolle als Rückgrat und Entwicklungsmotor im städtischen Gefüge einnimmt. In einem weiteren Schwerpunktthema erfolgt die Entwicklung einer integrierten Technologieforschungsplattform "Real-Life-Lab Campus TU BS", die zur Optimierung der Gebäudeperformance genutzt werden soll. So können mittels der Technologieplattform künftig die Energieverbräuche transparent gemacht, intelligent gesteuert und optimiert werden.

## **b) Projektarbeiten**

### *Phase 1*

Der Arbeitsplan des Projektes umfasst drei Arbeitspakete (AP) entsprechend der Teilziele sowie das Arbeitspaket zur wissenschaftlichen Begleitung und Koordination:

#### *1. Integraler energetischer Masterplan*

- Status 2010: Der Gebäudebestand des Campus TU Braunschweig wird in Bezug auf Energiebedarf und Energieverbrauch, Städtebau und Mobilität dokumentiert und in einem Energiekataster als Baseline für die weitere Bearbeitung abgebildet.
- Konzept 2020: Das Energiekataster wird in ein interdisziplinäres Berechnungsmodell für die Campuserwicklung übertragen, mit dem multiple Parameterstudien für verschiedene Szenarien der Campuserwicklung erstellt werden.

#### *2. Umsetzungsorientierte Planungsphase 2020, Vision 2050*

Die Ergebnisse zeigen einen detaillierten Entwicklungsplan für den Campus der TU BS 2020 auf, der mit der Hochschulleitung und den weiteren verantwortlichen Institutionen zu einem konkreten Umsetzungsplan unter Berücksichtigung technischer, finanzieller und administrativer Aspekte entwickelt wird. Darüber hinaus werden Szenarien für die langfristige Perspektive 2050 dargestellt. Die Vision 2050 bildet die Grundlage für eine dauerhaftes „Commitment“ der Hochschule zur nachhaltigen Campuserwicklung.



### 3. Verwertungsgrundlage

Im Rahmen der Erstellung des integralen Masterplans werden durch das interdisziplinäre Team Werkzeuge und Methoden für die Bearbeitung der komplexen Themen und Aufgabenstellungen entwickelt und evaluiert. Die erarbeiteten Konzepte und Szenarien bilden die Grundlagen für die Planungs- und Umsetzungsphase und sind Bestandteil zukünftiger Forschungs- und Lehraktivitäten im Bereich des energieoptimierten Bauens und Betriebens.

#### Phase 2

In der umsetzungsorientierten Phase bilden zwei Schwerpunktthemen den Forschungsfokus:

##### 1. Schwerpunktthema I - Umsetzung

Ziel des Folgeprojekts „EnEff Campus 2020“ ist es, den in der ersten Phase entwickelten konzeptionellen Umsetzungsplan zu realisieren. Das integrale Konzept besteht aus 4 Strategien zur energetischen Optimierung des Campus. Diese sollen im auf 3 Jahre angelegten Folgeprojekt für einen Großteil der rund 200 Gebäude (ca. 400.000 m<sup>2</sup> NGF) des Campus umgesetzt werden. Parallel wird ein umfassendes Monitoring und Evaluierungskonzept aufgebaut. Den Forschungsfokus bildet dabei die Demonstration von Maßnahmen in der Umsetzung. Dies umfasst:

- Neubau, Sanierung, Instandhaltung
- Energieversorgung
- Nutzermotivation und -information
- Städtebauliche Entwicklung

Zum einen soll eine Kombination aus einzelnen Strategien die energetische Optimierung des Campus bis 2020 als Demonstrationsprojekt intensiv in der Praxis vorantreiben. Zusätzlich wird das langfristige Ziel eines weitgehend CO<sub>2</sub>-neutralen Campus in eine präzisere Variantenuntersuchung überführt und entsprechende langfristige Strategien entwickelt.

Die einzelnen Strategien werden aufeinander abgestimmt, bleiben jedoch unabhängig voneinander umsetzbar. Auf diese Weise kann bei Bedarf flexibel auf mögliche Veränderungen reagiert werden, ohne das Gesamtziel im Grundsatz zu gefährden.

##### 2. Schwerpunktthema II - Technologieforschung

In einem weiteren Schwerpunktthema erfolgt die Entwicklung einer integrierten Technologieforschungsplattform "Real-Life-Lab Campus TU BS", die zur Optimierung der Gebäudeperformance genutzt werden soll. Hier werden im ersten Schritt von verschiedenen Instituten Methoden der Signalverarbeitung, der informationstechnischen Datensemantik und der Methoden des Software Engineerings auf Gebäude und Anlagen angewendet. So können mittels der Technologieplattform künftig die Energieverbräuche transparent gemacht, intelligent gesteuert und optimiert werden.

Durch die Evaluierung der Ergebnisse im „Real-Life-Lab Campus TU BS“ und die Umsetzung der Ergebnisse im Campus-Quartier findet unter den beiden Schwerpunktthemen

ein kontinuierlicher Austausch bei der Entwicklung, Umsetzung und Erprobung innovativer Technologien statt.

### c) Projektmittel

21,5 Mio. Euro für Umsetzungsmaßnahmen (keine Fördermittel):

- Gebäudehülle: 15,9 Mio. Euro
- Gebäudetechnik: 3,79 Mio. Euro
- Photovoltaik: 1,31 Mio. Euro
- Beleuchtung: 300.000 Euro
- Technische Ausstattung: 20.000 Euro

Fördermittel von 1,5 Mio. Euro für die wissenschaftliche Bearbeitung.

### d) Projektstand

Bis Projektende sind 97 durchgeführte und geplante Umsetzungen dokumentiert, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Maßnahmenpakete, Umsetzungen und erzielte Einsparungen.

Maßnahmenpaket	Anzahl Gebäude, an denen das Maßnahmenpaket umgesetzt wurde	Einsparungen		
		Primärenergie [MWh/a]	CO <sub>2</sub> -Emissionen [t/a]	Energiekosten [€/a]
1. Gebäudehülle	32	857	245	122.465
2. Gebäudetechnik	25	6.087	1.451	478.507
3. Photovoltaik	12	1.897	412	133.623
4. BHKW	Keine Umsetzung			
5. Beleuchtung	23	1.054	247	76.404
6. Tech. Ausstattung	2	225	53	16.435
7. Nutzerverhalten	3	195	46	14.250
<b>Gesamt</b>	<b>97</b>	<b>10.316</b>	<b>2.455</b>	<b>841.684</b>

#### *E-Mobilität*

Am Südturm des Mühlenpfordthauses wurde ein Ladebereich für Elektrofahrzeuge errichtet. Neben der technischen Installation wurden sowohl die beiden AC-Ladestationen als auch der Multicharger zum schnellen DC-Laden informations- und kommunikationstechnisch in ein übergeordnetes Ladesystem integriert. Dies ermöglicht die Erfassung ladespezifischer Daten und soll künftig eine intelligente Ladung der Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit weiterer Energiesysteme, wie beispielsweise die PV-Anlage des Instituts, ermöglichen.

#### *Nutzerverhalten*

Es wurden in ersten Pilotstudien Energie-Coachings mit über 100 Nutzerinnen und Nutzern unterschiedlicher Institute und Gebäude durchgeführt, um ihr Energie- und Umweltverhalten zu verbessern. Darüber hinaus fanden in dem Zeitraum sechs Workshops

mit ca. 80 Mitarbeiter/innen der TU und neun Workshops mit 106 Studierenden statt. Die daraus resultierenden Veränderungen der energetisch relevanten Kennwerte sind noch auszuwerten und zum jetzigen Zeitpunkt nicht Bestandteil der Maßnahmendokumentation.

### *CO<sub>2</sub>-Challenge*

Die CO<sub>2</sub>-Challenge ist ein TU-interner Energieeinsparwettbewerb. Durch seinen spielerischen und gleichzeitig kompetitiven Charakter sollen die Mitarbeitenden der TU wieder für ihr eigenes Verhalten in Bezug auf Energiesparen sensibilisiert und angeregt werden, mehr Energie zu sparen als andere Institute dies tun. Der spielerische Wettbewerb soll die Motivation der Institute steigern und gleichzeitig die Aufmerksamkeit für das Thema erhöhen. Die Institute erhielten ein ganzes Jahr lang im Rhythmus von zwei Monaten per Mail einen Steckbrief, der Informationen zu den CO<sub>2</sub>-Emission des jeweiligen Gebäudes in den beiden vorangegangenen Monaten mit Vergleich zum Vorjahr enthielt. Im Sinne eines Rankings enthält der Steckbrief außerdem Informationen dazu, wie das eigene Gebäude, verglichen mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen anderer TU-Gebäude, dasteht. Datengrundlage für die Auswertung ist der Strom- und Wärmeverbrauch aus dem Energiemanagement-System der TU. Im Rhythmus von zwei Monaten erhält das Gebäude mit der prozentual höchsten CO<sub>2</sub>-Einsparung eine Prämie von 2.000 €, die von der TU Braunschweig zur Verfügung gestellt wird. Die Prämie kann entweder zur Umsetzung geringinvestiver Baumaßnahmen oder für Anschaffungen auf Institutsebene (bspw. effiziente Geräte oder Mobiliar) genutzt werden. Es wurden somit insgesamt sechs „Gewinner-Gebäude“ gekürt und über die TU-interne Presse publik gemacht. Ergänzend dazu wurde ein Kreativ-Wettbewerb ausgeschrieben, bei dem Mitarbeitende Ideen zur Energieeinsparung an ihrem Institut oder in ihrem Gebäude entwickeln und einreichen konnten. An die Gewinner des Wettbewerbs wurden am Ende der Challenge Sachpreise (gestiftet von namhaften Sponsoren aus der Region) überreicht. Als dritte Komponente der CO<sub>2</sub>-Challenge wurde eine Prämierung für innovative Energiesparmaßnahmen ausgeschrieben. Die Prämierung erfolgt durch das Team der CO<sub>2</sub>-Challenge zusammen mit der Energieberatung des Gebäudemanagements nach festgelegten Bewertungskriterien wie bspw. das Einsparpotential, die Umsetzbarkeit und die Übertragbarkeit. Der Preis wurde an Mitarbeitende vom Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund sowie das Gauß-IT-Zentrum verliehen.

### *Gebäudehülle*





Zur Erhöhung des thermischen und akustischen Raumkomforts, der Reduzierung von Wärmeverlusten und der Verbesserung der Zufriedenheit möglichst vieler Nutzer aus allen Einrichtungen wurde für 2018 und 2019 das „Fensterprogramm“ zur Instandsetzung nicht voll funktionsfähiger Fenster der TU BS initiiert. Die Maßnahmen dienen der Verbesserung der Fensterdichtigkeit, der Wiederherstellung der vollen Lüftungsfunktion, dem Austausch erblindeter Glasflächen in Räumen mit Aufenthaltsqualität und dem Austausch von Fenstern und Teilflächen von Fassaden. Für die Maßnahmen wurden 2018 und nachfolgend für 2019 Mittel von jeweils 250.000 Euro seitens der TU BS zur Verfügung gestellt.






### 2.3.2.4 Die Projektergebnisse

#### a) Geplante Ergebnisse

Die in den verschiedenen Schwerpunktthemen entwickelten Einzelmaßnahmen (Gebäudehülle, Anlagentechnik, technischer Ausstattung, Nutzerverhalten, Integration von BHKWs, usw.) der erstellten Sanierungsbausteine mit Angaben zu Energieeinsparpotentialen, einer Beschreibung der jeweiligen Maßnahme im Einzelnen sowie den daraus resultierenden erforderlichen Investitionskosten bildeten die Grundlage für die im Anschluss folgende umsetzungsorientierten Phase II. In Tabelle 4 werden die Einzelmaßnahmen der verschiedenen Schwerpunktthemen mit ihren Ergebnissen zusammengefasst.

Tabelle 4: Einzelmaßnahmen der Schwerpunktthemen.

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Kosten / Energiebilanz	
 Gebäudehülle	Energetische Sanierung der Gebäudehülle nach EnEV 2009 für alle relevanten Gebäude auf dem Campus der TU BS.	Investitionskosten:	120 Mio. €
		Kosteneinsparung:	1,6 Mio. €/a
		Amortisation:	20 a
		Primärenergie:	-9 %
		CO <sub>2</sub> -Emission:	-12 %
 BHKW	Installation eines großen BHKW mit einer Feuerungsleistung von 526 kW zur Versorgung des Ost-Campus sowie ein kleineres BHKW mit 148 kW für den NordCampus.	Investitionskosten:	590 T€
		Kosteneinsparung:	320 T€/a
		Amortisation:	2 bzw. 6 Jahre
		Primärenergie:	-3 %
		CO <sub>2</sub> -Emission:	-10 %
 Photovoltaik	Eignungsanalyse aller Bestandsdachflächen der TU BS für PV-Integration unter Berücksichtigung von Dachaufbauten sowie der Verschattung durch Nachbargebäude und Baumbestände. Nicht berücksichtigt wurden der Zustand und die Tragfähigkeit der Dächer sowie der Denkmalschutz einzelner Gebäude.	Investitionskosten:	2.500 €/kW <sub>p</sub>
		Einsparung Strom:	2.590 MWh/a
		Kosteneinsparung:	480 T€/a
		Amortisation:	10-12 a
		Primärenergie:	-6 %
		CO <sub>2</sub> -Emission:	-5 %
 Flächen-effizienz	Reduzierung der vorhandenen Büroarbeitsflächen von ca. 60.000 m <sup>2</sup> bzw. 15 m <sup>2</sup> /Person (Bewertung gem. DIN V 18599-10 als geringe bis mittlere Belegung) auf ca. 10 m <sup>2</sup> /Person (hohe Belegung). Dies entspricht einer Büroflächenreduzierung von ca. 20.000 m <sup>2</sup> .	Investitionskosten:	n. n.
		Einsparung Wärme:	2.680 MWh/a
		Einsparung Strom:	670 MWh/a
		Kosteneinsparung:	436 T€/a
		Primärenergie:	-3 %
		CO <sub>2</sub> -Emission:	-3 %

<b>Gebäude- technik</b>	Energetische Optimierung aller vorhandenen raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) > 1.000 m <sup>3</sup> /h.	Investitionskosten: 4 Mio. € Einsparung Strom: 5.950 MWh/a Kosteneinsparung: 1,1 Mio. €/a Amortisation: 2,5 a Primärenergie: -14 % CO <sub>2</sub> -Emission: -12 %
		
<b>Beleuchtung</b>	Austausch der installierten Beleuchtung in allen Verkehrsflächen (Flure und Treppenhäuser), Büroflächen und Laborflächen, Einsatz von LED Beleuchtung.	Investitionskosten: 2,57 Mio. € Einsparung Strom: 3.050 MWh/a Kosteneinsparung: 570 T€/a Amortisation: 3 a Primärenergie: -8 % CO <sub>2</sub> -Emission: -6 %
		
<b>Technische Ausstattung</b>	Austausch sämtlicher Altgeräte an Kühl- und Gefrierschränken. Hochrechnung auf Basis der im Bestand aufgenommenen und dokumentierten Geräte (ca. 70% Geräte in Energieeffizienzklasse D und „schlechter“).	Investitionskosten: 1 Mio. € Einsparung Strom: 950 MWh/a Kosteneinsparung: 175 T€/a Amortisation: 5 a Primärenergie: -3 % CO <sub>2</sub> -Emission: -2 %
		
<b>Nutzerverhalten</b>	Energieeinsparungen mittels verschiedener Maßnahmenarten: Partizipation/Interaktion mit den Nutzern; Information (Kampagnen) und Feedback (z.B. über den Energieverbrauch)	Investitionskosten: 120 T€ Kosteneinsparung: 900 T€/a Primärenergie: -8 % CO <sub>2</sub> -Emission: -7 %
		
<b>Mobilität</b>	Einführung eines Mobilitätsmanagements mittels systemisch integrierter Maßnahmen zur Reduzierung, Bündelung oder Verlagerung von Verkehrsaufkommen.	Investitionskosten: 267 T€/a Kosteneinsparung: 655 T€/a Primärenergie: -25 %
		

Mit dem Start des Folgeprojekts „EnEff Campus 2020“ im September 2015 ging die TU Braunschweig in die Umsetzungsphase des Masterplans 2020. In enger Abstimmung zwischen der Hochschulleitung, der Landesebene, den beteiligten Fachinstituten und dem lokalen Energieversorger wurde in den folgenden drei Jahren ein für die deutsche Hochschullandschaft zukunftsweisendes Maßnahmenpaket zur energetischen Optimierung des Campus als Stadtquartier vorbereitet und schrittweise umgesetzt:



### Umsetzung von Baumaßnahmen zur energetischen Optimierung

- Bereits umgesetzte Maßnahmen (2010 bis 2014): 28 Mio. €
- Neubauvorhaben: 146 Mio. €
- Einzelmaßnahmen 60 Mio. €



### Betriebsmonitoring und -optimierung

- Einfaches Monitoring: 200 Gebäude
- Detailliertes Monitoring: 10 Gebäude



### Solarisierung des Campusareals

- Installation von 1 MW<sub>p</sub> PV-Anlagen



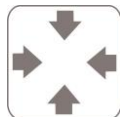
### BHKWs

- Dezentrale Versorgung mit mehr als 650 kW<sub>th</sub> KWK
- Ergänzung der Kraftwerkskapazitäten des lokalen EVUs
- Einbindung der Netz-Infrastruktur angrenzender Stadtquartiere



### Energiekostenbudgetierung

- Dezentrale Energiekostenrechnung in der Hochschulverwaltung mit direkter Energiekostenverantwortung für alle Institute



### Flächeneffizienz

- Städtebauliche Nachverdichtung
- Zentralisierung mit Schwerpunkt Hauptcampus



### Nutzerverhalten

- Kommunikationstrainings zur Nutzermotivation
- Ausbildung von 160 Energie-Coaches

## b) Bereits erhältliche Ergebnisse

- Berichte für den Fördergeber und die Begleitforschung zu EnEff:Stadt.
- Broschüre: EnEff Campus: *blue*MAP TU Braunschweig. (Inhalt: Projektübersicht, Ziele, Forschungsteam, Schwerpunktthemen, Ergebnisse, Ausblick)
- Abschlussbericht EnEff Campus:*blue*MAP TU Braunschweig [16]
- Abschlussbericht EnEff Campus 2020 [17]
- Diverse Veröffentlichungen [18] bis [26].

### **2.3.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Die Teilstrategie „Nutzerverhalten“ bestand ursprünglich aus den beiden Arbeitspaketen „Ausbildung der Energienutzungs Koordinator/innen“ und „Nutzerworkshops.“ Beide Arbeitspakete zeigen, dass die Motivierende Gesprächsführung als Kommunikationsansatz genutzt werden kann, um die Bereitschaft der Nutzer/innen, mehr Energie an der Universität zu sparen, zu steigern. In den Kommunikationsschulungen konnte gezeigt werden, dass bereits kurze Interventionen Change Agenten dabei helfen, weniger autonomieeinschränkend und stattdessen motivierender mit Nutzer/innen über Energieeinsparverhalten zu sprechen. Des Weiteren führen Nutzerworkshops, nicht aber Informationsveranstaltungen, dazu, dass die Teilnehmenden den Wert des Energiesparens stärker internalisieren und nach einem Monat mehr Energiesparverhalten an der TU Braunschweig zeigen. Konkret konnten Workshops die Nutzung der Fernwärme um 11,36 % und den Stromverbrauch um 7,45 % einer Abteilung reduzieren. Um das Workshopkonzept frei verfügbar zu machen, wurde dies online bereitgestellt. Trotz dieser positiven Effekte und dem Umstand, dass die Maßnahmen vom Präsidium der TU offen unterstützt, auf Veranstaltungen für Energiekoordinatoren vorgestellt und im Newsletter der TU Braunschweig beworben wurden, war die Nachfrage nach den Angeboten recht gering. Selbst die Reduzierung der Dauer und des Umfangs von Trainings und Workshops führte zu keinem Anstieg in der Nachfrage. Das mangelnde Interesse liegt wahrscheinlich auch daran, dass die Maßnahmen mit den „regulären“ Arbeitsaufgaben konkurrieren. Daher wurde in Kooperation mit dem Gebäudemanagement und dem Institut für Gebäude- und Solartechnik ein neues Arbeitspaket, die CO<sub>2</sub>-Challenge, initiiert, die dazu beitragen sollte, eine soziale Norm für das Energiesparen zu entwickeln. Hier treten alle Gebäude der TU Braunschweig gegeneinander an, um im zweimonatigem Rhythmus zu bestimmen, welches Gebäude am meisten Strom und Wärme einsparen konnte. Um diese Werte greifbarer dazustellen wurden die entsprechenden Zahlen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgewandelt und es wurde für jedes Gebäude ein Steckbrief erstellt, aus dem hervorging, was die Einsparungen konkret bedeuten, bspw. was der Wert in gefahrenen PKW-Kilometern bedeuten würden und ob das Gebäude im Vergleich zu den anderen Gebäuden der TU mehr oder weniger CO<sub>2</sub> produzierte. Diese Steckbriefe wurden an die Energienutzungs Koordinator/innen und Sekretariate verschickt mit der Bitte, diese an die Mitarbeitenden weiterzuleiten. Durch die Rückmeldung und den Vergleich mit den anderen TU-Einrichtungen sollte der Wettbewerbscharakter der Challenge betont werden und zu einer intrinsischen Motivation der Mitarbeitenden führen, auf ihren Energieverbrauch zu achten. Die intrinsische Motivation wurde aber auch durch extrinsische Anreize ergänzt, da die Siegergebäude eine Prämie von 2.000 € erhielten und die kreativsten Einsparideen mit Sachpreisen ausgezeichnet werden.

Neben diesen drei Arbeitspaketen bestand ein viertes Teilprojekt in der Untersuchung, ob eher das energiebewusste Verhalten der Mitarbeitenden oder die Investition in effiziente Geräte zu messbaren Einsparungen führen. Aufgrund der geringen Teilnahme an dieser Untersuchung können zu dieser Fragestellung bisher noch keine abschließenden Aussagen getroffen werden.

### **2.3.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Alle Arbeitspakete wurden von Beginn an in die Lehre integriert. Die dabei entstandenen Entwürfe, Seminar- sowie Bachelor- und Masterarbeiten wurden in direktem Bezug zum Forschungsprojekt gestellt.

Auf Seiten des Instituts für Gebäude- und Solartechnik wurden bei einer Vielzahl von Arbeiten Photovoltaik-Dachflächen- und Thermographieanalysen durchgeführt. Für die verschiedenen Standorte der Universität erfolgten Analysen der Freiflächenentwässerung. Zudem wurden für ausgewählte Gebäude ganzheitliche Energiekonzepte unter den Aspekten Sanierung vs. Abriss und Neubau entwickelt.

Am Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik (ISE) beschäftigten sich Studierende im Rahmen von Entwürfen, Seminaren und Stegreifen beispielsweise mit den Themen des Guerilla Parkings, dem Campus als Stadtraum und dem Campusleben der Zukunft. Das Institut für Psychologie, welches sich im Rahmen des Projektes mit dem Schwerpunktthema Nutzerverhalten beschäftigt, betreute eine Vielzahl von Arbeiten zum Motivational Interviewing, d. h. der Motivierenden Gesprächsführung. Zudem wurde das Thema Energieeffizienz in mehrere Lehrveranstaltungen integriert, um mit Studierenden im Rahmen ihrer fachlichen bzw. überfachlichen Vertiefung und Profilbildung psychologische Maßnahmen zu Energieeinsparungen zu entwickeln und eine Sensibilisierung gegenüber diesem Thema zu erzielen.

Arbeiten von Studierenden am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia) untersuchten beispielsweise Konzepte zur Energieversorgung des Campus und entwickelten ein Gleichstromsystem zur effizienten Integration erneuerbarer Energiequellen.

Am Institut für Transportation Design (ITD) der Hochschule für Bildende Künste wurden u. a. das Mobilitätsverhalten von Studierenden an der TU Braunschweig sowie Ansätze zur Förderung des Einsatzes von Fahrrädern am Beispiel der Stadt und der TU Braunschweig untersucht.)

### **2.3.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Hier haben wir keine negativen Erfahrungen gemacht, die Bearbeitung im Team und mit den externen Partnern lief sehr gut.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Verkehr und Mobilität“ seitens des Instituts für Transportation Design (ITD) war im Herbst des Jahres 2012 eine Online-Umfrage geplant. In der Umfrage sollten von allen Mitarbeitern und Studierenden der TU Braunschweig das Mobilitätsverhalten abgefragt werden. Ziel war es, Optimierungspotenziale im Bereich Mobilität in und um die TU Braunschweig zu entdecken. Mit Hilfe dieses Basiswissens können Optimierungspotenziale für innovative energieeffiziente Mobilitätskonzepte in und um die TU Braunschweig entdeckt werden. Für Mitarbeiter und Studierende bedeutet dies beispielsweise Verbesserungen für Ihren Arbeitsweg durch intelligente Konzepte für den ÖPNV oder für fahrrad- und fußgängerfreundlichen Verkehr.



Im Zuge der Bearbeitung gab es erhebliche Zeitverzögerungen in der Vorbereitung für die Online-Umfrage und somit auch für die Beschaffung der daraus resultierenden erforderlichen Daten, die wichtiger Bestandteil zur Bearbeitung des Arbeitspakets sind. Gründe hierfür waren unter anderem eine schwergängige Kommunikation mit dem Datenschutzbeauftragte (DSB) der TU BS und dem Gesamtpersonalrat, ein allgemeines Unverständnis gegenüber dem Projekt und der Notwendigkeit der Umfrage, die Kombination der Inhalte der Online-Umfrage, die den personenbezogenen Datenschutz hätten gefährden können, sowie Unklarheiten bei der Rechtsgrundlage für den Vertrag zur Auftragsdatenverarbeitung, die nach niedersächsischem Datenschutzgesetz (NDSG) oder nach Bundesdatenschutzgesetz BDSG bestanden.

In der letzten Sitzung mit dem Datenschutzbeauftragten (DSB) der HBK, dem DSB der TU, zwei Vertretern des Gesamtpersonalrates, dem IGS und dem ITD am 05.06.2013 stellte sich letztendlich heraus, dass der eigentliche kritische Punkt die Datenübermittlung der Gesamtdaten seitens der TU-Mitarbeiter zur statistischen Hochrechnung sei und dass die freiwillige Umfrage eher unproblematisch gesehen wird. In diesem Zusammenhang wurde sofort eine Trennung von TU-Daten und Umfrage-Daten gefordert. Die Anforderung der personenbezogenen Daten der TU BS ist mit allen notwendigen Unterlagen über den Dienstweg der TU Braunschweig gelaufen. Eine Genehmigung und der Beginn der Umfragen haben im September 2013 stattgefunden.

### **c) Energetische Benchmarks**

Werte Jahr 2018:

- Endenergieverbrauch Wärme: 88 kWh/m<sup>2</sup>a
- Endenergieverbrauch Strom: 64 kWh/m<sup>2</sup>a
- Primärenergieverbrauch Wärme: 47 kWh/m<sup>2</sup>a
- Primärenergieverbrauch Strom: 166 kWh/m<sup>2</sup>a
- CO<sub>2</sub>-Emissionen: 54 kg/m<sup>2</sup>a
- CO<sub>2</sub>-Emissionen: 1.081 kg/(Student\*a)
- CO<sub>2</sub>-Emissionen: 3.329 kg/(Mitarbeiter\*a)

### **d) Erfahrungen mit Technologien**

*BHKW*

Zusammen mit BS|Energy und dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig erfolgte auf Basis der Verbrauchsprofile eine detaillierte Dimensionierung (thermische Leistung, Volllaststunden, Anforderungen an die hydraulische und elektrische Einbindung) zweier BHKW-Aggregate (Campus Nord und Ost). Eine simulatorische Untersuchung zur Erweiterung des BHKWs am Campus Nord um eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung wurde aus wirtschaftlicher Sicht (hohe Investitionskosten) als nicht tragbar bewertet. Zur Beschaffung des Brennstoffes in Form von „grünem“ Import-Biomethan aus dem Ausland wurde eine externe Studie in Auftrag gegeben. Aufgrund der großen Unsicherheit bezogen auf die Preise für Emissionszertifikate stellte sich dies als problematisch heraus. Eine abschließend durchgeführte szenariobasierte Sensitivitätsanalyse zur

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergab für das realistische Szenario einen Amortisationszeitraum von 15 Jahren. Die geforderte Amortisationszeit von 8 Jahren seitens der TU Braunschweig konnte nicht erreicht werden, weshalb final keine praktische Umsetzung der BHKWs erfolgte.

#### *PV*

In den Jahren 2018-19 werden 9 Photovoltaik-Anlagen auf den energetisch sanierten Dachflächen von 5 Bestandsgebäuden und 4 Neubauten, den Carolo-Wilhelmina-Forschungszentren NFF, BRICS, PVZ und LENA, mit einer Fläche von 4.169 m<sup>2</sup> und einer Gesamtleistung von 758 kWp installiert. Die geschätzten Gesamtinvestitionskosten von ca. 1,32 Mio. Euro werden zu 50 % seitens des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Förderprogramms „Energieeinsparung und Energieeffizienz bei öffentlichen Trägern sowie Kultureinrichtungen“ gefördert. Die Ko-Finanzierung der anderen 50 % wird seitens des MWK (Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft u. Kultur) übernommen. Aufgrund der hohen Stromgrundlast der ausgewählten Gebäude sowie der in direkter Nähe befindlichen Universitätsliegenschaften wird der erzeugte Strom vollständig in das universitätsinterne Netz eingespeist und genutzt. Die Photovoltaik-Anlagen haben eine Amortisationszeit von ca. 10 Jahren und werden zusammen eine jährliche Einsparung an Strom von 731 MWh/a und damit eine Einsparung von 134.000 Euro und 412 t/a CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielen.

Die Auswahl der Dächer erfolgte auf Grund detaillierter Untersuchungen im Vorfeld. Neben der Prüfung des Denkmalschutzes und der Tragfähigkeit wurden die Dachflächen auf mögliche Verschattungen durch umliegende Bäume oder Gebäude untersucht. Auch müssen viele Dächer der TU Braunschweig in den nächsten 10 Jahren saniert werden, für die kein ausreichendes Budget vorhanden ist.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

##### *MS Excel Berechnungsmodelle*

In der Phase I des Forschungsprojekts wurde am IGS auf Gebäudeebene eine Vielzahl an Berechnungsmodellen auf Basis von MS Excel entwickelt. Aufgrund der großen Gebäudeanzahl sowie der Komplexität der Berechnungs- und Ausgabeparameter ist die Bearbeitungsdauer mit den einzelnen Berechnungswerkzeugen sehr zeitintensiv, auch fällt ein erhöhtes Fehlerpotenzial an. Um dieses zu vermeiden wurden die Tools zu einer Berechnungsdatei im MS Excel-Format zusammengefasst. Das mittelfristige Ziel ist die Anwendbarkeit der Berechnungswerkzeuge auf andere Bestandsquartiere.

##### *Energetische Gebäudebewertung*

Für das Forschungsprojekt EnEff Campus wurde das Berechnungsprogramm ‚Solar-Computer‘ zur Abbildung des Gebäudebestands und der Berechnung von Sanierungsmaßnahmen nach DIN V 18599 für am besten geeignet befunden. Die Software konnte sowohl hinsichtlich Anwendbarkeit als auch bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse überzeugen. Darüber hinaus wurden eigene Berechnungsprogramme und -methoden auf Basis von MS Excel entwickelt und angewendet.

In einer projektbegleitenden Recherche und Zusammenstellung von Programmen zur Berechnung, Modellierung und Planung von Quartieren sollten die Anwendbarkeit und der Nutzen für das vorliegende Forschungsprojekt überprüft werden. Ein Hauptaugenmerk lag darin bei den Planungsinstrumenten, die durch das Forschungs- und Förderprogramm EnEff:Stadt entwickelt wurden und werden. Untersucht werden sollte dabei unter anderem die Handhabbarkeit der Programme und die Anwendung speziell für universitäre Gebäude wie Laborgebäuden, Forschungseinrichtungen, Hörsälen oder Bibliotheken und welche Berechnungs- und Umsetzungsmöglichkeiten die Programme bieten.

Eine Anwendung war zum Zeitpunkt der Recherchen lediglich für das Programm „Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere (Quartiers ECA)“, welches Ende 2012 vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik zur freien Nutzung herausgegeben wurde, möglich. Bei diesem Tool ist eine vereinfachte Modellierung eines Stadtquartiers mithilfe von vorgefertigten Gebäudenutzungstypen und Energieversorgungsvarianten möglich. Als Ergebnis werden Jahres-Energiebedarfswerte für die entsprechenden betrachteten Quartiersvarianten ausgegeben, die miteinander verglichen werden können. Für die detaillierten Berechnungen und Konzeptentwicklungen zum Erreichen der Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes, wie z. B. die Betriebsoptimierung von RLT-Anlagen oder detaillierte Planung und Auslegungen von BHKW und PV-Anlagen, ist dieses Programm jedoch nicht anwendbar, da hier vereinfachte Berechnungen von Gebäudeenergiebedarfswerten auf Grundlage der aktuell gültigen EnEV vorgenommen werden.

Weitere betrachtete Programme für die Quartiersplanung befanden sich zum Zeitpunkt der Recherche noch in der Entwicklungsphase und waren nicht anwendbar.

#### *Energieversorgung*

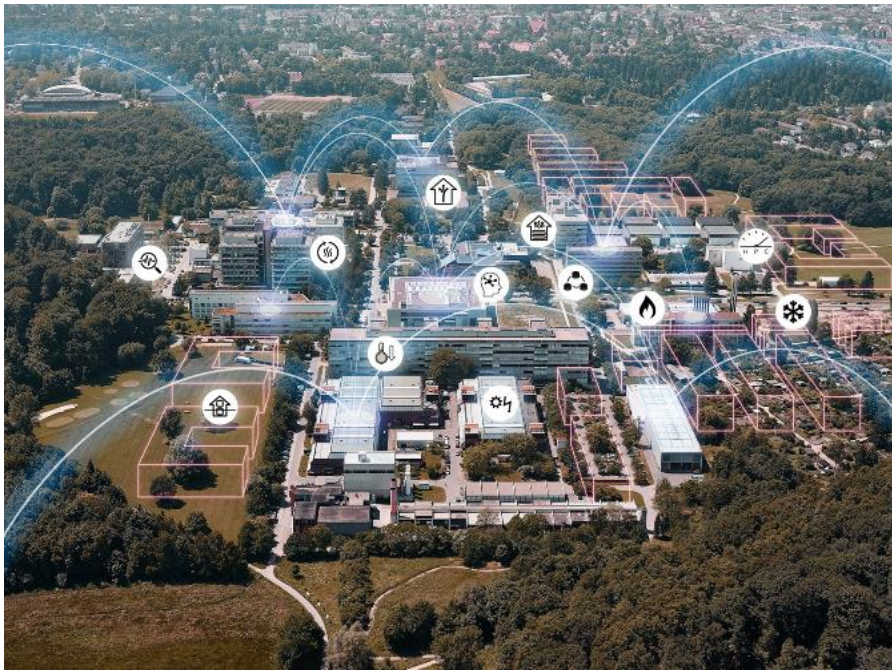
Zur Bewertung und Analyse der Energieversorgung kamen verschiedene, eigens in MS Excel erstellte Simulationsmodelle z. B. für die Dimensionierung und Bewertung von Blockheizkraftwerken oder der Auslegung einer Ladesäuleninfrastruktur für den Ausbau der E-Mobilität zum Einsatz. Für die Photovoltaik-Dachflächenanalyse des Campus der TU Braunschweig wurden die Programme „SunArea“ (Solarpotenzial-Kataster) sowie „PV-Sol“ verwendet.

## 2.4 Campus Lichtwiese Darmstadt

Autorenteam:

Johannes Oltmanns, M. Sc., Dr. Frank Dammel, Christopher Ripp, M. Sc., Mario Beykirch, M. Sc., Carl Schweinsberg, M. Sc., Dipl.-Ing. M. Sc. David Sauerwein, Niall Fitzgerald, M. Sc., Prof. Christoph Kuhn, Prof. Dr. rer. nat. Florian Steinke, Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson (TU Darmstadt)

### 2.4.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	EnEff:Stadt Campus Lichtwiese		
<b>Projektbild</b>	 <p>Der vernetzte Campus Lichtwiese. © TU Darmstadt.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	TU Darmstadt Karolinenplatz 5 64289 Darmstadt		
<b>Projektbeteiligte</b>	Technische Universität Darmstadt mit		
	Kanzler der TU Darmstadt	Forschungsgruppe Entwerfen und Nachhaltiges Bauen (FG ENB)	Forschungsgruppe Energy Information Network and Systems (FG EINS)
	Forschungsgruppe Technische Thermodynamik (FG TTD)	Forschungsgruppe Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien (FG E5)	Dezernat V – Baumanagement und Technischer Betrieb inkl. Energiemanagement und Büro für Nachhaltigkeit

<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	<p>6 Institutsgebäude (Seminarräume, Büros, Versuchslabore)</p> <p>12 Versuchshallen</p> <p>5 Laborgebäude</p> <p>1 Hörsaal- und Medienzentrum (Bibliothek)</p> <p>1 Mensa</p> <p>1 Hörsaalgebäude</p> <p>1 Hochleistungsrechner</p> <p>In Summe: 27 Gebäude</p>
<b>Neubauten im Projekt</b>	keine
<b>Baujahr der Gebäude</b>	Die Gebäude sind hauptsächlich in 3 Baualtersklassen einordbar: 1967-1969, 1983–1986, ab 2000 bis heute
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	<p>Der Gebäudebestand ist überwiegend unsaniert. Bei den mehrheitlich vorherrschenden Großbauten der 1960er und 1970er Jahre bedingt die monolithische Betonbauweise der opaken Fassadenflächen eine sehr geringe energetische Qualität der Gebäudehüllen. Die Fenster sind überwiegend als Einfachverglasung mit thermisch ungetrennten Rahmenprofilen bis heute vorhanden. Vielerorts führen offensichtliche Undichtheiten in der Fassade zu sehr hohen Infiltrationsraten. In einigen Gebäuden entstehen auf Grund durchstoßender Betonbauteile im Bereich der thermischen Hülle hohe konstruktive Wärmebrücken.</p> <p>Der technische Ausbau der Gebäude der ersten Bauphase entspricht weitestgehend dem Urzustand. Die Belüftung der Räume geschieht grundsätzlich über Fensterlüftung. Eine mechanische Be- und Entlüftung ist nur für innenliegende Bereiche vorgesehen. Die Lüftungsanlagen wurden typischerweise als Einzelanlagen ohne Wärmerückgewinnung und mit konstanten Volumenströmen konzipiert. Die Gebäude werden über Fernwärme mit Wärme versorgt. Teilweise sind in den Fernwärmeübergabestationen Wärmeübertrager vorhanden, teilweise werden die Radiatoren direkt mit dem Fernwärmemassenstrom durchströmt. Die Beleuchtungsanlagen wurden zwischenzeitlich in Teilbereichen der Gebäude saniert. Größtenteils ist jedoch auch hier der Urzustand mit stabförmigen Leuchtstofflampen und konventionellen Vorschaltgeräten in Betrieb. Eine Raumkühlung ist nur in Ausnahmefällen, z. B. in Laborgebäuden, realisiert.</p>
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	Die Energieversorgung erfolgt über eine Energiezentrale auf dem Campus: ein Heizkraftwerk, bestehend aus drei Blockheizkraftwerken (BHKW) mit jeweils 1,95 MW elektrischer und 2,0 MW thermischer Leistung sowie sechs Erdgasheizkesseln mit einer thermischen Gesamtleistung von 55,8 MW zur Abdeckung von Spitzenlasten. In etwa ein Drittel des Stroms wird als Zukaufstrom aus dem Netz des vorgelagerten Netzbetreibers bezogen. Die Wärmeversorgung des Campus Lichtwiese erfolgt über ein eigenes Fernwärmenetz (mittlere Vorlauftemperatur 88 °C, mittlere Rücklauftemperatur 58 °C). Die Kälteversorgung erfolgt über ein Kältenetz, das mit BHKW-gespeisten Absorptionskältemaschinen betrieben wird. Zur Versorgung von Spitzenlasten stehen zusätzliche Kompressionskältemaschinen zur Verfügung.
<b>Projektlaufzeit</b>	<p>Phase I: 01/2016 – 12/2018</p> <p>Phase II: 01/2019 – 12/2022</p>

<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betrieboptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung
	XX			X	XX	X		
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung				
	X	XX	X	X				
<b>Projekthalt</b>	<p>Basierend auf einem umfassenden Monitoring wird ein virtuelles Gesamtmodell („Digitaler Zwilling“) des Campusenergiesystems erstellt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung einer Strategie zur Reduzierung der Temperaturen im Fernwärmenetz, um Verluste zu verringern und die Einbindung von regenerativen Energien und Abwärme zu erleichtern. Beispielhaft soll die Abwärmenutzung des neuen Hochleistungsrechners umgesetzt werden. In einem zweiten Pilotprojekt wird untersucht, wie in der Praxis eine Absenkung der Versorgungstemperatur im Gebäudebestand ermöglicht werden kann. Dies wird am Beispiel des Institutsgebäudes der Architektur untersucht, eines der ältesten Gebäude des Campus Lichtwiese. Die Absenkung der Temperaturen in den Gebäuden ist eine Voraussetzung für die Temperaturabsenkung im Netz. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung eines Energiekonzeptes „post 2030“ zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % gegenüber dem Referenzwert 1990 bis zum Jahr 2050.</p>							
<b>Projektmittel</b>	<p>Insgesamt (Projektphasen I und II): 5,420 Mio. € Fördermittel davon für Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 2,726 Mio. €</p>							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	<p>Im Rahmen des beantragten Forschungsprojekts werden folgende gebäudebezogene Maßnahmen durchgeführt: hydraulischer Abgleich für das bestehende Heizsystem, Einbau neuer Heizkörperventile mit eingebauten Differenzdruckreglern in bestehenden Radiatoren, Installation von Niedertemperatur-Flächenheizsystemen (Heizsegel und eingeputzte Heizmäander), drehzahlgeregelte Umwälzpumpen, Abdichtungsmaßnahmen an Fenstern zur Verbesserung der Luftdichtheit, MSR-Technik, LED-Beleuchtung.</p>							
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	<p>Die Energieversorgung am Campus wurde innerhalb der Laufzeit der ersten Projektphase um einen Kältering erweitert, der mit Absorptions- oder Kompressionskältemaschinen versorgt werden kann. Im Heizkraftwerk am Standort wurden die drei vorhandenen BHKW vollständig überholt und um ein viertes BHKW mit einer Leistung von 3.25 MW<sub>el</sub>/3 MW<sub>th</sub> erweitert.</p> <p>In Phase II ist die Installation von Messgeräten zur Erfassung der thermischen und elektrischen Energieflüsse auf Niederspannungsebene sowie die Installation von stationären Netzanalysatoren zur Messung der Power Quality auf der elektrischen Mittelspannungsebene des Campus Lichtwiese vorgesehen. Die durch das Monitoring gesammelten Daten dienen der Entwicklung des Digitalen Zwillings und des Power Quality Managements des Campus Energiesystems.</p>							

	Darauf basierend soll mittels mathematischer Systemmodelle ein ganzheitliches optimiertes Energiekonzept des Campus post 2030 entwickelt werden. Dies soll vor allem zeigen, wie die selbstgesteckten CO <sub>2</sub> -Reduktionsziele des Campus realisiert werden können.					
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	150.000 m <sup>2</sup>		150.000 m <sup>2</sup>			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt</b> (gemessen im Jahr 2018)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten <sup>*3</sup>
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	23.000	150	6.900 <sup>*1</sup>	45	k. A.
	Kälte	8.000	*4	6.080 <sup>*1</sup>	k. A.	k. A.
	Strom	31.000	206	55.800 <sup>*2</sup>	371	k. A.
	Summe	62.000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b>		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	Das Projekt befindet sich noch am Anfang, Verbrauch und Kosten nach Projektende können daher noch nicht abgeschätzt werden.				
	Kälte					
	Strom					
	Summe					
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MATLAB Simulink &amp; CARNOT-Toolbox zur Modellierung der Erzeugungsanlagen (Strom, Wärme, Kälte) und der thermischen Netze</li> <li>- IDA ICE zur thermischen Simulation der Gebäude</li> <li>- DigSILENT PowerFactory zur Simulation des elektrischen Netzes</li> <li>- MATLAB, Python zur Datenanalyse und Simulation</li> <li>- GAMS als Optimierungsframework</li> <li>- MS Office-Anwendungen zur Unterstützung der Analysen von Verbesserungspotentialen</li> </ul>					
	<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konzept zur Einbindung von Hochleistungsrechnerabwärme in die Fernwärmeversorgung am Campus [30]</li> <li>- Potentialanalyse und Konzept für die Umsetzung der Temperaturabsenkung im Fernwärmenetz</li> <li>- Sanierungsszenarien im Gebäudebestand</li> <li>- Optimierung von Temperaturabsenkszenarien im Heizbetrieb</li> <li>- Ermittlung des Potentials eines Einsatzes von: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektromobilität im Campusnetz</li> <li>- elektrischen Speichern im Campusnetz</li> <li>- Photovoltaik-Anlagen im Campusnetz</li> <li>- Wärmepumpen im Campusnetz</li> <li>- LED-Beleuchtungsanlagen im Gebäudebestand</li> </ul> </li> </ul> <p>Die Informationen können bei den Ansprechpartnern der FG und bei Projektkoordination abgefragt werden. Informationen unter <a href="http://www.tu-darmstadt.de/eneff">www.tu-darmstadt.de/eneff</a></p>				

\*1 Der hier nachgewiesene Primärenergieverbrauch wurde ausschließlich für diese Publikation und für eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Projekten angegeben. Die angesetzten Primärenergiefaktoren von 0,3 (Wärme) und 0,76 (Kälte) wurden für das Wärme- und Kältenetz der TU Darmstadt nach AGFW FW 309-1 bzw. FW 311 gutachterlich nachgewiesen. Die Berechnungssystematik

entspricht der Stromgutschriftmethode, bei der der Wärme durch den selbsterzeugten Strom der BHKWs eine virtuelle Gutschrift für den dadurch nicht benötigten Fremdstrom angerechnet wird. Hierdurch werden insbesondere bei KWK-Prozessen sehr geringe Primärenergiefaktoren erreicht. Diese Vorgehensweise verschiebt die Systemgrenze der Betrachtung von der Quartiersebene auf die nationale Ebene (Stromnetz Deutschland). Da in diesem Projekt bewusst die Systemgrenze des Quartiers gewählt wurde, um Möglichkeiten der Energiewende auf Quartiersebene aufzuzeigen, werden im Rahmen der Projektarbeit CO<sub>2</sub>-Emissionen als geeignetere Bewertungsgröße angesehen, um die Klimaziele zu erreichen. Die Berechnung erfolgt nach der Exergiemethode (AGFW FW 309-6).

- \*2 Primärenergiefaktor von 1,8 für den deutschen Strommix gemäß EnEV.
- \*3 Die vom Contractor der TU Darmstadt in Rechnung gestellten Bruttoenergiepreise entsprechen einer Mischkalkulation aus dem eigentlichen Arbeits- und Leistungspreis für Energie und den Investitionskosten für den Betrieb und den Unterhalt des Kraftwerks. Aus diesem Grund ist die Berechnung betriebsbedingter Energiekosten nicht möglich.
- \*4 Da es sich beim Kältebedarf größtenteils um Prozesskälte handelt (hauptsächlich Kühlung von Laboren, Versuchsanlagen und Rechenzentrums Kühlung) ergibt die Angabe eines flächenspezifischen Kühlbedarfs keinen Sinn.

## 2.4.2 Projektbeschreibung

### 2.4.2.1 *Der Campus vor dem Projekt*

Der Campus Lichtwiese ist in besonderer Weise als Studienobjekt geeignet. In seiner vom übrigen Stadt-raum isolierten Lage kann er als unabhängige Einheit betrachtet und die vorhandenen Vernetzungen mit anderen Standorten sowie übergeordneten Energienetzen gut beschrieben werden. Die räumlich klare Abgrenzung des Campus erleichtert die bilanzielle Betrachtung dieser Einheit und die intensive Kopplung der einzelnen Systeme untereinander. Die eigentums- und planungsrechtliche Entität ist eine wesentliche Voraussetzung für eine engagierte und beschleunigte Transformation in der Energieversorgung.

Die Nutzungsmischung auf dem Campus umfasst nicht nur campustypische Funktionen wie Büros, Labore, Hörsäle und Bibliotheken, sondern auch produktionstechnische Versuchsanlagen. Die Nutzungsdiversität begünstigt eine Übertragung der erzielten Ergebnisse auch auf andere Quartiere.

Der Campus Lichtwiese ist versorgungstechnisch eigenständig an die TU-eigene Energiezentrale angebunden, die bis 2030 von einem Contractor (Energieversorger) betrieben wird. Die Versorgungsstraßen für Niederspannung, Mittelspannung, Fernwärme und -kälte sind und bleiben jedoch Eigentum der TU Darmstadt.



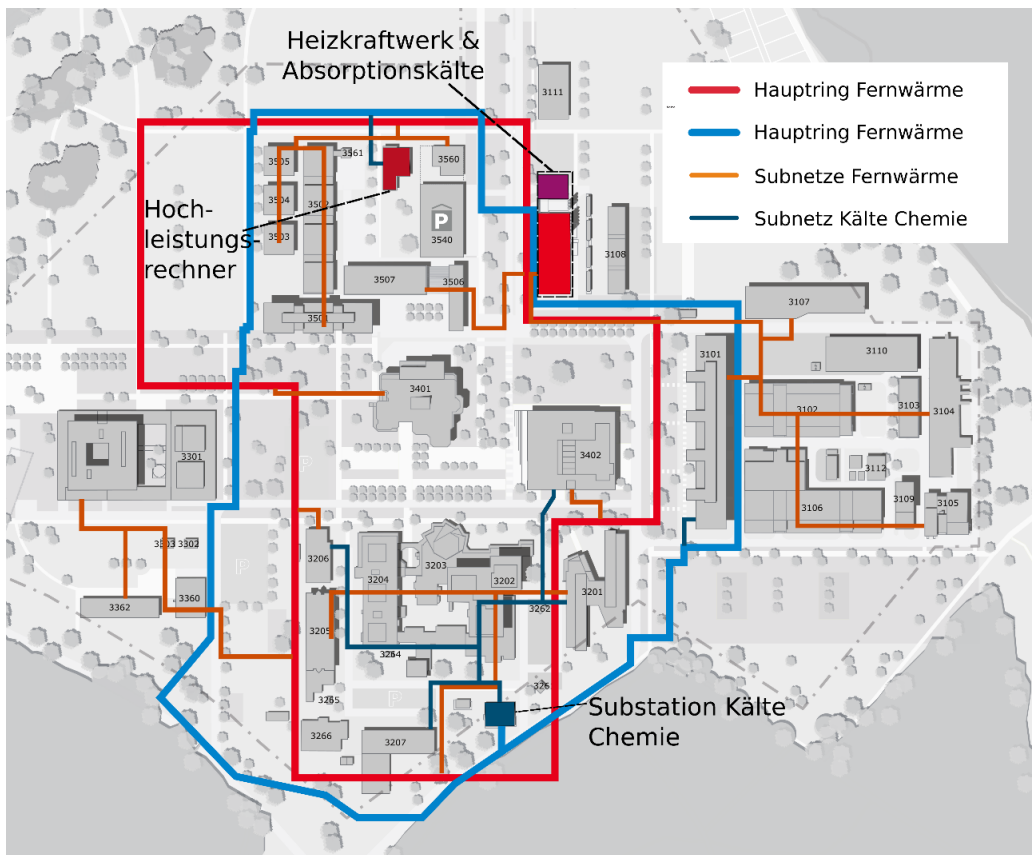


Bild 13: Fernwärme- und Kältenetze des Campus Lichtwiese der TU Darmstadt. © TU Darmstadt.

### 2.4.2.2 Die beteiligten Akteure

#### a) an den Prozessen der Universität

Als autonome Universität ist die TU Darmstadt eigenständig für ihre Gebäude und Bauprojekte verantwortlich, wodurch kurze Wege in der Kommunikation ermöglicht werden. Die Umsetzungsprojekte werden gemeinsam von Wissenschaft, Energiemanagement und Technischem Betrieb koordiniert, bei den anderen Teilprojekten stellt die Verwaltung die benötigten Pläne und Daten zur Verfügung und die Ergebnisse werden direkt in den Betrieb zurückgespielt, um die Planung der zukünftigen Weiterentwicklung der Infrastruktur der Universität zu unterstützen.




Die Erzeugungsanlagen sind Eigentum der TU Darmstadt. Der Betrieb wird im Rahmen eines Contractingvertrages als Dienstleistung bezogen. Im Rahmen des Projektes besteht deshalb enger Kontakt zwischen dem Dienstleister, der Verwaltung der Universität sowie den beteiligten Forschungsinstituten.

#### b) am Projekt

Das Projekt wird gemeinsam von Wissenschaft und Verwaltung in enger Verzahnung bearbeitet. Das interdisziplinäre Forscherteam setzt sich aus den Fachbereichen Archi-

tektur, Maschinenbau und Elektrotechnik und Informationstechnik und dem Energiemanagement zusammen. Tabelle 5 visualisiert die Zuständigkeiten innerhalb des Projekts:

Tabelle 5: Projektbeteiligte und Arbeitspakete im Projekt Campus Lichtwiese.

Projektbeteiligte/Arbeitspakete			ENB		Dez. V
<b>Bauliche Maßnahmen</b>					
AP 1.1: Abwärmenutzung HLR	-	Z,D	B	-	E,D
AP 1.2: Energieflexibilisierung Architektur	-	B	Z,D	-	E,D
<b>Digitaler Energiecampus</b>					
AP 2.1: Aufbau Monitoring	E,D	Z	Z	Z	D
AP 2.2: Betriebsalgorithmus	E,D	Z	B	B	I
AP 2.3: Live-Optimierung	E,D	Z	Z	-	I
AP 2.4: Auslegungsoptimierung	E,D	Z	B	-	-
AP 2.5: Lernende Komponentenmodelle	E,D	B	B	-	-
AP 2.6: Online Prognose	E,D	B	B	B	-
AP 2.7: CO2-Intensitäts- und Energiepreiszeitreihen	E,D	-	-	-	-
<b>Fernwärme der 4. Generation</b>					
AP 3.1: Netze	I	E,D	B	B	I
AP 3.2: Gebäude	I	B	E,D	B	I
<b>Elektrischer Energiecampus</b>					
AP 4.1: Bewertung Power Quality	I	I		E,D	I
AP 4.2: Spannungsabhängigkeit der elektrischen Last	I			E,D	B
AP 4.3: Analyse der hohen Grundlast	I	I	B	E,D	B
<b>Energiekonzept post 2030</b>					
AP 5.1: Nutzung von Erd- und Umweltwärme	B	E,D	-	B	I
AP 5.2: Einsatz solarer Fernwärme	B	E,D	-	B	I
AP 5.3: Reduktionsziele TU Darmstadt 2050	Z,D	E,D	Z,B	B	Z,B
AP 5.4: langfristige Investitionsplanung	E,D	Z,D	Z,D	B	I
AP 5.5: Energiekonzeptpapier post 2030	E,D	Z,D	Z,D	Z,D	Z

IBZED-Nomenklatur:

- I: Information: ist informativ eingebunden. Entscheidungsstelle informiert den Schnittstellenpartner über den Stand der Bearbeitung. Der Schnittstellenpartner hat ein Recht auf Information. Die Bringschuld liegt beim Entscheider.
- B: Beratung: hat das Recht zu beraten. Die Entscheidungsstelle hat die Pflicht, sich vor der Entscheidung beraten zu lassen. Es liegt allerdings in ihrem Ermessen zu entscheiden, inwieweit die Vorschläge in die Entscheidung/Umsetzung einfließen.

- Z: Zustimmung: hat das Recht, das Entscheidungsergebnis mitzubestimmen. Die Entscheidungsstelle ist verpflichtet, vor der endgültigen Entscheidung die Zustimmung des Schnittstellenpartners einzuholen.
- E: Entscheidung: Zuständigkeit und Verantwortung für die letztendliche Entscheidung. Das schließt die Pflicht zur Einleitung bzw. Verantwortung für die Vorbereitung der Entscheidungsunterlagen ein.
- D: Durchführung: verantwortlich für die Durchführung der von der Entscheidung betroffenen Prozesse.

### c) Organisationsstruktur

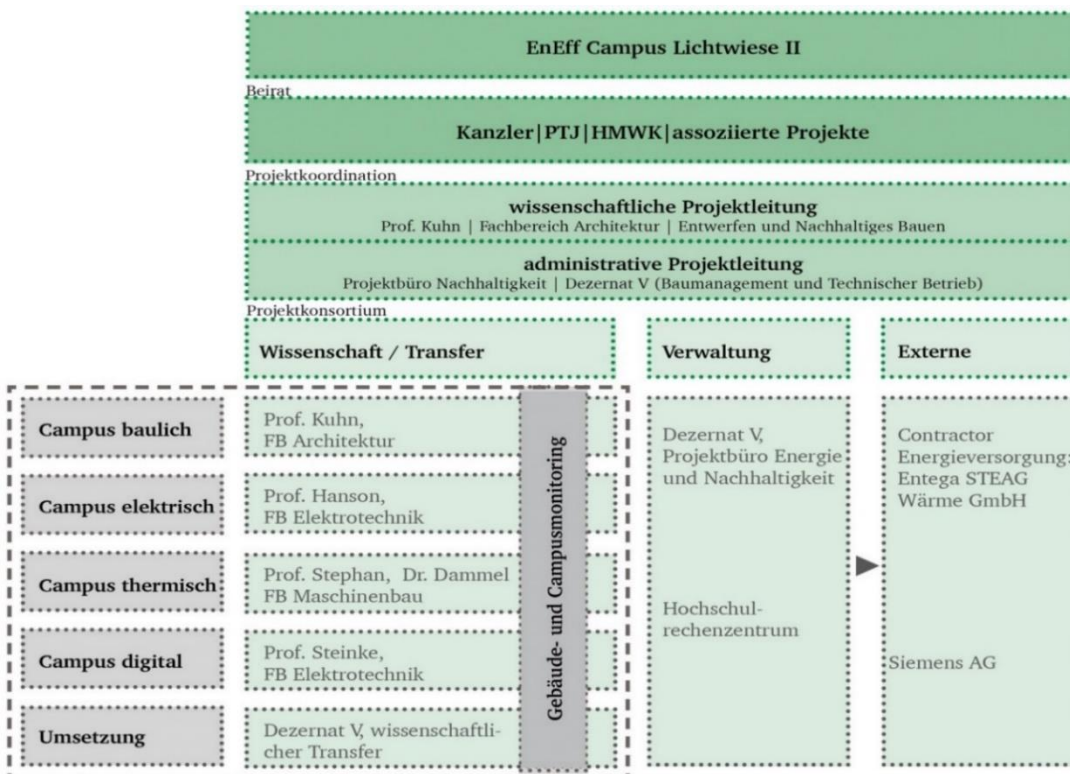


Bild 14: Beteiligte am Projekt EnEff:Stadt Campus Lichtwiese II. © TU Darmstadt.

### 2.4.2.3 Der Projektinhalt

#### a) Projektziele

Die Technische Universität Darmstadt hat sich in Anlehnung an die Klimaschutzziele der Bundesregierung ambitionierte Ziele gesteckt. Bis 2050 sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Basisjahr 1990 um 80 % sinken, siehe Bild 15. Ebenso sind Reduktionen für den Endenergiebedarf von Strom und Wärme anvisiert. Diese hohen Reduktionsbeiträge beider Zielgrößen werden durch effiziente Neubauten, Sanierung von Bestandsgebäuden und die Modernisierung des Kraftwerks erreicht. Zusätzlich wird es notwendig sein, die Energieversorgung Stück für Stück auf erneuerbare Energiequellen umzustellen, um die verbleibende Lücke zu den Emissionszielen zu schließen.

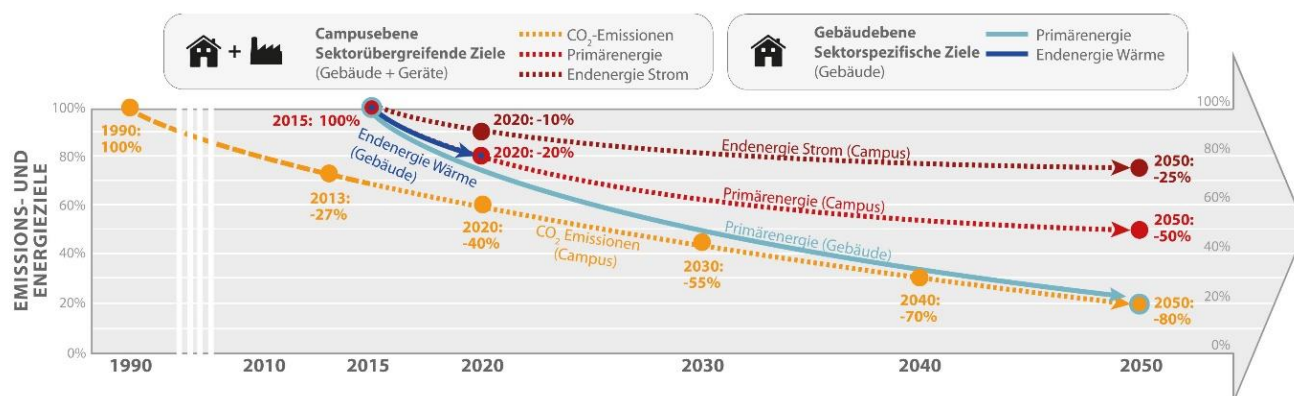


Bild 15: Energie- und Klimaschutzziele der TU Darmstadt bis 2050. © TU Darmstadt.

Das Projekt EnEff:Stadt Campus Lichtwiese soll einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der langfristigen Ziele der TU Darmstadt liefern. Der dabei verfolgte Ansatz konzentriert sich auf eine intelligente Vernetzung aller relevanten Bereiche: der Energieerzeugung (Strom, Wärme und Kälte) mit gekoppelter Erzeugung über KWK und Absorptionskälte, der Energiespeicherung zur Ausnutzung von Lastverschiebungspotentialen, der Energieverteilung in den entsprechenden Netzen und der Gebäude als netzdienliche Energieverbraucher. Mit Hilfe der intelligenten Vernetzung energierelevanter Anlagen sollen neue Maßstäbe für das Energiesystemmanagement gesetzt werden. Es soll eine Strategie mit Angabe konkreter Handlungsoptionen und deren Bewertung unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Emissions- und Energie-Reduktionsziele der TU Darmstadt bis 2050 entwickelt werden. Die vorgeschlagenen Maßnahmen sollen die Grundlage für das nächste universitätsweite Energiekonzept der TU Darmstadt bilden, auf dem die Ausschreibung des nächsten Contracting-Vertrags für den Zeitraum nach 2030 aufbauen wird.

### b) Projektarbeiten

In Phase I des Forschungsprojektes konnten wesentliche Potentiale zur Erhöhung der Energieeffizienz und Senkung des Energiebedarfs, hinsichtlich ihrer realen baulichen und energietechnischen Entwicklungen, evaluiert werden. Im Gebäudebereich sind dies hauptsächlich die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes, effizientere raumluftechnische Anlagen und die Modernisierung der Beleuchtung. Auf der Wärmeversorgungsseite zeigte die Absenkung der Temperaturen im Wärmenetz und die Abwärmenutzung des neuen Hochleistungsrechners das größte Potential. Weiterhin konnte ermittelt werden, welche zukünftigen Entwicklungen sich für die Aufgaben des elektrischen Netzes am Campus Lichtwiese ergeben werden und welche Auswirkungen diese auf den Netzbetrieb haben werden.

In Phase II soll mithilfe eines virtuellen Gesamtmodells des Campus, dem sogenannten „Digitalen Zwilling“, eine Simulationsumgebung geschaffen werden, die sowohl für das bestehende multi-modale Energiesystem für den Live-Betrieb Optimierungen vorschlagen soll und zusätzlich die Möglichkeit bietet, potentielle langfristige Investitionen in

das Energiesystem detailliert zu evaluieren. Die Basis dieser vollständigen digitalen Abbildung ist die Umsetzung eines Energiemonitorings, das umfangreiche, heterogene Sensorinformationen über Energieflüsse auf dem Campus sowie Wetterdaten erfasst. Nur mittels dieses Energiemonitorings kann eine ausreichende Datenbasis als (Live-)Input für den Digitalen Zwilling generiert werden. Darüber hinaus sollen mit der Vielzahl von Messdaten verschiedene Systemkomponenten, wie z. B. Wirkungsgrade der Kältemaschinen oder BHKW, mittels Machine Learning Methoden im realen Betrieb evaluiert werden.

Ein zweiter Schwerpunkt ist die Umsetzung baulicher Projekte. Hierbei handelt es sich zum einen um die Umsetzung der Abwärmenutzung des neuen Hochleistungsrechners der Universität. Andererseits ist zur Absenkung der Temperaturen in der Wärmeversorgung (Erzeugung und Fernwärmenetz) die gebäudeseitige Absenkung der Heizsystemtemperaturen die wichtigste Voraussetzung. Hierfür soll der Einsatz unterschiedlicher Flächenheizsysteme am Beispiel des Architekturfakultätsgebäudes erprobt werden.

Ein weiterer Projektschwerpunkt ist die Untersuchung der Power Quality im elektrischen Netz. Dabei soll sichergestellt werden, dass die Versorgungsqualität mit elektrischer Energie auch mit dem fortschreitenden Zubau von zukünftigen Betriebsmitteln (LED-Beleuchtung, Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen und andere wechselrichtergekoppelte Anlagen) weiterhin gewährleistet werden kann.

### **c) Projektmittel**

Insgesamt (Projektphasen I und II): 5.419.966 € bewilligte Fördersumme  
davon für Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 2.726.000 €

### **d) Projektstand**

*Teilprojekt 1 - Bauliche Maßnahmen*

#### Abwärmenutzung HLR

Im Rahmen der Anschaffung einer neuen Servergeneration für den Hochleistungsrechner der TU Darmstadt wird eine Rechnerkühlung mit Warmwasser umgesetzt, die es erlaubt, die Rechnerwärme bei Temperaturen von 40 - 45 °C abzuführen. Diese Wärme lässt sich mit Hilfe einer Wärmepumpe bei einem sehr guten Wirkungsgrad (COP) von bis zu 7 in den Rücklauf der Fernwärmeversorgung einspeisen. Ein entsprechendes Konzept wurde im Rahmen von EnEff:Stadt Campus Lichtwiese entwickelt und wird aktuell umgesetzt. Die Inbetriebnahme der neuen Rechnergeneration soll Anfang 2020 erfolgen.

#### Temperaturabsenkung/Energieflexibilisierung Architektur

Am Fachbereichsgebäude der Architektur soll der Betrieb von Niedertemperaturheizsystemen im Gebäudebestand untersucht werden. Das Ziel des Demonstrationsvorhabens ist es einerseits, die tatsächlich erreichbare Vorlauftemperaturabsenkung durch Integration von Flächenheizsystemen im Gebäudebestand unter Einhaltung von Komfortbedingungen zu quantifizieren. Gleichzeitig sollen auch im Teillastbetrieb möglichst tiefe Rücklauftemperaturen gewährleistet werden können. Andererseits sollen

unterschiedliche Regelungsstrategien zur Steigerung der Flexibilität des Wärmebezugs durch zyklisches Überheizen und Unterkühlen untersucht werden.

#### *Teilprojekt 2 - Digitaler Energiecampus*

Ziel dieses Teilprojekts ist es, einen Digitalen Zwilling des Energiesystems des Campus zu erstellen. Dabei orientiert sich die Vorgehensweise an Bild 14 und unterteilt sich in einen physikalischen und einen digitalen Teil. Auf physikalischer Seite wird ein Energiemonitoring installiert. Dafür werden alle Universitätsgebäude mit elektrischen und thermischen Energiemessgeräten ausgestattet. Diese sollen in sekundlicher Auflösung Daten zum Verbrauch sowie der Erzeugung einzelner Gebäude, ausgewählter Großverbraucher und Gebäudeteile erfassen.

Als Schnittstelle zwischen physikalischer und digitaler Seite wird eine Bibliothek aus Kommunikations-skripten erarbeitet. Diese fragen die Rohdaten der Messgeräte ab, formatieren und prüfen diese und berechnen bereits zweckdienliche Systemgrößen. Diese und die Rohdaten sollen so vollständig zentral auf einer Datenbank gespeichert werden.

Auf digitaler Seite wird diese Datenbankstruktur zur Aggregation und Speicherung der Energiedaten aufgebaut. Dabei wird eine zeitreihenbasierte Datenbankinfrastruktur verwendet. Dieses ermöglicht es effizient, die Daten einer großen Anzahl von Messgeräten in sekundlicher Auflösung zu speichern und die gleichzeitige Abfrage von großen Datenmengen zu realisieren. Um eine hohe Verfügbarkeit der Datenbankstruktur zu erzielen, sollen zwei physikalisch getrennte Server verwendet werden, um die Energiedaten redundant zu erfassen, wobei die Daten auf einem Server nur für eine Woche gesichert und dann überschrieben werden. So soll kostenminimal sichergestellt werden, dass bei einem Ausfall eines der Datenbankserver keine Datenverluste auftreten und mit einem Zeitraum von einer Woche ausreichend Zeit für eine Behebung der Störung vorliegt. Parallel wurde begonnen das mathematische Optimierungsmodell für den Betriebsalgorithmus des Energiesystems zu entwickeln, welcher die mathematische Basis des Digitalen Zwillings des Energiesystems bilden soll. Dieses Modell soll auf Grundlage der verfügbaren Monitoring-Daten kontinuierlich erweitert und die Güte der Systemparameter durch Einsatz von Machine Learning-Methoden verbessert werden.

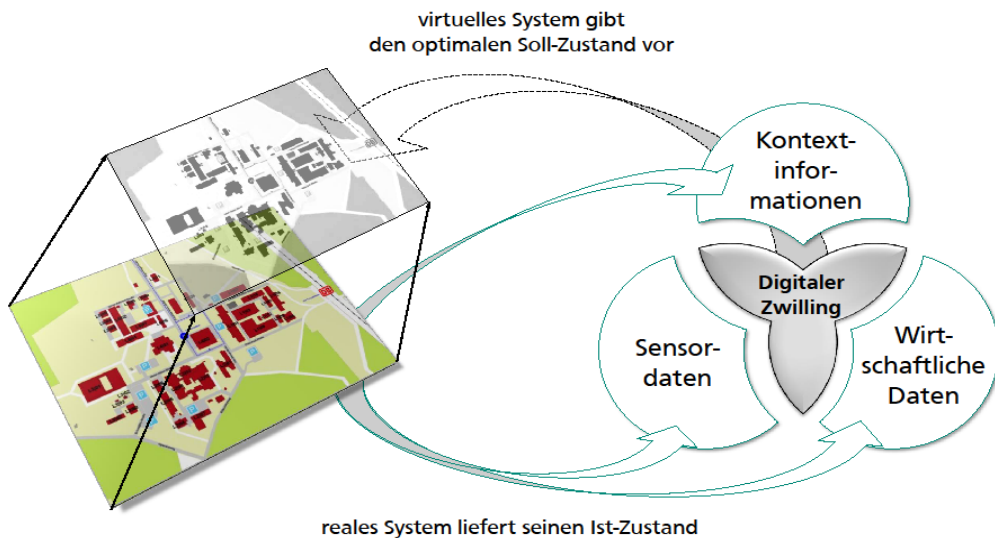


Bild 16: Der Digitale Zwilling als virtuelles Duplikat des realen Energiesystems des Campus Lichtwiese. © TU Darmstadt.

#### Teilprojekt 3 - Fernwärme der 4. Generation

Um Verluste in der Wärmeversorgung zu verringern und die Möglichkeit zur Nutzung alternativer Wärmequellen zu verbessern, müssen die Temperaturen im Fernwärmenetz verringert werden. Der Campus Lichtwiese dient als Beispielquartier dafür, wie niedrige Temperaturen nicht nur bei neuen Fernwärmenetzen, sondern auch in Bestandsnetzen erreicht werden können.

Ziel des Projekts ist es, bis 2030 den Campus Lichtwiese mit einer durchschnittlichen Fernwärmenetztemperatur von 55 °C Vorlauf- und 40 °C Rücklauf-temperatur versorgen zu können. Dies bedeutet eine Verringerung um 35 K (TVL) bzw. 15 K (TRL) gegenüber dem aktuellen Betrieb.

Fernwärmeparameter auf Netz- und Gebäudeseite bedingen sich gegenseitig, weshalb zur Entwicklung von Strategien zur Temperaturabsenkung immer beide Systeme gemeinsam betrachtet werden müssen. Vorlauftemperaturen können im Netz nur abgesenkt werden, wenn sichergestellt werden kann, dass die Komforttemperaturen in den Gebäuden auch mit niedrigeren Temperaturen bereitgestellt werden können. Die Rücklauf-temperatur des Netzes ergibt sich aus dem Mix der Rücklauf-temperaturen der Einzelgebäude.

#### Teilprojekt 4 - Elektrischer Energiecampus

Im Rahmen dieses Teilprojektes wird ein umfangreiches stationäres Power Quality Monitoring System auf Basis von zentral angebundenen Netzanalysatoren auf dem Campus Lichtwiese aufgebaut. Nach abgeschlossener Konzeptentwicklung und Umsetzung des Monitoring-Systems werden die während der Projektlaufzeit aufgenommenen Messdaten der Power Quality am Campus zur Entwicklung von Managementkonzepten für die Sicherstellung einer normgerechten Power Quality verwendet.

Darüber hinaus werden die Messdaten zur Untersuchung der Spannungsabhängigkeit der elektrischen Lasten des Campus Lichtwiese sowie zur Untersuchung der hohen Grundlast des Campusnetzes genutzt. Hieraus lassen sich zum einen Rückschlüsse auf mögliche Effizienzsteigerungs-Potentiale innerhalb des Campusnetzes ziehen, zum anderen kann die Kenntnis der Spannungsabhängigkeit der elektrischen Last zur verbesserten Ausnutzung des zulässigen Spannungsbandes genutzt werden.

#### *Teilprojekt 5 - Energiekonzept post 2030*

Arbeiten in diesem Arbeitspaket sind in der zweiten Hälfte des Projektzeitraums geplant.

#### **2.4.2.4 Die Projektergebnisse**

Die Projektergebnisse werden in den vorangegangenen Kapiteln behandelt. Weitere Informationen können bei den Ansprechpartnern der FG und bei der Projektkoordination abgefragt werden.

[www.tu-darmstadt.de/eneff](http://www.tu-darmstadt.de/eneff)

#### **2.4.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Mittels des umfassenden Energiemonitorings kann in einem Folgeprojekt die Nutzersensibilisierung anhand einer Visualisierung des eigenen Energieverbrauchs untersucht werden. Im aktuellen Projekt ist dies jedoch kein Bestandteil der Untersuchung.

#### **2.4.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Die Umsetzung des Projektes in der Lehre erfolgt durch die Betreuung thematisch passender Abschlussarbeiten (Bachelor/Master/Studienarbeit) und der Betreuung von studentischen Projekten wie dem Interdisziplinären Energieprojekt (IEP) des Masterstudiengangs Energy Science and Engineering an der TU Darmstadt.

#### **2.4.2.7 Lessons Learned**

##### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Trotz der erfolgreichen und engen Zusammenarbeit mit der Verwaltung ergeben sich immer wieder zeitlich aufwändige Abstimmungsprozesse. Die Kommunikations- und Abstimmungsprozesse sowie Verantwortlichkeiten wurden daher in einem für den internen Gebrauch bestimmten Organigramm präzisiert.

##### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Die kurzfristige Projektbewilligung führte zu einem verzögerten Arbeitsbeginn, wodurch es zu Verschiebungen in den Arbeitsabläufen kam und eine Verlängerung der ersten Phase notwendig wurde.

Für eine erfolgreiche Realisierung von Umsetzungsmaßnahmen müssen alle Stakeholder eng zusammenarbeiten. Besonders der intensive Austausch mit dem Energiemanagement ist erfolgsrelevant. Weiterhin muss die feste Einbindung der Bauverwaltung in das Projektteam frühzeitig angestrebt werden.



### c) Energetische Benchmarks

Wichtigste Zielgröße des Projekts sind die nutzflächenspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Endenergiebedarfe für Wärme und Strom, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Nutzflächenspezifische Kenngrößen.

	Bezugsjahr	Zielwert
CO <sub>2</sub> -Emissionen	1990	-80 % bis 2050
Endenergie Wärme	2015	-20 % bis 2020
Endenergie Strom	2015	-25 % bis 2050

Folgende Randbedingungen wurden festgelegt:

- Treibhausgasemissionen werden durch CO<sub>2</sub>-Äquivalente angegeben
- Regenerative Energien wirken in der Bilanz wie Effizienzmaßnahmen und werden vom Endenergiebedarf abgezogen
- Die Bilanzgrenze umfasst den gesamten Campus Lichtwiese
- Bilanzräume: Heizung, Kühlung, Be- und Entlüftung, Befeuchtung, Beleuchtung und Warmwasserversorgung inklusive nutzerbezogener Strombedarf außerhalb der Bilanz der DIN V 18599.

### d) Erfahrungen mit Technologien

Noch keine.

### e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln

Im Rahmen der Projektplanung mit mehreren Teilprojekten ist eine umfangreiche Projektzeitplanung und Darstellung aller Teilprojekte inklusive der vorhandenen Abhängigkeiten wie z. B. mit Gantt Diagramm zum Arbeitsplan, Beschreibung der Zusammenarbeit über Organigramm und Darstellung in IBZED-Nomenklatur, von erfolgskritischer Bedeutung.

MATLAB/Simulink in der Verbindung mit der CARNOT-Toolbox ist eine beliebte Software-Lösung für die Simulation von Haustechnik-Anwendungen. In Verbindung mit anderen MATLAB-Toolboxen wie der Optimization-Toolbox und den Möglichkeiten zur Datenauswertung und graphischen Darstellung bietet Mathworks ein umfangreiches Paket, mit dem alle Anforderungen der Modellierung der thermischen Energieversorgung in einer Software umgesetzt werden können. Andere Softwarelösungen wie Modelica oder TRNSYS bieten zusätzliche Möglichkeiten in der Modellierung und Simulation, für das Pre- und Postprocessing muss dort aber auf zusätzliche Software zugegriffen werden, wodurch ein zusätzlicher Aufwand für die Programmierung von Schnittstellen zwischen den verschiedenen Umgebungen entsteht.


Für thermische Gebäudesimulationen wurde die Simulationsumgebung IDA ICE von Equa verwendet. Über dynamische, multizonale Berechnungen können Gebäudeenergiebedarfe und der Innenraumkomfort bewertet werden. IDA ICE ist ein validiertes Werkzeug und wurde speziell für den Gebäudebereich entwickelt.

## 2.5 CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden

Autorenteam:

Dr.-Ing. Annina Gritzki, Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann (TU Dresden)

### 2.5.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	CAMPER – CAMPusEnergieverbrauchsReduktion. Auf dem Weg zum Energieeffizienz-Campus der TU Dresden (2015-2019) CAMPER-MOVE – CAMPusEnergieverbrauchsReduktion - Maßnahmen zur Optimierung für eine ressourcenschonende VerbrauchsEntwicklung (2019-2024)		
<b>Projektbild</b>	 <p>3D-Modell des Hauptcampus der TU Dresden. © Nikolas Prechtel, TU Dresden, Institut für Kartographie.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Technische Universität Dresden (TUD) 01062 Dresden		
<b>Projektbeteiligte</b>	Institut für Energietechnik (IET) der TU Dresden	Institut für Baukonstruktion (BAUKO) der TU Dresden	Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden
	Lehrstuhl für betriebliche Umweltökonomie (BUÖ) der TU Dresden	Lehrstuhl für Verkehrsökologie (VÖK) der TU Dresden (hinzugekommen im Projekt CAMPER-MOVE)	Dezernat Liegenschaften, Technik und Sicherheit (D4) der TU Dresden
	Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB)	DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH	DREWAG Netz GmbH (Netzgesellschaft der Stadtwerke)

<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	<p>Hauptcampus Südvorstadt: ca. 50 größere Gebäudekomplexe (bestehend aus ca. 150 Einzel-/Teilgebäuden), darunter ca. 40 Institutsgebäude heterogener Nutzung (Büros, Labore, Hörsaal, Seminarräume etc.), 6 Versuchsgebäude/Technika, 3 Verwaltungsgebäude, 1 Sportkomplex, 1 Rechenzentrum, 1 technische Leitzentrale, 1 Hörsaalzentrum, 1 Mensa</p> <p>Weitere Standorte im Stadtgebiet von Dresden sowie Umland: Botanischer Garten Dresden, Forstbotanischer Garten Tharandt, Campus Dresden-Johannstadt (Universitätsklinikum und Biotechnologien), Marschnerstraße (Leichtbau und Kunststofftechnik, Luft- und Raumfahrttechnik, Windkanäle), Pirna (Institut für Abfallwirtschaft), Zittau (Internationales Hochschulinstitut)</p>
<b>Neubauten im Projekt</b>	<p>Innerhalb der Projektlaufzeiten sind entstanden bzw. werden entstehen:</p> <p>2013-2015: Neubau Hochleistungs-Rechenzentrum mit Speicherkomplex (Lehmann-Zentrum)</p> <p>2016-2018: Neubau Institutsgebäude FR Physik (Hermann-Krone-Bau)</p> <p>2016-2018: Neubau Center for Advancing Electronics Dresden (CfAED)</p> <p>2016-2019: Neubau Zentrum für Innovationskompetenz (B CUBE) - Center for Molecular Bioengineering</p> <p>2018-2021: Neubau Forschungsgebäude Fakultät Maschinenwesen am Merkel-Bau</p> <p>2020-2024: Neubau Bürokomplex für das Lehmann-Zentrum II</p> <p>2019-2027: Neubau und Sanierung im Botanischen Garten Dresden (BOT)</p> <p>(<a href="https://tu-dresden.de/tu-dresden/campus/entwicklung/gefoiderte-bauprojekte">https://tu-dresden.de/tu-dresden/campus/entwicklung/gefoiderte-bauprojekte</a>)</p>
<b>Baujahr der Gebäude</b>	<p>1890-2018 Ca. die Hälfte der Campusgebäude steht unter Denkmalschutz</p>
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	<p>Die Gebäude weisen einen sehr unterschiedlichen baulichen Zustand auf, ein Teil ist für den Abriss vorgesehen, ein Großteil ist sanierungsbedürftig, einige Gebäude sind bereits teil- oder komplett saniert, einige sind neu errichtet. Der Sächsische Rechnungshof spricht im Jahresbericht 2015 (Band I: Staatsverwaltung, S. 173) für die TU Dresden von einem „Sanierungsstau von rd. 500 Mio. €“.</p>
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	<p>Zentrale Fernwärmeversorgung der meisten Gebäude (ca. 25 MW insgesamt), in entfernteren Standorten (z. B. Tharandt) Versorgung mit Gas-/Ölkessel. Abwärmennutzung des Lehmann-Zentrums (Rechenzentrum) zur Wärmeversorgung umliegender Gebäude (bisher nur Krone-Bau) via Nahwärmenetz. Strom überwiegend aus dem öffentlichen Stromnetz, zwei zentrale Übergabestellen (je ca. 4 MW), dezentrale Verteilung über campusinterne Mittelspannungsringe und dezentrale Trafostationen sowie Niederspannungshauptverteiler. Zusätzlich dezentrale Erzeugung und Eigenverbrauch von PV-Strom innerhalb der campusinternen Mittelspannungsverteilung, insgesamt 7 PV-Anlagen (ca. 360 kW<sub>p</sub>). Erdgasbezug für Versuchsanlagen, hauptsächlich den Kraftwerkssimulator des Zentrums für Energietechnik (Gasturbinenanlage mit Zusatzfeuerung). Die dort dezentral erzeugte Wärme wird in das anliegende Fernwärmenetz eingespeist und von umliegenden Campusgebäuden verbraucht (Verrechnung), der dezentral erzeugte Strom wird in das campusinterne Mittelspannungsnetz eingespeist und dort vollständig verbraucht. Kälteversorgung (ca. 22 MW insgesamt) über 7 kleinere Nahkältenetze (Kälteinseln mit großen Kältezentralen) sowie zusätzlich dezentrale Kleinkälteerzeuger (meist Mono-/Multi-Splitgeräte).</p>

<b>Projektlaufzeit</b>	Projekt CAMPER: 10/2015-03/2019 Projekt CAMPER-MOVE: 04/2019-03/2024								
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betrieboptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung	
	X	X	X	XX	XX	XX	X	XX	
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung					
	XX	XX	X	X					
<b>Projekthalt</b>	Die Realisierung eines Energieeffizienz-Campus stellt die TU Dresden aufgrund ihrer Größe, ihres historischen Gebäudebestandes und ihrer technischen Ausrichtung (mit hohen Energiebedarfen für Forschung und IT-Dienstleistungen) vor besondere Herausforderungen. Die Forschungsprojekte CAMPER und CAMPER-MOVE leisten hierbei von wissenschaftlicher Seite Unterstützung. Um geeignete Strategien erarbeiten zu können, werden die umfangreich vorhandenen Bestands-, Betriebs-, Verbrauchs- und Nutzungsinformationen unterschiedlicher Qualität zusammengeführt und aufbereitet, um sie einer gemeinsamen Analyse, Interpretation und Bewertung zuführen zu können. Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen zur Energieverbrauchsreduktion erarbeitet. Für besonders vielversprechende Energiesparmaßnahmen werden gemeinsam mit der Universitätsverwaltung (Dezernat 4) konkretere Umsetzungsvorschläge entwickelt und der Liegenschaftsverwaltung des Freistaates Sachsen (SIB) als Entscheidungshilfe unterbreitet. Zusätzlich werden Maßnahmen zur Unterstützung eines energiesparenden Nutzerverhaltens initiiert.								
<b>Projektmittel</b>	Insgesamt: Projekt CAMPER: 990.917 € bewilligte Fördersumme (FKZ 03ET1319A) Projekt CAMPER-MOVE: 1.200.318 € bewilligte Fördersumme (FKZ 03ET1656) zzgl. 338.115 € Eigenmittel der TU Dresden Davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 € Die Umsetzung von Maßnahmen erfolgt durch den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB), welcher den Freistaat als Eigentümer/Bauherr vertritt und auch für die Bewirtschaftung (Energie-/Medienkosten) verantwortlich ist.								
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Siehe die im Abschlussbericht CAMPER [31] beschriebenen Maßnahmen: - Reduktion sommerlicher Kühllasten, v. a. durch Verbesserung der Verschattungssituation im Bestand unter Berücksichtigung von Denkmal-, Betriebs- und Nutzeranforderungen, Optimierung der Tageslichtnutzung; bei Neubauten Berücksichtigung innovativer Techniken (Thermoaktive Bauteilsysteme TABS, Phase Change Materials (PCM), schaltbare Verglasungen) - Denkmalschutzkompatible Sanierungsmaßnahmen mit Innendämmung unter Berücksichtigung der in der ersten Projektphase erarbeiteten Praxisanleitung für die energetische Sanierung von Baudenkmalen - Umbau und Modernisierung des Botanischen Gartens Dresden								

<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	<p>Siehe die im Abschlussbericht CAMPER [31] beschriebenen Maßnahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Steigerung der Flexibilität und Effizienz der Kältebereitstellung bei veränderlichen Kältebedarfen durch Erhöhung des Vernetzungsgrades (Ausbau Nahkälteverbund), Integration größerer Speicherkapazitäten, Substitution dezentraler Kleinkälteerzeuger, Einsatz hocheffizienter Kältemaschinen (Turbokompressoren, gutes Teillastverhalten), erweiterte Nutzung der freien Kühlung (hybride Kühltürme)</li> <li>- Verstärkte Integration von Photovoltaik (PV) mit Eigenstromverbrauch auf Quartiersebene unter Ausnutzung der campussinternen Stromverteilungsnetze, perspektivisch auch Sektorkopplung (P2C, P2M), Nachrüstung von PV auf verfügbaren Dachflächen</li> <li>- Einsatz von Niedertemperaturwärme „LowEx“ für die Versorgung zu errichtender oder sanierter Gebäude durch verstärkte Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren oder technologischen Prozessen sowie Ausnutzung der Rücklauftemperatur von Gebäuden/FW-Netz unter Beachtung thermischer/hydraulischer Grenzen, Ausnutzung vorhandener bzw. Schaffung neuer Netzstrukturen (Nah-/Fernwärme), Absenkung des Heizmedien-Temperaturniveaus</li> <li>- Weiterentwicklung des universitären Energiemanagements mit dem Ziel der verstärkten Systematisierung und Automatisierung sowie Verstetigung des Erschließens von Einsparpotentialen; Konzeptionierung von Strukturen für ein möglichst wirksames Energiemanagement unter Beachtung ökonomisch sinnvoller Grenzen (messtechnischer und personeller Aufwand), bes. Berücksichtigung energieintensiver Gebäude/Verbrauchergruppen und Möglichkeiten von Smart Metern</li> <li>- Unterstützung eines effizienten Nutzerverhaltens durch Einbindung und Motivation der Nutzer in den Bereichen Energie und Mobilität, Konzeptionierung von Anreizstrukturen, Vermeidung von Rebound-Effekten, Strategieranpassung auf Basis von Erfahrungswerten</li> </ul>					
<b>Gesamte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	Ca. 610.000 m <sup>2</sup> (Stand 2015)		Ca. 660.000 m <sup>2</sup> (geschätzt, bis 2024)			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt (Jahr 2015, Wärme und Strom gemessen, Kälte teilweise berechnet)</b>		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
Wärme (Fernwärme, Erdgas, Öl)	60.188	105	24.987	44	4,4 Mio.	
Kälte (Fernwärme, Strom)	17.393	30	24.285	42	2,0 Mio.	
Strom (ohne Kälteerzeugung)	50.791	89	127.416	222	7,7 Mio.	
Summe	128.373	224	176.688	308	14,2 Mio.	

Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	Noch keine Angaben möglich, das Projekt läuft noch.				
	Kälte					
	Strom					
	Summe					
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	Unter anderem - TRNSYS-TUD für die gekoppelte dynamische Gebäude- und Anlagensimulation sowie Netzsimulation (Fernwärme) - PV*Sol für die Dimensionierung und Ertragsprognose der Photovoltaikanlagen - Polysun für kombinierte Anlagensysteme mit PV und Eigenverbrauchsanalyse - BIM-HVAC-Tool und EnergyPlus für die dynamische Gebäudesimulation - EnerCalc für die Bewertung der Gebäudesanierung (Sanierungsszenarien) - MS Excel und MATLAB für Datenaufbereitung und -auswertung - graviss-CAFM für Projektkoordination und Datenmanagement sowie Visualisierung von Nutzungs-, Bestands-, Betriebs- und Verbrauchsdaten					
<b>Bereits erhältliche Projekt- ergebnisse</b>	- Abschlussbericht Projekt CAMPER, Oktober 2019, hochgeladen auf <a href="http://www.tib.eu/de">www.tib.eu/de</a> am 17.12.2019, [31] - Beitrag zum 5. Kongress Zukunftsraum Schule, [32] - Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2017“, [33] - Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2018“, [34] - Beitrag zum TGA-Kongress 2018, [35] - Fachaufsatz in der Zeitschrift GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, [36] - Posterbeitrag zum „Aktionstag Energie“ des Umweltmanagements der TU Dresden in Kooperation mit CAMPER, [37] - Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2019“, [38] - Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2020“, [39] - Fachaufsätze in der Zeitschrift B+B Bauen im Bestand, Ausgaben 02/2020 und 03/2020, [40], [41]					

## 2.5.2 Projektbeschreibung

### 2.5.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Die Technische Universität Dresden, gegründet im Jahr 1828 als Technische Bildungsanstalt, ist heute eine der größten und ältesten Universitäten in Deutschland. Aufgrund der früheren Ausrichtung dominieren naturwissenschaftliche und ingenieurtechnische Fachrichtungen auch heute noch den Campus. Dies schlägt sich in einer großen Zahl an Gebäuden mit hohem bis sehr hohem Anteil an Labor- und Versuchsflächen nieder. Die TU Dresden ist eine klassische Campusuniversität mit historischem Kerngelände bzw. Hauptcampus im südlichen Bereich der Stadt Dresden. Darüber hinaus gehören zur Universität auch einige vom Hauptcampus entfernte Standorte („Satelliten“), wie bspw. der Botanische Garten, der Forstbotanische Garten und die Medizinische Fakultät. Insgesamt verfügt die TU Dresden über Gebäude mit einer Nettogrundfläche von ca.

600.000 m<sup>2</sup>. Der Energiebezug aus öffentlichen Netzen belief sich im Jahr 2015 (Projektbeginn) auf ca. 52.000 MWh Fernwärme, ca. 62.500 MWh Elektroenergie und ca. 13.500 MWh Erdgas.

Die Mehrzahl der Universitätsgebäude befindet sich auf dem Hauptcampus Südvorstadt. Dieser ist durch ein Gebäudeensemble von kleineren und größeren Gebäuden unterschiedlichsten Alters und baulichen Zustandes geprägt. Insgesamt sind ca. 50 größere Gebäudekomplexe vorzufinden, bestehend aus ca. 150 Einzel-/Teilgebäuden. Die Nettogrundfläche dieser Gebäude beträgt ca. 400.000 m<sup>2</sup>. Im Jahr 2015 wurden zur Versorgung des Hauptcampus ca. 38.000 MWh Fernwärme, ca. 38.000 MWh Elektroenergie und ca. 6.500 MWh Erdgas bezogen. 22 % der Elektroenergie wurde von Rechenzentren verbraucht. Erdgas wurde überwiegend in Versuchsanlagen eingesetzt. Nach Einschätzung des Staatsbetriebes Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB), welcher den Freistaat Sachsen als Eigentümer der Gebäude vertritt, ist ca. die Hälfte der Gebäude des Hauptcampus sanierungsbedürftig. Gleichzeitig ergeben sich durch den Denkmalschutz für einen Großteil der Bestandsgebäude besondere Herausforderungen bei der energetischen Ertüchtigung und Integration erneuerbarer Energien.

Der Hauptcampus der TU Dresden verfügt über eine gut ausgebaute Energieinfrastruktur. Die Mehrzahl der Gebäude ist an das Fernwärmenetz (FW) der DREWAG Stadtwerke GmbH angeschlossen. Die Wärmebereitstellung für das zentrale Fernheiznetz der Stadt Dresden erfolgt zu 89 % aus Kraft-Wärme-Kopplung und zu 1 % aus erneuerbaren Energien. Der Dresdner Fernwärme wurde 2015 ein Primärenergiefaktor von 0,23 bescheinigt.

Die Kälteversorgung des Campus erfolgt über sieben kleinere Nahkältenetze (Kälteinseln) sowie eine Reihe dezentraler Klein-Kälteerzeuger (zumeist Mono-/Multisplitgeräte). Die Kälteinseln waren ursprünglich (2006) als Vorstufe für einen späteren Gesamt-Kälteverbund gedacht. Heute weisen sie einen unterschiedlichen Vernetzungsgrad auf. Insgesamt sind auf dem Hauptcampus gegenwärtig Kälteerzeuger mit einer Nennleistung von ca. 22 MW installiert und damit das Niveau der Wärmeversorgung erreicht. Die Kälte wird überwiegend für technologische Prozesse in Laboren und Werkstätten, zur Kühlung von Rechentechnik und zur Hörsaalklimatisierung benötigt. Eine Komfortkühlung von Büro-, Besprechungs- und Seminarräumen findet bislang nur in Ausnahmefällen statt. Der Kälteenergieverbrauch wird nicht vollständig messtechnisch erfasst. Auf Grundlage der vorhandenen Messwerte fanden im Rahmen des Projektes detaillierte Betrachtungen zum Kälteenergieverbrauch statt, wobei fehlende Verbrauchsinformationen durch entsprechende Angaben aus der Literatur und Erfahrungswerte des Betreibers ergänzt wurden. Im Ergebnis wurde ein Kälteverbrauch des Hauptcampus in der Größenordnung von 23.000 MWh/a festgestellt. Dies umfasst die erzeugerseitig bereitgestellte Nutzenergie (inkl. thermischer Speicher-, Verteilungs- und Übergabeverluste) und entspricht im Vergleich etwa dem 0,7-fachen des Heizwärmeverbrauches.

Die Elektroenergieversorgung des Hauptcampus ist an zwei zentralen Übergabestationen mit dem öffentlichen Stromnetz verbunden. Von dort aus versorgen sieben interne, ringförmige Mittelspannungsnetze sämtliche Campusgebäude. Dies ermöglicht

auch die flexible Umverteilung des auf dem Campus erzeugten Stroms, welcher mit Hilfe von PV-Anlagen (gegenwärtig ca. 350 MWh/a aus sieben Aufdach-Anlagen) regenerativ gewonnen und vom Kraftwerkssimulator im KWK-Prinzip (Kraft-Wärme-Kopplung) erzeugt wird.

### **2.5.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Bauherr und Eigentümer der Gebäude ist der Freistaat Sachsen, vertreten durch den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB). Der SIB ist für die Planung und Durchführung größerer Baumaßnahmen verantwortlich und übernimmt die Bewirtschaftung der Gebäude. Der SIB handelt auch die Energielieferverträge aus und kommt für die Energie- und Medienkosten der TU Dresden auf. Die TU Dresden, speziell das Dezernat Liegenschaften, Technik und Sicherheit (Dezernat 4), fungiert als Betreiber der Gebäude und Anlagen, verwaltet die Bestandsdokumentationen sowie Betriebs- und Verbrauchsdaten, führt die regelmäßigen EMAS-Prüfungen durch und erstellt den jährlichen Umweltbericht. Das Dezernat 4 begleitet sämtliche größeren und kleineren baulichen Umsetzungen auf dem Campus. Auch initiiert es regelmäßig Energieeffizienzmaßnahmen. Kleinere Baumaßnahmen kann die TU Dresden in Eigenregie durchführen bzw. beauftragen. Weiterhin erstellt das Dezernat 4 die Bedarfsanmeldungen (Flächen, Ausstattungen, technische Anlagen u. ä.) für das Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) entsprechend den Anforderungen der Nutzer (Institute, Verwaltung etc.). Nutzer der Gebäude sind die fünf Wissenschaftsbereiche mit ihren Fakultäten und Instituten, zusätzliche zentrale Einrichtungen (wie BIOTEC, CRTD, Botanischer Garten) und die Universitätsverwaltung. Die Lehrräume werden zentral verwaltet und vergeben. Die Nutzung der übrigen Flächen wird von den zugeordneten Struktureinheiten (Lehrstühle, Dezernate) selbst organisiert. Die Lehrstühle verantworten auch den Betrieb ihrer Versuchsanlagen, Großgeräte u. ä., ohne jedoch für die Energie- und Medienkosten aufkommen zu müssen (s. o.). Seit Beginn der ersten Projektphase (CAMPER) unterstützen die beteiligten Lehrstühle das Dezernat 4 bei der energetischen Campusanalyse und der Erarbeitung von Strategien und Maßnahmen zur Energieverbrauchsreduktion. Diese zielen auf baulich-technische Umsetzungen, die Erweiterung des universitären Energiemanagements und -controllings sowie die Unterstützung eines sparsamen Nutzerverhaltens ab. Zur Stärkung der Verbindung von Forschungsprojekt und Verwaltung hat der Kanzler der TU Dresden im Dezernat 4 (SG Betriebstechnik) eine projektbezogene Haushaltstelle eingerichtet, welche seit September 2019 besetzt ist.

#### **b) am Projekt**

Die Projektleitung und -koordination (auch mit externen Partnern) obliegt dem Institut für Energietechnik (IET), vertreten durch die Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung, unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann. Das Institut für Energietechnik behandelt zudem sämtliche Fragestellungen der energetischen Grob- und Feinanalysen sowie der darauf aufbauenden konzeptionellen Überle-



gungen zur zukünftigen Energieversorgung inklusive deren qualitativer und quantitativer Bewertung. Das Institut für Energietechnik erarbeitet Erstgutachten für die Vorbereitung praktischer Umsetzungen zur Erhöhung der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit von Wärme- und Kälteversorgungseinrichtungen sowie zur Erhöhung der regenerativen Eigenstromversorgung. Auch Befragungen zum energierelevanten Nutzerverhalten und darauf abgestimmte Maßnahmen zur Unterstützung eines effizienten Umgangs mit Energie werden vom Institut für Energietechnik durchgeführt. Gleiches gilt für die Mehrzahl der Monitoring- bzw. Messprogramme, welche im Rahmen des Projektes stattfinden. Das Institut für Energietechnik lenkt den Auf- und Ausbau des zentralen Projekt- und Datenpools und erarbeitet die Grundzüge eines erweiterten universitären Energiemanagements.

Das Institut für Baukonstruktion führt Erhebungen zur Baukonstruktionen und zu den thermischen Hüllflächen der Campusgebäude durch. Die festgestellten Gebäudecharakteristika bilden die Grundlage für numerische Berechnungen zum energetischen Ausgangszustand und relevanten Sanierungsszenarien, welche im Rahmen des Projektes vom Institut für Baukonstruktion mit Hilfe statischer Rechenverfahren ausgeführt werden. Die zu betrachtenden Sanierungsvarianten werden in gemeinsamer Abstimmung aller Projektpartner spezifiziert. Aus den Ergebnissen können Aussagen zur Entwicklung zukünftiger Heiz- und Kühlenergiebedarfe unter verschiedenen, sich teilweise ändernden Randbedingungen sowie Handlungsempfehlungen zur energetischen Erüchtigung der Gebäudehüllen abgeleitet werden.

Das Institut für Bauklimatik beteiligt sich an der Erhebung von Daten zum baulichen Zustand der Campusgebäude, führte teilweise eigene Messungen durch und erstellt detaillierte Gebäudemodelle. Mit Hilfe dieser Modelle können dynamische Simulationen zur Bewertung verschiedener baulicher, klimatischer und nutzungsbedingter Entwicklungen vorgenommen werden. Weiterhin erstellt das Institut für Bauklimatik eine Praxisanleitung zur Innendämmung schützenswerter Gebäude, welche aus ästhetischen Gründen nicht mit Außendämmung versehen werden können.

Der Lehrstuhl für betriebliche Umweltökonomie führt Recherchen zur ökologischen Bewertung verschiedener Maßnahmen des baulichen Wärmeschutzes durch und stellt darüber hinaus eigene Berechnungen für die vom Institut für Bauklimatik empfohlenen Dämmstoffe an. Darüber hinaus steht der Lehrstuhl für betriebliche Umweltökonomie im Zuge der Projektbearbeitung den anderen Lehrstühlen hinsichtlich ökonomisch-ökologischer Fragestellungen beratend zur Seite.

Der Lehrstuhl für Verkehrsökologie befasst sich mit sämtlichen Fragestellungen, welche die Mobilität von Mitarbeitern und Studierenden der TU Dresden betreffen und erarbeitet Konzepte zur Förderung eines effizienten, ressourcenschonenden Mobilitätsverhaltens bei Arbeitswegen und Dienstreisen.

### c) Organisationsstruktur

#### *Bündelung der Kompetenzen aus unterschiedlichen Fachbereichen*

- Institut für Energietechnik (IET), Lehrstuhl für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung (GEWV), Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann (Projektleiter)
  - technische Gebäudeausrüstung, Energie- und Wärmeversorgung von Quartieren
  - rationelle Energieanwendung und regenerative Energiequellen
- Institut für Baukonstruktion (BAUKO), Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
  - energetische Sanierung, Photovoltaik und neuartige energieerzeugende Fassadenkonstruktionen
- Institut für Bauklimatik (IBK), Lehrstuhl für Bauphysik, Prof. Dr.-Ing. John Grunewald
  - Baustoffe und Dämmsysteme, bauphysikalische Beratung, Planungs- und Bemessungswerkzeuge
- Lehrstuhl für Betriebliche Umweltökonomie (BUÖ), Prof. Dr. Edeltraud Günther
  - ökonomisch-ökologische Bewertung von Produkten und Prozessen
- Lehrstuhl für Verkehrsökologie (VÖK), Prof. Dr.-Ing. Udo Becker
  - Quantifizierung und Reduzierung verkehrlicher Umweltwirkungen, nachhaltiges Mobilitätsverhalten

#### *Unterstützung durch*

- Universitätsverwaltung (Dezernat 4 – Liegenschaften, Technik und Sicherheit)
- Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB, Vertreter des Eigentümers)
- assoziierte Partner: DREWAG Stadtwerke GmbH (Energieerzeugung, Kundenanlagen) und DREWAG NETZ GmbH (Netzbetreiber)

### 2.5.2.3 Der Projektinhalt

#### a) Projektziele

Das Forschungsvorhaben CAMPER widmete sich dem Ziel der schrittweisen Reduktion des Energieverbrauchs der TU Dresden und der damit verbundenen klima- und umweltschädlichen Emissionen. Hierfür waren zunächst im Rahmen einer tiefgehenden energetischen Campusanalyse die umfangreichen, verteilt vorhandenen Informationen (Bestands-, Nutzungs-, Betriebs- und Verbrauchsdaten) heterogener Qualität zusammen- und einer gemeinsamen Auswertung und Interpretation zuzuführen. Dies erfolgte unter Ausnutzung der Möglichkeiten zur strukturierten Datenhaltung in einem zentralen Datenpool (Arbeitspaket AP 2 - Campus: Datenpool). Auf Grundlage dieser Informationen wurde die Ausgangssituation hinsichtlich Zustand, Betrieb und Nutzung der Gebäude und Anlagen, der Energieversorgung sowie des Nutzerverhaltens bestimmt und eingeordnet, um wirksame Ansätze zur Reduktion der Endenergieverbräuche und der damit verbundenen Treibhausgasemissionen identifizieren zu können (AP 3 – Campus: Analyse). Ergänzende Detailbetrachtungen besonders energieintensiver Bereiche wurden u. a. mit Hilfe von Monitoring und dynamischer Simulation durchgeführt. Darauf aufbauend wurden in enger Abstimmung mit dem Dezernat Liegenschaften, Technik und Sicherheit der TU Dresden (Dezernat 4, verantwortlich für den Gebäude- und Anlagenbetrieb) und dem Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement

(SIB, Vertreter des Eigentümers Freistaat Sachsen) strategische Überlegungen zur Energieverbrauchsreduktion entwickelt, geeignete Maßnahmen baulich-technischer Art und zur Unterstützung eines effizienten Nutzerverhaltens erarbeitet und ökonomisch-ökologisch einer ersten Bewertung unterzogen (AP 1 – Campus: Koordination, AP 4 – Campus: Strategie, AP 6 – Campus: Kommunikation). Begleitend wurden erste praktische Umsetzungen mit Pilotcharakter initiiert (AP 5 – Campus: Pilot). Die dabei gewonnenen Erkenntnisse gingen in Entwicklungsszenarien ein, welche auch zukünftig abweichende Rahmenbedingungen berücksichtigen, wie bspw. geplante Campuserweiterungen, Vorhersagen zum Klimawandel und den technologischen Fortschritt. Dabei wurden die verschiedenen Energieversorgungsbereiche sowohl einzeln als auch in ihrer Gesamtheit betrachtet, Prognosen zum zukünftigen Energiebedarf erstellt und erreichbare Verbrauchsänderungen quantifiziert. Die Ergebnisse mündeten in einen Energie- und Treibhausgas-Entwicklungsplan mit kurz-, mittel- und langfristiger zeitlicher Perspektive (2030/2050/2080). Der Energieentwicklungsplan beschreibt mögliche Entwicklungspfade und untersetzt sie mit konkreten Maßnahmen.

Das Vorhaben CAMPER-MOVE widmet sich den Herausforderungen, welche sich im Zuge der benötigten Transformationsprozesse für den Campus der TU Dresden ergeben. In CAMPER-MOVE sollen praktische Umsetzungen durch wissenschaftliches Monitoring und Optimierung unterstützt und bzgl. Wirkung und Praxistauglichkeit bewertet werden. Die Erfahrungen fließen in weiterführende konzeptionelle Überlegungen ein. „MOVE“ (engl. Aktion, Bewegung) steht dabei symbolisch für den Transformationsprozess hin zu einem Energieeffizienz-Campus, der durch wissenschaftliche Begleitung vorangetrieben wird. In Anpassung an benötigte Zeiträume für praktische Umsetzungen und Messprogramme ist das Vorhaben auf 5 Jahre angelegt. Der interdisziplinäre Ansatz und die Kooperation mit der TU-Verwaltung, dem städtischen Energieversorger (DREWAG) und dem Sächsischen Immobilien- und Baumanagement (SIB) bilden eine sehr gute Ausgangslage. Als „Roadmap“ dient der in CAMPER erstellte Entwicklungsplan.

## **b) Projektarbeiten**

*Arbeitsplan CAMPER (2015–2019):*

AP1: „Campus: Projektkoordination“

- Koordination der Zusammenarbeit mit internen und externen Partnern
- Wissenstransfer, Handlungsanleitungen, Öffentlichkeitsarbeit
- Schaffung eines Werkzeuges zur Unterstützung von Projekt- und Informationsmanagement

AP2: „Campus: Datenpool“

- Erstellung einer zentralen, übergreifenden Datenbasis als Grundlage für die weiteren Arbeitspakete -> CAMPER-Projekt- und Datenpool (flexible Softwarelösung mit umfangreichen und erweiterbaren Fähigkeiten, Integration von Analyse- und Auswertemethoden)

- Nutzung/Verwertung über das Projektende hinaus, Verfügbarkeit für alle Projektbeteiligten
- Einfache Bearbeitung, Minimierung von Zugriffskonflikten

#### AP3: „Campus: Analyse“

- Energetische Detailanalyse des Campus (Gebäudehüllen, Gebäudenutzung und Belegungsintensität, technische Ausstattung und Anlagenbetrieb, Energieinfrastruktur, Betrieb der Wärme- und Kältenetze, Nutzerverhalten und Mobilität)
- Verwendung historischer und aktueller Informationen, zusätzliche Erhebung von Daten durch eigene Messprogramme/Monitorings und Nutzerbefragungen
- Zusammenfassung charakteristischer Eigenschaften der Gebäude
- Energetische Bewertung/Benchmarking durch Bildung geeigneter Kennwerte und Gegenüberstellung zu entsprechenden Referenzwerten
- Identifikation von Optimierungsansätzen und Energieeinsparpotentialen

#### AP4: „Campus: Strategie“

- Erstellung eines Sanierungsfahrplans unter Berücksichtigung des baulichen Zustands der Gebäude, erforderlicher Bauzeiten und Nutzflächenbedarfe
- Abschätzung der zukünftigen Energieverbrauchsentwicklung unter Einbeziehung von baulichen Campuserweiterungen, klimatischen Veränderungen, Denkmalschutz, Nutzeranforderungen und technologischem Fortschritt
- Anwendung unterschiedlicher Planungshilfsmittel und Rechenmethoden, vergleichende Bewertung der Tools und Beschreibung der vorliegend gewählten/geeigneten Herangehensweise
- Erstellung eines Energieentwicklungsplans mit variabler zeitlicher Perspektive, Untersetzung mit konkreten Einzelmaßnahmen

#### AP5: „Campus: Pilot“

- Vorbereitung der Umsetzung ausgewählter Pilotmaßnahmen
- Erarbeitung wissenschaftlich fundierter Grundlagen als Entscheidungshilfen für den Bauherrn

#### AP6: „Campus: Kommunikation“

- Unterstützung eines effizienten Nutzerverhaltens durch Sensibilisierung und Partizipation
- Durchführung verschiedener kleinerer und größerer Nutzerbefragungen zur Abschätzung des gegenwärtigen Nutzerverhaltens und Ansätzen zur positiven Beeinflussung
- Initiierung erster Maßnahmen in Kooperation mit der Universitätsverwaltung (verstärkte Öffentlichkeitsarbeit, Entwicklung eines verleihbaren Mess-Equipments zur Erfassung des energierelevanten Nutzerverhaltens am Arbeitsplatz mit Web-Plattform und Feedback-Funktionen)

*Arbeitsplan CAMPER-MOVE (2019–2024):*

AP1: „Campus: Bau“ – Wissenschaftliche Begleitung der praktischen Umsetzung von Effizienzmaßnahmen

- Steigerung der Flexibilität und Effizienz der Kältebereitstellung
- Reduktion sommerlicher Kühllasten
- Verstärkte solare Eigenstromversorgung und Sektorkopplung (Power-to-Cool/Power-to-Mobility)
- Denkmalschutzkompatible energetische Sanierungen
- Nutzung von Niedertemperatur-/Abwärme
- Weiterführende konzeptionelle Überlegungen unter Einbeziehung der bei den Umsetzungen gesammelten Erfahrungen

AP2: „Campus: Energiemanagement“ – Erweiterung des universitären Energiemanagements

- Unterstützung der TU Dresden bei der Weiterentwicklung des Energiemanagements
- Verfestigung des Erschließens von Einsparpotentialen durch verstärkte Systematisierung und Automatisierung (v. a. für energieintensive Bereiche)

AP3: „Campus: Nutzer“ – Unterstützung eines nachhaltigen Nutzerverhaltens

- Einbindung und Motivation der Nutzer in den Bereichen Energie und Mobilität
- Konzeptionierung von Anreizstrukturen
- Potenziale der Elektromobilität

AP4: „Campus: Plan“ – Kontrolle und Fortschreibung der Entwicklungsplanung

- Kontrolle und Anpassung von Zielvorgaben (Realitätsbezug)
- Identifikation von Ursachen für abweichende Entwicklungen und Strategieanpassung
- Weiterentwicklung der zentralen Datenbasis

AP5: „Campus: Transfer“ – Öffentlichkeitsarbeit, Wissenstransfer, projektbegleitende Maßnahmen

**c) Projektmittel**

Projekt CAMPER: 990.917 € bewilligte Fördersumme (hauptsächlich Personalkosten)

Projekt CAMPER-MOVE: 1.200.318 € bewilligte Fördersumme (hauptsächlich Personalkosten) zzgl. 338.115 € Eigenmittel der TU Dresden (Haushaltmittel für Personalkosten) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €

Die Umsetzung von baulich-technischen Maßnahmen erfolgt durch den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB), welcher den Freistaat als Eigentümer/Bauherr vertritt und der auch für die Bewirtschaftung (Energie-/Medienkosten) verantwortlich ist. Die Umsetzung von Maßnahmen zur Unterstützung eines effizienten Nutzerverhaltens erfordert keine oder nur geringe Kosten, welche anteilig aus Projektmitteln und Haushaltmitteln der TU Dresden finanziert werden. Für Software-Weiter-

entwicklungen (Datenpool/CAFM, Webplattform), welche nicht von den Projektpartnern erbracht werden können, stehen im Projekt CAMPER-MOVE ca. 100.000 € für Unteraufträge zur Verfügung.

#### **d) Projektstand**

Das CAMPER-Projekt (2015–2019) widmete sich v. a. der Planung und bereitete spätere Umsetzungen vor. Praktische Umsetzungen werden im Rahmen des Folgeprojektes CAMPER-MOVE (2019–2024) angestrebt und begleitet. Als wesentliche Erkenntnis des CAMPER-Projektes ist festzuhalten, dass an der TU Dresden in Zukunft größere Anstrengungen als bisher unternommen werden müssen, um den Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen und Kosten reduzieren zu können. Insbesondere beim Elektroenergieverbrauch ist eine Trendwende herbeizuführen. Eine Fokussierung auf die Senkung des Heizenergieverbrauchs ist nicht ausreichend, wie die vergleichende Betrachtung des jährlichen Aufkommens der verschiedenen Energieträger (überwiegend Fernwärme und Elektroenergie), der damit verbundenen Kosten sowie der resultierenden THG-Emissionen verdeutlicht. Im Rahmen des Projektes wurde herausgearbeitet, wie eine maßvolle energetische Ertüchtigung des überwiegend historischen Gebäudebestandes gelingen und von zusätzlichen Energiesparmaßnahmen flankiert werden kann. Dabei sind den verschiedenen Versorgungsbereichen aus ökonomisch-ökologischer Sicht unterschiedliche Bedeutungen beizumessen. Kurz- bis mittelfristig sollte Ansätzen zur Verringerung des Einsatzes fossiler Energieträger seitens der Elektroenergieversorgung und der Mobilität von Mitarbeitern und Studierenden höchste Priorität zukommen. Dazu gehören:

- die Erhöhung der Effizienz der Kälteerzeugung und Vermeidung steigender Kältebedarfe durch verstärkten sommerlichen Wärmeschutz,
- der Einsatz und effiziente Betrieb energiesparender Rechentechnik und Laborgeräte sowie die erweiterte Ausnutzung der Abwärme,
- eine verstärkte solare Eigenstromversorgung und perspektivisch Sektorenkopplung (Power-to-Cool, Power-to-Mobility),
- die Unterstützung eines effizienten Nutzerverhaltens (inkl. Mobilität) sowie
- ein erweitertes universitäres Energiemanagement mit kontinuierlicher, systematischer Feinanalyse energieintensiver Bereiche.

Trotz der ökologisch vorteilhaften Fernwärmeversorgung sollte auch die Reduktion des Campus-Wärmeverbrauches perspektivisch nicht vernachlässigt werden. Mittel- bis langfristig sollten die Bemühungen hier vor allem abzielen auf

- eine Temperaturabsenkung zur Verringerung der Leitungswärmeverluste,
- die verstärkte Ausnutzung vorhandener bzw. Schaffung neuer Netzstrukturen zur Weiterleitung von Abwärme,
- die erweiterte Nutzung des Rücklauf temperaturniveaus der Gebäude und Netze sowie
- eine automatisierte Fehlererkennung und -diagnose.

Die Senkung des Heizenergiebedarfes kann perspektivisch auch bei Realisierung umfangreicherer Campuserweiterungen gelingen, indem vorhandene und ggf. auszubauende campusinterne Wärmenetze einer erweiterten Nutzung zugeführt und prozessbezogene Wärmequellen konsequent einbezogen werden. Hinsichtlich der energetischen Ertüchtigung des Gebäudebestandes und der Integration erneuerbarer Energien ergeben sich aufgrund der hohen Zahl von Baudenkmalen für die TU Dresden besondere Herausforderungen. Hier wurden konkrete Lösungsvorschläge erarbeitet:

- zur moderaten energetischen Ertüchtigung des Gebäudebestandes unter Berücksichtigung tendenziell wachsender Kühlbedarfe,
- zur Realisierung einer geeigneten zeitlichen Abfolge der Revitalisierungen (Sanierungsfahrplan),
- zur Innendämmung von Denkmalen mit dem Einsatz kapillaraktiver, diffusionsoffener Dämmstoffe und
- zur Integration von Photovoltaik als Indachsystem mit homogener Optik.

Nicht vernachlässigt werden dürfen die mobilitätsbedingten Energieverbräuche und Emissionen der TU Dresden, welche vor allem für Arbeitswege und Dienstreisen der Mitarbeiter in hohem Umfang anfallen. Hier bedarf es neuer Mobilitätskonzepte mit entsprechenden Anreizen für ein energieeffizientes, ökologisch vorteilhaftes Nutzerverhalten. Folgerichtig wird im Fortsetzungsprojekt CAMPER-MOVE der Lehrstuhl für Verkehrsökologie der TU Dresden als weiterer Projektpartner involviert.

#### **2.5.2.4 Die Projektergebnisse**

##### **a) Geplante Ergebnisse**

Die im CAMPER-Projekt durchgeführten detaillierten Analysen brachten signifikante energetische, ökonomische und ökologische Einsparpotentiale zu Tage, welche durch baulich-technische Maßnahmen, Anpassungen bei der Betriebsführung und den Energielieferverträgen sowie ein effizienteres Nutzerverhalten erschlossen werden können. So ergab die mehrjährige Betrachtung der am Zentrum für Energietechnik der TU Dresden befindlichen Gasturbinen-Versuchsanlage, dass dortige Wärmeeinspeisungen und entsprechende Vergütungen infolge einer veränderten Betriebsführung seit 2016 stark gesunkenen sind, bei nahezu unverändert hohem Erdgasbezug. Der fachliche Austausch mit dem Betriebspersonal führte zur Erkenntnis, dass dieser Zustand nur in Teilen auf Erfordernisse der Forschung und Lehre zurückzuführen ist. Es wurde festgelegt, das Versuchskraftwerk künftig in den Wintermonaten mit maximaler Auskopplung von Fernwärme zu betreiben. Die dadurch erzielbaren Energie- und Kostenvorteile bewegen sich im Bereich von 2.500 bis 3.000 MWh/a bzw. 140.000 bis 210.000 Euro/a. Weiterhin könnten durch bedarfsgerechte Anpassung der Verrechnungsleistungen der von der TU Dresden betriebenen Fernwärmestationen insgesamt ca. 16 % der Grundkosten bzw. jährlich 230.000 Euro eingespart werden.

Hinsichtlich der Abwärmenutzung am größten Rechenzentrum wurde herausgearbeitet, dass dort mit Hilfe der dafür errichteten Nahwärmetrasse Fernwärmebezüge von ca. 1.200 MWh/a und damit Energiebezugskosten von ca. 130.000 Euro/a vermieden werden. Die Gesamtkostenbetrachtung ergab, dass sich die Abwärmenutzung bereits

nach 3 Jahren Betriebszeit amortisiert hat. Die Trasse verfügt aktuell über Leistungsreserven von ca. 1 MW, gleichzeitig wird noch ein Großteil der Rechnerabwärme an die Umgebung abgeführt. Gemeinsam mit der Betriebstechnik wurden Überlegungen für eine zukünftig erweiterte Nutzung von Rechnerabwärme angestellt und Umsetzungsvorschläge erarbeitet.

Im Rahmen detaillierter Betrachtungen zur Kälteversorgung konnte gezeigt werden, dass die Kälteerzeugungseinrichtungen vielfach stark überdimensioniert sind und dadurch ineffizient arbeiten, was zu erhöhten Betriebs- und Verbrauchskosten führt. Für verschiedene Kältezentralen wurden Vorschläge zur Bedarfsanpassung des Erzeugerparks mit Umrüstung auf flexiblere Maschinen entwickelt. Weitere Ansätze wie die Integration größerer Speicherkapazitäten zur stärkeren Ausnutzung der kostengünstigen freien Kühlung und zur Nutzung selbst erzeugten PV-Stromes zur (v. a. sommerlichen) Kälteerzeugung wurden untersucht und entsprechende Empfehlungen ausgearbeitet.

Weiterhin wurden für mehrere Gebäude konkrete Umsetzungsvorschläge zur Integration von Photovoltaik erarbeitet. Bei Realisierung dieser ersten Ausbaustufe könnten durchschnittlich ca. 970 MWh/a an elektrischem Strom erzeugt und Strombezugskosten von ca. 290.000 Euro/a eingespart werden. Die PV-Installationen würden sich nach ca. 1/3 ihrer garantierten Nutzungsdauer (20 Jahre) amortisieren.

Zur Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehüllen wurden für repräsentative Bestandsgebäude der verschiedenen Baualtersklassen Sanierungskonzepte erarbeitet und mit Hilfe statischer und dynamischer Berechnungsmethoden energetisch und bauphysikalisch untersucht. Aus den Ergebnissen wurden verallgemeinerbare Sanierungsempfehlungen abgeleitet, welche den Erhalt der (denkmalgeschützten) Bausubstanz sicherstellen, den energetischen und bauphysikalischen Anforderungen gerecht werden und sich in einem sinnvollen ökonomischen Rahmen bewegen. Auf dieser Grundlage konnten die zukünftigen Heiz- und Kühlenergiebedarfe aller Campusgebäude quantifiziert und ein Sanierungsfahrplan erstellt werden. Dieser berücksichtigt neben der Höhe der ermittelten Energieeinsparpotentiale auch bereits geplante Bautätigkeiten und den gegenwärtigen baulichen Zustand der Gebäude.

Die Projektbearbeitung erfolgt in enger Kooperation mit dem Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB) sowie dem Dezernat Liegenschaften, Technik und Sicherheit der TU Dresden (Dezernat 4) als Betreiber der Gebäude und Anlagen. Dies erhöht die Umsetzungschancen der entwickelten Lösungen immens.

#### **b) Bereits erhaltliche Ergebnisse**

- Abschlussbericht Projekt CAMPER, Oktober 2019, hochgeladen auf [www.tib.eu/de](http://www.tib.eu/de) am 17.12.2019, [31]
- Beitrag zum 5. Kongress Zukunftsraum Schule, [32]
- Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2017“, [33]
- Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2018“, [34]
- Beitrag zum TGA-Kongress 2018, [35]
- Fachaufsatz in der Zeitschrift GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, [36]



- Posterbeitrag zum „Aktionstag Energie“ des Umweltmanagements der TU Dresden in Kooperation mit CAMPER, [37]
- Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2019“, [38]
- Beitrag zu Jahrbuch und Tagung „Denkmal und Energie 2020“, [39]
- Fachaufsätze in der Zeitschrift B+B Bauen im Bestand, Ausgaben 02/2020 und 03/2020, [40], [41]
- Projekthomepage: [www.tu-dresden.de/camper](http://www.tu-dresden.de/camper)

### **2.5.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Die Energiekosten der TU Dresden beliefen sich im Jahr 2016 auf ca. 18 Mio. Euro. Hohe Energieverbräuche und -kosten konnten insbesondere für Bereiche mit großem Nutzereinfluss und entsprechenden Eingriffsmöglichkeiten festgestellt werden, wie Versuchsanlagen, Laborgeräte und Rechentechnik. Abschätzungen im Rahmen des CHANGE-Projektes an deutschen Hochschulen zufolge entspricht dies an der TU Dresden einem jährlichen Einsparpotential von ca. 6,5 GWh Fernwärme, ca. 11,7 GWh Elektroenergie und insgesamt ca. 2,7 Mio. Euro an Energiebezugskosten. Folgerichtig wurden gemeinsam mit dem Umweltmanagement der TU Dresden Maßnahmen zur Unterstützung eines effizienten Nutzerverhaltens initiiert, wie die Entwicklung eines Messkoffers mit zugehöriger Web-Plattform für Energiemonitorings am Arbeitsplatz, die Durchführung eines Aktionstages Energie und die regelmäßigen Veröffentlichungen im halbjährlich erscheinenden Umwelt-Newsletter der TU Dresden.

Zur Analyse der Ausgangssituation an der TU Dresden hinsichtlich des Nutzerverhaltens am Arbeitsplatz und bei der Mobilität wurden verschiedene kleinere und größere Nutzerbefragungen und Messprogramme durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden Handlungsempfehlungen zur Unterstützung eines sparsamen Nutzerverhaltens erarbeitet. Diese betreffen im Wesentlichen:

- die Erhöhung der Motivation für ein energieeffizientes Verhalten durch Bereitstellung nutzerspezifischer Informationen und Hilfsmittel,
- die Einführung einer geeigneten Form der verursachergerechten Energiekostenzuordnung und -beteiligung unter Berücksichtigung verschiedener relevanter bzw. limitierender Aspekte (Bewirtschaftung, heterogene Gebäudenutzung, variable Randbedingungen bzgl. Witterung, Forschungsintensität, Studierendenzahl etc., unterschiedliche Energieintensität der verschiedenen Forschungszweige usw.),
- die Bereitstellung von Personal und Messequipment zur Energieberatung sowie
- die Schaffung ökonomischer Anreize und Festlegung von Standards für die Beschaffung und den energiesparenden Betrieb elektrischer Geräte.

### **2.5.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Die Forschungsergebnisse gingen und gehen in verschiedene Lehrveranstaltungen ein (z. B. die Umweltringvorlesungen an der TU Dresden) und tragen so unmittelbar zum Wissenstransfer in die Nutzergruppe der Studierenden bei. Darüber hinaus werden im Rahmen studentischer Arbeiten diverse Fragestellungen zur Campusenergieversorgung

gung, zur rationellen Energieverwendung, zur energetischen Gebäudesanierung, zur Integration erneuerbarer Energien und zum Nutzerverhalten untersucht. Mit Bezug zum CAMPER-Projekt wurden an der TU Dresden bereits über 50 studentische Arbeiten (Diplom-/Masterarbeiten, Studienarbeiten, Projektarbeiten, Oberseminare; Stand Oktober 2019) erstellt. Die Studierenden werden auf diese Weise unmittelbar in die Erkenntnisse und Überlegungen zur Realisierung eines energieeffizienten Campusquartiers einbezogen und mit den Herausforderungen der Praxis konfrontiert. Dabei sind die Aufgabenstellungen und die Betreuung der Arbeiten vielfach interdisziplinär, wodurch die Studierenden fachübergreifende Sichtweisen entwickeln und auf eine kooperative Arbeitsweise von Architekten, Bau- und TGA-Ingenieuren vorbereitet werden.

### **2.5.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Bauliche Umsetzungen erstrecken sich aufgrund der Abhängigkeit von Haushaltplanungen (Land, Universität), der Vielzahl an Beteiligten sowie der Langwierigkeit öffentlicher Ausschreibungs-, Planungs- und Bauprozesse auf verhältnismäßig lange Zeiträume. Innerhalb zeitlich kürzer angelegter Forschungsprojekte ist dies oftmals nicht zu realisieren. Als sinnvoll erweist sich aber in jedem Falle die wissenschaftliche Vorbetrachtung mit Prüfung energetischer, ökonomisch-ökologischer und technischer Aspekte, um auf diese Weise die Entscheidungsfindung in der Universitäts- und Landesverwaltung unterstützen und positiv beeinflussen zu können. Als ebenfalls sehr nützlich erweist sich die Analyse durchgeführter Maßnahmen, wobei von wissenschaftlicher Seite mit Hilfe von Monitoring, Analyse und Optimierungsempfehlungen Unterstützung geleistet sowie Erfahrungswerte zusammengetragen werden können, was im operativen Betrieb der Liegenschaften oftmals nicht möglich ist.

Verteilte Verantwortlichkeiten, teilweise gegensätzliche Interessen und individuell unterschiedliche Herangehensweisen können Entscheidungs-, Planungs- und Umsetzungsprozesse zusätzlich erheblich erschweren. Ein integrativer Ansatz, der die verschiedenen beteiligten Akteure einer Quartiersentwicklung und -planung einbindet, stellt eine besondere Herausforderung dar, ermöglicht es auf der anderen Seite aber, gegenseitiges Verständnis für unterschiedliche Sichtweisen zu entwickeln und Interessenskonflikte aufzulösen. Dazu gehört auch die Realisierung des erforderlichen Wissenstransfers und Austausch von Daten/Dokumenten. Im Gebäudebestand, speziell bei der Quartiersentwicklung und -planung, ist eine gute Datenbasis Grundvoraussetzung für belastbare energetische Analysen und darauf aufbauende Überlegungen bzw. Konzepte zur zukünftigen Energieversorgung. Die Beschaffung, Zusammenführung und Auswertung von Daten hat sich an der TU Dresden als erheblich aufwendiger und komplizierter erwiesen als zunächst erwartet werden konnte. Die Gründe hierfür liegen nicht nur bei der uneinheitlichen, verteilten Datenhaltung und individuellen Hemmnissen bei der Bereitstellung von Informationen, sondern teilweise auch bei eingeschränkten Exportmöglichkeiten aus der verwendeten Gebäudeleittechnik (GLT)-Software. Weiterhin ist nicht selten Insider-/Expertenwissen des Anlagenbetreibers unabdingbar, um Fehlinterpretationen von Daten vermeiden zu können.

## **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Die an der TU Dresden existierenden Bewirtschaftungsstrukturen setzen gegenwärtig wenig Anreize zur Energieverbrauchsreduktion. Der Bauherr (Freistaat Sachsen/SIB) trifft mit seinen Investitionsentscheidungen bei der Modernisierung oder Errichtung von Gebäuden eine Vorhersage zum Energiebedarf, besitzt später aber kaum Einfluss auf die Entwicklung der realen Verbräuche, für deren Kosten er wiederum verantwortlich ist. Der Betreiber (Dezernat 4 der TU Dresden) hat einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Gebäude und Anlagen zu gewährleisten, der den Anforderungen der Nutzer gerecht wird. Gleichzeitig steht er vor der Aufgabe, einen möglichst kostengünstigen und effizienten Betrieb zu realisieren, hat dabei aber nur begrenzten Einfluss auf Bedürfnisse und Verhalten der Nutzer sowie die Investitionsentscheidungen des Bauherrn. Die daraus resultierenden Zielstellungen sind teilweise konträr zueinander, zusätzlich sind die personellen Ressourcen begrenzt. Die Institute, welche Nutzer der Gebäude und Anlagen sind, besitzen durch die von ihnen gemeldeten Bedarfe und das Verhalten ihrer Mitglieder großen Einfluss auf den Energieverbrauch, jedoch ist dieser für sie von untergeordneter Bedeutung. Die Nutzer verantworten ihre Aufgaben im Bereich der Lehre und Forschung, nicht beim Energieverbrauch. Bei der Beschaffung von Versuchsgeräten sind Aspekte wie Kosten, Platzbedarf oder Lieferzeiten für den Entscheidungsprozess häufig relevanter als der spätere Energieverbrauch bzw. die Nachhaltigkeit. Für eine korrekte Einschätzung der für die Forschung tatsächlich erforderlichen Energieinfrastruktur (z. B. Kälteleistungsbedarf) mangelt es den Nutzern zumeist an Sachkenntnis wie auch Informationen zur zukünftigen Bedarfsentwicklung. Zudem fehlen den Nutzern geeignete Informationen, so eine Erkenntnis der campusweiten Befragung, um die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen ihres energierelevanten Verhaltens am Arbeitsplatz richtig bewerten zu können. Zusammengefasst befördern die gegenwärtigen Bewirtschaftungsstrukturen mit verteilten Verantwortlichkeiten und teilweise divergierenden Prioritäten an der TU Dresden eher den großzügigen Umgang mit Energie und Medien.

Die verstärkte Interaktion der beteiligten Personengruppen beinhaltet einen Ansatz zur Verbesserung der Situation. Dazu gehört eine zielgruppengerechte Kommunikation ebenso wie die Schaffung geeigneter Anreizstrukturen zur Förderung eines ökologisch vorteilhaften Anlagenbetriebes und Nutzerverhaltens. Der Betreiber sollte stärker in Investitionsentscheidungen einbezogen werden oder eigene Vorschläge umsetzen können, da er über das entscheidende Insiderwissen verfügt und Schwachstellen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen kann. Partizipation kann auch auf der Ebene der Nutzer/Institute zur Sensibilisierung und Erhöhung der Motivation beitragen. Den Nutzern könnten die Konsequenzen ihres Verbrauchsverhaltens zusätzlich auch in Form von Energiekosten verdeutlicht werden. Dies setzt das Vorhandensein bzw. die Schaffung geeigneter Zählerinfrastrukturen und Berechnungsmethoden voraus.

## **c) Energetische Benchmarks**

Die Gegenüberstellung der Campusenergieverbräuche zu Benchmarks der Literatur (wie den Vergleichswerten des BMWi/BMUB von 2015 oder den Verbrauchskennwerten für Gebäude der VDI 3807-2 von 2014) zeigt, dass die energetische Bewertung nach

bekanntesten Methoden (wie sie auch in den Energieverbrauchsausweisen stattfindet) für Universitätsgebäude heterogener Nutzung im Rahmen einer Energieanalyse nur eingeschränkt geeignet bzw. wenig zielführend ist. Hierfür können mehrere Ursachen identifiziert werden:

- Die für den Energieverbrauch tatsächlich relevante und für die Darstellung im Verbrauchsausweis zu verwendende versorgte Nutzfläche ist bei Nichtwohngebäuden i. d. R. nicht bekannt und oftmals auch nicht einfach zu ermitteln. Stattdessen wird zumeist auf den Wert der Nettogrundfläche zurückgegriffen. Da diese großen Flächen ohne Anschluss an die Energieversorgung (v. a. Heizung/Kühlung) einschließen kann (z. B. Lager, Abstell-/Kellerräume), führt dies bei der Ermittlung und Bewertung flächenspezifischer Energiekennwerte ggf. zu entsprechend niedrigen Ergebnissen und zu einer zu positiven Bewertung.
- Die Zuordnung eines Gebäudes zu einem Gebäudetyp gemäß Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK) ist für Hochschulgebäude teilweise schwierig, da Gebäude nicht selten von Lehrstühlen unterschiedlicher Fachbereiche genutzt werden (wie bspw. Geistes-, Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften) und zusätzlich häufig zentral genutzte Lehrräume (Hörsäle, Seminarräume) enthalten. Auch existiert teilweise nicht für jedes Gebäude ein eigener Energiezähler, wenn die Energiemengen an übergeordneter Stelle erfasst werden (z. B. an der Fernwärme-Anschlussstation, Schnittstelle zum Energieversorger), wo dies abrechnungstechnisch erforderlich ist. Selbst wenn die Flächenanteile unterschiedlicher Gebäude und Nutzungen bekannt sind, so ist die Eignung eines (mit zusätzlichem Aufwand zu bildenden) flächengewichteten Referenzwertes zumindest schwierig, da die Zuordnung gemeinsam genutzter Infrastrukturen und Flächen größere Unsicherheiten beinhaltet.
- Auch zwischen Gebäuden gleichen Typs und gleichen Wärmeschutzstandards ergeben sich aufgrund abweichender Nutzung und Ausstattung sehr unterschiedlich hohe Energieverbräuche. Dies zeigt sich insbesondere im Bereich der Ingenieur- und Naturwissenschaften, wo die Größe, Art und Auslastung von Laboren, Versuchshallen und Serverräumen den Energieverbrauch maßgeblich beeinflusst.
- Für eine Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten müssen die witterungsabhängigen und –unabhängigen Energieverbrauchsanteile ermittelt und unterschiedlich behandelt werden. Praktisch ist dies (u. a. aufgrund unzureichender Zählerinfrastrukturen) zumeist nur eingeschränkt möglich und mit zusätzlichem Aufwand behaftet. Alternativ können diese Anteile auf Grundlage des Zeitverlaufes der Heiz-, Kühl- und elektrischen Lasten innerhalb eines Jahres sowie bekannter saisonaler Unterschiede näherungsweise bestimmt werden.

Die vorgenannten Schwierigkeiten ließen sich auch bei einer erheblich detaillierteren Ermittlung der energieverorgten Nutzflächen und einer entsprechend gewichteten Referenzwertbildung nur teilweise beheben. Nach wie vor würden sich mehr oder weniger großer Unwägbarkeiten und zusätzlich ein erheblicher Mehraufwand ergeben, speziell bei der für Hochschulen typischen und sich regelmäßig ändernden, inhomogenen Gebäudenutzung. Nichtsdestotrotz kann auch näherungsweise die Ermittlung und Einordnung flächenspezifischer Energiekennwerte, insbesondere bei einem größeren

Gebäudegemenge, nützliche Anhaltspunkte für die Priorisierung detaillierterer Betrachtungen in Abhängigkeit vom zu erwartenden Einsparpotential liefern. Im Ergebnis dieser (konventionellen) Energieverbrauchsbeurteilung auf Basis flächenbezogener Kennwerte zeigt sich für die Campusgebäude der TU Dresden sowohl seitens des Heiz- als auch des Elektroenergieverbrauches, dass Großverbraucher teilweise eine mittlere bis gute Bewertung erhalten. Dabei ist für die Priorisierung und auch Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen weniger das spezifische Einsparpotential (in kWh/m<sup>2</sup> oder %) relevant, als vielmehr die Höhe der erreichbaren absoluten Einsparung (in kWh). Die größten absoluten und damit auch ökonomisch leicht zu erschließenden Energieeinsparungen („low hanging fruits“) sind erfahrungsgemäß bei Großverbrauchern zu finden. Daher wird die Klassifikation der Gebäude nach dem Energieverbrauch im vorliegenden Projekt dahingehend erweitert, dass neben dem flächenspezifischen Verbrauchskennwert auch die Gebäudegröße und der absolute Verbrauch in die Bewertung eingehen.

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

##### *Kälteversorgung:*

Im Zuge der energetischen Campusanalyse konnte der in den letzten Jahren enorm gewachsene Kältebedarf als ein Treiber der Stromverbrauchsentwicklung identifiziert werden. Die Kälte wird überwiegend für technologische Prozesse in Laboren sowie zur Kühlung von Serverräumen und Hörsälen eingesetzt. Die Kälteerzeuger arbeiten mit unterschiedlicher Auslastung, nicht nur witterungsbedingt, sondern auch, weil die Kälte teilweise nur temporär bzw. projektabhängig benötigt wird. Gleichzeitig besitzt die Versorgungssicherheit hohe Priorität, da auch sensible Bereiche gekühlt werden (z. B. Tierhaltung in der Biologie). Um die Versorgung vor dem Hintergrund wachsender Anforderungen im Verbund (Redundanzen) besser absichern und mit zentraler Leittechnik überwachen zu können, wurde auf Initiative der Betriebstechnik der TU Dresden 2006 mit dem Aufbau eines Nahkältesystems begonnen. Dabei wurde auch das Ziel verfolgt, die Anzahl dezentraler Kleinkälteerzeuger zu reduzieren, die Energieeffizienz der Kälteerzeugung insgesamt zu erhöhen und der Aufwand für Installation, Betrieb und Instandhaltung von Kälteerzeugungsanlagen zu senken. In den Kältezentralen kommen heute überwiegend elektrische Kompressionskältemaschinen (KKM) zum Einsatz. Die anfangs als Grundlasthersteller mehrheitlich genutzten, fernwärmegetriebenen Absorptionskältemaschinen (AKM) wurden bis auf wenige Ausnahmen in der jüngeren Vergangenheit zurückgebaut bzw. durch Kompressionskältemaschinen ersetzt. Hierfür lagen verschiedene Gründe vor, wie ungünstiges Teillastverhalten der Absorber (häufiges Takten) mit in der Folge erhöhtem Wartungsaufwand und vorzeitigem Verschleiß, eine verkürzte Lebensdauer der Geräte, eine geringe Energieeffizienz und letztlich erhöhte Betriebs- und Verbrauchskosten. Darüber hinaus haben sich im Zuge der Energiewende mit wachsenden, dabei aber fluktuierenden Anteilen regenerativer Erzeuger an der öffentlichen Energieversorgung die Randbedingungen für die städtische Fernwärmeversorgung geändert. Während der städtische Energieversorger den Ausbau der wärmegetriebenen Kälteerzeugung in früheren Jahren förderte, um für sommerliche Wärmeüberschüsse der kontinuierlichen Stromproduktion (GuD-Kraftwerk) zusätzliche

Wärmeabnehmer zu generieren, werden aus Kosten- und Effizienzgründen perspektivisch in Zeiten mit niedrigen Stromerlösen und geringer Wärmenachfrage (also v. a. im Sommer) die bedarfsgeführte, flexible Wärmeerzeugung (mit stufenweise zuschaltbaren Gasmotoren sowie Elektrodenheizkessel für Power-to-Heat) und ein möglichst niedriges Temperaturniveau des Wärmenetzes angestrebt. Absorptionskältemaschinen, mit besonders hohem Wärmebedarf im Sommer und ganzjährig hohem Temperaturniveau auf der Antriebsseite ( $\geq 100$  °C), erweisen sich hierbei als unvorteilhaft. Weiterhin erfordern Absorptionskältemaschinen im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen systembedingt einen deutlich höheren Aufwand zur Rückkühlung (Wärmeabfuhr vom Kondensator an die Umgebung). Die am Kondensator abzuführende Wärme ist bei Absorbieren zwei- bis dreimal so hoch wie bei Kompressoren.

In den Kältezentralen der TU Dresden stattfindende Umrüstungen werden oftmals gleichzeitig für Bedarfsanpassungen der installierten Leistung genutzt, da die im Zuge der Anlagenplanung ermittelten Kältebedarfe zumeist mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Dies ist v. a. darauf zurückzuführen, dass ein erheblicher Teil des Kältebedarfes durch technologische Prozesse entsteht, welche im Rahmen der Forschung projektbedingt variablen Auslastungen unterliegen. Auch haben die Nutzer bzw. Institute im Vorfeld der Planungen Schwierigkeiten, ihren aktuellen und zukünftigen Kältebedarf realistisch einzuschätzen. Zumeist werden auf Basis vorhandener Kälteerzeuger und unter Berücksichtigung von Ausbaureserven großzügige Hochrechnungen vorgenommen. Die tatsächlich erforderliche Gleichzeitigkeit der Kältebedarfe unterschiedlicher Nutzer oder Versuchsanlagen eines geplanten Versorgungsbereiches bzw. Kältenetzes wird dabei i. d. R. vernachlässigt. Auch ist den Nutzern die Relevanz der angeforderten Kaltwasser-Temperaturen häufig nicht bewusst, insbesondere bei einer Versorgung im Verbund, wo die niedrigste Temperaturanforderung das Niveau des gesamten Netzes bestimmt. Zusammengenommen führt dies tendenziell zu energetisch ungünstigen Verhältnissen mit niedrigen Kaltwassertemperaturen und stärkerer Überdimensionierung der Anlagen, was sich auf den späteren Anlagenbetrieb nachteilig auswirkt und den Betreiber (Dezernat 4) vor größere Herausforderungen stellt.

#### *Abwärmennutzung:*

Hinsichtlich der Nutzung prozessbezogener Wärmequellen existieren an der TU Dresden bereits vielversprechende Ansätze und Umsetzungen, wie bspw. die Nutzung von Serverabwärme an den Rechenzentren, die Auskopplung von Wärme und Strom am Versuchskraftwerk und die Nachnutzung sekundärer Heizkreisrückläufe verschiedener Fernwärmestationen. Die bei diesen konkreten praktischen Anwendungen gesammelten Erfahrungen bestätigen, dass die Nutzung von Abwärme energetisch, ökonomisch und ökologisch vorteilhaft gestaltet werden kann und dass Abwärmepotentiale in erheblichem Umfang vorhanden sind. Um bislang ungenutzte Wärmemengen in geeigneter Weise erschließen zu können, müssen zunächst die technischen und ökonomischen Voraussetzungen geprüft bzw. geschaffen werden. Dabei ist die vorhandene Energieinfrastruktur in die Betrachtungen einzubeziehen. Mitunter erweisen sich andere Versorgungsansätze (wie die Nutzung von Fernwärme) insgesamt als vorteilhafter. Die Berücksichtigung der Nutzung von Abwärmequellen bei der Planung neuer Gebäude oder

Anlagen von Beginn an, bspw. durch die Wahl möglichst hoher Kühlwassertemperaturen und niedriger Heizkreistemperaturen, begünstigt die praktische Realisierung bzw. ermöglicht sie teilweise erst. Auch die Gewährleistung der Versorgungssicherheit bei fluktuierendem Aufkommen oder Ausfall der Abwärme spielt eine entscheidende Rolle. Da sich in der Realität oftmals ein von der Planung deutlich abweichender Betrieb oder veränderte Randbedingungen ergeben, sollte die regelmäßige Überprüfung der tatsächlich genutzten Abwärmemengen als Energiemanagementaufgabe verstetigt werden.

#### *Integration von PV im Gebäudebestand:*

Wenn Gebäude aufgrund ihres baulichen Zustandes ohnehin umfassend saniert bzw. ertüchtigt werden müssen, kann dies die Integration von Photovoltaik in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht begünstigen. Als Hemmnis für den Ausbau der Photovoltaik erwiesen sich in der Vergangenheit an der TU Dresden vor allem der Denkmalstatus eines Großteils der Gebäude, Brandschutzbedenken sowie die Tragfähigkeit der Dachkonstruktionen. Denkmalrechtlich sind Solaranlagen grundsätzlich genehmigungs-/erlaubnispflichtig, da mit der Errichtung einer Solaranlage immer eine Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes und Eingriffe in die Substanz eines Baudenkmals einhergehen. PV-Anlagen im Bereich denkmalgeschützter Gebäude sollten optisch unauffällig oder nur auf Anbauten/Nebengebäuden angebracht werden und außerdem der primären energetischen Versorgung des Denkmals dienen. Bisher existiert keine allgemeingültige Rechtslage, weshalb die Genehmigung immer eine Einzelfallentscheidung darstellt. Die Erfahrungen gelungener Umsetzungen in Dresden/Sachsen wie auch anderen Bundesländern (siehe bspw. die vom Berliner Landesdenkmalamt genehmigten PV-Installationen) zeigen, dass sich eine frühzeitige, kooperative Einbindung der verantwortlichen Behörden positiv auf den Entscheidungsprozess auswirkt und sich geeignete Lösungen finden lassen. Für Neubauten in der Umgebung von Denkmalen gilt ebenfalls, dass die Behörden frühzeitig einbezogen werden sollten, damit ggf. gestalterisch auf die Anforderungen eingegangen werden kann.

Der technologische Fortschritt in der PV-Branche ermöglicht es inzwischen, Moduleigenschaften gezielt zu beeinflussen und auf diese Weise gestalterische Aspekte zunehmend besser berücksichtigen zu können. Auch die bauwerks- oder gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) ist heutzutage kein neues Konzept mehr, wird jedoch bei der Planung von Neubauten oder Sanierungsmaßnahmen an Bestandsgebäuden aufgrund mangelnder Kenntnisse hinsichtlich der (Gestaltungs-)Potentiale und Herausforderungen häufig nicht berücksichtigt. Weiterhin wiegen bei Baudenkmalen durch Brandschäden verursachte Verluste besonders schwer, weshalb die Thematik bereits im Vorfeld der Planungen unter Einbeziehung der zuständigen Feuerwehren eingehend zu behandeln ist. Ob eine großflächige Dachbelegung mit Photovoltaik erhöhte Risiken hervorruft und wie diesen ggf. begegnet werden kann, wird in Fachkreisen kontrovers diskutiert. Häufig besteht bei Planern und Entscheidungsträgern Unsicherheit hinsichtlich der Bewertung von PV-Anlagen aus Sicht des Brandschutzes. Daraus resultiert nicht selten eine eher ablehnende Haltung.

#### *Weitere Technologien:*

Die Betrachtungen zu Ausbauszenarien für Photovoltaik und Solarthermie mit Lastganalysen auf Basis stündlicher Mess- und Prognosewerte zeigen, dass beide Strategien zur Gewinnung erheblicher Mengen an erneuerbarer Energie (Strom/Wärme) führen und von der Universität zu jeder Zeit vollständig selbst verbraucht werden könnten. Als ökologisch und ökonomisch vorteilhafter erweist es sich, die verfügbaren (Dach-)Flächen zur PV-Stromgewinnung zu nutzen. Bei zu errichtenden Campusgebäuden sollte wegen des hohen Elektroenergiebedarfes grundsätzlich Photovoltaik integriert werden. Die Installation von Solarthermie-Anlagen ist nur in Einzelfällen mit sehr hohem Warmwasserbedarf zu empfehlen (z. B. zur Trinkwassererwärmung in Sportstätten oder Gießwasser-Erwärmung für Gewächshäuser).

Bei der Errichtung neuer Gebäude sollte in Bezug auf die Wärmeversorgung geprüft werden, inwieweit die Nutzung von Abwärme oder Umweltwärme mittels Wärmepumpen der Fernwärmeversorgung vorzuziehen ist. Grundlage einer solchen Überprüfung bildet die Gesamtschau der nutzerspezifischen Anforderungen an die Medientemperaturen und Heizleistungen, der bestehenden Infrastruktur und der Verfügbarkeit von Erdreich- oder Prozesswärmequellen. Beispielhaft wurde dies für die geplante Erweiterung und Modernisierung des Botanischen Gartens der TU Dresden vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass die Wärmeversorgung aus dem zentralen Fernheiznetz der Stadt Dresden die geringsten primärenergetischen Aufwendungen hervorruft und idealerweise um lokale PV-Anlagen auf verschiedenen Gebäuden des Botanischen Gartens ergänzt werden sollte. Die Nutzung von Serverabwärme würde demgegenüber ca. das Zweifache an Primärenergie benötigen und auch höhere Kosten verursachen. Die dezentrale Wärmeerzeugung mit Gas-Brennwertkesseln oder einer Kombination aus Gas-Brennwertkessel und Gasmotor-BHKW (KWK) würde zu geringeren Gesamtkosten führen, aber ca. das Vierfache an Primärenergie erfordern.

Der Einsatz anderer erneuerbarer Energiesysteme, wie Klein-Windkraft-Anlagen oder präparierte Trittplatten, erweist sich zumindest kurz- bis mittelfristig für den Campus als nicht zielführend. Die damit zu gewinnenden Energieerträge sind bei den örtlichen Gegebenheiten verhältnismäßig gering, so dass diese Techniken kaum zur Verbesserung der Campus-Energieeffizienz beitragen können. Auch die ökonomische Bewertung fällt für diese Techniken aus heutiger Sicht negativ aus.

Bei allen technischen Maßnahmen ist zu berücksichtigen, dass die Wirkung von Rebound-Effekten die Erreichung der Einsparziele gefährden kann. Umso bedeutsamer sind die Realisierung eines umfassenden Energiemanagements und die konsequente Unterstützung eines dauerhaft effizienten Nutzerverhaltens.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die verschiedenen verfügbaren Softwaretools hinsichtlich wesentlicher Kriterien individuelle Vor- und Nachteile besitzen, die in Abhängigkeit der konkreten Aufgabenstellung bei der Auswahl beachtet werden sollten. Bei einigen Tools ist der Bilanzraum hinsichtlich der Größe (maximale Anzahl von Gebäuden) und der betrachteten Energieversorgungsstrukturen sehr eingeschränkt. Der



Detailierungsgrad ist oftmals nicht variabel. Anwendungen mit einem hohen Detaillierungsgrad verursachen tendenziell einen hohen Eingabeaufwand. Bei einigen Tools handelt es sich um zugeschnittene (projektspezifische) Lösungen mit eingeschränkter Verfügbarkeit bzw. Übertragbarkeit. Um den Aufwand für die Betrachtungen eines größeren Gebäudegemenges in vertretbarem Umfang zu halten, werden Komplexität und Variationsmöglichkeiten deutlich verringert. Der Eingabe- und Bearbeitungsaufwand je Gebäude verringert sich dadurch, was aber auch Einschränkungen beim Detaillierungsgrad und der Qualität der Ergebnisse mit sich bringt.

Insgesamt ergeben sich auch für den Hauptcampus als gesamtes Gebäudegemenge bei Anwendung verschiedener Rechentools erhebliche Abweichungen zwischen dem errechneten Heizenergiebedarf und dem real auftretenden Verbrauch. Dies ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, in der Hauptsache folgende:

- Hochschulgebäude sind häufig durch eine heterogene Nutzung gekennzeichnet. In den Institutsgebäuden (so auch an der TU Dresden) befinden sich i. d. R. sowohl Hörsäle und Seminarräume als auch Büro- und Laborräume, je nach Fachrichtung zusätzlich Werkstätten oder Versuchshallen. Eine Zuordnung zu typisierten, zwecks Minimierung des Eingabeaufwandes vordefinierten Gebäudekategorien (Bürogebäude, Hörsaalgebäude, Laborgebäude, Werkstattgebäude) ist daher schwierig und führt zu mehr oder weniger großen Abweichungen zwischen Rechenmodell und Realität.
- Die meisten Bestandsgebäude befinden sich in einem teilsanierten Zustand, häufig wurden Fenster/Dachflächen erneuert, oberste Geschossdecken gedämmt, Beleuchtung teilweise modernisiert, Fassaden nicht saniert. Die pauschale Zuordnung der Gebäude zu Baualtersklassen mit typischen Kennwerten der Gebäudehülle ist daher begrenzt geeignet. Oftmals fehlen entsprechende Bauunterlagen bzw. Dokumentationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen. Die Bestimmung und Eingabe individuell angepasster U-Werte als Alternative zur pauschalen BAK-Zuordnung ist für eine größere Zahl von Gebäuden recht aufwändig und mit größeren Unsicherheiten behaftet.
- Zahlreiche Nichtwohngebäude besitzen größere Flächenanteile mit zeitlich oder räumlich eingeschränkter Beheizung/Kühlung/Lüftung (Hallen, Werkstätten, Labore). Je nach Flächenanteil thermisch eingeschränkt konditionierter Bereiche, dem Vorhandensein entsprechender Informationen und den Eingabe-/Anpassungsmöglichkeiten des Berechnungsmodells ergeben sich dadurch Abweichungen.
- Nichtwohngebäude mit einem hohen technischen Ausstattungsgrad (insbes. Institutsgebäude für Lehre und Forschung im technologischen Bereich) weisen zumeist erhöhte interne Wärmegewinne auf, welche nicht unerhebliche Teile des Heizwärmebedarfes kompensieren und den Kühlenergiebedarf erhöhen. Über die grundsätzliche Gebäudenutzung hinausgehende Informationen, insbesondere Daten zum Elektroenergieverbrauch relevanter Verbrauchergruppen, liegen in der Regel jedoch nicht vor. Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung solcher speziellen Gegebenheiten sind bei einfacheren Planungshilfsmitteln häufig ohnehin sehr begrenzt. Der bei Strombedarf technisch hoch ausgestatteter Gebäude wird von den Planungs-

hilfsmitteln tendenziell zu niedrig berechnet (siehe auch die entsprechenden Ergebnisse einer Feldstudie der dena) und in der Folge dessen Einfluss auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf unterschätzt.

- Die Ausstattung von Nichtwohngebäuden mit Raumluftechnischen Anlagen (RLT) betrifft oft nur Teilbereiche (an der TU Dresden bspw. Hörsäle, Labore, Sanitär-räume), nicht selten kommen in einem Gebäude RLT-Anlagen unterschiedlicher Art zum Einsatz (nur Abluft- oder Zu-/Abluft-Anlagen, mit/ohne Wärmerückgewinnung, mit/ohne Feuchtebehandlung, unterschiedliche Zuluftparameter). Je nach Flächenanteil und Diversität der RLT, Kenntnisstand und Möglichkeiten zur Anpassung des Berechnungsmodells ergeben sich dadurch Abweichungen zur Realität.
- Die Trinkwassererwärmung ist bei Nichtwohngebäuden oftmals von untergeordneter Bedeutung. Häufig existieren nur wenige Zapfstellen in ausgewählten Räumen (z. B. Teeküchen), wo Wasser mit Hilfe von Durchlauferhitzern oder in kleineren Druckspeichern elektrisch erwärmt wird. Gehören zu einem Gebäude Labore mit Forschung im biologischen Bereich oder eine Mensa, werden mitunter aber auch größere Mengen Warmwasser benötigt. Aus einer ungenauen Abbildung der TWW-Versorgung resultieren daher teilweise nicht unerhebliche Abweichungen zur Realität.
- Weitere Differenzen zwischen theoretisch berechnetem Bedarf und realem Verbrauch ergeben sich infolge eines von den Annahmen abweichenden Nutzerverhaltens (Fensterlüftung, Nutzung von Sonnenschutzeinrichtungen, räumlich und oder zeitlich eingeschränkte Beheizung von Räumen etc.).


Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei einem hochtechnisierten Hochschulcampus aufgrund seiner speziellen Eigenschaften Einflussgrößen an Relevanz gewinnen, die bei durchschnittlichen Stadtquartieren (Gebäudegemenge mit Wohn-, Büro- und gewerblicher Nutzung) in der Gesamtheit von untergeordneter Bedeutung sind. Eine Besonderheit von Hochschulgebäuden stellt die heterogene Nutzung der Gebäude mit zeit- und projektabhängig variierender Auslastung dar, welche einen signifikanten Einfluss auf die sich einstellenden Heiz- und Kühlenergiebedarfe sowie die resultierenden Lastverläufe haben. Die getesteten Planungshilfsmittel erweisen sich im gegenwärtigen Zustand als begrenzt geeignet, den Campus der TU Dresden mit ca. 50 größeren Gebäudekomplexen heterogener Nutzung und Ausstattung bei vertretbarem Aufwand mit hinreichender Genauigkeit abbilden und daraus bauliche wie auch versorgungstechnische Entwicklungsszenarien ableiten zu können. Im vorliegenden Projekt wurde daher sukzessive eine eigene Methodik erarbeitet, wobei in Teilschritten verschiedene Tools verwendet wurden.

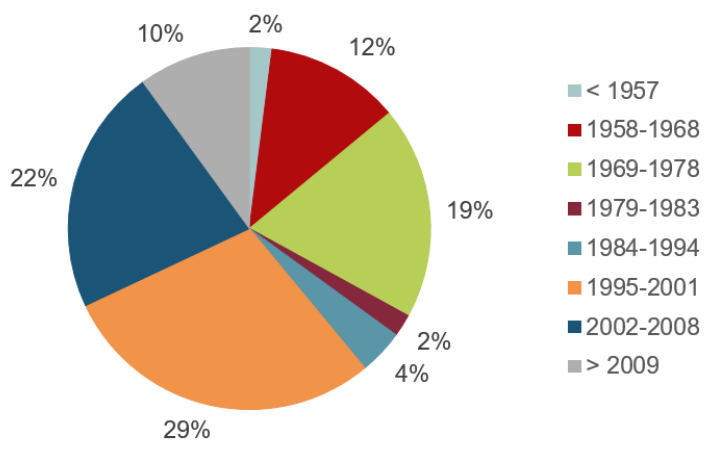
## 2.6 CleanTechCampus Garching

Autorenteam:

- Dipl.-Ing. Benedikt Schweiger, Dr.-Ing. Annelies Vandersickel, Wolf Wedel, M. Sc., Markus Landerer, M. Sc., Dr.-Ing. Konrad Schönleber, Prof. Dr. Harmut Spliethoff (TU München)
- Anna Hermes, M. Sc., Dr. Jens Kuckelkorn, Dipl.-Ing. (FH) Michael Radspieler (ZAE Bayern)
- Dipl.-Ing. Christoph Matschi, M. Sc., Prof. Dr. Isabell Nemeth (Hochschule Ansbach)

### 2.6.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	CleanTechCampus Garching - Entwicklung ganzheitlich optimierter, nachhaltiger und übertragbarer Energiekonzepte am Beispiel des TUM Campus Garching		
<b>Projektbild</b>	 <p>Plan des Campus Garching der TU München. © TU München.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Technische Universität München Boltzmannstr. 15 85748 Garching		
<b>Projektbeteiligte</b>	TU München Lehrstuhl für Energiesysteme (LES)	TU München Lehrstuhl für erneuerbare und nachhaltige Energiesysteme (ENS)	TU München Control of Renewable Energies (CRES)

	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)	Hochschule Ansbach Studien- und Technologiezentrum Feuchtwan- gen (FEU)																			
<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	Summe Bestand: 63 Gebäude davon 39 % Institutsgebäude, 15 % Laborgebäude, 14 % Bürogebäude, 19 % Technikgebäude, 10 % Sonstige; weiterhin eine Mensa und ein Rechenzentrum																				
<b>Neubauten im Projekt</b>	Neubauten während des Projekts: neue Mensa, 2 Institutsgebäude, Studentengebäude „StudiTUM“ Geplante Neubauten bis 2040: 52 Gebäude (Nutzungsarten überwiegend noch unbekannt, bereits festgelegt: 1 Mensa, 1 Hörsaal, 3 Institutsgebäude, 4 Parkhäuser, 3 Wohnheime)																				
<b>Baujahr der Gebäude</b>	<p>Gebäudespezifische Baualtersverteilung</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Baujahr</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 1957</td> <td>2%</td> </tr> <tr> <td>1958-1968</td> <td>12%</td> </tr> <tr> <td>1969-1978</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>1979-1983</td> <td>2%</td> </tr> <tr> <td>1984-1994</td> <td>4%</td> </tr> <tr> <td>1995-2001</td> <td>29%</td> </tr> <tr> <td>2002-2008</td> <td>22%</td> </tr> <tr> <td>&gt; 2009</td> <td>10%</td> </tr> </tbody> </table>			Baujahr	Anteil	< 1957	2%	1958-1968	12%	1969-1978	19%	1979-1983	2%	1984-1994	4%	1995-2001	29%	2002-2008	22%	> 2009	10%
Baujahr	Anteil																				
< 1957	2%																				
1958-1968	12%																				
1969-1978	19%																				
1979-1983	2%																				
1984-1994	4%																				
1995-2001	29%																				
2002-2008	22%																				
> 2009	10%																				
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	Am Campus Garching sind Gebäude unterschiedlichster Bauklassen mit dementsprechend stark variierender Bauqualität vorhanden. Für die Zusammensetzung sei auf das Baualter-Diagramm verwiesen. Sanierungsmaßnahmen wurden bisher noch keine durchgeführt.																				
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	Zentrale Wärmeversorgung mit einer Gasturbine mit Dampfendüsung (Cheng-Cycle), die über ein variables Strom- zu Wärmeverhältnis verfügt (4-5,6 MW <sub>el</sub> , 0,5-6,3 MW <sub>th</sub> ). Zusätzlich verfügt der Campus über zwei Gasheizkessel (je 18 MW <sub>th</sub> ), Fernwärmeleitungen mit einer Länge von 15 km, Absorptionskältemaschinen (3 Maschinen mit insgesamt 3,2 MW <sub>Kälte</sub> ) sowie Kompressionskältemaschinen (insgesamt 11 MW <sub>Kälte</sub> ). Der thermische Bedarf sowie der Kältebedarf werden komplett mit eigenen Anlagen gedeckt, wohingegen zur Deckung des elektrischen Bedarfs etwa die Hälfte extern bezogen wird.																				
<b>Projektlaufzeit</b>	05/2016 – 10/2019																				

<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Gebäudesanie- rung	Betriebsopti- mierung (Digita- ler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwick- lung	Finanzierungs- methode	Nutzersensibili- sierung
	X	X			(X)	XX		
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung				
	X	XX		(X)				
<b>Projekthalt</b>	Am Beispiel des Geländes der TU München am Campus Garching wird eine Methodik zur übergreifenden Optimierung von Strom-, Wärme- und Kälteversorgung entwickelt. Die Methodik wird in Form eines Leitfadens veröffentlicht. Als Optimierungswerk findet die Open-Source-Software urbs Anwendung, welche sowohl eine Ausbau- als auch Einsatzplanung für Energiesysteme ermöglicht. Im Rahmen des Projekts wurde urbs um eine Benutzeroberfläche entwickelt, die in Kombination mit dem Leitfaden eine niederschwellige Anwendung der Methodik erlaubt. Die konkreten Ergebnisse für den Campus werden in Form einer Roadmap zusammengefasst und Empfehlungen für den Aus- und Umbau der Energieversorgung am Campus gegeben.							
<b>Projektmittel</b>	Insgesamt bewilligte Fördersumme (FKZ: 03ET1407A/B): 881.309 € (TUM) + 301.164 € (ZAE) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	keine							
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	Keine							
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt				Nach dem Projekt			
	413.000 m <sup>2</sup>				583.500 m <sup>2</sup>			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt (basierend auf Messungen in 2017)</b>		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten		
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a		
	Wärme	78.000	189	85.500	207	k. A.		
	Kälte	17.000	41	20.000	48	k. A.		
	Strom	90.000	218	122.000	295	k. A.		
Summe	185.000	448	277.500	552	ca. 14 Mio. €			

Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt (berechnet für das Jahr 2020)	Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
Wärme	77.000	132	42.000	102	k. A.
Kälte	10.500	18	12.000	29	k. A.
Strom	106.500	183	129.000	312	k. A.
Summe	194.000	333	261.000	443	ca. -15 % gegenüber „Weiter so“
<p>Ausgewähltes Szenario der sektorgekoppelten (Strom, Wärme, Kälte), intertemporalen (2017–2040) Energiesystemoptimierung: CO<sub>2</sub>abs_SN80-CW55_biome_PV+</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub>abs: Absolute CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele: keine Berücksichtigung des stetigen Wachstums des Campus, in 2030 -55 % gegenüber 1990</li> <li>- SN80-CW55: Ambitionierte Temperaturabsenkungen für die beiden Fernwärmenetze in 2030: Vorlauftemperatur Stammnetz 80 °C (aktuell 125 °C) und Campus West 55 °C (geplant 80 °C)</li> <li>- biome: Option des Biomethanbezugs</li> <li>- PV+: hohes Flächenpotential für Installation von PV-Anlagen</li> <li>- Prognostizierte Energiebedarfszunahmen von 2017 bis 2030: Strom + 61,5 %, Wärme + 7 %, Kälte + 68,5 %</li> <li>-&gt; -35 % direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2030 gegenüber einem „Weiter so“-Szenario</li> </ul>					
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<p>Eigene Planungstools:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimierungsframework urbs (Open Source): Ausbau- und Einsatzplanungswerkzeug</li> <li>- Eigene Preprocessing-Tools, wie bspw. Fernwärmenetzauslegungstool, Tool zur Erstellung von bspw. stündlichen Strahlungszeitreihen</li> </ul> <p>Externe Tools:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- QGIS: Geoinformationssystem-Software</li> <li>- AX3000: statische und dynamische Energieberechnungen auf Gebäudeebene</li> <li>- IDA ICE: dynamische Energieberechnungen auf Raumebene</li> </ul>				
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energiesystemoptimierungssoftware urbs: <a href="https://github.com/tum-ens/urbs">https://github.com/tum-ens/urbs</a></li> <li>- Vortrag auf dem MSE-Kolloquium am 13.7.2017: With innovative highlights towards a sustainable TUM Campus</li> <li>- Vortrag auf dem Projektleitertreffen EnergieWendeBauen in Potsdam am 7.5.2019: Sektorkopplung in der Quartiersplanung am Beispiel des Garchinger Campus der TU München</li> <li>- Vortrag auf dem MSE-Kolloquium am 1.8.2019: Comparison of different Development Scenarios for the Energy System of the TUM Campus Garching</li> </ul>				

## 2.6.2 Projektbeschreibung

### 2.6.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Der Forschungsstandort der TUM in Garching ist mit über 15.000 Studierenden und 3.500 Mitarbeitern eines der größten und forschungsintensivsten Universitätsgelände in Deutschland. Der Campus zeigt dabei ein stetiges und zügiges Wachstum auf. In den Jahren 2009 bis 2016 hat die Personenanzahl um mehr als die Hälfte – mit steigender

Tendenz – zugenommen. Bei der Größe der bebauten Fläche zeigt sich ebenfalls ein zunehmender Trend, der für die Zukunft mit 145.000 m<sup>2</sup>NGF vorgesehenen Neubauten bestätigt wird. Dies entspricht einem Wachstum von ca. 40 % und bietet eine einzigartige Gelegenheit, neben einer Optimierung der bestehenden Energieversorgung auch ihren Ausbau innovativ zu gestalten.

Auf dem Hochschulgelände befinden sich eine Vielzahl typischer Universitätsgebäude mit unterschiedlichen Nutzungen und Baualterklassen. Dabei handelt es sich um weitgehend in massiver Bauweise errichtete Nichtwohngebäude mit großen Hallen und heterogener Gebäudetechnik. Ein Drittel der Gebäude wurde vor der ersten Wärmeschutzverordnung (WSchV 1984) gebaut und insgesamt sind zwei Drittel älter als die erste Energieeinsparverordnung (EnEV 2002). Damit sind die Gebäude beispielhaft für große kommunale und gewerbliche Objekte in städtischen Quartieren.

Bei der Nutzungsstruktur der Campus-Gebäude zeigt sich eine hohe Relevanz der Forschungsaktivitäten. Mit dem Großprojekt Galileo (momentan im Bau) wird der Campus um ein Kongresszentrum mit Hotel, Wohnmöglichkeiten, Restaurants und diversen Einkaufs- und Entspannungsmöglichkeiten ergänzt. Sowohl im Hinblick auf die Bauweise als auch auf die Nutzung der Gebäude ist der Campus Garching repräsentativ für ein komplexes und heterogenes Mischgebiet mit starker Präsenz des GHD-Sektors (Gewerbe, Handel und Dienstleistung).

Auch die Stromverbrauchsprofile sind typisierend für den GHD-Sektor. Die starke Präsenz der Büros und Forschungsbetriebe führt zu einem typischen Verbrauchsprofil mit Tagesspitzen an den Werktagen. Der TUM Campus verfügt zudem über einen heterogenen Bestand an Versuchsanlagen, zu denen auch großtechnische Anlagen mit einer Anschlussleistung von ein bis drei MW gehören. Diese werden zu stark unterschiedlichen Zeitpunkten genutzt und führen zu hohen Lastspitzen.

Das Herzstück der Energieversorgung ist eine flexible Cheng-Cycle-KWK-Anlage. Zusammen mit zwei Gaskesseln deckt der Cheng-Cycle momentan 100 % der Wärmeversorgung und in etwa die Hälfte der Stromversorgung ab. Der restliche Strom wird bei dem lokalen Energieversorger zugekauft. Schon heute könnte der Kältebedarf teilweise flexibel aus Strom (Kompressionskältemaschinen) oder Wärme (Absorptionskältemaschinen) bereitgestellt werden. Sowohl das Fernwärmenetz, das Heizkraftwerk als auch das Stromnetz gehören der TUM und werden von ihr betrieben. Der Wärmeverbrauch lag im Jahr 2016 bei 72,5 GWh und der Stromverbrauch bei 82 GWh. In diesen beiden Jahresenergiemengen ist die Energie für eine Kälteerzeugung von etwa 22 GWh enthalten.

### **2.6.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Die Roadmap für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems wird in Eigenverantwortung des Lehrstuhls für Energiesysteme der TUM in enger Zusammenarbeit mit dem TUM Immobilienmanagement entwickelt. Um einen guten Informationsfluss zu gewährleisten, finden regelmäßige Abstimmungen mit den beteiligten Mitarbeitern aus dem Bereichen bauliche Entwicklungsplanung, Gebäudemanagement und Energieversorgung statt.

In regelmäßigen Steuerkreis- und Projektsitzungen informieren sich die Hochschulleitung, das staatliche Bauamt München II und die beteiligten Bayerischen Ministerien (Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr – oberste Baubehörde und Staatsministerium für Bildung und Kultur, Wissenschaft und Kunst) über den Fortschritt des Projektes und beraten über die nächsten Schritte.

Die TUM hat das Projekt personell unterstützt und ermöglicht, dass die notwendigen Informationen wie Pläne, Verbräuche, etc. dem Projekt zeitnah zur Verfügung stehen. Ein Überblick der Zuständigkeiten für diese Datenbeschaffung gibt Tabelle 7. Eine finanzielle Beteiligung bei der Umsetzung der Roadmap in einer nächsten Phase wird momentan sowohl mit der Hochschulleitung als auch mit den betreffenden Ministerien diskutiert.

Tabelle 7: Zuständigkeiten an der TU München für die Datenbeschaffung.

Grundlagen	Verantwortliche / Datenbeschaffung
Gebäudepläne (u. a. GIS-Pläne)	Staatliches Bauamt München II (Stadt München) + eigene Gebäudebegehungen
Pläne des Fernwärmenetz (aktueller Stand + Weiterentwicklung im Rahmen der Erweiterung Campus West) + vorhandene Anlagentechnik (Hausübergabe + Kälte)	Technischer Betrieb TUM + Studienbüro Rögelein & Partner + eigene Gebäudebegehungen
Stromnetz-Pläne	Technischer Betrieb TUM
Energieverbräuche und -kosten	Technischer Betrieb TUM

#### **b) am Projekt**

Das Projekt ist in Arbeitspakete untergliedert, die von den einzelnen Projektpartnern bearbeitet werden. Aufgrund der hohen Interdisziplinarität der Aufgaben ist eine strikt getrennte Bearbeitung weder möglich noch wünschenswert. Durch regelmäßige Projekttreffen aller Projektteilnehmer lassen sich die Fortschritte abgleichen und die zukünftige Vorgehensweise kann koordiniert werden. Ergänzt werden diese Termine durch weitere Projekttreffen fachspezifischer Gruppen, die teilweise auch der Einbindung externer Partner wie bspw. dem Staatlichen Bauamt München 2 (StBAM2), dem Ingenieurbüro Rögelein + Partner und der TUM Verwaltung dienen. Die Arbeitspakete mit dem zugehörigen Koordinator sind in Tabelle 8 aufgelistet.



Tabelle 8: Arbeitspakete und Zuständigkeiten

Arbeitspaket und Titel	Koordination
AP1: Spartenübergreifende Optimierung	ENS
AP 2: Bedarfsszenarien – Lastmanagement und Optimierungspotentiale der Gebäude	HANS
AP 3.1: Netze – Strom	CRES
AP 3.2: Netze – Wärme/Kälte	ZAE
AP 4: Erzeuger/Speicher – Strom/Wärme/Kälte	LES
AP 5: Koordination und Schnittstellenarbeit	LES

### c) Organisationsstruktur

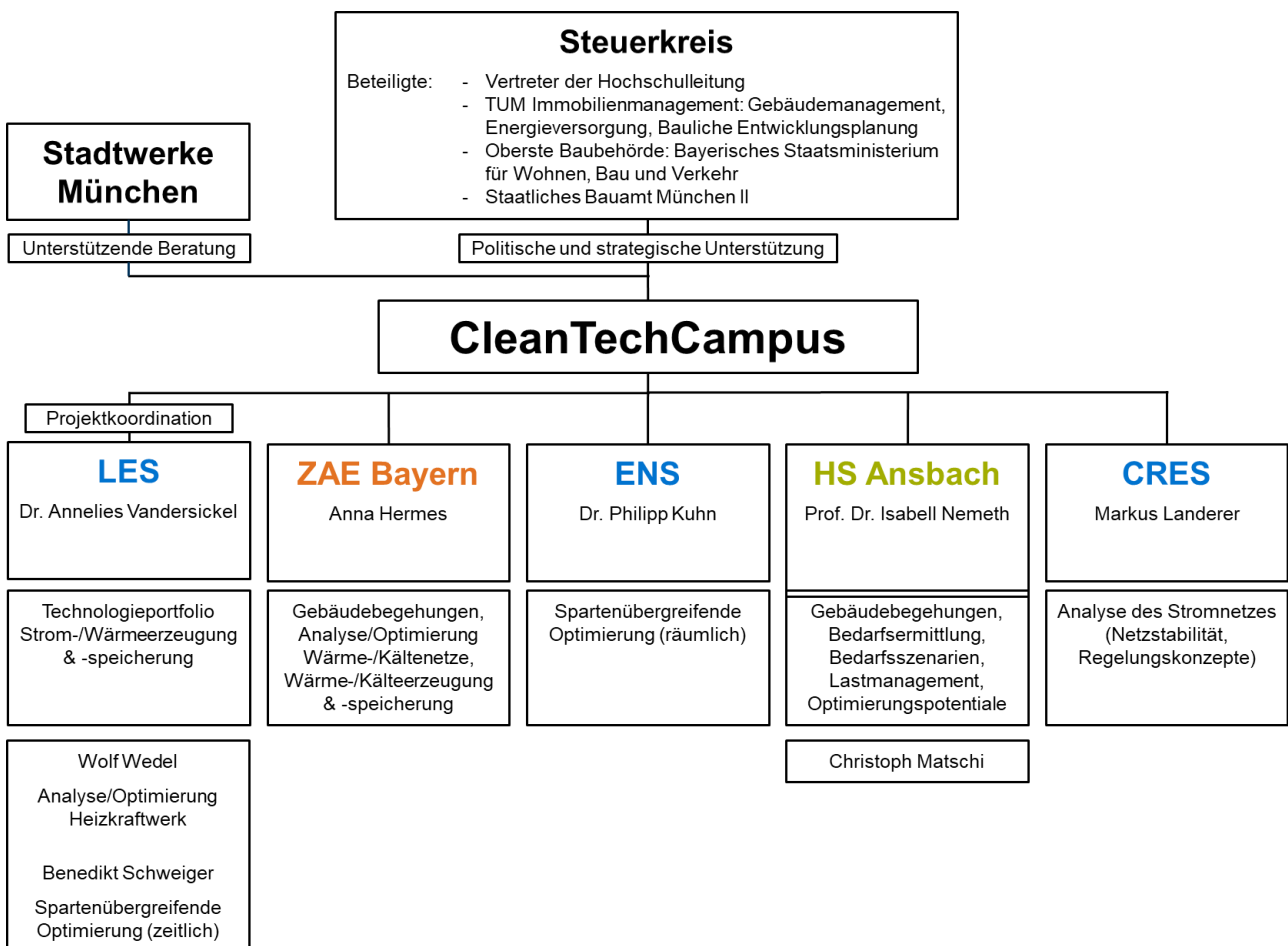


Bild 17: Organisationsstruktur CleanTechCampus Garching. © TU München.

### 2.6.2.3 Der Projektinhalt

#### a) Projektziele

1. Ziel: Entwicklung einer Methodik zur gemeinsamen Optimierung gekoppelter Strom-, Wärme- und Kältesysteme unter Berücksichtigung der Verbraucher, Erzeuger und Speicher.
2. Ziel: Anwendung der entwickelten Methodik zum Entwurf eines robusten Energienetz- und Versorgungsausbauplans für den TUM Campus Garching als Beispiel für heterogene und hochkomplexe Mischgebiete; dabei wird sowohl eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs als auch ein erhöhter Anteil erneuerbarer Energien angestrebt.
3. Ziel: Anwendung der Methodik zur *modellhaften Bewertung des Einsatzes innovativer Technologien und Lösungen in einem stark gekoppelten Energiesystem*, um diese dann in der nächsten Phase in Pilotprojekten am Campus zu demonstrieren.

#### b) Projektarbeiten

Als Vorbild eines hochkomplexen GHD-Gebiets (Gewerbe-Handel-Dienstleistungs-Gebiet) soll für den stetig wachsenden Campus Garching der TU München ein innovatives Energiekonzept mit gekoppelter Betrachtung von Gebäude-, Strom-, Wärme- und Kälteversorgung entwickelt werden. Aus dieser Kopplung ergeben sich neue Technologieoptionen sowie einzigartige Synergien und es lassen sich – am Beispiel des TUM Campus Garching – wichtige ‚Transformatoren‘ in zukünftige High-Tech Parks identifizieren. Die Projektziele sind das Erstellen einer Roadmap für den Campus Garching, die Erarbeitung einer übertragbaren Methodik für diese Konzeptplanung bzw. -entwicklung und die gewonnenen Erkenntnisse zum Einsatz neuartiger Technologien auf andere Gebiete übertragen zu können. Dabei wird sowohl eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs als auch ein erhöhter Anteil erneuerbarer Energien angestrebt.

Das entstehende System soll langfristig durch den Einsatz einer einzigartigen Kombination innovativer Technologien den Forschungscampus Garching als Leuchtturm der Energiewende repräsentieren. Der Aufbau als Living-Lab soll den Campus sowohl für Forschungs- als auch Lehrzwecke öffnen und ein Beispiel für zukunftsorientiertes Handeln darstellen.

#### c) Projektmittel

Insgesamt bewilligte Fördersumme: 881.309 € (TUM) + 301.164 € (ZAE)

davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €

#### d) Projektstand

Erstes Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Methodik zur gemeinsamen Optimierung gekoppelter Strom-, Wärme- und Kältesysteme unter Berücksichtigung der Verbraucher, Erzeuger und Speicher. Die Methodik basiert auf einem iterativen Zusammenarbeiten der bei den Projektpartnern schon größtenteils vorhandenen Tools. Im Rahmen der ersten Projektperiode wurden die Grundsteine dieser Methodik zwischen den Partnern abgestimmt und festgelegt:

- Die vorhandenen Tools wurden allen Partnern vorgestellt und erklärt, die Synergien und der Zusatznutzen jedes einzelnen Tools weiter konkretisiert sowie die Schnittstellen festgelegt.
- Diese Schnittstellen und die Zusammenarbeit der Projektpartner sind in Ablaufdiagrammen spezifiziert worden.
- Zum Austausch der Informationen und um sicher zu stellen, dass jeder Partner und jedes Modell die gleiche Datengrundlage nutzen, wurde eine GIS-Datenbankstruktur und eine systematische Ordnerstruktur zur Ablage der Messdaten aufgebaut.

Zweites Ziel ist die Anwendung der Methodik zur Entwicklung einer Roadmap für die Weiterentwicklung des TUM Campus Garching. Dazu wurde die oben genannte Datenbank und Ordnerstruktur ausgefüllt.

Die Zusammenarbeit mit den Akteuren am Campus (Technischer Betrieb, Staatliches Bauamt, Entscheidungsträger) wurde vertieft und erste explizite Vorschläge zu möglichen Verbesserungen des Energiesystems gemacht. Gleichzeitig wurden durch die weitere Softwareentwicklung die Grundsteine für die intertemporale Optimierung – eine Optimierung des Energiesystems über einen längeren Zeitraum, bspw. bis 2040 – und die räumliche Betrachtung gelegt. Zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit und weil eine Verwendung des Programms RIVUS – was eigentlich für die räumliche Optimierung vorgesehen war – zusätzliche Hemmschwellen bei zukünftigen Benutzern aufbauen würde, wurde die räumliche Optimierung in urbs integriert. Dadurch müssen Nutzer sich nur in eine Software einarbeiten und der iterative Prozess wird vereinfacht. Auf der Detailebene wurde die Darstellung des Heizkraftwerks in Simulationsmodellen abgeschlossen und validiert sowie Netzsimulationen zur hydraulischen Charakterisierung und zur Verlustbestimmung innerhalb des Fernwärmenetzes durchgeführt. Die GIS-Datenbank wurde fertiggestellt und um die prognostizierten Bedarfe in unterschiedlichen Szenarien erweitert. Die aus dem beschriebenen Preprocessing gewonnenen Daten und Erkenntnisse wurden genutzt, um das Energiesystemoptimierungsmodell zu detaillieren, damit dieses alle relevanten Technologien und Gesetzgebungen beinhaltet, die für die Energiesystemoptimierung innerhalb eines Quartiers maßgebend sind. Dafür wurde das Model um folgende Punkte erweitert:

- um weitere innovative Technologien, wie bspw. HT-WP (Hochtemperatur-Wärmepumpe), KWKK-Anlage (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) für das Fakultätsgebäude Maschinenwesen, Biomassevergassungs-Anlagen, etc.
- detaillierte Abbildung der gegenwärtigen Gesetzeslage: Integration des individuellen Netzentgelts, der neuen Staffelung der EEG-Umlage (Erneuerbaren Energien Gesetz) für Anlagen mit einer elektrischen Leistung zwischen 2 MW<sub>el</sub> und 10 MW<sub>el</sub>, sowie der Stromsteuer.
- Aufteilung des Wärmebedarfs in zwei Bedarfe: Maschinenwesen (MW) und Stammnetz, um die KWKK-Anlage bei der niedrigeren Vorlauftemperatur (VL) des MW-Gebäudes abbilden zu können.
- Aufteilung des Kältebedarfs in MW, Chemie und Campus: MW, Chemie, da hier AKMs installiert sind bzw. weiteres Potential besteht -> AKMs können nun nur noch Kälte für diesen Kälteknotten liefern.

Diese Knotenaufteilung ermöglicht eine intertemporale Optimierung unter Berücksichtigung räumlicher Einschränkungen, welche mit einem detaillierten Knotenmodell aufgrund des Rechenaufwands nicht möglich wäre. Das Modell wurde genutzt, um intertemporale Szenarien zu berechnen, wodurch die Basis für die Roadmap zur zukunfts-fähigen Energieversorgung am Campus gelegt wurde.

**Aktueller Stand:**

Die Methodik der gemeinsamen Optimierung wurde damit fertig gestellt und am Beispiel des TUM Campus Garching getestet. Das entwickelte Optimierungsmodell sowie ein Leitfaden zur Nutzung der Methodik werden momentan dokumentiert und nach Abschluss des Projektes öffentlich zur Verfügung gestellt.

Die berechneten intertemporalen Szenarien für die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung am Campus wurden den beteiligten Akteuren vorgestellt und momentan in Form einer Roadmap aufbereitet. In Rahmen dessen wurde auch die Rolle innovativer Pilottechnologien, wie HT-WP, KWKK und Brennstoffzelle, untersucht und konkrete Vorschläge für deren Umsetzung ausgearbeitet.

**2.6.2.4 Die Projektergebnisse**

**a) Geplante Ergebnisse**

1. Leitfaden und Methodik zur Energiesystemoptimierung von Quartieren
2. Roadmap für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems

**b) Bereits erhältliche Ergebnisse**

Energiesystemoptimierungssoftware urbs: <https://github.com/tum-ens/urbs>

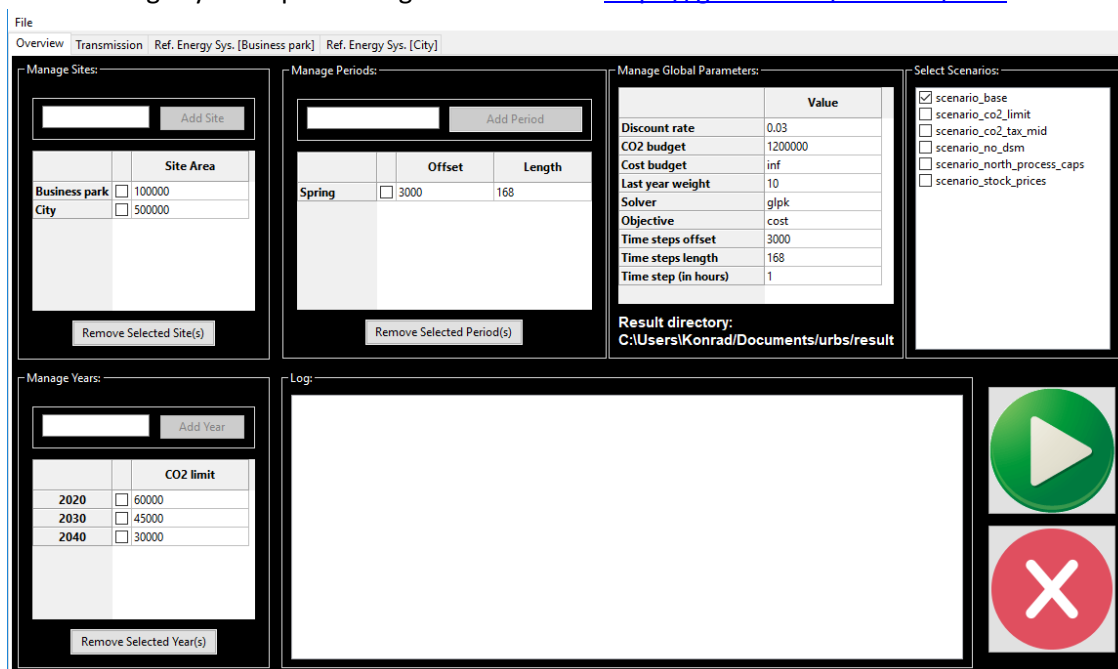


Bild 18: Eingabemaske für die Konfiguration allgemeiner Parameter der Energiesystemoptimierung. © TU München.

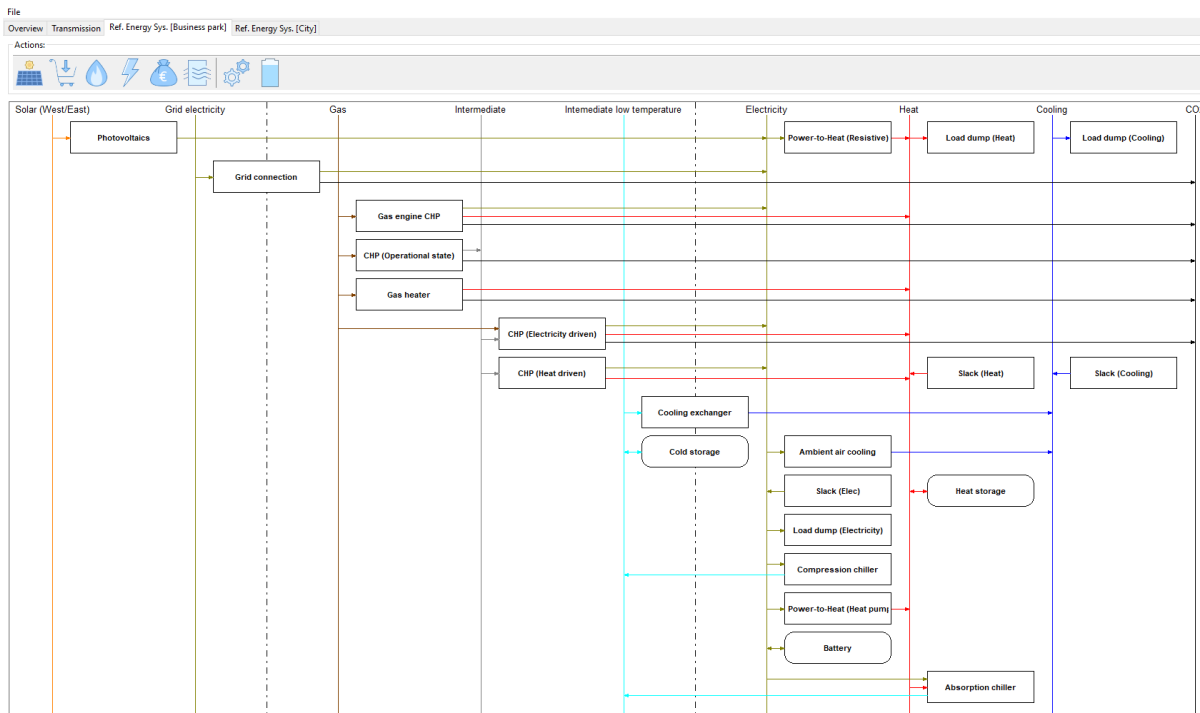


Bild 19: Eingabemaske für die Konfiguration der technoökonomischen Parameter der Energiesystemoptimierung. © TU München.

### 2.6.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung

Nachdem der Technische Betrieb als Betreiber aller technischen Anlagen am Campus in ständigem, direkten Kontakt zu den Nutzern – den Studenten und Mitarbeitern – steht, fanden zahlreiche Treffen mit dem Technischen Betrieb statt. In diesen Treffen wurden stets auch Einschätzungen, nicht selten Bedenken, der Gebäudebetreiber sowie der Nutzer diskutiert. Einige Ergebnisse dieser Diskussionen wurden direkt oder auch als Annahmen von Entwicklungsszenarien in das Energiesystemmodell integriert. Beispiele hierfür stellen u. a. die Restlaufzeiten von Bestandsanlagen und realistische Zeitpläne von Umbaumaßnahmen dar.

Verbesserungsvorschläge von Nutzern des Optimierungsframeworks urbs wurden bei der Weiterentwicklung der Software ebenfalls berücksichtigt. Auf diese Weise wurden sowohl die Installation als auch die Bedienung von urbs deutlich nutzerfreundlicher gestaltet und zusätzliche Eingabeparameter, wie bspw. einen pro Zeitschritt variierenden Multiplikationsfaktor für die Energiewandlungsprozesse, eingeführt.

### 2.6.2.6 Umsetzung in die Lehre

Das Projekt wurde in mehreren Lehrveranstaltungen verwendet. Unter anderem wurde die Nutzung des Optimierungstools urbs und die Modelle des Energiesystems des Campus Garching in einer Summer School, im Rahmen mehrerer Studien- und Abschlussarbeiten sowie für Praktika und Seminare an der Universität verwendet.

### **2.6.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Der Austausch mit dem Betriebspersonal ist für eine praxisnahe Einschätzung der durchgeführten Energiesystemanalysen sehr wichtig. Allerdings entscheidet das Betriebspersonal nicht über die zukünftige Ausrichtung der Energieversorgung, vielmehr werden diese von Entscheidungsträgern um eine Einschätzung zu vorgeschlagenen Entwicklungspfaden gebeten. Daher ist es sehr hilfreich, wenn an der Universität eine Stelle für eine/n Energie- oder Nachhaltigkeitsmanager/in bereits vorhanden ist bzw. geschaffen wird. Erfolgreiche Beispiele an anderen Universitäten zeigen, dass diese Person in der Hierarchie möglichst weit oben angesiedelt sein sollte und in erster Linie koordinierende Aufgaben zu übernehmen hat. Experten im Bereich der Energieversorgung finden sich an fast allen Universitäten, diesen sollte die Möglichkeit eines regelmäßigen Austauschs gegeben werden und ihre Vorschläge sollten die Entscheidungsträger erreichen. Neben dem direkten Weg zu Entscheidungsträgern gewährleistet die Schaffung einer Energiemanagementstelle zudem eine über einen längeren Zeitraum konsistente, nachhaltige Energiepolitik.

An der TU München ist eine solche Personalstelle bisher leider noch nicht vorhanden, soll aber im Zuge der Umsetzungsphase geschaffen werden.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Bezüglich der Umsetzung von Maßnahmen wurde in zahlreichen Gesprächen immer wieder auf die Schwierigkeit der Beantragung von Investitionsgeldern hingewiesen. Diese müssen im Gegensatz zu laufenden Kosten für die Energieversorgung beim Freistaat Bayern beantragt werden. Hierfür fehlt häufig Personal bzw. die Erfahrung beim Verfassen solcher Anträge. Eine vielversprechende Lösung scheint die Kopplung dieser Anträge an größere Bauvorhaben zu sein.

Nachdem sich viele der in der Energiesystemoptimierung betrachteten Maßnahmen schon nach wenigen Jahren ökonomisch amortisieren und zudem die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren, sollten diese Investitionen auch ohne die Kopplung an andere Projekte getätigt werden können. Hier bietet sich eine Aufteilung der reduzierten laufenden Kosten infolge der Investition für den Freistaat Bayern und der Technischen Universität München an.

Eine weitere Option könnte die Beteiligung von Mitarbeitern und Studenten an Investitionen sein, bspw. um Photovoltaik-Anlagen (PV) auf den Dächern zu installieren. Auf diese Weise könnte die Universität bei geringeren Kosten den CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduzieren ohne Investitionskosten beantragen zu müssen. Mitarbeiter und Studenten würden hierfür eine lukrative Verzinsung erhalten und könnten sich direkt an der Energiewende beteiligen.

#### **c) Energetische Benchmarks**

In Anbetracht der ambitionierten Reduktionsziele an Treibhausgasen der Bundesregierung sollten energetische Benchmarks stets an den Treibhausgas-Ausstoß gekoppelt werden. Das Heranziehen des Primärenergiebedarfs wird diesem Anspruch nicht gerecht, da bspw. der Primärenergiefaktor von Steinkohle jenem von Erdgas entspricht,

die Treibhausgas-Emissionen allerdings um ein Vielfaches höher liegen. Diese Diskrepanz fällt beim Vergleich von Braunkohle mit Erdgas noch viel gravierender aus. Daher sollten für die ökologische Bewertung stets die Treibhausgas-Emissionsfaktoren – am besten basierend auf Lebenszyklusanalysen – verglichen werden.

Werden KW(K)K-Anlagen (Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung) betrachtet, sollte der gesamte Treibhausgas-Ausstoß für die Deckung des Strom-, Wärme- und Kältebedarfs optimiert werden. Eine separate Betrachtung der einzelnen Sektoren ist deutlich komplexer und deren Ergebnisse sind nur bedingt aussagekräftig, da diese stark von den getroffenen Annahmen – bspw. der Verteilung der Treibhausgas-Emissionen bei KWK-Anlagen auf den elektrischen und thermischen Output – abhängen.

Als Zielfunktion der Energiesystemoptimierungen für den Campus Garching wurde die Minimierung der Gesamtkosten für den betrachteten Zeitraum – 2017 bis 2040 bei den intertemporalen Optimierungen – definiert, wobei in den meisten Szenarien CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele als einzuhaltende Randbedingungen vorgegeben wurden.

Für den Garchinger TUM-Campus wurden als Treibhausgasreduktionsziele jene der Bundesregierung übernommen. Um den Minderungswert für das Jahr 2017 gegenüber 1990 festzulegen, wurde die Deckung des heutigen Energiebedarfs mittels den aktuell installierten Energiewandlungsprozessen mit denen der in 1990 vorhandenen Anlagen verglichen. Eine Integration der historischen Entwicklung der Studenten- und Mitarbeiterzahlen bzw. der Flächenentwicklung für den Campus Garching ergab keine aussagekräftigen Kennwerte. Ausgehend vom festgelegten Emissionsreduktionswert für 2017 wurden für die Optimierung bis in Jahr 2040 sowohl die Einhaltung der absoluten Treibhausgasgrenzwerte der Bundesregierung als auch die flächenspezifischen – mit Berücksichtigung des prognostizierten Flächenzuwachses des Campus – untersucht. Folglich ergeben sich für 2030 bzw. 2040 eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 55 bzw. 70 % gegenüber dem Jahr 1990.

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Bei den durchgeführten Energiesystemoptimierungen haben sich einige Technologien stets sowohl als wirtschaftlich als auch ökologisch sinnvoll erwiesen. Zu nennen sind hier in erster Linie PV sowie für eine Übergangszeit von ca. 15 Jahren Gasmotoren-KW(K)K-Anlagen. Die Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Strombereitstellung kann – sofern diese nachhaltig gewonnen wird – insbesondere bei hohen Temperaturniveaus der Wärmeversorgung einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele liefern.

Die Integration von erneuerbarer Wärme, bspw. der Abwärme von Hochleistungsrechenzentren oder der thermischen Energie eines Geothermie-Reinjektionsmassenstroms mit Hilfe von Wärmepumpen wird bei sehr ambitionierten CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen interessant, sofern die Temperaturniveaus der Fernwärmeversorgung nicht allzu hoch liegen (ca. 80 °C Vorlauf). Fallen die Temperaturen höher aus, stellen sog. Hochtemperaturwärmepumpen eine Alternative dar. Allerdings weisen diese gegenüber Standardwärmepumpen höhere Investitionskosten auf und aufgrund des höheren Temperaturhubs niedrigere Jahresarbeitszahlen. Mit Hinblick auf die Notwendigkeit einer Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien zur Einhaltung der nationalen Klimaziele sollten die Temperaturen der Wärmeversorgung grundsätzlich so

ambitioniert wie möglich reduziert werden. Auf diese Weise lassen sich erneuerbare Wärmeversorgungsanlagen (Geothermie, Solarthermie, Abwärmequellen, Wärmepumpen) leichter in ein Energiesystem integrieren und fossil befeuerte Anlagen weisen höhere Wirkungsgrade auf.

Beim Campus Garching übersteigt der Strombedarf – insbesondere zukünftig – den Wärmebedarf deutlich, weshalb vor allem rein elektrische Energieerzeugungsanlagen, bspw. PV, und KWK-Anlagen mit einem hohen Strom-Wärme-Verhältnis wirtschaftlich interessant sind.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Die Abbildung des Energiesystems des Campus Garching mit Hilfe der rein linearen Optimierungsoftware urbs ist bis zu einem bestimmten Detaillierungsgrad gut darstellbar, wobei aufgrund der Einschränkungen der linearen Programmierung für eine sehr detaillierte Darstellung häufig auf Zwischenprozesse zurückgegriffen werden muss. Sollen Prozesse noch präziser abgebildet werden, bspw. mit einem exakten Teillastverhalten oder für mehrere unterschiedliche Netztemperaturen, bietet sich ein gemischt ganzzahliges Energiesystemoptimierungsmodell an.




## 2.7 Living Lab Energy Campus Jülich

Autorenteam:

- Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller, Michael Mans, M. Sc., Peter Remmen, M. Sc. (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik (EBC))
- Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck, Eric Spinnraker, M. Sc., Daniel Koschwitz, M. Sc. (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D)

### 2.7.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	EnEff:Stadt, EnEff:Campus: LivingRoadmap - Entwicklung eines Energieversorgungskonzeptes mit modellbasierter prädiktiver Regelung anhand einer Living Roadmap am Beispiel des Forschungszentrums Jülich		
<b>Projektbild</b>	 <p>Überflugbild des Forschungszentrum Jülich. © Forschungszentrum Jülich.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Forschungszentrum Jülich Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich		
<b>Projektbeteiligte</b>	RWTH Aachen University E.ON Energieforschungszentrum Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik (EBC) Mathieustraße 10 52074 Aachen	RWTH Aachen University Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D Mathieustraße 30 52074 Aachen	Forschungszentrum Jülich Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich
<b>Anzahl und Art der beinhalteten Gebäude</b>	83 Bürogebäude, 144 Laborgebäude, 120 sonstige Gebäude In Summe: 347 Gebäude		
<b>Neubauten im Projekt</b>	Neubauten wurden nicht explizit betrachtet		
<b>Baujahr der Gebäude</b>	1918 bis 2019 (flächengewichteter Durchschnitt 1977)		

<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	teilweise entsprechend des Baualters, teilweise bereits durchgeführte energetische Sanierungen, teils Neubauten (siehe Baualter)							
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	Zentrale Wärmeversorgung mit Fernwärme des Braunkohlekraftwerks Weisweiler. Strom aus dem allgemeinen Stromnetz. Zentrale Kälteversorgung mit Hilfe von 3 Kältezentralen mit 10 MW/6 MW/5 MW Leistung.							
<b>Projektlaufzeit</b>	01/2016 – 03/2019							
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betrieboptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung
	X			X	X	X		X
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung				
		XX						
<b>Projekthalt</b>	Das Projekt „03ET1352A, EnEff:Stadt, EnEff:Campus: Living Roadmap“ rückt den Fokus stärker auf eine dynamische und integrale Betrachtung von Stadtquartieren, welche eine Vielzahl heterogener Gebäude mit unterschiedlichem Lastverhalten (insbesondere thermisch aber auch elektrisch) einschließt. Die Erstellung und Bewertung von ganzheitlichen Energiekonzepten für Quartiere unter dynamischen Randbedingungen kann ein großes Potential zur Energieeffizienz darstellen. Die integrale Betrachtung hilft dabei, größere Potenziale zur Emissionsreduktion zu erschließen und gleichzeitig Nutzeranforderungen zu decken. In „Living Roadmap“ werden Methoden und Software entwickelt, die den Betrieb und die städtebauliche Planung von Liegenschaften und ihrer Energiesysteme mit Hilfe von Datenanalyse, Optimierung und dynamischen Simulationswerkzeugen begleiten. Diese Werkzeuge versetzen Planer und Betreiber der Liegenschaft in die Lage, sowohl den Bestand, als auch Neubauten in der Liegenschaft zu bewerten.							
<b>Projektmittel</b>	Insgesamt: 939.607,61 € bewilligte Forschungssumme (FKZ: 03ET1352A) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): keine							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Keine expliziten Maßnahmen geplant							
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	Keine expliziten Maßnahmen geplant							
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt				Nach dem Projekt			
	350.000 m <sup>2</sup>				350.000 m <sup>2</sup>			

Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt (gemessen im Jahr 2016)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	95.420	272,6	66.790	190,8	k. A.
	Kälte	36.100	103,1	15.110	43,2	k. A.
	Strom	106.300	303,7	191.350	546,7	k. A.
	Summe	237.820	679,4	273.250	780,7	k. A.
Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	Zielwerte für den Campus Jülich werden in folgenden Projekten am Forschungszentrum Jülich konkretisiert.				
	Kälte					
	Strom					
	Summe					
Eingesetzte Planungstools	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MODELICA für Gebäudesimulation und thermischer Netzsimulation</li> <li>- TEASER und uesgraphs als Open-Source Software für die Parametrierung der Simulationen</li> <li>- Gurobi als Solver für die Lösung von nicht-linearen mathematischen Problemen NLP</li> </ul>					
Bereits erhältliche Projektergebnisse	AixLib - MODELICA Modell Bibliothek: <a href="https://github.com/RWTH-EBC/AixLib">https://github.com/RWTH-EBC/AixLib</a> TEASER - Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit: <a href="https://github.com/RWTH-EBC/TEASER">https://github.com/RWTH-EBC/TEASER</a> uesgraph - Graphenframework zur Abbildung von Energienetzen in Liegenschaften: <a href="https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs">https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs</a>					

## 2.7.2 Projektbeschreibung

### 2.7.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Die Liegenschaft des Forschungszentrums Jülich setzt sich aus 347 Gebäudeteilen unterschiedlicher Baujahre und Nutzung auf einer Gesamtfläche von rund 2,2 km<sup>2</sup> zusammen. Die bebaute Fläche beträgt rund 0,22 km<sup>2</sup>, sodass sich mit ca. 10 % Anteil bebauter Fläche eine lockere Bebauung ergibt. Die aufsummierte Nettogrundfläche aller erfassten Gebäude dieses Campus beträgt ca. 0,350 km<sup>2</sup>.

Der Campus des Forschungszentrums Jülich befindet sich unter anderem aufgrund des Baualters der Gebäude und der Energieversorgung in Veränderung. So finden derzeit zahlreiche Sanierungs- und Ausbaumaßnahmen der Gebäude sowie Versorgungsnetze statt oder befinden sich in der Planungsphase.

Das durchschnittliche mit der Nettogrundfläche gewichtete Baujahr aller auf dem Campus erfassten Gebäude beträgt ca. 1977. Die genaue Verteilung der Baujahre erstreckt sich von 1918 bis 2019, veranschaulicht durch Bild 20. Dabei ist zu erkennen, dass ein großer Teil der Gebäude in den Jahren bis 1968 und ab 1995 gebaut wurde. So steht zum einen vermutlich erheblicher Sanierungsbedarf an, zum anderen weisen auch viele Gebäude einen guten Dämmstandard bis hin zu Passivhausstandard auf. Diverse Sanierungen wurden bereits durchgeführt, dabei ist zu beachten, dass je nach Sanierungsvarianten die Auswirkungen auf den Energieverbrauch deutlich unterschiedlich ausfallen. Die Versorgung der einzelnen Räume in den Gebäuden findet mittels unterschiedlicher

Heiztechnologien statt. So befinden sich auf dem Campus Lüftungsanlagen verschiedener Funktionalität (sowohl nur Heizen als auch Vollkonditionierung von Laborflächen hinsichtlich Temperatur und Feuchte) sowie Radiatoren als auch Flächenheizkörper. Das sekundärseitige Temperaturniveau auf dem Campus wurde in den letzten Jahren weitgehend auf  $70\pm\text{ }^\circ\text{C}$  im Vorlauf und  $55\pm\text{ }^\circ\text{C}$  im Rücklauf umgestellt, wobei Abweichungen nach oben und unten existieren. Falls diese Umstellung auch mit allen Sonderverbrauchern möglich sein sollte, werden langfristig alle Verbraucher auf dieses oder ein geringeres Temperaturniveau umgestellt.

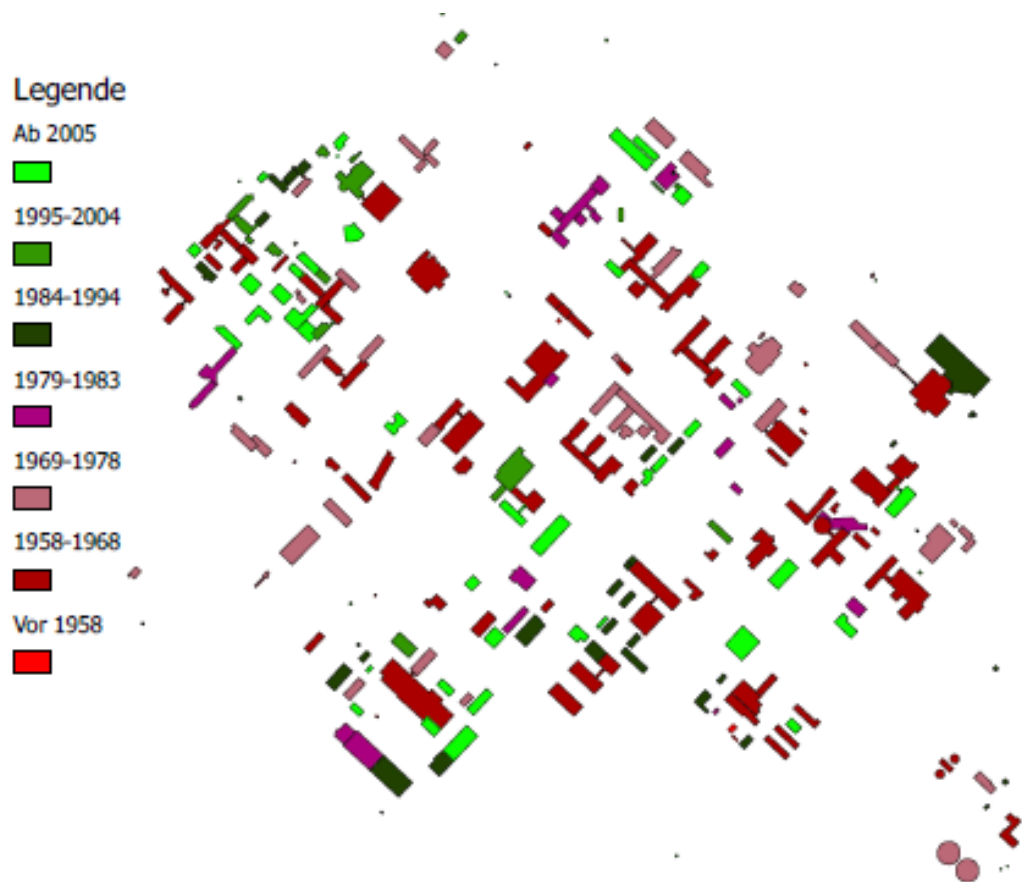


Bild 20: Baualtersklassen der Gebäude des Forschungszentrums Jülich. © RWTH Aachen.

Das Wärmenetz des Forschungszentrums Jülich ist nach Abschluss des Umbaus vollständig als Zweileitermaschennetz ausgeführt, versorgt rund 200 Gebäudeteile über rund 100 Wärmeübertrager mit thermischer Energie und umfasst eine Gesamtröhrlänge von ca. 37 km (Stand 2019). Die Regelung des Netzes erfolgt durch Anpassung der Vorlauftemperatur, die in Abhängigkeit von der Außentemperatur eingestellt wird. Dieser Zusammenhang für das Netz wird als Heizkurve bezeichnet, wobei die Vorlauftemperatur jahreszeitlich zwischen rund  $95\pm\text{ }^\circ\text{C}$  und  $140\pm\text{ }^\circ\text{C}$  schwankt.

Das Kältenetz des Forschungszentrums versorgt 53 Abnehmer mit thermischer Energie, die unter anderem für Entfeuchtung, Raumkühlung, Serverkühlung oder auch für Versuche genutzt wird. Es umfasst eine Gesamtröhrlänge von rund 21,5 km. Das Netz ist in einer Tiefe von rund einem Meter verlegt, im Gegensatz zum Wärmenetz jedoch vollständig ungedämmt. Die Rohre mit Nennweiten von NW63 bis NW400 bestehen entweder aus Polyethylen 100 (PE) oder Polyvinylchlorid (PVC-U). Es ist ebenfalls als Maschennetz ausgeführt und auf eine Temperatur von  $6\pm$  °C im Vorlauf sowie  $12\pm$  °C im Rücklauf ausgelegt. Das gesamte Rohrnetzvolumen beträgt rund 800 m<sup>3</sup>.

### **2.7.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Seitens der RWTH Aachen waren der „Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimotechnik - EBC“ (Fakultät Maschinenwesen) und der „Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen - e3D“ (Fakultät Bauingenieurwesen) beteiligt, wobei ersterer die Projektleitung innehatte. Wie im folgenden Abschnitt angegeben, wurde die Datengrundlage für die Projektbearbeitung seitens des Forschungszentrums Jülich zur Verfügung gestellt, welches als assoziierter Partner am Projekt teilgenommen hat.

#### **b) am Projekt**

Das Projekt „Living Roadmap“ wurde seitens der RWTH Aachen gemeinschaftlich vom „Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimotechnik - EBC“ (Fakultät Maschinenwesen) und dem „Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen - e3D“ (Fakultät Bauingenieurwesen) umgesetzt. Dabei war EBC vorrangig für die Planung und Optimierung der modularen Energiewandlung, die Berechnung eines dynamischen Netzbetriebs sowie für die modellbasierte Regelung der Wärme- und Kälteerzeugung verantwortlich, während e3D hauptsächlich für die Ermittlung von Objekt- und Anlagendaten, den Aufbau eines Datenmodells und die Integration des bidirektionalen Nutzerfeedbacks zuständig war. Zum interdisziplinären Projektteam gehörte auch das Forschungszentrum Jülich, insbesondere der Geschäftsbereich „Gebäude- und Liegenschaftsmanagement“ (G) sowie die Abteilung „Zukunftscampus Jülich“ (ZC). Ab dem zweiten Projektjahr wurden zusätzliche Abstimmungen mit dem IEK-10 vorgenommen. Sämtliche Daten und Informationen, wie beispielsweise Verbrauchsdaten und Netzschemata, wurden von den Geschäftsbereichen G und B („Planen und Bauen“) bereitgestellt.

### c) Organisationsstruktur

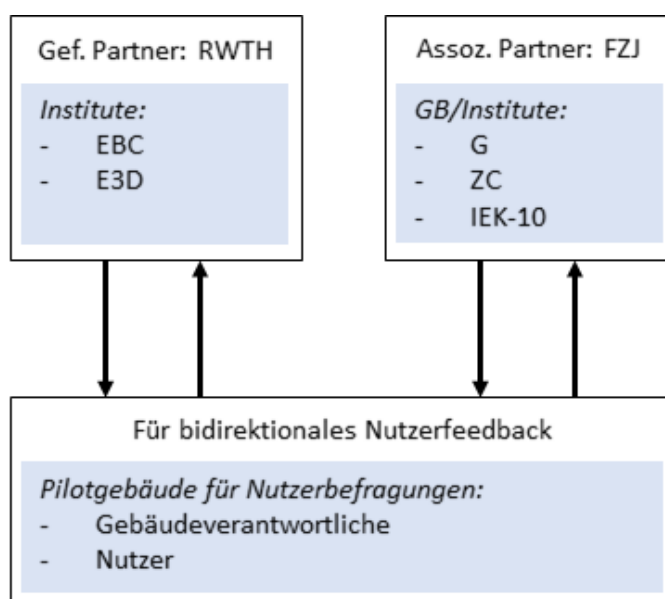


Bild 21: Organisationsstruktur im Projekt „Living Roadmap Jülich“. © RWTH Aachen.

### 2.7.2.3 Der Projektinhalt

#### a) Projektziele

Das Forschungszentrum Jülich möchte seine Energieversorgung neu ausrichten und ist daher als eine Plattform für ein Demonstrationsvorhaben in besonderer Weise geeignet. Durch seine abgeschlossene räumliche Struktur und die bereits existierende Infrastruktur ist das Forschungszentrum Jülich für den Aufbau eines ganzheitlichen Energiekonzepts prädestiniert. Parallel wird für den Campus ein neues, städtebauliches Konzept entwickelt, in dem eine Verdichtung der Flächen, einzelne Neubaumaßnahmen und neue Raumkonzepte für die Forschung vorgesehen sind.

Derzeit wird das Forschungszentrum Jülich mit Strom aus dem öffentlichen Netz und Fernwärme aus dem Braunkohlekraftwerk Weisweiler versorgt. Die Kälteversorgung wird über Kompressionskältemaschinen gewährleistet. Der hohe Sanierungsbedarf der Bestandsgebäude, die voraussichtlich notwendigen Neubauten und das Ziel einer überwiegend regenerativen und emissionsarmen Energieversorgung führen zu einem Handlungsbedarf für das Forschungszentrum.

Zur Berücksichtigung der komplexen Interaktionen wird die Konzeptentwicklung auf einem detaillierten Berechnungsmodell aller Erzeugungseinheiten und Verbraucher aufbauen. Hierfür soll das Forschungszentrum als vollständig virtuelle Liegenschaft abgebildet werden. Dieses energietechnische Abbild des Forschungszentrums wird durchgängig von der Konzeptentwicklung, dem Betrieb, der Nutzereinbindung bis hin zur Potentialermittlung für Investitionen genutzt. Dazu wird als ganzheitliches Planungs-

instrument das Konzept einer dynamischen „Living Roadmap“ verfolgt. Dieses modellgestützte System erlaubt es, dass sich die Planung bei sich ändernden Rahmenbedingungen automatisiert anpasst und neu berechnet werden kann. Dadurch wird gewährleistet, dass sich das Projekt auch bei den immer vorhandenen unvorhersehbaren Einflüssen im definierten Zielkorridor bewegt und der Umsetzungsplan entsprechend angepasst werden kann.

Im traditionellen Prozess stehen Planung und Umsetzung in einer sequentiellen Abfolge. Planung und Umsetzung berücksichtigen dabei nur bedingt den Aspekt der Systemregelung. Die Interaktion zwischen Bestandsanlagen und Anlagenerweiterungen kann nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt werden. So findet zumeist eine einmalige Einstellung der Systemregelung für die neuen Anlagen statt. In Bestandsteilen finden keine Anpassungen statt. Ein optimaler Betrieb des Gesamtsystems kann somit nie erreicht werden. Auch das Optimum für Teilbereiche ist nur schwer zu erreichen, da die Interaktion mit dem Gesamtsystem auf Grund fehlender Hilfsmittel in der Planung nicht berücksichtigt werden kann.

Im Prozess mit Einsatz der Living Roadmap wird jede Änderung, unabhängig auf welcher Ebene diese durchgeführt wird, zu einer Gesamtsystemreaktion führen, auf die eine neue Systemparametrierung zur erneuten Erreichung des Gesamtsystemoptimums unter den neuen Randbedingungen folgt.

Neben dem städtebaulichen Konzept und den technischen Lösungsansätzen bietet das Forschungszentrum Jülich die Möglichkeit, den Nutzer als die dritte tragende Säule des Konzepts in besonderer Weise zu integrieren. Im Energiesystem kommt den Mitarbeitern hier eine Doppelrolle zu. Zum einen sind sie Nutzer von Energie, die mit ihrem Verhalten die Effizienz des Gesamtsystems maßgeblich beeinflussen können. Gleichzeitig ist die Energieversorgung eines der Kernthemen in der eigenen Forschung. Daher bietet die Integration von Forschungs- und Demonstrationsmöglichkeiten in das Energiekonzept große Potentiale für die Mitarbeiter und deren Forschung. Mit einer erweiterten Definition von Effizienz als Nutzen bezogen auf den Aufwand kann diese Doppelrolle der Mitarbeiter treffend berücksichtigt werden.

Ein Energiekonzept, das die Forschungstätigkeit der Mitarbeiter berücksichtigt und unterstützt, bietet einen großen Zusatznutzen bei nur geringem Mehraufwand. Dies ist der Leitgedanke des vorgeschlagenen Energiekonzepts, der in dem Leitsatz „Research for Energy – Energy for Research“ ausgedrückt wird.

Folgende Ziele wurden innerhalb des Forschungsvorhabens erreicht:

- Detaillierte Aufnahme der Campus-Daten, insbesondere Daten zur Nutzung der Gebäude, genauem Verlauf der thermischen Netze und zeitlich und lokal hoch aufgelösten Messwerten
- Aufbau eines standardisierten Quartiersinformationssystems, der virtuellen Liegenschaft, welches standardisierte Datenbanksysteme und moderne Zeitreihendatenbanken koppelt. Das System ermöglicht damit die zusammenhängende Speicherung von semantischen und zeitvarianten Daten.
- Automatisierte Erstellung von Gebäude- und thermischen Netzmodellen aus den Datenbanksystemen, sowie ein automatisierter Abgleich mit Messwerten

- Entwicklung von Optimierungsmethoden für die Sanierungsreihenfolge von Gebäuden sowie der gekoppelten Wärme- und Kälteversorgung unter Berücksichtigung eines sich verändernden Bedarfes (Living Roadmap)
- Detaillierte Berechnung der thermisch-hydraulischen Netzzustände, sowie Abgleich mit Messdaten
- Umsetzung eines Nutzerfeedbacks in Form von Umfragen in repräsentativen Gebäuden und einer interaktiven Webseite
- Demonstration eines dynamischen Planungshilfsmittels
- Internationale Verbreitung der Ergebnisse durch Mitarbeit am „IBPSA Project 1“
- Software- und Wissenstransfer an das IEK-10 des Forschungszentrum Jülich zur Fortführung der Umgestaltung des Campus im „Living Lab Energy Campus“

### **b) Projektarbeiten**

Das Projekt rückt den Fokus stärker auf eine dynamische und integrale Betrachtung von Stadtquartieren, welche eine Vielzahl heterogener Gebäude mit unterschiedlichem Lastverhalten (sowohl elektrisch als insbesondere auch thermisch) einschließt. Die Erstellung und Bewertung von ganzheitlichen Energiekonzepten für Quartiere unter dynamischen Randbedingungen kann ein großes Potential zur Energieeffizienz darstellen. Die integrale Betrachtung hilft dabei, größere Potenziale zur Emissionsreduktion zu erschließen und gleichzeitig Nutzeranforderungen zu decken. In „Living Roadmap“ wurden Methoden und Software entwickelt, die den Betrieb und die städtebauliche Planung von Liegenschaften und ihrer Energiesysteme mit Hilfe von Datenanalyse, Optimierung und dynamischer Simulationswerkzeuge begleiten. Diese Werkzeuge versetzen Planer und Betreiber der Liegenschaft in die Lage, sowohl den Bestand als auch Neubauten in der Liegenschaft zu bewerten. Um den dynamischen Prozess der Neugestaltung der Energieversorgung einer Liegenschaft sowie die Sensibilisierung der Nutzer der Gebäude für die Energiewende aktiv zu begleiten, wird im Rahmen des Projektes ein bidirektionales Nutzerfeedbackkonzept entwickelt. Zentrales methodisches Ergebnis des Projektes „Living Roadmap“ ist das Konzept der virtuellen Liegenschaft und der Living Roadmap. Beide Konzepte wurden im Projekt an der Liegenschaft des Forschungszentrums Jülich validiert und sind auf weitere Liegenschaften übertragbar. Die virtuelle Liegenschaft bildet die reale Liegenschaft mit Hilfe eines Digitalen Zwillings ab und umfasst dabei die Integration von semantischen Informationen (z. B. Daten über physikalische Gebäudeeigenschaften) und messtechnischen Informationen als auch physikalische und datengetriebene Modelle des gesamten Energiesystems. Dies wird durch ein Datenbanksystem realisiert, welches die öffentlich verfügbare „3DCityDB“ mit einer Zeitreihendatenbank koppelt. Mit der virtuellen Liegenschaft kann nicht nur der aktuelle Betrieb des Systems visualisiert und analysiert werden, wie es bei Gebäude- und Quartiermanagementsystemen teilweise schon üblich ist, sondern auch zukünftige Zustände, geplante Erweiterungen der Systemkomponenten oder unterschiedliche Regelungsstrategien simuliert und bewertet werden. Hierbei werden zwei Zeithorizonte betrachtet. Zum einen ermöglicht die virtuelle Liegenschaft langfristige städtebauliche Perspektiven aufzuzeigen. Zum anderen können mit Hilfe der Modelle



Regelungsstrategien getestet und bewertet werden. Die unterschiedlichen Komponenten der virtuellen Liegenschaft sind in Bild 22 dargestellt. Wie in Bild 22 dargestellt, besteht die virtuelle Liegenschaft aus einzelnen Funktionen, Modulen oder Bausteinen. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um die schon erwähnte Datenanalyse, Optimierung, dynamische Simulation, aber auch um die Einbindung der Nutzer durch Visualisierung und Feedbackmöglichkeiten. Die einzelnen Funktionen, Module oder Bausteine wurden im Rahmen des Vorhabens so konzipiert, dass sie den Betrieb einer Living Roadmap ermöglichen.

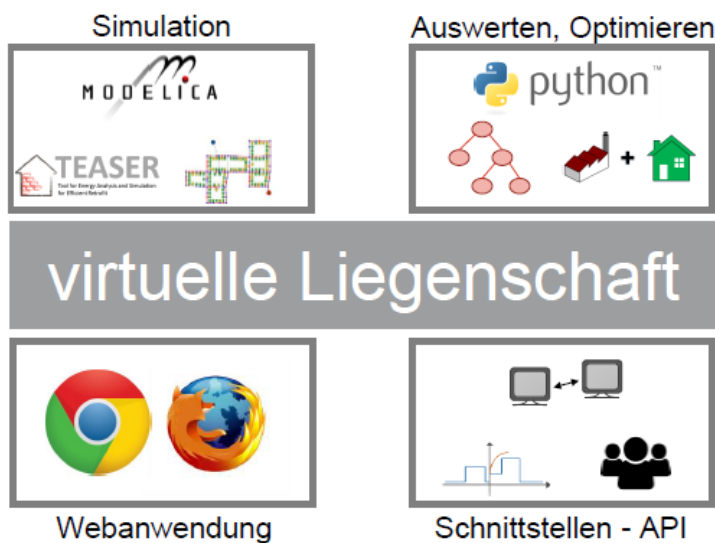


Bild 22: Bestandteile der virtuellen Liegenschaft. © RWTH Aachen.

Der entscheidende Vorteil der Living Roadmap ist, dass Berechnungen und Funktionen in einer Toolkette derart aufeinander abgestimmt sind, dass Änderungen in den Annahmen oder in den Berechnungen in die folgenden Berechnungen/Simulationen einfließen. Somit können nicht nur verschiedene Varianten berechnet werden, sondern es ermöglicht auch die Abbildung von sich ändernden Planungszuständen. Mit Hilfe der virtuellen Liegenschaft und der Living Roadmap konnten sowohl langfristige städtebauliche Optimierungen, Regelungskonzepte, als auch die Nutzerpartizipation in Jülich demonstriert werden. Beispielhafte Untersuchungen sind der Einfluss von Sanierungsreihenfolgen auf die Dimensionierung und Auswahl einer zentralen Energieversorgung, ein Prototyp für ein neuartiges Regelungskonzept (Model Predictive Control) des Wärmenetzes oder eine auf Messdaten beruhende Energiesystemanalyse einzelner Gebäude. Ein wichtiger Aspekt in der Umsetzung von neuen Energiekonzepten und baulichen Veränderungen in Liegenschaften ist die Einbindung der Nutzer bzw. Stakeholder. Dazu wurde im Projekt „Living Roadmap“ eine Weboberfläche entwickelt, welche den aktuellen oder aber auch die berechneten Zustände der Energieversorgung der Liegenschaft visualisieren kann. Außerdem wurde in fünf Gebäuden am Forschungszentrum Jülich eine Umfrage über ein Jahr zu den thermischen Bedingungen am Arbeitsplatz durchgeführt.

### c) Projektmittel

Für das Forschungsvorhaben EnEff:Stadt, EnEff:Campus: Living Roadmap wurden bis zum 31.03.2019 Mittel in folgender Höhe verwendet:

Personalausgaben (Wiss. Mitarbeiter 0812, Softwareentwickler 0817, stud. Mitarbeiter 0822):	906.618,79 €
Sächliche Verwaltungsausgaben 0843, 0846:	15.251,45 €
Gegenstände u. a. Investitionen von mehr als 400/410 € im Einzelfall 0850:	17.737,37 €
Gesamtausgaben 0861:	939.607,61 €

### d) Projektstand

Das Projekt wurde am 31.03.2019 erfolgreich abgeschlossen.

#### 2.7.2.4 Die Projektergebnisse

##### a) Geplante Ergebnisse

- Veröffentlichung (Open Source) der in Python programmierten, objektorientierten Schnittstelle zwischen der 3DCityDB und den ebenfalls frei zugänglichen Werkzeugen TEASER zur Erstellung von Gebäudemodellen (<https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>) und uesgraphs zur Erstellung von Modellen thermischer Netze (<https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs>), (Q2/2020)

Da das Projekt bereits abgeschlossen ist, sind alle weiteren Projektergebnisse in b) gelistet.

##### b) Bereits erhältliche Ergebnisse

Folgende Open Source Werkzeuge wurden innerhalb des Projektes erweitert und verbessert:

- TEASER – zur automatisierten Generierung von dynamischen Archetyp-Gebäudemodellen (geschrieben in Python, generiert Modelle für die Modelica Bibliotheken AixLib und IBPSA Project 1), <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>
- uesgraph – zur Abbildung von Energienetzen in einer Liegenschaft und Modellgenerierung thermischer Netze (geschrieben in Python, generiert Modelle für die Modelica Bibliotheken AixLib und IBPSA Project 1), <https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs>
- AixLib – Modelica Bibliothek mit Modellen für Gebäude, Gebäude- und Quartiersenergiesysteme (geschrieben in Modelica), <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>
- Diverse Veröffentlichungen [42]-[49].

Außerdem wird der Abschlussbericht in der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover veröffentlicht.

### **2.7.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Im Sinne des Gedankens „Research for Energy – Energy for Research“ erfolgte die Integration eines bidirektionalen Nutzerfeedbacksystems, um Hinweise, Ideen und Verbesserungsvorschläge der Mitarbeiter/-innen in die energetische Planung und Optimierung des Forschungszentrums Jülich miteinzubeziehen. Zur Erhebung dieser Informationen wurden Fragebögen konzipiert, deren Auswertungsergebnisse für die Konzeption und Bewertung von Maßnahmen dienen. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, wurde eingangs ein detaillierter Fragebogen vorgesehen, der sich am umfangreichen INKA-Fragebogen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), welcher auf dem Berkeley-Fragebogentyp basiert, orientierte. Letzterer hat sich mit Themenfeldern zur detaillierten Abfrage der Komfortbedingungen am Arbeitsplatz, der gebäudebezogenen Außenraumqualität oder der Standortqualität in der Anwendung bewährt. Da aufgrund unterschiedlicher Faktoren eine umfassendere Einbindung der Nutzer/-innen nicht möglich war, wurde ein Online-Fragebogen zur Beurteilung des Umgebungsklimas nach der DIN EN ISO 10551 an fünf Gebäuden zu den Quartalen Herbst, Winter, Frühling und Sommer durchgeführt. Das Ziel bestand schließlich darin, zu untersuchen, ob und inwieweit der thermische Komfort am Arbeitsplatz als Indikator und Anhaltspunkt für möglicherweise erforderliche Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen dienen kann. Darüber hinaus wurde untersucht inwieweit die Methodik auf den gesamten Gebäudebestand angewendet werden kann und wie die Beteiligung seitens der Nutzer ist. Die fortlaufende und transparente Kommunikation der Auswertungsergebnisse in Form von Hand-Outs empfanden die Mitarbeiter/-innen durchweg positiv. Die Methodik ist auch auf den gesamten Campus anwendbar, da für die Erstellung der Handouts im Rahmen des Projekts ein automatisiertes Auswertungsskript erstellt wurde.

### **2.7.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Die gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Modellierung und Simulation von Energiesystemen und Netzen fließen in die Veranstaltung „Simulationsmodelle für die Heizungs- und Raumklimatechnik“ der RWTH Aachen University ein. Hierbei wird den Studierenden die Modellierung von Energiesystemen in der Modellierungssprache Modella gelehrt und in mehreren Hausarbeiten das Wissen vertieft.

Im Bereich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, der Optimierung der Energiewandlungsanlagen und der Randbedingungen bezüglich staatlichen Förderungen wird das gewonnen Wissen im Fach „Energiewirtschaft“ an die Studierenden der RWTH Aachen University weitergegeben.

### **2.7.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

In Bezug auf die Integration von Nutzerumfragen zum thermischen Komfort am Arbeitsplatz hinsichtlich der Umsetzung des Partizipationsgedankens sind verschiedene Beteiligte wie der Datenschutzbeauftragte oder Institutsverantwortliche in die Planung mit-

einzu beziehen. Vor diesem Hintergrund müssen unterschiedliche Vorgaben in eine gemeinsame Umsetzungsstrategie überführt werden. Für die Projektbearbeitung ist daher ein erhöhter Abstimmungs- und Überarbeitungsaufwand für die Konzipierung der Nutzerumfragen zu berücksichtigen.

### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Hinsichtlich Nutzerpartizipation wurde eingangs ein detaillierter Fragebogen vorgesehen, der sich am umfangreichen INKA-Fragebogen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), welcher auf dem Berkeley-Fragebogentyp basiert, orientierte. Letzterer hat sich mit Themenfeldern zur detaillierten Abfrage der Komfortbedingungen am Arbeitsplatz, der gebäudebezogenen Außenraumqualität oder der Standortqualität in der Anwendung bewährt. Der betreffende Fragebogen wurde in mehreren Schritten im Projektablauf angepasst, konnte jedoch aus datenschutzrechtlichen Gründen letztlich nicht angewendet werden.

Um dennoch eine Nutzerpartizipation ermöglichen zu können, wurde ein in Umfang und Länge stark reduzierter Fragebogen zum thermischen Komfort am Arbeitsplatz als Indikator und Anhaltspunkt für möglicherweise erforderliche Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen eingesetzt.

### **c) Energetische Benchmarks**

Als energetische Benchmarks wurden Kennwerte zum spezifischen thermischen Energieverbrauch einzelner Gebäude ermittelt. Dadurch ließen sich in Kombination mit GIS-basierten Visualisierungsplattformen energetische Quellen und Senken im Quartier identifizieren. Weiterhin wurden Referenzwerte für den Heizenergieverbrauch bei der Durchführung von Energieeinsparungsmaßnahmen nach VDI 3807-2 in Abhängigkeit von unterschiedlichen Gebäudenutzungen zugrunde gelegt. Dadurch wurde der verminderte Wärmebedarf von Gebäuden nach der Sanierung abgeschätzt. Die Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren diente zur Identifizierung von Gebieten, die sich für eine Abkopplung von Gebäudegruppen von der zentralen Versorgung eignen würden. Beim Gleichzeitigkeitsfaktor wird das Auftreten mehrerer Kategorien (z. B. Wärme, Kälte und Strom) in einer Gesamtheit betrachtet und so ein Rückschluss auf die Gleichzeitigkeit dieser Kategorien gezogen. Dieser Index liefert ein Ergebnis zwischen null und eins. Hierbei steht  $div = 1$  für einen kompletten Ausgleich und  $div = 0$  für die Dominanz einer der Kategorien. Der Gleichzeitigkeitsfaktor kann für einzelne Stunden oder größere Zeiträume (z. B. ein Jahr) definiert werden und hat keine Einheit. Auf dem Campus gibt es mehrere Gebäude- und Gebäudegruppen, welche einen hohen Gleichzeitigkeitsfaktor vorweisen. So können einzelne Gebäudegruppen identifiziert werden, die einen jährlich gemittelten Gleichzeitigkeitsfaktor zwischen Wärme und Kälte von über 0,7 haben und sich somit für eine Wärmeverschiebung zwischen Gebäuden sehr gut eignen würden. Dies wird in den folgenden Projekten näher untersucht.

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

In Living Roadmap konnte gezeigt werden, dass die Übertragung von einem Monitoringsystem in das im Projekt erstellte Datenbankmodell realisiert werden kann. Im Projektverlauf konnten jedoch auch einige Verbesserungsmaßnahmen identifiziert werden, insbesondere:

- Die Umstellung auf einen OPC-UA Server stellt eine wesentliche Verbesserung dar. Die OPC-DA Technologie ist bereits nicht mehr Stand der Technik und sollte durch den neuen offenen Standard ersetzt werden.
- Die durchgeführten Tests mit der aufgebauten Verbindung sowie die Erfahrung durch den Betrieb der umgesetzten Datenübertragung, weisen darauf hin, dass derzeit das Auslesen der Daten aus dem OPC-DA-Server der zeitintensivste Teil der Datenübertragung ist. Eine Überarbeitung dieser Python-Schnittstelle kann hierbei zu Verbesserungen führen. Die Anbindung an eine eventuelle OPC-UA- Schnittstelle erscheint allerdings sinnvoller, da diese nicht aktiv ausgelesen werden muss, sondern die Daten vielmehr automatisch erneuert werden.

Die Maßnahmen konnten im Projekt Living Roadmap nicht mehr umgesetzt werden. Allerdings wurde sowohl die Softwarearchitektur des beschriebenen Systems als auch die Erfahrungen mit dem am Forschungszentrum Jülich ansässigen Institut IEK-10 geteilt. Dadurch wurde das IEK-10 in die Lage versetzt, eine neue Version der Messdatenübertragung für das Projekt Living Lab Energy Campus zu realisieren.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Das Projekt Living Roadmap hatte den Fokus neue, dynamische Planungshilfsmittel für die Betrachtung von großen Liegenschaften mit thermischen Netzen zu entwickeln. In diesem Kontext wurde eine virtuelle Liegenschaft entwickelt, welche als Datenbanksystem das Planungshilfsmittel 3DCityDB (eine SQL-Implementierung von CityGML <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb>) nutzt. Hierbei sind insbesondere die neuesten Entwicklungen, wie die Bereitstellung des Datenbankschemas als virtualisierte Umgebung mittels Docker-Containern und die Möglichkeit, das Schema automatisiert mit Hilfe der Application-Domain-Extension für CityGML zu erweitern, hervorzuheben. Dadurch, dass die Planungshilfsmittel in diesem Projekt in Python und Modelica entwickelt wurden, wurde sich in diesem Projekt entschieden, objektorientierte Schnittstellen zur 3DCityDB direkt in Python zu entwickeln.

## 2.8 Intracting an Hochschulen, Kassel

Autorenteam: Marius Ehlert, M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Jens Knissel (Universität Kassel)

### 2.8.1 Projektsteckbrief

Das Projekt „Intracting an Hochschulen“ beinhaltet selbst keine Technologieanwendungen. Die Universität Kassel setzt das Intracting-Modell jedoch praktisch um. Formal sind beide Projekte voneinander unabhängig. Über ein Monitoring des Fortschritts und der Erfahrungen der Universität Kassel findet die Anwendung Einzug in das Forschungsprojekt. Nachfolgende Informationen zu Energieverbräuchen und Gebäudedaten entstammen diesem Monitoring.

<b>Projektname</b>	Kontinuierliche Steigerung der Energieeffizienz an Hochschulen durch Implementierung des Intracting-Modells		
<b>Projektbild</b>	<p>Schematische Abbildung „Intracting an Hochschulen“. © Universität Kassel.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Universität Kassel Mönchebergstraße 19 34127 Kassel		
<b>Projektbeteiligte</b>	Universität Kassel, Fachgebiete Technische Gebäudeausrüstung (Projektleitung), Bauphysik, Solar- und Anlagentechnik, Energy Economics	Universität Kassel, Abteilung Bau, Technik und Liegenschaften	HIS-HE Institut für Hochschulentwicklung

	IWU Institut Wohnen und Umwelt	KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg	Universität Heidelberg, Abteilung Bau- und Liegenschaften					
	Universität Osnabrück, Dezernat Gebäudemanagement	Fachhochschule Aachen, Abteilung Ressourcen- & Sicherheitsmanagement	Universität Marburg, Abteilung Energie-, Flächen-, Bauprojektmanagement					
<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	77 Gebäude, davon aufgeteilt nach Hauptnutzungsfläche 53 % Institutsgebäude, 10 % Bibliotheksgebäude, 7 % Unterrichtsgebäude, 5 % Forschungsgebäude, 4 % Verwaltungsgebäude, 3 % Mensen und Kantinen							
<b>Neubauten im Projekt</b>	Keine							
<b>Baujahr der Gebäude</b>	Das Baujahr der Gebäude erstreckt sich von 1837 – 2015.							
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	Entsprechend des Baualters; teilweise bereits durchgeführte energetische Sanierungen							
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	Energiefremdbezug: Strom (100 % Ökostrom), Fernwärme (öffentliches Fernwärmenetz der Stadt Kassel), Erdgas Energieeigenerzeugung: Photovoltaik, BHKW							
<b>Projektlaufzeit</b>	10/2015 – 05/2021							
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nahwärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Gebäudesanierung	Betriebsoptimierung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsmethode	Nutzersensibilisierung
	X					XX	XX	
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umsetzung	Messung				
	XX	XX						
<b>Projekthalt</b>	An Hochschulen werden selbst hochwirtschaftliche Energiesparmaßnahmen vielfach nicht umgesetzt. Es fehlen den Hochschulen häufig sowohl Personal als auch finanzielle Mittel, um erforderliche Investitionen zu tätigen. Zudem konkurrieren benötigte Finanzmittel mit Investitionen in Lehre, Forschung oder notwendige Verwaltungsaufgaben. Im Projekt wird systematisch und übertragbar herausgearbeitet, wie das Modell des Intractings an Hochschulen implementiert werden kann, um wirtschaftliche Energiesparmaßnahmen zu erschließen und damit die Hochschulhaushalte von Energiekosten zu entlasten. Neben den methodischen Fragen wird ein Simulationswerkzeug entwickelt, mit dem die Implementierungskonzepte unter Berücksichtigung der hochschulspezifischen Randbedingungen visualisiert und optimiert werden können.							

<b>Projektmittel</b>	Insgesamt: 628.813 € bewilligte Fördersumme davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €					
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Lüftungssanierung, Pumpenaustausch, Installation von PV-Anlagen, Beleuchtungs-sanierung, Gebäudedämmung					
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>						
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	350.703 m <sup>2</sup> (Energiebezugsfläche)					
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt</b>		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	32.867	93,72	7.888	22,49	2.460.596
	Kälte	-	-	-	-	-
	Strom	23.653	67,44	42.575	121,40	4.242.100
	Summe			50.463	143,89	6.702.696
	Primärenergiefaktoren: Strom: 1,8; Fernwärme: 0,24					
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b>		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	keine Angabe				
	Kälte					
	Strom					
Summe						
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	MS Excel: Eigenes Tool für die strategische Planung, konzeptionelle Ausgestaltung sowie für die Dokumentation und das Controlling der Anwendung des Intractings					
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	Relevante Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Intracting					

## 2.8.2 Projektbeschreibung

### 2.8.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Das Forschungsprojekt Intracting an Hochschulen ist kein Umsetzungsprojekt, so dass der energetische Zustand des Campus keine Relevanz hat.

### 2.8.2.2 Die beteiligten Akteure

#### a) an den Prozessen der Universität

Die Universität Kassel setzt das Finanzierungskonzept Intracting parallel zum Forschungsprojekt „IntrHo“ um, was formell jedoch unabhängig vom Forschungsprojekt erfolgt. Das Monitoring des Umsetzungsprojektes der Universität ist jedoch Bestandteil des Forschungsprojektes. Daher werden an dieser Stelle die am Monitoring-Prozess beteiligten Akteure genannt.



Der Leiter der Abteilung Bau, Technik, Liegenschaften ist verantwortlich für das Projekt Intracting an der Universität Kassel. Die Identifizierung, wirtschaftliche Bewertung und Umsetzung von energetischen Sanierungsmaßnahmen wird von den Energieeffizienzmanagern I und II durchgeführt. Für die Bereitstellung der energetischen Kennzahlen ist der Energiebeauftragte der Universität Kassel zuständig. Die für das Controlling und damit auch für die Umbuchung von Finanzmitteln zur Medienversorgung und Investitionen verantwortliche Mitarbeiterin der Abteilung Bau, Technik, Liegenschaften liefert Informationen zu den internen Prozessen der Mittelumbuchung.

### **b) am Projekt**

Dem Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung obliegt die Projektleitung. Es ist zuständig für die Koordination und den größten Teil der inhaltlichen Bearbeitung des Projekts. Insbesondere die Erstellung von Methoden und Werkzeugen zur Implementierung sowie Umsetzung des Intractingvorhabens stehen im Mittelpunkt. Die Fachgebiete Bauphysik, Solar- und Anlagentechnik sowie Volkswirtschaftslehre mit Schwerpunkt dezentrale Energiewirtschaft unterstützen das Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung bei der Projektbearbeitung. Inhaltliche Bearbeitungsschwerpunkte des Fachgebiets Bauphysik sind die Methodik zur Quantifizierung der Energieeinsparung und der Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Das Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik stellt den Stand der Aktivitäten an Hochschulen im Bereich der Energieeffizienz zusammen und erarbeitet Möglichkeiten zur Nutzermotivation. Das Fachgebiet Volkswirtschaftslehre mit Schwerpunkt dezentrale Energiewirtschaft untersucht Möglichkeiten zur Finanzierung des Anschubetrags für Intracting.

Die Energiemanager bzw. Energiebeauftragten der fünf Partnerhochschulen testen und plausibilisieren die im Projekt erarbeiteten Grundlagen, Methoden und Planungshilfsmittel. Dies gewährleistet, dass die Grundlagen und Methoden die notwendige Breite aufweisen, um als Leitfaden für Hochschulen mit unterschiedlichen institutionellen Randbedingungen geeignet zu sein. Der Energieeffizienzmanager der Uni Kassel unterstützt das Forschungsprojekt zusätzlich durch das Aufbereiten und Bereitstellen benötigter Informationen und praktischer Erfahrungen.

Die KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg ermittelt die Verbreitung von Intracting in Kommunen.

Das IWU Institut Wohnen und Umwelt liefert Daten zu Energieeinsparungen und Grobkosten von Energiesparmaßnahmen in Nichtwohngebäuden, die als Grundlage für die Planung und Simulation des Intracting-Vorhabens dienen.

Das Institut HIS-HE Institut für Hochschulentwicklung identifiziert hochschulspezifische Randbedingungen, erstellt ein rechtliches Gutachten zur Umsetzung von Intracting an Hochschulen und unterstützt bei der Kommunikation der Ergebnisse des Projekts in die Hochschullandschaft.

### c) Organisationsstruktur

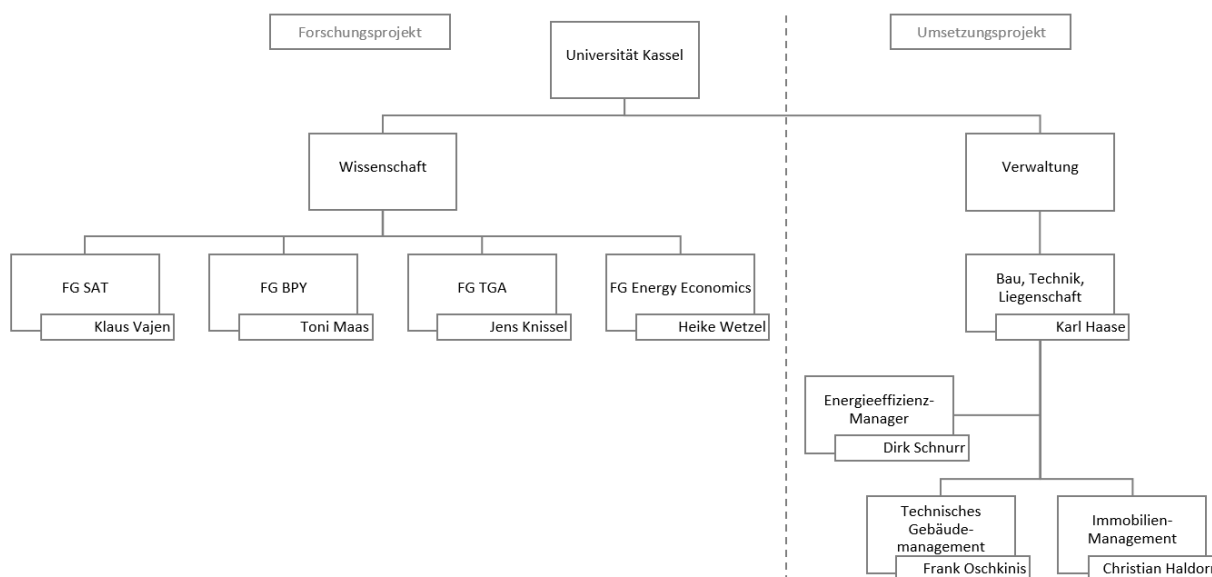


Bild 23: Organisationsstruktur des Projekts „Intracting an Hochschulen“. © Universität Kassel.

### 2.8.2.3 Der Projekthalt

#### a) Projektziele

Auf Hochschulleitungsebene wird vielfach eine nachhaltige Entwicklung angestrebt. Es ist bekannt, dass die steigenden Energiekosten zukünftig die Hochschulhaushalte immer stärker belasten werden. Die angespannten Hochschulhaushalte machen ein entsprechendes Engagement jedoch schwierig. Kurzfristig konkurrieren die Investitionen in Energiesparmaßnahmen mit den benötigten Finanzmitteln für Lehre, Forschung sowie für notwendige Verwaltungsaufgaben. Auf dieses Dilemma zwischen langfristigen Zielen und kurzfristigen Zwängen bei der Mittelvergabe fokussiert das Projekt IntrHo. Grundlegendes Forschungsthema ist die Implementierung und Anwendung des Intractingansatzes an Hochschulen.

Ziel ist es, mit dem Intractingansatz ein anwendungsorientiertes, übertragbares Technologiekonzept zu entwickeln und zu erproben, dass das hochschulinterne Energiemanagement in die Lage versetzt, kontinuierlich an der Effizienzsteigerung der Hochschulgebäude zu arbeiten und so vorhandene Energieeinsparpotenziale zu erschließen. Intracting schafft hierfür die erforderlichen finanziellen wie organisatorischen Randbedingungen.

#### b) Projektarbeiten

1. *Implementierungskonzepte*: Es wird untersucht, ob und wenn ja, in welcher Form die Idee des Intracting von Kommunen auf Hochschulen transformiert werden kann. Hierzu werden die bisherigen Ausprägungsformen des Intracting in Kommunen analysiert und die Erfahrungen der Kommunen über Workshops und Interviews zusammengetragen. Die unterschiedlichen verwaltungs- und haushaltstechnischen, aber

auch die gebäude- und nutzungsspezifischen Randbedingungen der Hochschulen werden analysiert. Hierauf aufbauend werden verschiedene Implementierungsmöglichkeiten an Hochschulen mit ihren Vor- und Nachteilen ausgearbeitet. Für die Universität Kassel und vier weitere Hochschulen werden beispielhaft konkrete Implementierungskonzepte von den jeweiligen Energieabteilungen erstellt. Durch die Auswahl der vier Hochschulen wird ein möglichst großes Spektrum von hochschulspezifischen Randbedingungen abgedeckt. Die Auswahl erfolgte in Absprache mit dem Fördermittelgeber.

2. *Allgemeine Methoden:* Unabhängig vom Implementierungskonzept gibt es allgemeine methodische Fragen, für die in diesem Arbeitspaket Lösungen aufgezeigt werden. So kann es in einigen Hochschulen ein Einführungshemmnis sein, die Anschubfinanzierung aufzubringen. Es werden unterschiedliche alternative Finanzierungsmöglichkeiten wie Landeskredite oder Bürgerkredite untersucht. Für die Bewertung von Maßnahmen und die Quantifizierung des Rückflusses auf die „Intracting-Kostenstelle“ werden Möglichkeiten zur Quantifizierung der eingesparten Energie sowie Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt und diskutiert. Zudem werden Möglichkeiten zur Steigerung von Motivation und Kooperation der Akteure zusammengestellt bzw. entwickelt und offene verwaltungstechnische, organisatorische und juristische Fragen begleitend geprüft. Bei der Bearbeitung werden die Ergebnisse der anderen EnEff-Campus Projekte berücksichtigt.
3. *Szenariensimulation:* Für die strategische Planung und konzeptionelle Ausgestaltung des Intracting-Ansatzes, aber auch für die konkrete Anwendung, wird ein Szenariensimulationsprogramm erstellt, mit dem die zeitliche Entwicklung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung aber auch des Kontostandes der „Intracting-Kostenstelle“ simuliert und visualisiert werden kann. Energieeinsparung und Kontostand hängen entscheidend von der Höhe der Anschubfinanzierung, den umsetzbaren Energiesparmaßnahmen und dem Verfahren zum Gutschreiben der Energieeinsparung (welcher Prozentsatz über welchen Zeitraum) ab. Die Szenariensimulation erlaubt der Hochschulleitung (Präsidium) und der Energie- bzw. Bauabteilung, das individuelle Implementierungskonzept zu optimieren und konzeptbezogene Prognosen für Energiekosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Finanzierungsbedarf zu erstellen. Die zu Beginn des Implementierungsprozesses sinnvollen strategiebezogenen Szenariensimulationen werden üblicherweise mit typischen energetischen Verbesserungsmaßnahmen „gefüttert“. Als Hilfe hierfür wird eine Datenbank mit typischen Maßnahmen aus dem Bereich der Betriebsoptimierung, der niedrig-, mittel- und hochinvestiven Maßnahmen, inklusive entsprechender typischer Investitionskosten und Energieeinsparungen, zusammengestellt. Schrittweise können die Szenariensimulationen damit konkretisiert und schlussendlich für die Finanz- und Maßnahmenplanung in der Umsetzung genutzt werden. Mit dem Szenariensimulationsprogramm und den typischen Effizienzmaßnahmen werden für unterschiedliche hochschulspezifische Randbedingungen Szenarienberechnungen durchgeführt und systematische, verallgemeinerbare Aussagen zu sinnvollen Implementierungsvarianten getroffen.
4. *Begleiten der Umsetzung an der Uni Kassel:* Die Universität Kassel implementiert den Intracting-Ansatz in ihrer Abteilung Bau, Technik, Liegenschaften und setzt eine

Vielzahl bereits identifizierter Energiesparmaßnahmen um. Das Umsetzungsprojekt und das Forschungsprojekt sind formal unabhängig voneinander, inhaltlich sind beide aber eng miteinander verbunden. So fließen die Fragen und Erfahrungen aus der Umsetzung und Anwendung an der Universität Kassel in das Forschungsprojekt ein. Umgekehrt werden die im Forschungsprojekt erarbeiteten allgemeinen Konzepte, Methoden und Werkzeuge im Umsetzungsprojekt getestet. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird die Strategie und deren Implementierung an der Universität Kassel unter Berücksichtigung der konkreten Randbedingungen untersucht und ggf. durch weitere Szenariensimulationen optimiert. Aus dem Anwendungstest werden Hinweise abgeleitet, welcher Weiterentwicklungsbedarf für ein universell anwendbares Softwaretool besteht. Entscheidend für eine hohe Akzeptanz des Intractingansatzes ist die Einführungsphase. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die Maßnahmen des Umsetzungsprojektes analysiert und bewertet und verallgemeinerbare Hinweise abgeleitet.

Neben der Analyse von Strategie und Einführungsphase erfolgt im Rahmen des Forschungsprojektes ein Monitoring der Anwendung des Intracting-Ansatzes an der Universität Kassel. Hierfür werden geeignete Kennzahlen zur Prozessbeschreibung und -bewertung definiert. Diese Prozesskennzahlen werden erhoben und zurückgemeldet. Auf dieser Grundlage werden kritische Prozessschritte identifiziert und der Ablauf optimiert. Die positiven und negativen Erfahrungen werden dokumentiert und Verbesserungspotenziale aufgezeigt.

5. *Kommunikation*: Die Erfahrungen und Ergebnisse des Projektes werden dokumentiert. Die Arbeit wird von einem „Runden Tisch“ aus von Experten und wichtigen Akteuren von Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene, aber auch der Wissenschaft begleitet. Die Ergebnisse werden in Fachartikeln und einer Fachtagung am Ende der Projektlaufzeit der Fachöffentlichkeit bekannt gemacht. Die Ausgestaltung der Expertenworkshops und der Fachtagung orientiert sich am thematischen Verbund EnEff-Campus und wird mit dem PtJ abgestimmt. Neben dem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben wird ein Leitfaden „Intracting an Hochschulen“ erstellt, der eine praxisnahe Anleitung zur Einführung von Intracting geben soll. Um die Kommunikation der Ergebnisse in die Hochschullandschaft hinein zu gewährleisten ist das Deutsche Zentrum für Hochschul- und Wissenschaftsforschung – HIS-Hochschulentwicklung in das Projekt mit eingebunden. Zudem wird eine enge Kooperation mit dem Arbeitskreis Technischer Abteilungen der Hochschulen angestrebt.

#### **c) Projektmittel**

Insgesamt: 628.813 € bewilligte Fördersumme, davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €

#### **d) Projektstand**

*Arbeitspaket I „Implementierungskonzepte“* wurde bereits vollständig bearbeitet. Hierunter fallen die Erfassung der Erfahrung von Intracting in Kommunen, die Ausarbeitung von Erfolgsfaktoren sowie Hemmnissen des Intracting-Ansatzes und deren Übertragung auf Hochschulen, sowie die Ausarbeitung hochschulspezifischer Randbedingung und die Erstellung von Implementierungskonzepten der fünf Partnerhochschulen.

*Arbeitspaket II „Allgemeine Methoden“* ist ebenfalls abgeschlossen. Darunter fallen die Akquise der Anschubfinanzierung, Quantifizierungsmöglichkeiten der Energieeinsparung verschiedener Gewerke, Möglichkeiten zur Wirtschaftlichkeitsbewertung, Motivation und Kooperation von Akteuren sowie die Ausarbeitung verwaltungsrechtlicher Fragen.

*Arbeitspaket III „Szenariensimulation“* befindet sich in der Bearbeitung. Typische Effizienzmaßnahmen wurden recherchiert und in einer Datenbank zusammengefasst. Das Excel-basierte Tool zur Simulation, Anwendung und Kontrolle des Intracting-Ansatzes ist in einer ersten Version erstellt und an die Partnerhochschulen zum Testen und Plausibilisieren weitergegeben worden.

*Arbeitspaket IV „Begleitung der Umsetzung“* an der Uni Kassel ist in der Bearbeitungsphase. Die Analyse der Einführung des Intracting-Konzepts der Universität Kassel ist abgeschlossen, wohingegen das Monitoring der Anwendung von Intracting an der Universität Kassel fortläuft. Die durch das Forschungsteam bereitgestellten Hilfsmittel zur Anwendung von Intracting werden getestet und bewertet.

*Arbeitspaket V „Kommunikation“* wird fortlaufend umgesetzt. In diversen Treffen der Projektbeteiligten wird das Projekt koordiniert und die bereits erarbeiteten Ergebnisse werden diskutiert. Die Erfahrungen und Ergebnisse des Projektes werden von einem „Runden Tisch“ aus von Experten und wichtigen Akteuren von Landes- und kommunaler Ebene, aber auch der Wissenschaft begleitet.

#### **2.8.2.4 Die Projektergebnisse**

##### **a) Geplante Ergebnisse**

Ergebnisse des Forschungsprojekts werden Arbeitshilfen für die Planung, Umsetzung und Kontrolle des Intracting-Ansatzes sein. Die Arbeitshilfen sind der Planungsleitfaden, der eine praxisnahe Anleitung zur Einführung von Intracting geben soll und das Excel-basierte Szenarien-Tool. Das Tool dient der strategischen Planung und konzeptionellen Ausgestaltung des Intracting-Ansatzes, aber auch der konkreten Anwendung. So kann die zeitliche Entwicklung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung aber auch des Kostandes der „Intracting-Kostenstelle“, simuliert und visualisiert werden. Die Szenariensimulation erlaubt der Hochschulleitung (Präsidium) und der Energie- bzw. Bauabteilung das individuelle Implementierungskonzept zu optimieren und konzeptbezogene Prognosen für Energiekosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Finanzierungsbedarf zu erstellen. Die gesamten Ergebnisse des Projekts werden in einer Abschlusstagung vorgestellt und in einem Projektbericht veröffentlicht.

##### **b) Bereits erhältliche Ergebnisse**

Das Forschungsprojekt analysiert relevante Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Intracting. Daraus hat die Universität Kassel die nachfolgende Darstellung erarbeitet.

Finanzierung Energiekosten	Landeshaushalt		Hochschulhaushalt
Bauherreneigenschaft	Keine	Teilweise	Vollständig
Verantwortlichkeit Bauunterhaltung	Keine	Teilweise	Vollständig
Finanzierung Bauunterhaltung	Landeshaushalt	Teilweise	Hochschulhaushalt
Finanzierung Baumaßnahmen	Landeshaushalt	Teilweise	Hochschulhaushalt
Energieeinsparpotential des Gebäudebestands	Gering	Mittel	Hoch

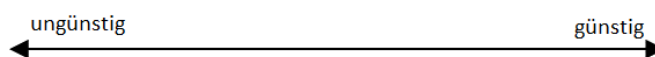


Bild 24: Relevante Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Intracting. Je weiter rechts sich eine Hochschule in den jeweiligen Rubriken einordnen kann, desto vorteilhafter ist dies für eine erfolgreiche Umsetzung von Intracting. Findet sich eine Hochschule in einem Feld mit blauer Schrift wieder, ist von einer Umsetzung des in diesem Projekt beschriebenen Intracting-Vorhabens abzuraten. © Universität Kassel.

Das Forschungsprojekt IntrHo erstellt u. a. Prognosen, welchen Beitrag Intracting zur Reduzierung des Energieverbrauchs leisten kann. Nachfolgend wird eine mögliche Entwicklung der jährlichen Energieeinsparungen durch die Reinvestition der eingesparten Energiekosten im Sinne des Intracting-Prinzips am Beispiel der Universität Kassel veranschaulicht.

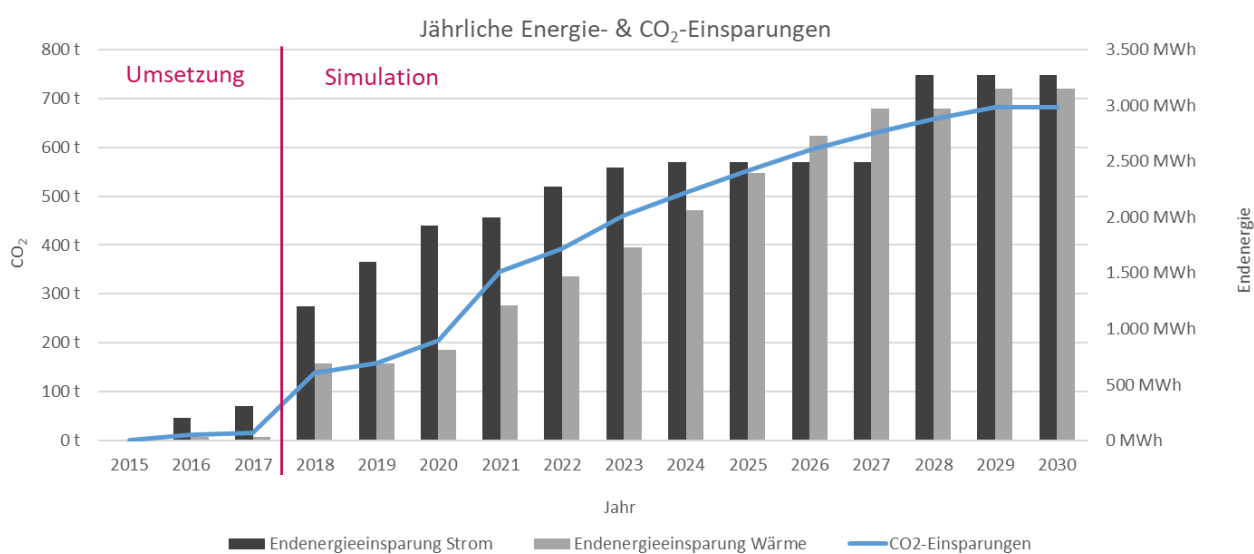


Bild 25: Zeitliche Entwicklung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch energetische Sanierungsmaßnahmen im Zuge des Intracting-Vorhabens der Uni Kassel. Diese Abbildung stellt vorläufige Ergebnisse durch die Simulation mit standardisierten Sanierungsmaßnahmen dar. (Bis 2017 wurden tatsächlich umgesetzte Maßnahmen angesetzt).

### 2.8.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung

In dem Forschungsprojekt wird systematisch und übertragbar herausgearbeitet, welche Modelle zur Implementierung von Intracting in die Hochschulverwaltung geeignet sind. Berücksichtigt werden dabei die unterschiedlichen verwaltungs- und haushalts-

spezifischen Rahmenbedingungen der Hochschulen, die finanzielle Ausstattung der Intractingkostenstelle sowie die baulichen und nutzungsspezifischen Randbedingungen. Um die verschiedenen Randbedingungen an Hochschulen, die durch die Kulturhoheit der Länder in Deutschland herrscht, abzudecken, wurde zu Projektbeginn eine Klassifizierung der Hochschulen vorgenommen. Die Klassifizierung diente als Grundlage zur Auswahl der Partnerhochschulen, um ein möglichst breites Spektrum der deutschen Hochschullandschaft abzudecken.

Die Partnerhochschulen plausibilisieren die im Projekt erarbeiteten Ansätze und Werkzeuge und geben ihrerseits Handlungsempfehlungen. Durch den direkten Austausch wird sichergestellt, dass die Ergebnisse des Projekts die notwendige Breite aufweisen, um ein möglichst großes Spektrum an Randbedingungen abzudecken.

Neben der direkten Zusammenarbeit mit Hochschulen werden der Austausch mit und die Information von Hochschulen zu dem Thema Intracting über die Teilnahme an Fachtagungen und Veröffentlichung von Fachartikeln sichergestellt und so potentielle Nutzer auf das Thema aufmerksam gemacht.

#### **2.8.2.6 Umsetzung in die Lehre**

In diversen Vorlesungen des Fachgebiets wird über das Projekt informiert. Des Weiteren werden studentische Arbeiten in Form von Bachelor-, Master- oder Studienarbeiten zu Teilbereichen des Projekts angeboten und umgesetzt.

#### **2.8.2.7 Lessons Learned**

##### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Die Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen werden im Zuge des Monitorings der Umsetzung von Intracting an der Universität Kassel zum aktuellen Zeitpunkt dokumentiert und aufbereitet.

##### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Die Hemmnisse und Erfolgsfaktoren bei der Einführung und Umsetzung von Intracting u. a. an der Universität Kassel werden im Rahmen des Monitorings erhoben. Diese werden im Abschlussbericht des Forschungsprojektes und im Intracting-Leitfaden dokumentiert und stehen damit Interessierten und der Fachöffentlichkeit zur Verfügung.

##### **c) Energetische Benchmarks**

Noch keine.

##### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Noch keine.

##### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**


Die Planungshilfsmittel werden derzeit von Projektbeteiligten getestet. Rückmeldungen zu den Erfahrungen liegen zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor.

## 2.9 Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg

Autorenteam:

- Prof. Dr. rer. nat. Oliver Opel (FH Westküste),
- Samuel Rischmüller, M. Sc., Dr.-Ing. Stefan Plesser (SIZ energie+)

### 2.9.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg Monitoring Neubau Zentralgebäude Universität Lüneburg		
<b>Projektbild</b>	 <p>Ostteil des Campus mit BHKW-Zentrale und Zentralgebäude-Baustelle. © Leuphana Universität Lüneburg.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Leuphana Universität Lüneburg Universitätsallee 1 21335 Lüneburg		
<b>Projektbeteiligte</b>	Leuphana Universität Lüneburg	GFZ Potsdam	GTN Neubrandenburg
	RWTH Aachen	EPA Aachen	SIZ energie+
	energydesign braunschweig GmbH	synavision gmbH	
<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	3 Verwaltungsgebäude, 1 Bibliothek, 5 Hörsaalgebäude, 1 Mensa (incl. Büros), 10 Institutsgebäude (Seminarräume, Büros, Labore und Medienzentrum), 1 Ateliergebäude, 1 Zentralgebäude (Seminarräume, Büros, Labore, Cafeteria, Hörsaal), 1 Büro- und Café-Gebäude, 1 Sporthalle, 1 Fitness- und Gymnastikzentrum In Summe: 25 Gebäude		
<b>Neubauten im Projekt</b>	Zentralgebäude (4 Gebäudeteile mit Auditorium, vielseitig nutzbarer Veranstaltungsfläche, Restaurant, Seminarräume, Büro- und Besprechungsräume sowie Maschinenhalle)		



<b>Baujahr der Gebäude</b>	Altgebäude 1936, Mensasaal 1990, Bibliothek und Hörsäle 1996, Zentralgebäude 2017							
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	Entsprechend des Baualters. In den Gebäuden aus dem Jahr 1936 wurden Dach- und Heizungssanierungen durchgeführt. In 2010 wurde das Nahwärmesystem saniert. Das Zentralgebäude unterschreitet den EnEV 2009-Standard um 48 %.							
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	Das Gelände wurde aus einer Energiezentrale des Versorgers Avacon mit Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung versorgt. (2 BHKW +2 Kessel mit insgesamt 525 kW <sub>el</sub> und 10 MW <sub>th</sub> , 50 m <sup>3</sup> Speicher). Der Energieträger war Erdgas.							
<b>Projektlaufzeit</b>	Phase I: 10/2010 – 12/2017 Phase II: 09/2016 – 08/2020							
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betriebsoptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungs- methode	Nutzersensibili- sierung
	X		X		XX		X	X
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung				
	XX	XX	X	X				
<b>Projekthalt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klimaneutrale Energieversorgung (Null- oder negative Treibhausgas-Bilanz)</li> <li>• Einsparung im Bestand (30 % Endenergie, 50 % Primärenergie)</li> <li>• Effizienter Neubau (&lt; 100 kWh/m<sup>2</sup>a Endenergie)</li> <li>• Qualitätssicherung Fertigstellung, Inbetriebnahme, Einregulierung Neubau</li> <li>• Monitoring und Betriebsoptimierung Neubau</li> <li>• Nutzereinbindung (Ambient Computing)</li> </ul>							
<b>Projektmittel</b>	Insgesamt: 4.308.433 € davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 2.833.848 €							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Bestand (Energieeinsparcontracting): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung Heizkreise / Abschaltung Nahwärme im Sommer</li> <li>• Neue Zähler und Effizienzpumpen</li> <li>• LED-Beleuchtung und Einzelraumregelung</li> <li>• Deckenstrahlplatten in der Turnhalle,</li> <li>• Schnelldampferzeuger in der Mensa</li> </ul> Neubau: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmenutzung auf 2 Temperaturniveaus und interne Kaskadierung</li> <li>• LED-Tages- und Kunstlichtsystem</li> <li>• Schaltbare Verglasung in der Südost- und Südwestfassade</li> <li>• Aktivierte PCM-Kühldecken</li> <li>• Vakuuminisulationspaneele (Terrasse)</li> <li>• Intelligente Gebäudetechnik zur Nutzereinbindung</li> <li>• Monitoringkonzept und Modellräume</li> <li>• Umfangreiche Verbrauchsmessung</li> </ul>							

<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	EU-weite Ausschreibung für Energieliefercontracting mit Bewertung der Exergieeffizienz, erneuerbare Energie-Nutzung (60 %) und Preis (40 %). Umgesetztes Konzept: Modernisierung der BHKWs und Umstellung auf Biomethan, Option auf Errichtung eines Aquiferspeichers. Energieeinsparcontracting mit Installation von 650 kW <sub>p</sub> Photovoltaik, insgesamt 720 kW <sub>p</sub> , und diversen Einsparmaßnahmen.					
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	56.148 m <sup>2</sup> (2012: 58.841 m <sup>2</sup> )		80.581 m <sup>2</sup>			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt</b> (gemessen 2012, GTZ-bereinigt)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	4.928	83,8	2.020	34,3	660.467
	Kälte	-	-	-	-	
	Strom	2.437	41,4	6.336	108,0	319.247
Summe	7.365	125,0	8.356	142,0	979.714	
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b> (gemessen 2018, GTZ bereinigt)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	5.897	73,2	-1.501	-18,6	556.598
	Kälte		3,5	110	1,4	53.585
	Strom	2.370	29,4	4.266	52,9	405.158
Summe	8.552	106,0	2.539	35,7	1.015.341	
	Für Biomethan (EEG) wurde der PEF 0,6 (gemäß GEG-Entwurf § 22 (2)) verwendet.					
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE2.E für die Betriebsoptimierung der schaltbaren Verglasung Neubau</li> <li>• Synavision - Digitaler Prüfstand für Monitoring und Betriebsoptimierung Neubau</li> <li>• FeFlow und TRNSYS zur Speichersimulation</li> </ul>					
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diverse Abschlussarbeiten und Konferenzbeiträge.</li> <li>• Peer-reviewed Paper, u. a. [55]</li> <li>• Abschlussbericht mit umfangreichen Anlagen [56]</li> </ul>					

## 2.9.2 Projektbeschreibung

### 2.9.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Die alte Kaserne an der Scharnhorststraße, 1936 errichtet, erfuhr in den 90er-Jahren im nördlichen Teil unter Nutzung der alten Kasernengebäude die Konversion zum Universitätsgelände. Im südlichen Teil befindet sich heute das Wohngebiet Bockelsberg mit 504 Wohneinheiten, diversen Geschäften und Gewerbebetrieben. Bereits im Zuge der Konversion wurde für die Energieversorgung des Bockelsberg auf Kraft-Wärme-Kopplung gesetzt. Im Bereich der Universität wurde das noch aus den 30er-Jahren stammende Dampfnetz als Wärmenetz verwendet, das 2010 vor Beginn des Projekts saniert wurde. Weiterhin gibt es ein universitätseigenes Niederspannungsnetz für die Stromversorgung.

Neben den 14 durch die Universität genutzten alten Kasernengebäuden in Vollziegelbauweise wurden 2 ehemalige Gebäude in privater Trägerschaft als Studentenwohnheim verwendet und verfügten bereits über isolierverglaste Fenster, während die durch die Universität genutzten Gebäude überwiegend noch Einscheiben-Doppel-Kastenfenster besaßen. Die in den 90er-Jahren vorgenommenen Erweiterungen (Speisesaal, Hörsäle, Bibliothek) sowie ausgebauten Hallen (Ladenzeile, (Fitness-)Studio 21) verfügten über Isolierverglasung und dem damaligen Baustandard entsprechende Dämmung. Die Dachgeschosse der Universitätsgebäude wurden von 2007-2013 sukzessive nach jeweils gültiger EnEV ausgebaut (seit Projektstart 2010 6.713 m<sup>2</sup>) und verfügten über Isolierverglasung bzw. Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung. Die Mensa, der Speisesaal, die Hörsäle und die Bibliothek verfügten über mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Die in der Ladenzeile untergebrachten Drittnutzer auf dem Campus (Sparkassenfiliale, Techniker Krankenkasse, Unibuch, Campus Copy) sowie das Studio 21 wurden zusammen mit einem Kindergarten über das Wärmenetz mitversorgt.

Die bauliche Entwicklung des Campus Scharnhorststraße basiert auf einer Flächenplanung, die im Zuge einer profilbildenden Neuausrichtung der Universität mit den Säulen Humanismus, Nachhaltigkeit sowie Handlungsorientierung entstand. Sie folgte zeitlich auf die Fusion der Universität Lüneburg mit der Fachhochschule Nordostniedersachsen und die Umwandlung in eine Stiftungsuniversität. Basis ist die Zusammenführung der drei Lüneburger Standorte auf dem Campus Scharnhorststraße, um Pendelverkehre zu vermeiden und die Vorteile eines Universitätscampus vollständig nutzen zu können. Das international sichtbare Zeichen der als Bologna-Modelluniversität inhaltlich konsequent an inter- und transdisziplinärer Forschung und Lehre ausgerichteten Profilierung stellt das von Prof. Daniel Libeskind entworfene und in studentischen Seminaren optimierte neue Zentralgebäude mit 17.152 m<sup>2</sup> Nettogrundfläche dar. Zeitgleich mit der Aufnahme der Planungen für die bauliche Campuserweiterung wurde die „klimaneutrale Universität“ als Ziel festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt emittierte die Universität jährlich ca. 8.000 t CO<sub>2</sub>, zwei Drittel davon aus Pendelverkehren und Dienstreisen.

Es fehlte ein großer Hörsaal für die Durchführung von Veranstaltungen für eine vollständige Semesterkohorte, für fächerübergreifende Veranstaltungen im Leuphana-Semester (Studium Generale) und Komplementärstudium sowie Gastvorlesungen, akademische Feiern sowie Tagungen und Veranstaltungen. Weiterhin sollten eine Cafeteria/Restaurant, Seminarräume, Arbeitsräume für Forscher, Gruppenräume und flexibel zu nutzende Flächen für Studierende geschaffen werden. Um eine hohe Auslastung zu gewährleisten, sollte zusätzlich eine Funktionalität als Stadthalle, für Musikveranstaltungen, öffentliche Lesungen, Messen und Ausstellungen gegeben sein.

### 2.9.2.2 Die beteiligten Akteure

#### a) an den Prozessen der Universität

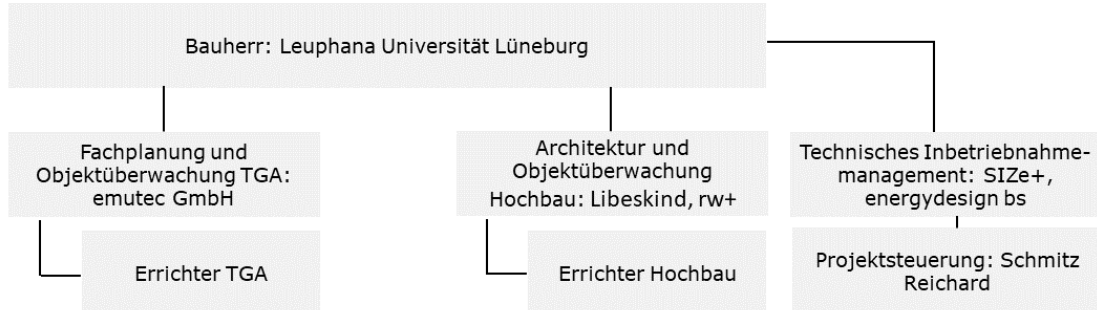
- *Bauherr*: Stiftung Universität Lüneburg
- *Projektleitung*: Susanne Ohse, Leiterin Stabsstelle Campuserwicklung
- *Mitarbeiter Stabsstelle*: Frank Sudfeld (Hochbau), Oliver Günther (Hochbau), Simone Endler (Hochbau), Daniela Wöbken (Assistenz)
- *Projektsteuerung*: Schmitz Reichard (Aachen)
- *Forschungsteam Leuphana*: Prof. Wolfgang Ruck (Projektleiter), Prof. Dr. Oliver Opel (Projektkoordinator), Dipl.-Ing. (FH) Karl F. Werner, M. Eng. (Bautechnik), Dipl.-Ing. Nikolai Strodel (Energietechnik), Andrea Tribel, M. A. (Kommunikationswissenschaft), Jan Geffken, M. Sc. (Nutzereinbindung)
- *Netzwerk*: Prof. Dr. Oliver Opel, FH Westküste (Gastwissenschaftler), Marlies Wiegand (Gruppenleiterin Gebäudetechnik Arbeitsgruppe Opel am Institut für die Transformation des Energiesystems)
- *Technischer Gebäudebetrieb*: Thomas Müller (Leiter Gebäudemanagement), Oliver Braune (Leiter Betriebstechnik)

#### b) am Projekt

- *Entwurfsverfasser*: Prof. Daniel Libeskind (Leuphana Universität/New York)
- *Ausführender Architekt*: Büro rw+ (Berlin)
- *Statik*: Boll und Partner GmbH (Stuttgart)
- *Fachplaner Gebäudetechnik*: emutec GmbH (Norderstedt)
- *Fassadenplanung*: Arup GmbH (Berlin)
- *EnEV-Berechnung*: Arup GmbH (Berlin)
- *Außenanlagen*: Karres en Brands (Niederlande)
- *Energieliefercontracting*: Avacon Natur GmbH
- *Energieeinsparcontracting*: Cofely Deutschland GmbH
- *Forschung extern*: GeoForschungsZentrum GFZ, Helmholtz-Zentrum Potsdam (Energiesystemmodellierung und Speicher), Geothermie Neubrandenburg (Geologisch-technische und wirtschaftliche Machbarkeitsanalyse und Speichermodellierung), EPA Aachen (dynamische Energiesystem- und Gebäudemodellierung), RWTH Aachen (dynamische Energiesystemmodellierung), SIZ Innovationszentrum energie+, energydesign Braunschweig (Monitoringkonzept, Inbetriebnahmebegleitung, Monitoring und Betriebsoptimierung).

### c) Organisationsstruktur

Neubau



Betrieb

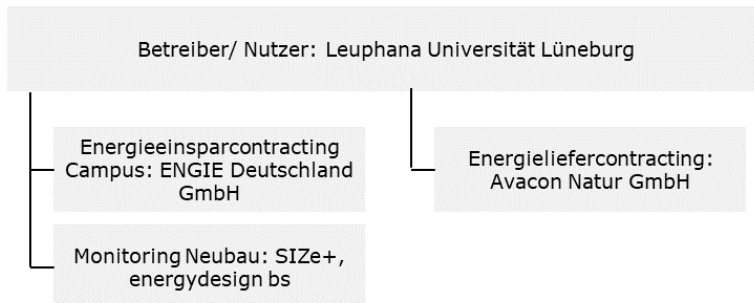


Bild 26: Schematische Darstellung der Projektbeteiligten im Projekt Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg. © Leuphana Universität Lüneburg.

#### 2.9.2.3 Der Projektinhalt

##### a) Projektziele

Für den Neubau sollte die vorhandene, exergetisch bereits recht günstige Infrastruktur genutzt und optimiert werden. Ziel war eine Nutzung niedrigexergetischer Wärme zur Auskühlung des Rücklaufs des Campusnetzes, um Speicher besser integrieren zu können. Die Energiebereitstellung für den Campus sollte auf erneuerbare Energien umgestellt und dabei klimaneutral gestaltet werden. Da von niedrigen Primärenergiebedarfen für die Wärmeversorgung ausgegangen werden konnte, lag der Fokus für den Neubau auf dem sparsamen Umgang mit Kälte und elektrischer Energie. Der Endenergiebedarf sollte dabei durch die Nutzung innovativer Technologien 100 kWh/m<sup>2</sup>a nicht überschreiten.

Das unter Einbindung von Studierenden der Kultur- und Umweltwissenschaften erarbeitete Gebäudekonzept sah zur Einsparung elektrischer Energie bereits eine freie Lüftung der fassadenseitigen Büros im zentralen Bauteil Forschungszentrum sowie Nachtauskühlung vor. Die Kubatur, Fassadenausrichtung und Fensterflächen wurden ebenfalls zur Kältelastreduktion sowie auf ein günstiges Außenfläche-zu-Volumen-Verhältnis optimiert. Die Umsetzung der Planung sowie die Inbetriebnahme der technischen Anlagen wird durch ein technisches Qualitätsmanagement als Unterstützung der Projektsteuerung und des Bauherrn begleitet.

Energieeinsparungen im Bestand sollten (wie die Energieversorgung) durch ein Energieeinsparcontracting umgesetzt werden. Zudem wird der Neubau nahtlos nach der Inbetriebnahme im Betrieb überwacht, um frühzeitige Performance-Defizite festzustellen und beheben zu können. Eine Vorstudie ergab Potentiale im Bereich von 30 % Endenergie.

Innovative, beforschte Technologien und Konzepte sind:

- *Effizienter Neubau*
- *Exergieoptimierte Energienutzung*
- *Wärmespeicherung und Regelenergieeinbindung*
- *Intelligente Gebäudetechnik und Nutzereinbindung*
- *Technisches Inbetriebnahmemanagement*
- *Monitoring und Betriebsoptimierung Neubau*

## **b) Projektarbeiten**

*Neubau:*

- Energetische Konzeption und Fachplanungsleistungen: Planerisch wurde die Einbindung des Gebäudes in das Campusnetz sowie der Einsatz von Vakuumisolierverglasung, schaltbarer Verglasung, PCM-Klimadecken, Vakuumisolierpaneele sowie nutzungsabhängige, effiziente Lüftungstechnik und Luftführung und das LED-Tages- und Kunstlichtsystem bearbeitet. Zudem wurde eine Verschattungsstudie erstellt.
- Dynamische Modellierung: Modelliert wurden der Wärme- und Kältebedarf sowie der Bedarf an elektrischer Energie für Beleuchtung und Geräte auf der Basis von DOE.2E. Der modellierte Kältebelastgang wurde der Kälteanlagenplanung zugrunde gelegt. Weiterhin wurden Raumtemperaturen unter Nutzung der E-Control-Verglasung modelliert.
- Beratung des Bauherrn und Umsetzungsbegleitung Energiekonzept: Der Bauherr wurde während der Planung und Bauzeit in regelmäßigen Steuerungsrounds sowie in Planungssitzungen, Workshops, Besprechungen zu bestimmten Themen und Teamsitzungen bei der Umsetzung des energetischen Konzepts durch die beauftragten Fachplaner beraten und unterstützt. Die Umsetzung des Monitoringkonzepts auf der Baustelle wurde geprüft.
- Planung und Umsetzung Monitoringkonzept und Nutzereinbindung: Es wurde ein gebäudetechnisches Konzept für die Nutzereinbindung sowie ein Monitoringkonzept erstellt und in der Umsetzung begleitet.
- Durchführung des Monitorings und der Betriebsoptimierung: Das Monitoring und die Betriebsoptimierung haben im Jahr 2018 begonnen und werden bis zum Projektende August 2020 fortgeführt. Vor der Abnahme der GA-Leistungen wurde ein Probetrieb durchgeführt, um auf eine planungskonforme Umsetzung zu prüfen.
- Projektkommunikation: Das Projekt wurde regelmäßig interessierten Besuchergruppen sowie auf Veranstaltungen durch Vorträge und Führungen erläutert.



Bild 25: Altes Kasernengebäude vor Neubau. © Leuphana Universität Lüneburg.

*Campus:*

- Ausschreibung und Vergabe Energieeinspar- und Energieliefercontracting: Das Forschungsteam setzte die Ausschreibungskriterien fest und begleitete das zweistufige Verhandlungsverfahren, in dem insbesondere auf die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den beiden Vorhaben eingegangen werden musste. Ausschreibungskriterium war die Einsparung von Primärenergie in % des damaligen Bedarfs und der damals vorhandenen Versorgungsstruktur sowie die Reduktionskosten in €/kWh.
- Dynamische Modellierung: Der Campus wurde bautechnisch und energietechnisch erfasst und mittels DOE.2E modelliert.
- Begleitung der Umsetzung: Das Energieeinsparcontracting wurde inhaltlich und organisatorisch durch das Forschungsteam und die Betriebstechnik unterstützt.
- Projektkommunikation und Nutzereinbindung: Während der Konzeption und Planung der Einsparmaßnahmen wurde insbesondere die Betriebstechnik eingebunden. Während der Umsetzung gab es Gespräche mit den Nutzern, Informationsveranstaltungen, Informationen auf Info-Screens in der Mensa und im Hörsaalgang. Die Umsetzung der Einzelraumregelung und der Nutzereinbindung über die Haustechnik wurde, ebenso wie die Arbeiten und die Einregulierung der Heizungssysteme, in einer Arbeitsgruppe des Personalrats begleitet, um Fragen des Datenschutzes und des gewünschten thermischen Komforts zu begleiten.

### *Energiesystem:*

- *Exergiebasierte Variantenbetrachtung:* Der Ausschreibung vorausgehend wurde ein Benchmarkszenario auf der Basis von Kraft-Wärme-Kopplung festgelegt und exergetisch bilanziert. Zudem wurden zwei Speicherkonzepte (Kurzzeitspeicherung für stromgeführten Betrieb mit 200 m<sup>3</sup> Wasserspeicher und Langzeitspeicherung für hohe KWK-Anteile und Einsparung exergetisch ineffizienter Spitzenlastkesselnutzung). In diesem Vergleich schnitt die Langzeitspeicherung am effizientesten ab, mit (durch höhere saisonale Speicherverluste, angenommen wurden 60 % Wirkungsgrad) geringem Vorsprung vor der Kurzzeitspeicherung.
- *Ausschreibung/Vergabe Energiesystem:* Die Ausschreibung der Energieversorgung mit Wärme und Kälte erfolgte für den gesamten Campus. Bewertet wurde in einem Punktesystem neben dem Preis (40 %) der Einsatz erneuerbarer Energien (30 %) sowie qualitativ auf der Basis der Benchmarkszenarien die exergetische Qualität der Angebote (30 %). Die Vergabe wurde ebenfalls in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt, um die Abhängigkeiten zwischen wirtschaftlicher Energieeinsparung (abhängig von den zukünftigen Energiepreisen) und Energiebezug (abhängig vom sich zukünftig ergebenden Bedarf) bearbeiten und zusammenführen zu können.
- *Geologisch-technische Machbarkeitsanalyse Aquiferspeicher:* Bestandteil der Ausschreibung war auch die optionale Errichtung eines Aquiferspeichers, dessen geologische Machbarkeit parallel zum Vergabeverfahren untersucht und in das Verfahren eingebracht wurde. Im Ergebnis stellte sich geologisch eine günstige Situation in Lüneburg dar. Weiterhin wurden die Höhe der Investitionen (ca. 4 Mio. € für 150.000 m<sup>3</sup> Wasseräquivalent) und Betriebskosten (ca. 40.000 €/a) einer solchen Lösung ermittelt.
- *Wasserchemische Modellierung:* Bestandteil der Machbarkeitsanalyse war ebenso die wasserchemische Modellierung mit dem Gleichgewichtsmodell PHREEQ, um die maximal mögliche Einspeichertemperatur in Abhängigkeit von Lösungs- und Fällungsprozessen zu bestimmen. Mit 90 °C möglicher Einspeichertemperatur stellte sich die zu erwartende Wasserchemie als für Hochtemperaturspeicherung geeignet dar.
- *Dynamische Modellierung mit Kopplung finite Elemente-Modell mit FeFlow:* Im weiteren Verlauf wurde der Speicher für das Abnehmersystem Bockelsberg unter Einbezug der Niedrigexergieheizsysteme des Zentralgebäudes, die eine Nutzung der gespeicherten Wärme bis unter 30 °C (und damit fast auf dem Niveau der natürlichen Temperatur des Speicherhorizonts in 450 - 500 m Tiefe) und damit hohe Rückgewinnungsgrade ermöglichen, mittels des finite-Elemente-Modells FeFlow sowie mit TRNSYS unter der Variation verschiedener Parameter modelliert, um die bestmögliche Speichereinbindung und Potentiale für dieses Abnehmersystem zu erhalten. In der numerischen Simulation wurde zudem eine neuartige Speichervariante erarbeitet, in der eine hydraulische Beeinflussung der warmen und kalten Seite möglich ist. Dieses senkt die Kosten und erhöhte in der Simulation den Speicherwirkungsgrad.



- *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung:* Basierend auf dem energetischen Modell wurde eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die saisonale Speicherung von Wärme aus Biomethan-Kraft-Wärme-Kopplung im Netz Bockelsberg durchgeführt. Für dieses Abnehmersystem stellte sich zunächst keine ausreichende Wirtschaftlichkeit unter Annahme eines Zeitraums von 15 Jahren (entspricht in etwa der verbleibenden Laufzeit der noch bestehenden Erzeugungsanlagen in der EEG-Förderung) heraus (es würden 80 % Investitionsförderung benötigt). Ursache hierfür ist die geringe Ausnutzung des Systems (es wären im Netz Bockelsberg nur ca. 3,25 GWh Wärme zur saisonalen Einspeicherung vorhanden, der Speicher könnte bei gleichen Errichtungskosten jedoch mindestens 10 GWh speichern).
- *Nachhaltigkeitsbewertung Biomethan:* Da durch Vorgabe der Stiftung als Brennstoff Biomethan eingesetzt werden sollte, wurden die Nachhaltigkeitseffekte dieses Brennstoffes (Treibhausgasausstoß, Flächenverbrauch) untersucht und bewertet. Der spezifische Treibhausgasausstoß für auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas beträgt nach dem Stand der Technik je nach Eingangsstoff inklusive aller Vorketten ca. 50-80 g/kWh [57]-[60]. Negativ zu bewerten ist der Flächendruck auf andere Feldfrüchte und die Erhöhung der Pachtpreise für Ackerflächen. Der Anbau von Biogassubstraten war dabei mitunter auch auf umgebrochenem Grünland rentabel, das von der EU nicht als Ackerland subventioniert wird. Hier kann durch die Änderungen im EEG eine Entspannung erwartet werden. Eine Perspektive ist vor allem die vermehrte Nutzung in KWK als wichtiger Treiber der hinterherhinkenden Wärmewende. Die Aufbereitung und Einspeisung von Biomethan bietet eine entsprechende Möglichkeit.
- *Untersuchung Erweiterungsmöglichkeiten Netz Bockelsberg:* Um einen wirtschaftlichen Einsatz des Speichers zu erreichen, wurden gemeinsam mit dem Versorger und der Stadt und weiteren Akteuren Varianten zur Erweiterung des Wärmenetzes Bockelsberg bzw. einer Zusammenlegung der Netze Bockelsberg und Lüneburg-Mitte diskutiert und auf der Basis bereitgestellter Ist-Daten modelliert. Hierbei stellte sich ein bei 50 % Förderung wirtschaftliches Potential von 13 GWh eingespeicherter Wärme (und 9 GWh (~70 %) wieder nutzbarer Wärme, bei 10 GWh höherer Stromproduktion und > 3.000 t CO<sub>2</sub>/a Reduktionspotential) heraus. Zusätzliche Einnahmequellen könnten die Einbindung von Regelenergienutzung (Power-to-Heat), Abwärme und ggf. solarer Wärme sein.
- *Untersuchung Wirtschaftlichkeit Aquiferspeicher auf Basis aktualisierter Kosten und mittels eines Lastprofilgenerators:* Im Rahmen der Dissertation von Dr. Nikolai Strodel sowie angeschlossen an das Projekt „Aquiferspeicher“ O3ET1376A - Entwicklung der Einsatzfelder für mitteltiefe Aquifer-Wärmespeicher in Norddeutschland unter wirtschaftlich/finanziellen, geologisch/technischen, umweltchemischen und rechtlich/förderpolitischen Aspekten wurde das System weiter untersucht. Die spezifischen Speicherkosten betragen ohne Einbezug von Förderung etwa 6 ct/kWh, bei Ausnutzung der Speicherkapazität von 15 GWh etwa 2 ct/kWh. Im Modell wurden nach 5-10 Jahren Effizienzen von über 70 % im saisonalen Speicherbetrieb erreicht. Die Geologie hat sich weiter als sehr gut geeignet herausgestellt. Trotz der durch die geringe Ausnutzung der Kapazität mit etwa 3 GWh/a zu speichernder Wärme relativ

hohen Speicherkosten wäre ein Betrieb während der Restlaufzeit der EEG-Förderung mit nur 20 % Förderung der Investitionskosten darstellbar. Als Umsetzungshemmnis werden starke, in Lüneburg regional durch Senkungsprozesse (historische Salzgewinnung) nach 2014 (Räumung eines durch Studierende bewohnten Altbaus in der Lüneburger Innenstadt aufgrund von Senkungen) besonders gestiegene Vorbehalte gegen eine Nutzung des Untergrundes festgestellt, die die grundsätzlich vorhandene politische Unterstützung einschränken. Diese Vorbehalte sind sachlich unbegründet. Der geplante Aquiferspeicherstandort liegt etwa 2,5 km in südlicher Richtung; hier ist das Salz mehrere tausend Meter tief gelagert, die Kreide befindet sich auf etwa 800 m u. GOK, der im Tertiär (Obereozän) ermittelte Zielhorizont auf etwa 400 m u. GOK ist unproblematisch zu erreichen und durch eine etwa 100 m mächtige Stauerschicht äußerst gut von den oberen wasserführenden Schichten getrennt.

- *Projektkommunikation und Vorbereitung Umsetzung Aquiferspeicher:* Basierend auf den positiven Ergebnissen eines Speichers für ein größeres Abnehmersystem (als Baustein einer effizienten und klimafreundlichen Wärmeversorgung in den Altstadtgebieten von Lüneburg mit hoher Wärmebedarfsdichte) wurden die Ergebnisse der Öffentlichkeit vorgestellt, im Lüneburger Nachhaltigkeitsrat und im Umweltausschuss beraten. Das Umweltdezernat der Hansestadt Lüneburg hatte zugesagt, hierzu runde Tische mit den relevanten Akteuren einzuberufen, um eine Struktur für ein Umsetzungsprojekt zu finden. Leider wurde dieser Prozess nicht wie geplant begonnen, was durch ein verringertes Interesse der Stadtverwaltung und Lokalpolitik zu erklären ist. Die aktuellen Ergebnisse wurden zunächst auf Arbeitsebene in den Prozess eingespielt, eine neuerliche politische Agendasetzung steht noch aus.

#### *Nutzereinbindung:*

- Konzeption GA und GLT-Konzept für den Neubau: Für die technische Umsetzung wurden Sensor- und Aktorsysteme festgelegt sowie ein Konzept für den Datenexport aus der Gebäudeleittechnik und Nutzereingriffe in die Sollwertsteller erarbeitet.
- Semiotische Fundierung und Konzeption: Um eine möglichst hohe Akzeptanz und Nutzerfreundlichkeit zu gewährleisten wurde das Konzept kommunikationswissenschaftlich untersetzt, um Designprinzipien und Funktionalitäten für die Benutzeroberfläche ableiten zu können.
- Umsetzung und Programmierung AI-App: Die Umsetzung wurde in 2018 beauftragt und in 2019 begonnen.
- Planung und Umsetzung in Campus und Neubau: Um den Komfort für die Nutzer/Innen erhöhen zu können und um Energieeinsparpotentiale aufdecken zu können, wurden im Zentralgebäude 14 Modellräume mit einem erweiterten Sensor-Aktorsystem ausgestattet. Dieses wird auf durch unterschiedliche Steuerungsoptionen der Nutzer/Innen im Hinblick auf Energieeinsparung gegenüber den Betriebskosten und dem erhöhten Komfort evaluiert und kann für die Nutzereinbindung per App

genutzt werden. Auf dem Campus wurde Einzelraumregelung in Büro- und Seminarräumen in 3 Gebäuden umgesetzt, die in das Nutzereinbindungssystem integriert werden sollen.

### c) Projektmittel

Tabelle 9: Kosten für Dachausbau, Contracting und den Neubau des Zentralgebäudes.

	Dachausbau	Contracting	Zentralgebäude	Förderung
KG 300	6.500.000 €	-	40.000.000 €	1.000.000 €
KG 400	3.500.000 €	3.100.000 €	15.000.000 €	1.834.000 €

### 2.9.2.4 Die Projektergebnisse

#### a) Geplante Ergebnisse

Im Rahmen des Monitoringprojekts wird bis Ende 2020 der Abschlussbericht 03ET1415AB EnEff-Campus Monitoring Neubau Zentralgebäude Universität Lüneburg erarbeitet.

#### b) Bereits erhältliche Ergebnisse

Abschlussbericht 03ET1009A (Planung und Umsetzung) mit umfangreichen Anlagen [56]. Anlagen u. a.:

- Machbarkeitsstudie Aquiferspeicher
- EnEV-Berechnung
- dynamische Modellierung Wärme-, Kälte- und Strombedarf
- Verschattungsstudie
- Planungsunterlage Vakuumverglasung
- Planungsunterlage E-Control
- Planungsunterlage PCM-Klimadecken
- Das Zentralgebäude ist als Referenzprojekt im REHVA Guidebook „HVAC Commissioning Process“ [61] enthalten.
- Peer-reviewed Paper, u. a.: Opel, O. et al.: Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg. 2017, [55]

#### c) Weitere Veröffentlichungen:

- Campus: Projektstatus Contracting 1. Jahr (noch in der Einregulierungsphase) [62]
- Energiesystem: Speichereinbindung [63]-[66]
- Nutzereinbindung: Konzept und semiotische Fundierung [67]-[69]

### 2.9.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung

Nach Umsetzung der Energieeinsparmaßnahmen wurde in einer Informationsveranstaltung sowie in den folgenden Jahren auf der Mitarbeiterversammlung über die einzelnen Maßnahmen informiert. Weiterhin wurden Hinweisaufkleber und eine Bro-

schüre, die die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten und die energieeffiziente Nutzung thematisierte, erstellt. Eine weitere Broschüre über die Besonderheiten der Modellräume wurde vorbereitet, aber noch nicht finalisiert.

Aufgrund von Beschwerden über zu geringe Raumtemperaturen direkt nach der Umsetzung der Einsparmaßnahmen wurde ein intensiver Prozess mit dem Betriebsrat gestartet und regelmäßige Informationen über den Mitarbeiter-Mailverteiler über den Stand der Heizsystem-Optimierungen in den Jahren 2014 – 2016 vorgenommen. Letztlich konnte jedoch der unglückliche Start mit zu geringen Temperaturen nach der Einregulierung durch den zur Einsparung mittels Energieeinspar-Garantievertrag verpflichteten Contractor kommunikativ nicht wieder kompensiert werden. Durch den MSR-Tausch und händisch betriebene Heizkreise sowie daraus sich ergebende höhere Temperaturen ist der negative Eindruck des „Sparens an den Mitarbeitern“ inzwischen größtenteils in Vergessenheit geraten, wodurch sich neue Möglichkeiten der Neuoptimierung mittels der neuen MSR, die weitergehende Möglichkeiten bietet, sowie neue Kommunikationsansätze auf tun.

Neben der noch in Umsetzung befindlichen App zur effizienten und interaktiven Nutzung der mit Einzelraumregelung (EZR) ausgestatteten Räume fehlt derzeit noch die Visualisierung der Energieverbräuche, die im Rahmen der Installation eines Energiemanagementsystems durch den Contractor noch geschuldet, aber aufgrund der Erneuerung der MSR und GLT derzeit noch nicht in Betrieb gegangen ist.

#### **2.9.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Thematisierung hauptsächlich im Leuphana-Semester (Studium Generale 1, Semester mit Abschlusskonferenz, neu: Projekt Lüneburg 2030+: Fächerübergreifende, geförderte Veranstaltungsreihe in Kooperation der Stadt zum Envisioning. Ziel: Der Lüneburger Zukunftsatlas mit Maßnahmen in etlichen Nachhaltigkeitsbereichen) und im Komplementärstudium (studiengangunabhängige Wahlpflichtveranstaltungen) sowie im Master Nachhaltigkeitswissenschaften (Transdisziplinäre Projektseminare, Erneuerbare Energien und Bachelor-/Masterarbeiten).

Weitere Arbeiten werden im Studiengang „umweltgerechte Gebäudesystemtechnik“ der FH Westküste angefertigt, weiterhin fließen der Campus und das Zentralgebäude in verschiedenen Veranstaltungen als Fallbeispiele ein.

#### **2.9.2.7 Lessons Learned**

##### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

- Erfordern ein hohes Maß an Kommunikation; je größer die Anzahl der Stakeholder, desto wichtiger und zeitraubender sind Abstimmungsprozesse
- Vor allem im Neubau sind regelmäßige, gemeinsame Steuerungsunden der verschiedenen Teilprojektleiter eine Voraussetzung für integrale, baubegleitende Prozesse
- Verbindliche Ziele aufgrund der Förderung sind im Widerstreit der Interessen wichtige und notwendige Durchsetzungsinstrumente für über gesetzliche Anforderungen hinausgehende Ansprüche. Energieeffizienz und Nachhaltigkeit sind schön, aber im Zweifel und unter Kostendruck in der Regel kein Muss. Die Energiepreise sind

weiterhin niedrig und Betriebskosten oftmals weiterhin über gesonderte Finanzierungen über Umlagen oder spezifische Zuwendungen abgedeckt.

- Infrastrukturprojekte (bspw. Groß-Wärmespeicher, Netzausbau) sind ebenfalls stark von der richtigen Akteursansprache und Kommunikation abhängig, wobei sich das kommunikative Umfeld jedoch verändern kann.
- Erfolgreiche Projektkommunikation lässt sich daher nicht erzwingen, vielmehr müssen in der Kommunikation Opportunitäten und die richtigen Zeitfenster genutzt werden.
- Contracting ist eine für öffentliche Liegenschaften gut geeignete Art der Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen und für die Energiebereitstellung.
- Technisches Monitoring ist ein wichtiges Instrument, um den Bauherrn bereits in der Planungsphase unabhängig von anderen Projektbeteiligten zu unterstützen und im Sinne eines energieeffizienten Gebäudebetriebs auf Probleme hinzuweisen. Bei umfangreichen Maßnahmen sind die internen Personalkapazitäten und Baumittel schnell limitierend, insbesondere, wenn Kredite als Finanzierungsoption nicht möglich sind.
- Insbesondere beim Einsparcontracting stellen sich Herausforderungen in der Vereinbarkeit von Wirtschaftlichkeit, Nutzerwünschen (insbesondere durch die sehr variablen und individuellen Nutzungsarten und -zeiten) und organisatorischen Prozessen.
- Die Schnittstelle Betrieb der energierelevanten Anlagen und Instandhaltung der Liegenschaft (durch den Nutzer) und Wartung/Reparatur der im Rahmen des Contractings installierten Anlagen (durch den Contractor) muss individuell ausgestaltet werden.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

- Direkt nach der Optimierung der Heizsysteme wurde in 2014 der bislang geringste GTZ-bereinigte Heizwärmebedarf mit 3.789 MWh Wärme noch ohne Zentralgebäudeumbau erreicht, was einer Einsparung von 23 % Endenergie in den Bestandsgebäuden entsprach.
- In Schlechräumen musste die Ventil-Voreinstellung korrigiert werden, teilweise wurden Heizflächen zugebaut.
- Der Strombedarf ist bedingt durch das Wachstum der Universität seit 2007 stark angestiegen und konnte in absoluten Einheiten nur teilweise durch die Einsparmaßnahmen kompensiert werden.
- Bedingt durch eine MSR-Sanierung und zwischenzeitliche Handregelung stieg der Heizwärmebedarf in 2016 wieder stark an. Nach durchgeführter MSR-Sanierung steht aktuell eine Neuoptimierung mit den nun vorteilhafteren technischen Möglichkeiten (nichtlineare Heizkurven) an.
- Der geplante Aquifer-Wärmespeicher konnte bislang nicht umgesetzt werden, da eine um 2014 verstärkt aufgekommene Diskussion um Senkungsgebiete im Stadtkern das politische Klima für die untertägige Wärmespeicherung deutlich verschlechterte. Der geplante Standort am Campus Scharnhorststraße weist jedoch keine geologischen Risiken auf (s. o.).

### c) Energetische Benchmarks

- In der dynamischen Modellierung wurden die Strombedarfe verschiedener Geräte wie PC, Drucker, Kopierer, Dimmerraum, Veranstaltungstechnik miterfasst, da diese den Wärme- und Kältebedarf beeinflussen.
- Für den Campus liegen bereits Messdaten aus einem Jahr nach Umsetzung des Contractings vor. Beachtet werden muss außerdem die in der Projektlaufzeit gestiegene Studierendenzahl (von ca. 6.500 auf über 9.000 Studierende). Im Jahr 2014/2015 ergaben sich Endenergieeinsparungen beim Wärmebedarf von witterungsbereinigt 23 %.
- Im Vergleich der gemessenen Endenergiebedarfe vor Umsetzung des Projekts (2012, witterungsbereinigt) und aktuellen, witterungsbereinigten Verbräuche (2018, Bild 27, links) zeigen sich nur geringe absolute Endenergieeinsparungen in den Campus-Altbauten. Ursache ist der in 2018 nach MSR-Sanierung erneut unoptimierte Zustand der Heizungsanlagen.

In der Primärenergiebilanz (Bild 27 rechts) wirken sich die verringerten Primärenergiefaktoren aus. Für Biomethan wurde gemäß aktuellem GEG-Entwurf der PEF von 0,6 verwendet, es ergibt sich für das Nahwärmesystem ein negativer PEF von -0,25. Damit ist die Primärenergiebilanz durch den Strombezug inklusive Nutzerstrom sowie die durch stromgeführte Fahrweise gesunkene BHKW-Nutzung (Anteil KWK aus Biomethan seit 2016 nur noch 70–75 %) nicht vollständig ausgeglichen. Ebenfalls wirkt sich der gegenüber der ursprünglichen Zielsetzung fehlende Aquiferspeicher aus.

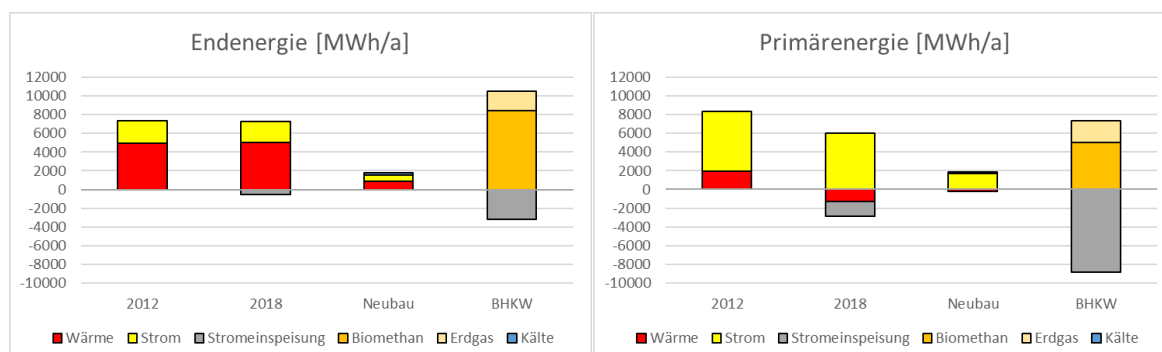


Bild 27: Witterungsbereinigte Endenergie- (links) und Primärenergieverbräuche und -erzeugung (rechts) inkl. Nutzerstrom. © Leuphana Universität Lüneburg.

- Der gemessene spezifische Energieverbrauch des Campus ohne Zentralgebäude ist gegenüber 2012 trotz gestiegener Studierendenzahlen leicht gesunken, bei Einbezug der Photovoltaikanlage ergibt sich eine Stromeinsparung von 34,5 %. Der Wärmebedarf ist nach anfänglicher Reduktion wieder auf dem Niveau von 2012 und bietet im Licht der Projekterfahrungen noch Optimierungspotential von absolut 0,5 GWh/a oder 8,3 kWh/m<sup>2</sup>a bzw. 10 %, ohne die ursprünglich angezielte, aber mit deutlichen Nutzerbeschwerden einhergehende Zieltemperatur von 20,5 °C einzuhalten (Bild 28, links). Der Strombedarf der Campusgebäude ist vergleichbar mit den berechneten Bedarfen des bautechnisch deutlich anspruchsvolleren Neubaus, der

seine zusätzlichen Strombedarfe für Lüftung und Kühlung durch effizientere Beleuchtung kompensiert. Die Stromverbräuche durch Lüftung fallen deutlich geringer als in der Modellierung angenommen (Bild 28, rechts).

- Der Verbrauch des Zentralgebäudes liegt nach Inbetriebnahme der Maschinenhalle, aber noch ohne Restaurantbetrieb, in 2018 bei etwa 100 kWh/m<sup>2</sup>a Endenergie. Die Stromverbräuche für Lüftung sind deutlich geringer als modelliert, ebenso der Wärmebedarf, insgesamt liegt der Verbrauch unter den mittels DOE2.E für 50 und 100 % Auslastung modellierten Werten (Bild 29).

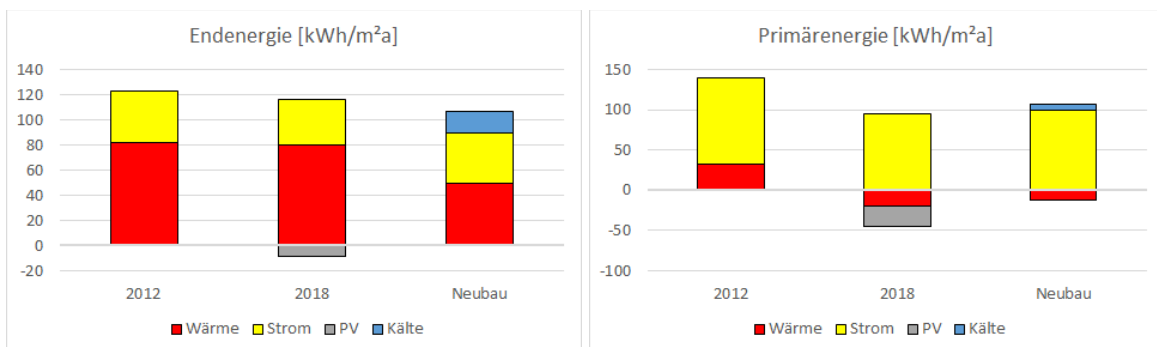


Bild 28: Spezifische Endenergie- (links) und Primärenergieverbräuche (rechts).  
© Leuphana Universität Lüneburg.

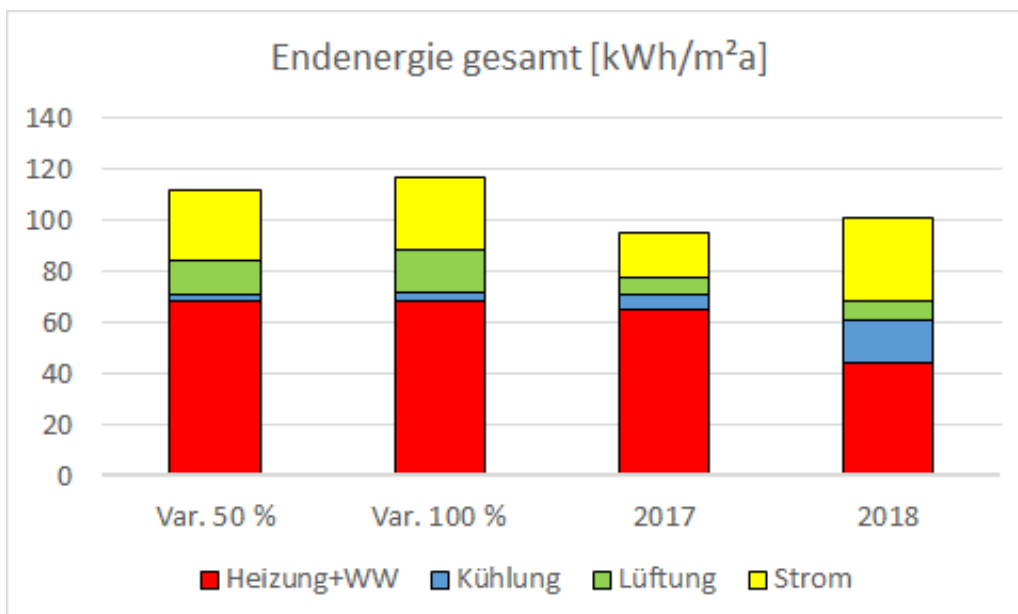


Bild 29: Berechnete (DOE2.E) und gemessene Verbräuche des Zentralgebäudes inkl. Nutzerstrom. © Leuphana Universität Lüneburg.

- Der spezifische Gebäudeenergieverbrauch ohne Nutzerstrom liegt in etwa beim Bedarf nach EnEV-Berechnung, wobei jedoch vor allem in 2018 deutlich mehr Kühlung (Kältebedarf nicht witterungsbereinigt) und weniger Heizung benötigt wurde

(Bild 30). Dies lag auch an einer im Rahmen der Untersuchungen mittels des Digitalen Zwillings aufgefallenen Vollast-Periode der Kühlung und einhergehendem erhöhtem Betrieb der RLT-Anlage 1 im August 2018.

- Der Optimierungsbericht weist zudem ein Potential von etwa 150 MWh Endenergie bei Optimierung der Lüftungsanlagen aus.
- Bei der Analyse des Stromverbrauchs fällt der hohe Anteil der Umluftkühlgeräte auf (Kälteübergabe Dimmerraum und ISP-Räume), der in der Größenordnung der RLT liegt (Bild 31).

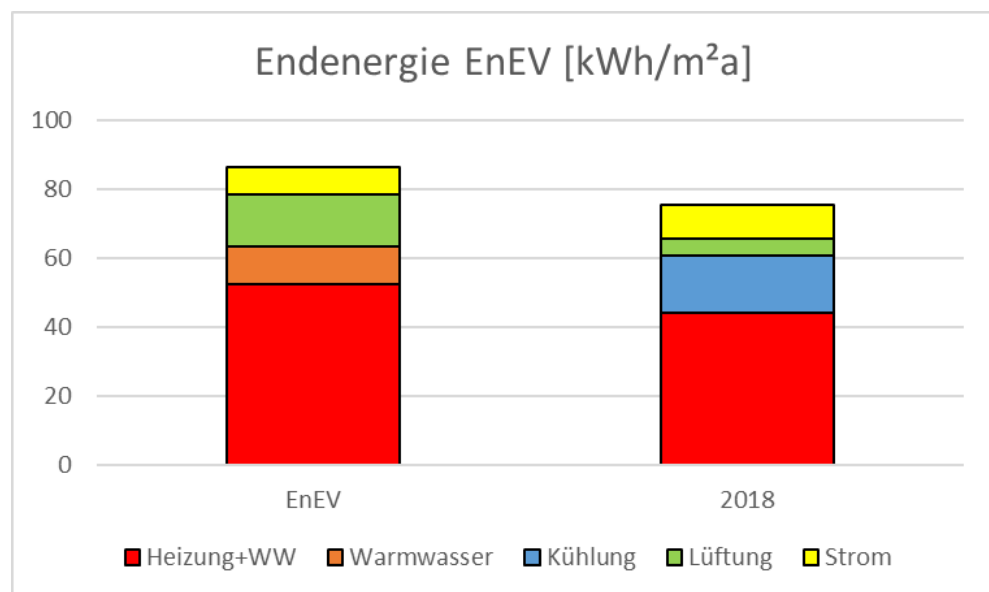


Bild 30: Spezifische Gebäudeenergiebedarfe nach EnEV 2009 (links) und 2018 gemessene Verbräuche des Zentralgebäudes. © Leuphana Universität Lüneburg.

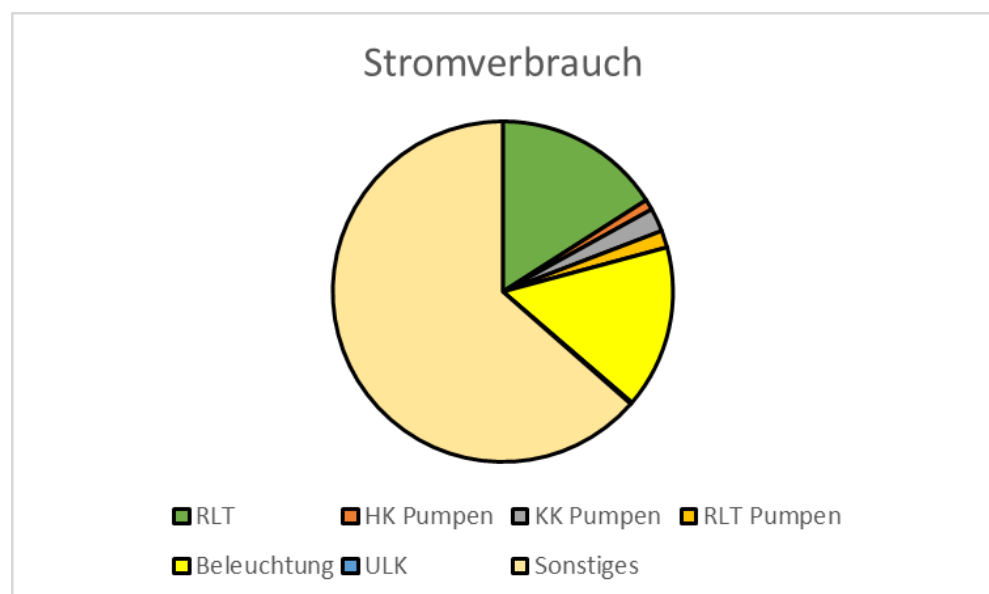


Bild 31: Stromverbrauch Zentralgebäude © Steinbeis-Innovationszentrum energie +.



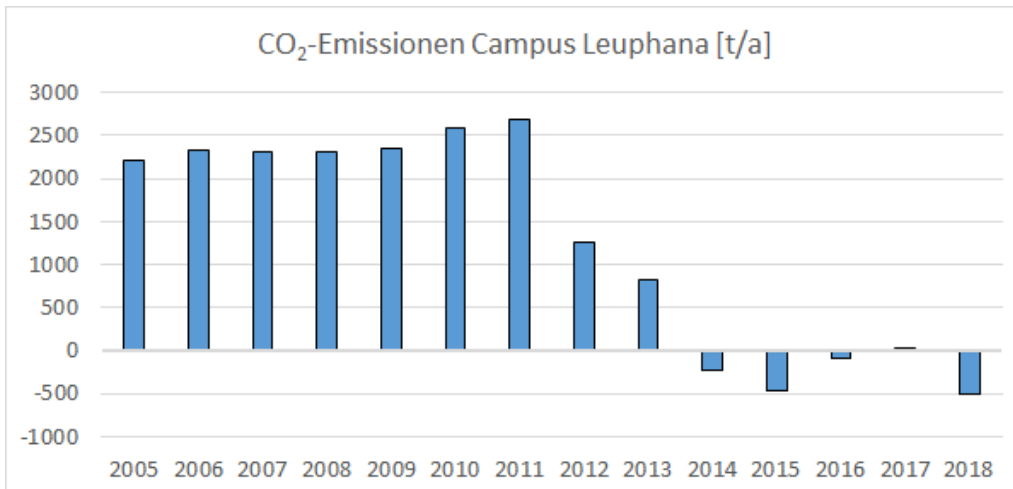


Bild 32: THG-Bilanz der Leuphana Universität für Strom, Wärme und Kälte, Campus und Außenstandorte. © Leuphana Universität Lüneburg.

- In der THG-Bilanzierung des Campus wirkt sich besonders die Stromeinspeisung und daraus resultierende Gutschrift von  $-821 \text{ g CO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q./kWh}$  aus. Damit ergibt sich eine negative  $\text{CO}_2$ -Bilanz unter Einbezug von Wärme, Kälte und Strom (Ökostrom) für die Gesamtuniversität inklusive der noch mit Gas und Öl beheizten Außenstandorte (Bild 6).
- Weitere Emissionen entstehen durch Dienstreisen (ca. 600 t/a), Essen in der Mensa (ca. 500 t/a), Wasser und Papier (50 t/a) und die auf eine Nutzungszeit von 50 Jahren umgelegten Emissionen bei der Erstellung des Zentralgebäudeneubaus (250 t/a).
- Für den Campus Universitätsallee ohne Außenstandorte ergibt sich eine ausgeglichene Bilanz unter Einbezug dieser Emissionen.
- Der Eindruck, ein negativer PEF für die erzeugte Nahwärme bzw. eine Einspeisegutschrift für den Strom führe zu sinkenden berechneten Primärenergiebedarfen bzw. Emissionen, ist nur korrekt, wenn keine wenigstens in der Jahresbilanz nachgeführte Bilanzierung erfolgt. Ansonsten wirkt sich bei erhöhtem Heizwärmebedarf der steigende Kesselanteil negativ aus und führt wiederum zu einem erhöhten PEF für die Nahwärme und erhöhten spezifischen Emissionen.

#### d) Erfahrungen mit Technologien

- Im Neubau lassen sich geringe Strombedarfe für Kälte und Beleuchtung ohne großen gebäudetechnischen Aufwand verhältnismäßig einfach realisieren.
- Die Raumluftanlagen laufen im Betrieb deutlich effizienter als berechnet.
- Das E-Control-Glas stellte sich in den sehr warmen Sommern 2017, 2018 und 2019 bereits als sehr gut geeignete technische Option für den sommerlichen Wärmeschutz heraus. Im Gegensatz zu Jalousien ist durch die Trägheit des Glases beim Schaltvorgang kein störender Fahrvorgang vorhanden, die sich bei ändernder Einstrahlung ändernde Tönung wird nicht als störend wahrgenommen. Die Innenraumtemperaturen blieben bis zu 10 K unter den Außentemperaturen.

- Photovoltaik ist im Eigenverbrauch auch bei Ost- und Westausrichtung eine der interessantesten Erzeugungsvarianten und hilft effektiv, den Fremdbezug von Strom zu verringern.
- Bei effizienter und klimafreundlicher Wärmeversorgung ergeben sich entsprechend geringe Gesamtprimärenergiebedarfe, auch bei Fensterlüftung und entsprechend höheren Wärmebedarfen.
- Kraft-Wärme-Kopplung eignet sich für Altbauten hervorragend und ist energiesystemisch komplementär zur dezentralen Energieerzeugung in effizienten, teillautarken und Energieplus-Neubauten.
- Die CO<sub>2</sub>-reduzierenden Effekte bei Nutzung von Biomethan-Kraft-Wärme-Kopplung sind bedingt durch die energiesystemischen Effekte (Verdrängung von Kohlestrom) und die geringen spezifischen Emissionen dieses Brennstoffs ( $< 100 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalent/kWh}$ ) sehr hoch (ca.  $-500 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalent/kWh}_{\text{th}}$ ).
- Zur Versorgung von  $0,25 \text{ km}^2$  Mischgebiet mittlerer Dichte mit Wärme aus Biomethan-Kraft-Wärme-Kopplung wird eine Anbaufläche von ca.  $1 \text{ km}^2$  benötigt. Der erzeugte, grundlast- und regelenergiefähige Strom kann jedoch 2-6-mal so viele Gewerbebetriebe und Haushalte (je nach Eigenerzeugungsgrad und Effizienz) mit Grundlaststrom versorgen.
- Die Maßnahmen am Standort Campus Scharnhorststraße-Bockelsberg führen zu einer ausgeglichenen Treibhausgasbilanz für Strom, Wärme und Dienstleistungen sowie Dienstfahrzeuge der gesamten Universität sowie Strom und Wärme des Gebiets Bockelsberg. Die jährliche Einsparung beträgt ca.  $7.400 \text{ t CO}_2\text{-Äquivalent/a}$  gegenüber der Versorgung mit Kessel.

#### e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln

- Dynamische Modellierung ist immer noch ein recht hoher Aufwand. Sie ist insbesondere in der Speicherauslegung und für die Planung der Kältebereitstellung bei variablen und vergleichsweise hohen Nutzungserfordernissen jedoch fast unerlässlich.
- Ein mittels Finite-Elemente-Methodik simuliertes System lässt sich parametrisiert gut in eine dynamische Modellumgebung übertragen und für die Auslegung innovativer Energiesystemtechnik nutzen.
- Insgesamt ist für die Erarbeitung der Annahmen ein hoher Aufwand zu treiben, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Insbesondere Nutzungsszenarien und die korrekte Übertragung der geplanten oder installierten Haustechnik in das Berechnungstool oder Modell beeinflussen die Ergebnisse stark, während die Eingabe der Gebäudehülle recht eindeutig und fehlerunanfällig ist.
- Konsequenterweise steigt das Risiko von Fehleinschätzungen mit dem Grad der Komplexität der abzubildenden Technik und Nutzungsarten und dem gleichzeitig steigenden Informationsdefizit des Planers/Modellierers/Bearbeiters.

## 2.10 Energieeffiziente Hochschule - Campus Information Modeling (HoEff-CIM), München

Autorenteam:

- Jakob Hahn, M. Eng., Prof. Dr.-Ing. Werner Jensch (CENERGIE - Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere, Hochschule München)
- Dr.-Ing. Daniel Kierdorf, Prof. Dr.-Ing. Werner Lang (Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Technische Universität München)

### 2.10.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	HoEff-CIM – Energieeffiziente Hochschule – Campus Information Modeling (03ET1176A-D) aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes HoEff – Die Hochschule auf dem Weg zu einem Energieeffizienten Gebäudebetrieb (0327470A-B)		
<b>Projektbild</b>	 <p>LMU-Liegenschaften: Beispiele für unterschiedliche Baualtersklassen. © TUM/LMU.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München Geschwister-Scholl-Platz 1 80539 München mit den Standorten Stammgelände (Stadtmitte), Oberschleißheim, Areal Sendlinger Tor, Großhadern/Martinsried (ohne Klinikum) und Garching		
<b>Projektbeteiligte</b>	Hochschule München	Ludwig-Maximilians-Universität München	Technische Universität München
	Brochier Consulting + Innovation GmbH	Assmann Ingenieure Beraten + Planen AG	

<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr heterogene Nutzungen, häufig innerhalb desselben Gebäudes (z. B. Büros, Bibliotheken, Hörsäle, Labore, Tierhaltungen, usw.)</li> <li>- Technisierungsgrad von einfachen Bürogebäuden bis hin zu hochkomplexen Laborgebäuden</li> <li>- Größen von alleinstehenden Gebäuden bis hin zu großen Gebäudekomplexen oder campusartigen Strukturen</li> <li>- Gebäudesubstanz reicht vom abrisstreifen Gebäude bis zum Neubau</li> </ul> <p>In Summe: 232 Gebäude mit etwa 27.600 Räumen (ohne Klinikum Großhadern)</p>							
<b>Neubauten im Projekt</b>	Im Projekt waren keine Umsetzungen von Neubauten beinhaltet							
<b>Baujahr der Gebäude</b>	Von 1840 bis 2016 (alle Baualtersklassen) Teilweise denkmalgeschützt							
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	Entsprechend des Baualters, teilweise bereits durchgeführte energetische Sanierungen							
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	Ein Großteil der Gebäude ist an das Energieversorgungsnetz (Fernwärmenetz) der Stadtwerke München angeschlossen, es sind sowohl zentrale als auch dezentrale Versorgungen (z. B. Gaskessel) realisiert. Strom wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen.							
<b>Projektlaufzeit</b>	(HoEff: 12/2008 – 11/2012) HoEff-CIM: 05/2013 – 06/2017							
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betrieboptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung
	XX			XX	X	XX		
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung				
	XX	XX						
<b>Projekthalt</b>	Ziel dieses Projekts ist die Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestands der LMU München bis 2050. Hierzu wurden alle Universitätsgebäude erfasst und energetisch bewertet. Die erhobenen Daten dienen zur Entwicklung des Quick-Check-Tools, dass eine webbasierte Anwendung zur energetischen Bewertung von großen Liegenschaften darstellt. Als Output dieses Tool werden ökologisch und ökonomisch sinnvolle Sanierungsmaßnahmen aufgezeigt.							
<b>Projektmittel</b>	Insgesamt: HoEff: 471.722 € bewilligte Fördersumme (FKZ: 0327470A/B) HoEff-CIM: 1.552.495 € bewilligte Fördersumme (FKZ: 03ET1176A-D) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 0 €							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Es fand keine Umsetzung während der Projektlaufzeit statt.							

<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	Es fand keine Umsetzung während der Projektlaufzeit statt.					
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	773.547 m <sup>2</sup> (ohne Klinikum)		773.547 m <sup>2</sup> (ohne Klinikum)			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt</b> (Hochrechnung)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	79.862	103	k. A.	k. A.	k. A.
	Kälte	2.644	3	k. A.	k. A.	k. A.
	Strom	31.619	41	k. A.	k. A.	k. A.
Summe	114.125	147	k. A.	k. A.	ca. 22 Mio.	
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b> (berechnet)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	Im Median kann der Heizenergiebedarf gemäß Berechnung um 67,5 % gesenkt werden. Eine konkrete Umsetzung war nicht Bestandteil des Projekts.				
	Kälte					
	Strom					
Summe						
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eigenes Tool mit Monte-Carlo-Simulation zur energetischen Bewertung von Gebäuden basierend auf EnergyPlus (Referenzraummethode - RRM)</li> <li>- MS Excel für Energiebilanzen nach DIN V 18599</li> <li>- selbst entwickeltes Quick-Check-Tool</li> </ul>					
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maßnahmenkatalog für Einsparpotenziale an Hochschulen in den Bereichen Raumluftechnik, Beleuchtung, Bauphysik, Sanitärtechnik, Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Wärmeabgabe, Kältetechnik, Elektrotechnik, MSR und Nutzeraufklärung. Im Anhang am HoEff-Abschlussbericht [70]</li> <li>- QuickCheck-Tool (QCT): Einfach handhabbares Werkzeug mit den im Projekt entwickelten Werkzeugen und Methoden im Energiemanagement mit dem Ziel einer beschleunigten, zentralen Datenerhebung mit Aus- und Bewertung für zur Erstellung von Benchmarks mit automatisierten Berichten (Bezug über hoeff.info)</li> <li>- HoEff-Energieklassen beschreiben und bündeln typische Hochschulnutzungen. Für die 16 Energieklassen stehen Energiekennwerte in Abhängigkeit des Wärmedämmstandards, der Orientierung und der Raumkonditionierung zur Verfügung.</li> <li>- LMU Energiemasterplan mit Sanierungskonzepten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie, Soziales, technische Qualität, Prozessqualität). (Quelle: Schlussbericht HoEff-CIM [71])</li> <li>- Referenz-Raum-Methode (RRM): Die entwickelte RRM bildet den energetischen Gebäudecharakter anhand von statistischen Verfahren, wie der Monte Carlo-Simulation ab. Auf Basis dessen wurden eine fundierte Analyse und Bewertung der Gebäude durchgeführt. (Quelle: Dissertation von Regel, R. [78])</li> <li>- Monitoring-Software EnMoLMU: An der LMU ist im Rahmen des Projektes eine eigene, auf die Bedürfnisse zugeschnittene Monitoring-Software auf Basis der freien Software R entwickelt worden, welche nun im Gebäudemanagement eingesetzt wird. (Quelle: HoEff Bericht [74])</li> </ul>					

- In einem eigenen Teilvorhaben „Entwicklung ganzheitlicher Technikkonzepte“ ist der Schwerpunkt der technischen Anlagenausrüstung in Hochschulen detailliert untersucht worden. (Quelle: Teilbericht BCI [71])

## 2.10.2 Projektbeschreibung

### 2.10.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Die Ludwig-Maximilians-Universität München (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 das Klinikum Großhadern). Die Bewirtschaftung dieses heterogenen Gebäudebestandes stellt die Liegenschaftsverwaltung der LMU und die anderen beteiligten Institutionen und Behörden immer wieder vor große Herausforderungen. So beliefen sich 2015 alleine die Ausgaben für Energie (Strom, Fernwärme, Heizöl, Erdgas) auf etwa 22 Mio. €.

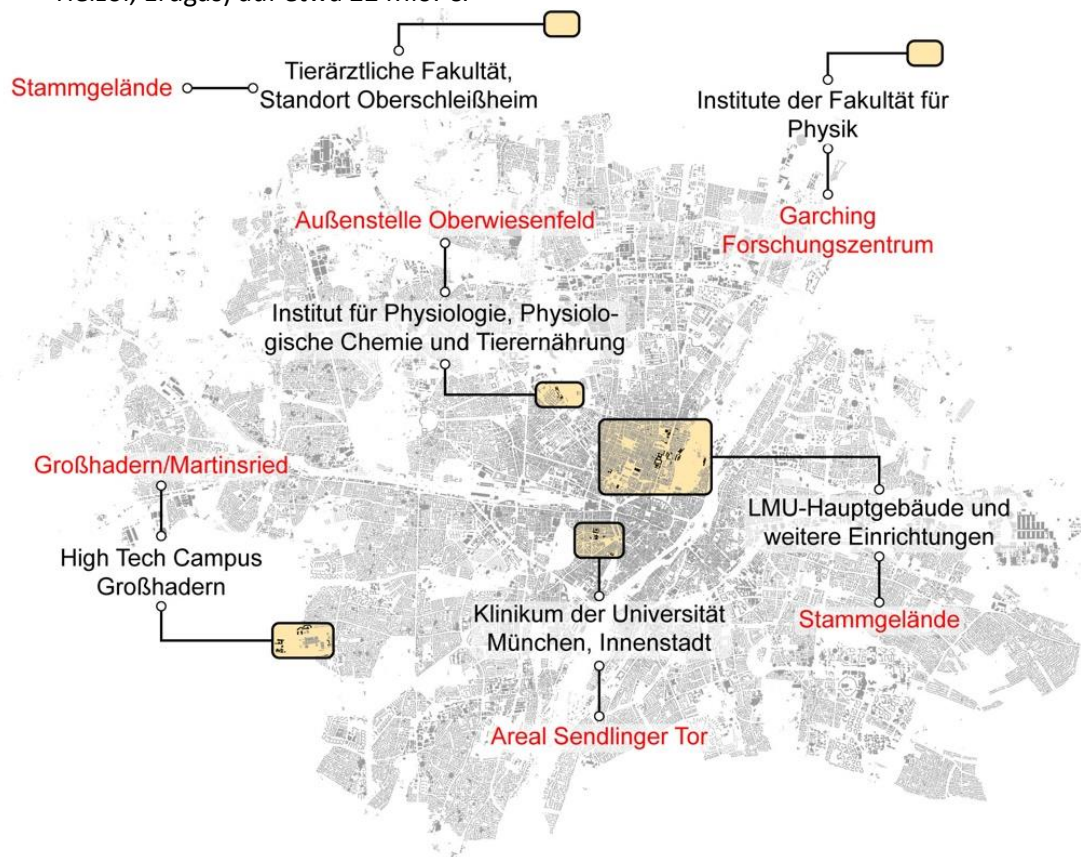


Bild 33: Lageplan der verschiedenen Standorte der Ludwig-Maximilians-Universität in München. © TU München.

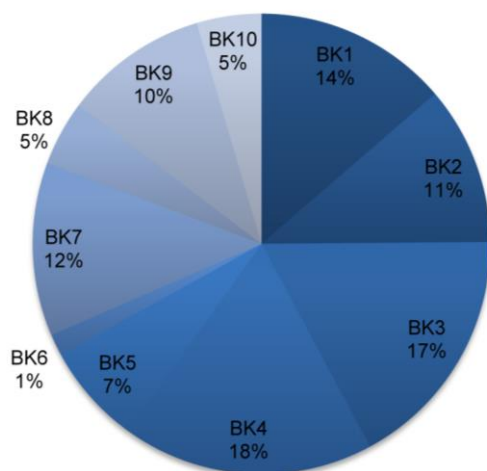
Des Weiteren sind die Gebäude über das gesamte Stadtgebiet Münchens und darüber hinaus verteilt (siehe Bild 33). Die LMU ist somit keine klassische Campus-Universität. Die Liegenschaften lassen sich in die vier großen Bereiche „Stammgelände“, „Areal

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 im Verlauf des Projekts nicht weiter berücksichtigt.

Charakteristisch für den Gebäudebestand der Ludwig-Maximilians-Universität München ist seine Vielfalt. Kein Gebäude gleicht einem anderen. Große Unterschiede gibt es insbesondere:

- beim Baualter von 1840 bis 2016 (vgl. Abbildung der Baualtersklassen (BK)),
- bei den sehr heterogenen Nutzungen (z. B. Büros, Bibliotheken, Hörsäle, Labore, Tierhaltungen, usw.), die häufig auch noch in einem Gebäude vereint sind,
- bei der Komplexität der technischen Gebäudeausstattung (Technisierungsgrad 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).

### Verteilung der Gebäude nach Baualtersklassen



Baualtersklasse	Beginn	Ende
BK1	-	1918
BK2	1919	1948
BK3	1949	1957
BK4	1958	1968
BK5	1969	1978
BK6	1979	1983
BK7	1984	1994
BK8	1995	2001
BK9	2002	2008
BK10	2009	-

Bild 34: Heterogene Baualtersklassen an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Die Baualtersklassen wurden eingeteilt gemäß der BMVBS Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand von 2007. © TUM/HM.

#### 2.10.2.2 Die beteiligten Akteure

##### a) an den Prozessen der Universität

An den Prozessen an der Ludwig-Maximilians-Universität war die Zentrale Universitätsverwaltung beteiligt, die es dem Projektteam ermöglichte, detaillierte Informationen über den gegenwärtigen Stand der Universitätsliegenschaften zu erhalten. Die LMU ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts und besitzt das Recht der Selbstverwaltung.

Zugleich ist sie eine staatliche Einrichtung und in einen Zentralbereich sowie 18 Fakultäten gegliedert.

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. 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.

Das Staatliche Bauamt München 2 (StBAM2) organisiert die Baumaßnahmen aller staatlichen Hochschulen in München sowie aller hochschulnahen 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.

#### **b) am Projekt**

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.

- Hochschule München (HM), CENRERGIE – Institut für Energieeffiziente Gebäude und Quartiere (vormals: Competence Center Energieeffiziente Gebäude) & Fakultät 07 Informatik/Mathematik
- Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
- Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München, Zentrale Universitätsverwaltung
- BROCHIER Consulting + Innovation GmbH (heute: BUILD.ING Consultants + Innovators GmbH), Nürnberg
- Assmann Ingenieure Beraten + Planen AG, München

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 Referenz-Raum-Methode (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 zu weiteren Einzelabstimmungen durchgeführt.



### c) Organisationsstruktur

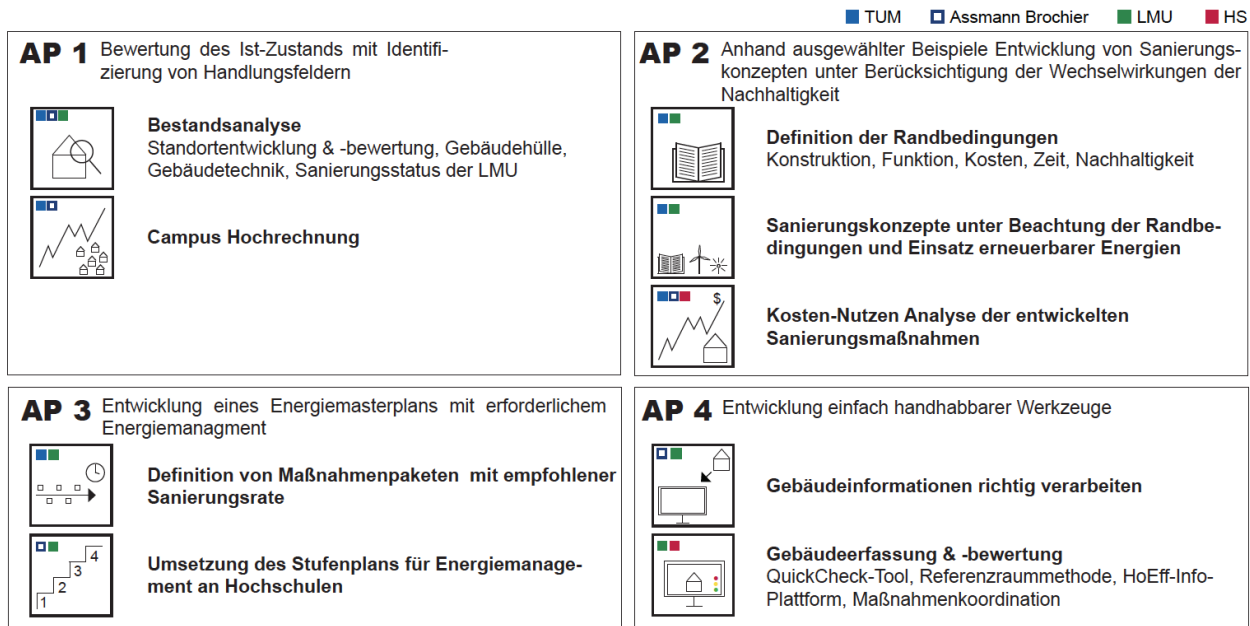


Bild 35: Organisationsstruktur des Projektes mit den vier Projektpartnern. © TUM/HM.

#### 2.10.2.3 Der Projektinhalt

##### a) Projektziele

HoEff-CIM (Energieeffiziente Hochschule - Campus Information Modelling) 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 Quick-Check-Tool (QCT) in EnergyPlus importiert werden. Das QCT hat das Ziel, die Begehung eines komplexen Hochschulgebäudes zu strukturieren, den Bearbeitungsaufwand zu reduzieren und dem Nutzer die aufbereiteten Informationen darzustellen. Mit Hilfe des webbasierten Tools soll eine stufenartige Bestandsaufnahme möglich sein.

Hierzu 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).

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. Diese Erkenntnisse sollen auf weitere Liegenschaften übertragbar sein.

### b) Projektarbeiten

Aus dem direkten Vorgängerprojekt HoEff stand der grundlegende Datenbestand zur Verfügung. Dieser basiert auf einer Begehung mit technischer Aufnahme und Bewertung von 82 Hochschulgebäuden der LMU, systematischen Methoden des Erfassens von Raum- und Gebäudedaten mittels eines Prototypen des „Quick-Check-Tools“ und ausgewerteten Energieverbrauchskennwerte für 10 Baualtersklassen, 15 Nutzungen (Energieklassen), 7 technischen Ausstattungsgraden und 4 Orientierungen. Eine Einteilung von Raumnutzungen zu Energieklassen, sowie deren Energiekennwerte kann weiterentwickelt werden. Auf Basis dieser Datenerhebung im Quick-Check-Tool wurde ein Gebäudesteckbrief mit einer Bewertung des Zustandes erstellt.



HoEff Quick Check

Home Gebäudedatenverwaltung Systemverwaltung Logout (systemadmin)

Hallo systemadmin | Eingeloggt in (keinem Projekt) | Ihre Systemrechte: Systemadministrator

Willkommen zu *HoEff Quick Check*

"Die HOchschule auf dem Weg zu einem energieEFFizienten Gebäudebetrieb" (HoEff)

**"Quick Check"**

ermöglicht Ihnen, die Erfassung und Verwaltung von energetisch relevanten Gebäudedaten. Es handelt sich dabei um Gebäudedaten, die es ermöglichen den Energieverbrauch von Hochschulen mit ihren teilweise sehr komplexen und unterschiedlichen Nutzungen greifbar machen, und um Maßnahmen zu evaluieren, wie in Hochschulgebäuden der Energiebedarf gesenkt werden kann.

Das System ist momentan noch in der Betaphase, wobei um Hinweise auf mögliches Fehlverhalten des Systems gebeten wird.

„Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages“  
 Copyright © 2012 by Eduard Zikeli und Michael Polotzek.  
 Alle Rechte vorbehalten.  
 Powered by Yii Framework.

Bild 36: Quick-Check-Tool. © HoEff (HM/Ebert Ingenieure).

Geschwister-Scholl-Platz 1 (A) Zentralbereich  
 Baujahr: 1840  
 Gebäude Nr.: 0000

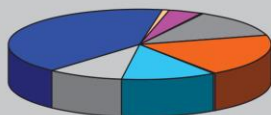


Hauptgebäude: Aulas, Audimax, Senatssaal,  
 Hörsäle etc. Universitätsverwaltung etc.,  
 Cafeteria etc.; Uni.-bibliothek;  
 NGF: 15.928 m<sup>2</sup>  
 denkmalgeschützt

**Lage und Hauptnutzung des Gebäudes**



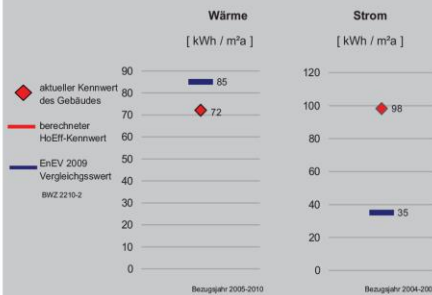
**Flächenverteilung**



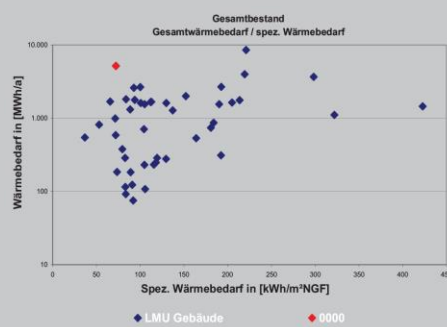
Nutzungen nach DIN 277

- Wohnen & Aufenthalt
- Büroarbeit
- Prod., Hand- & Maschinenarbeit, Experimente
- Lagern, Verteilen, Verkaufen
- Bildung, Unterricht & Kultur
- Heilen & Pflegen
- Sonstige Nutzung
- Betriebstechnische Anlagen
- Verkehrserschließung & -sicherung

**Verbräuche des Gebäudes im Vergleich**



Wärmeverbund Geschwister-Scholl-Platz 1 und Ludwigstr. 27  
 Bezugsfläche 71.594 m<sup>2</sup>



**Bauphysik und Zustand**

- Dach :** Walmdach
- Zustand: ■
- Außenwand :** massive Fassade, Lochfassade
- Zustand: ■
- Fenster :** Kastenfenster alt (2x einfach)
- Zustand: ■
- Sonnenschutz:** außenliegend
- Zustand: ■

**Anlagentechnik und Zustand**

- Heizung :** Fernwärme, Fernwärme
- Baujahr/Leistung: / kW
- Zustand: ----///
- Lüftung :** 2 RLT-Anlagen
- Zustand gut:
- Zustand mittel:
- Zustand schlecht:
- Kälte :** keine Bewertung
- Baujahr/Leistung: /
- Zustand:



Bild 37: Gebäudesteckbrief. © HoEff (HM/Ebert Ingenieure).

Das hierauf aufbauende Forschungsvorhaben HoEff-CIM wurde in vier Arbeitspakete unterteilt:

1. *Bewertung des Ist-Zustands mit Identifizierung von Handlungsfeldern*  
 Hierunter fällt die Bestandsanalyse der Liegenschaften der LMU München. Genauer betrachtet wurden die Standortentwicklung und -bewertung, die Gebäudehüllen der Liegenschaften, der Stand der Gebäudetechnik sowie der aktuelle Sanierungsstatus der LMU. Darüber hinaus wurde eine Hochrechnung für den kompletten Campus der LMU erstellt.
2. *Anhand ausgewählter Beispiele Entwicklung von Sanierungskonzepten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Nachhaltigkeit*  
 In diesem Arbeitspaket wurden die wesentlichen Randbedingungen hinsichtlich Konstruktion, Funktion, Kosten, Zeit und Nachhaltigkeit zur Durchführung des Forschungsvorhabens festgehalten. Anhand von Referenzgebäuden wurden Sanierungskonzepte unter Beachtung der Randbedingungen und Einsatz erneuerbarer Energien erstellt sowie Kosten-Nutzen-Analysen der entwickelten Sanierungsmaßnahmen durchgeführt.
3. *Entwicklung eines Energiemasterplans mit erforderlichem Energiemanagement*  
 Der Energiemasterplan verfolgt das Ziel, der LMU einen Fahrplan zum klimaneutralen Campus 2050 aufzuzeigen. Hierfür wurden Maßnahmenpaketen mit empfohlener Sanierungsrate definiert sowie die Umsetzung eines Stufenplans für das Energiemanagement an Hochschulen aufgezeigt.
4. *Entwicklung einfach handhabbarer Werkzeuge*  
 Im letzten Arbeitspaket werden die gewonnenen Informationen gesammelt, ausgewertet und weiterverarbeitet. Ziel hierbei ist die gezielte Verarbeitung der gesammelten Informationen. Mit Hilfe des QCT, der Referenz-Raum-Methode (RRM), der HoEff-Info-Plattform und der Maßnahmenkoordination können Gebäude rasch erfasst und bewertet werden.

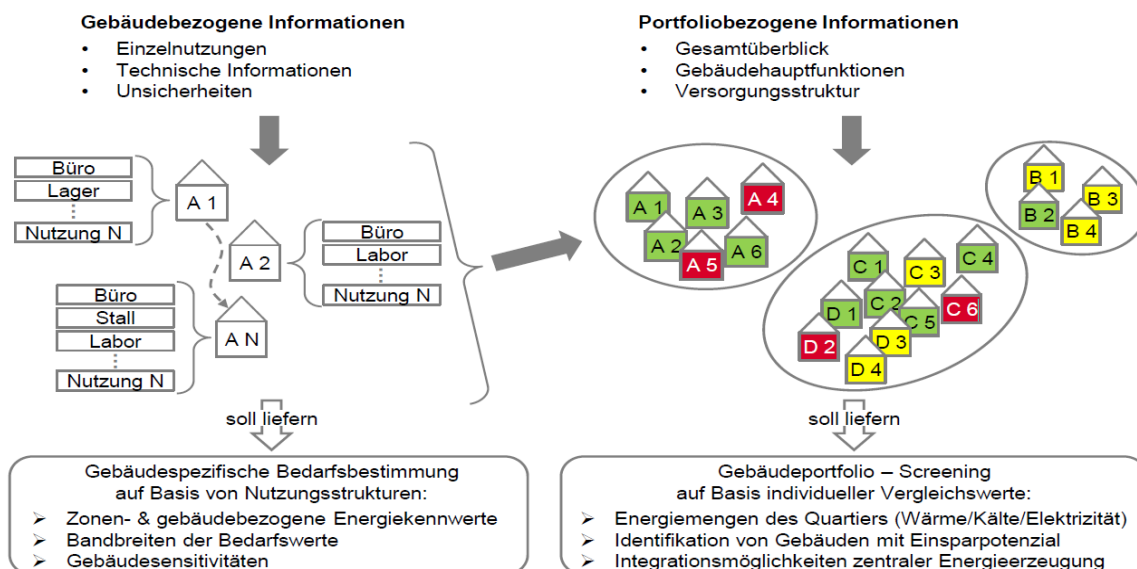


Bild 38: Datenermittlung – vom Gebäude zum Campus. © HM, R. Regel.

### c) Projektmittel

Forschungsförderung:

HoEff: 471.722 €

HoEff-CIM: 1.552.495 €

Das Projekt HoEff-CIM zielt auf die Entwicklung einer Bewertungsmethodik ab, um Hochschulgebäude energieeffizient sowie ökonomisch betreiben und sanieren (Sanierungsfahrplan) zu können. Die Umsetzung in der Praxis war nicht Bestandteil des Forschungsprojektes.

Im nachfolgenden NuData Campus (ab April 2019) sollen die Erkenntnisse der Untersuchungen aus Bestandsgebäuden und Liegenschaften in Zusammenarbeit mit dem Bauamt München bereits in der frühen Planungsphase eines Hochschulgebäudes umgesetzt werden.

### d) Projektstand

Die Projekte HoEff (2008 - 2012) und HoEff-CIM mit dem Forschungsgegenstand der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München sind vollständig abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden der Fachwelt in den im Anhang genannten Publikationen und Abschlussberichten [70]–[81] zugänglich gemacht. Weiterhin gibt es die bereits zuvor genannte Homepage [www.hoeff.info](http://www.hoeff.info). Das Folgeprojekt NuData Campus mit einer Weiterentwicklung der Ergebnisse und Anwendung in der Praxis läuft seit April 2019 an der Hochschule München (HM).

#### 2.10.2.4 Die Projektergebnisse

##### a) Geplante Ergebnisse

Die Ziele des HoEff-CIM Projektes wurden vollumfänglich erfüllt und sind unter anderem in den in b) genannten Publikationen nachzulesen. Es wurde für die Teilbereiche des Campus ein Energiemasterplan erstellt mit folgenden Prämissen:

- Senkung des Primärenergiebedarfs um 50 % bis 2050.
- Senkung des Strombedarfs um 25 % bis 2050.
- Komplette Sanierung des Gebäudebestands: Steigerung der Sanierungsrate auf 3 % pro Jahr bis 2050.
- Deckung des Endenergiebedarfs zu 60 % aus erneuerbaren Energien bis 2050.

Liegenschaft Schwabing / Bogenhausen 1  
 Sanierungspotentiale Gebäudehülle/  
 Optimierungspotentiale TGA/  
 Bedarfsdeckung durch Solarenergie

- Bedarfsdeckung Solarkollektoren [%]
- Bedarfsdeckung PV-Module [%]
- Geringes Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV  $\leq$  20%
- Niedriges Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV  $\leq$  50%
- Mittleres Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV  $\leq$  80%
- Hohes Einsparpotential, Heizwärmebedarf nach EnEV  $>$  80%
- Niedriges Optimierungspotential TGA
- Hohes Optimierungspotential TGA
- Keine Bewertung
- Denkmalschutz



Bild 39: Energiemasterplan – Visualisierung Potenziale je Liegenschaft. © TUM.

### b) Bereits erhältliche Ergebnisse

Die Erfahrungen des Projektes zeigen, dass die Komplexität und Vielfalt von Informationen der Gebäude eines Hochschulcampus effiziente, unterstutzende Werkzeuge für das alltägliche Energiemanagement erforderlich machen. Dabei konnte bereits durch eine energetische Bewertung von heterogen genutzten Gebäuden mittels Benchmarking durch den Bezug auf die einzelnen Nutzungszonen ausreichend genaue Ergebnisse gewonnen werden. Die tieferegehende dynamische Bewertung eines Campus über Modellierung ist dadurch realisierbar, dass die Eingaben auf typische Referenzraume und relevante Einflussparameter reduziert werden (Referenz-Raum-Methode).

Die Ziele der Energiewende können bei einem Hochschulcampus – am Beispiel der LMU – eingehalten werden. Dafür ist aber konsequentes Handeln basierend auf einem Energiemasterplan notwendig. In diesem Kontext muss das Wissen über den energetischen Zustand eines Campus in die komplette Organisationsstruktur kommuniziert und darauf ausgerichtet werden. Nur dadurch können die Einsparpotenziale erkannt und genutzt werden.

Schlussendlich kann das große Ziel eines klimaneutralen Campus nur über eine nutzungsdatenbasierte Optimierung von Gebäuden und Anlagen erreicht werden.

Informationen zu den Projekten HoEff, HoEff-CIM und NuData Campus können auf den Internetplattformen [www.hoeff.info](http://www.hoeff.info) und [www.nudata.de](http://www.nudata.de) abgerufen werden:

- Maßnahmenkatalog für Einsparpotenziale an Hochschulen in den Bereichen Raumlufttechnik, Beleuchtung, Bauphysik, Sanitärtechnik, Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Wärmeabgabe, Kältetechnik, Elektrotechnik, MSR und Nutzeraufklarung. Im Anhang am HoEff-Abschlussbericht [70]

- QuickCheck-Tool (QCT): Einfach handhabbares Werkzeug mit den im Projekt entwickelten Werkzeugen und Methoden im Energiemanagement mit dem Ziel einer beschleunigten, zentralen Datenerhebung mit Aus- und Bewertung zur Erstellung von Benchmarks mit automatisierten Berichten. (Bezug über hoeff.info)
- HoEff-Energieklassen beschreiben und bündeln typische Hochschulnutzungen. Für die 16 Energieklassen stehen Energiekennwerte in Abhängigkeit des Wärmedämmstandards, der Orientierung und der Raumkonditionierung zur Verfügung.
- LMU-Energiemasterplan mit Sanierungskonzepten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie, Soziales, technische Qualität, Prozessqualität). (Quelle: Schlussbericht HoEff-CIM [71])
- Referenz-Raum-Methode (RRM): Die entwickelte RRM bildet den energetischen Gebäudecharakter anhand von statistischen Verfahren, wie der Monte Carlo-Simulation ab. Auf Basis dessen wurde eine fundierte Analyse und Bewertung der Gebäude durchgeführt. (Quelle: Dissertation von Regel, R. [78])
- Monitoring-Software EnMoLMU: An der LMU ist im Rahmen des Projektes eine eigene, auf die Bedürfnisse zugeschnittene Monitoring-Software auf Basis der freien Software R entwickelt worden, welche nun im Gebäudemanagement eingesetzt wird. (Quelle: HoEff Bericht [74])
- In einem eigenen Teilvorhaben „Entwicklung ganzheitlicher Technikkonzepte“ ist der Schwerpunkt der technischen Anlagenausrüstung in Hochschulen detailliert untersucht worden. (Quelle: Teilbericht BCI [71])

#### **2.10.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Als aktiver Partner in das Forschungsprojekt wurde das Gebäudemanagement der LMU mit einbezogen. Auf diese Weise konnten die Ergebnisse direkt sehr erfolgreich in die tägliche Arbeit integriert werden (z. B. ins CAFM-System) und das bestehende Technische Monitoring mit systematischer Zählerstruktur ausgebaut werden. Studentische Arbeiten waren Bestandteil der Begehungen der Liegenschaften.

## Energiesignatur

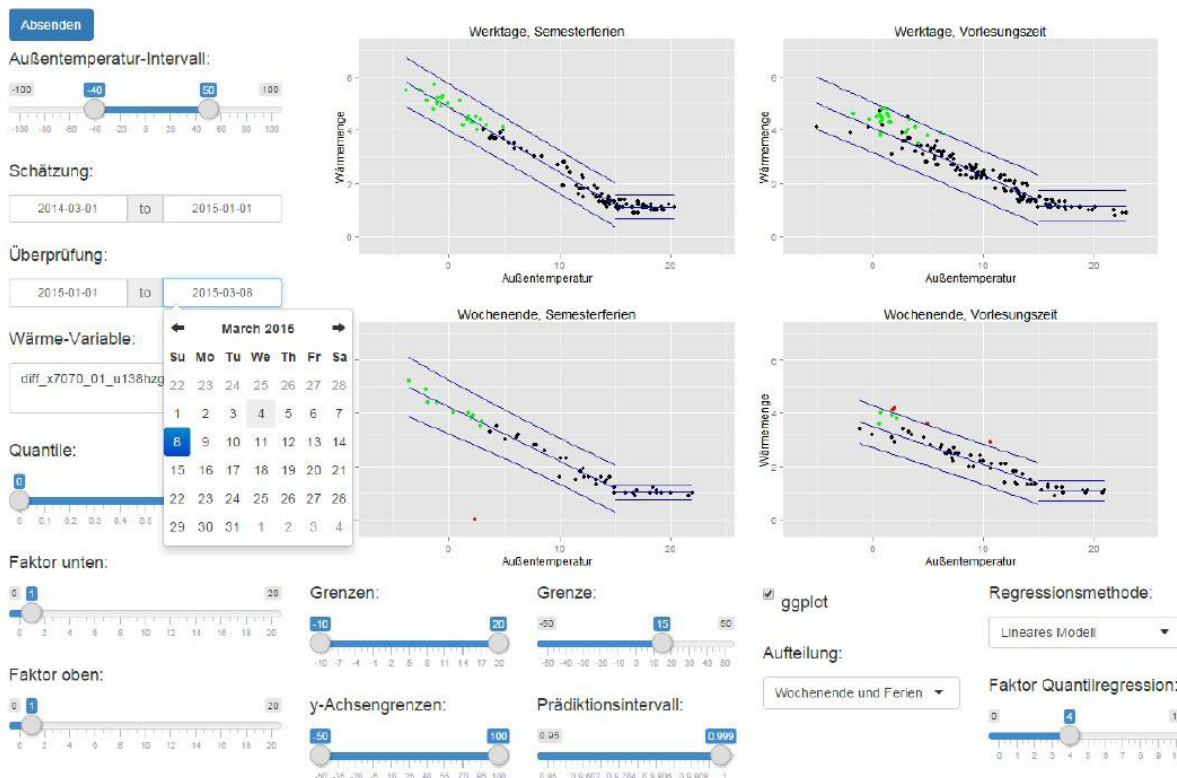


Bild 40: Beispiel für die an der LMU eingesetzte Energiemonitoring Software EnMoLMU. © LMU.

Seit April 2019 setzt das Nachfolgeprojekt „NuData Campus – Nutzungsdatenbasierte Optimierung von Gebäuden und Anlagen am Beispiel der Hochschule München“ (FKZ: 03ET1648A-B) die in HoEff und HoEff-CIM gewonnenen Erkenntnisse sukzessiv am Beispiel der Hochschule München um. Neben einem verstärkten Einbezug von Nutzern und Nutzungsdaten im Gebäudebetrieb der bestehenden Liegenschaften sollen die Ergebnisse für eine präzisere Planung eines zukünftigen Hochschulgebäudes in Kooperation mit dem Bauamt am Campus Nord der HM eingesetzt werden.

### 2.10.2.6 Umsetzung in die Lehre

Wesentliche Fragestellungen zur Bestandsbewertung von komplexen Liegenschaften sowie Möglichkeiten zur nachhaltigen Sanierung von Gebäuden wurden in die Lehrveranstaltungen der Hochschule – im Fach Facility-Management und Anlagenplanung – als auch der Technischen Universität München – im Bereich Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen – integriert. Einzelne Fragestellungen, die sich am Forschungsvorhaben orientierten, wurden durch Bachelor-, Master- und Projektarbeiten bearbeitet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden Studierenden in der Betreuung von aktuellen Arbeiten zugänglich gemacht, um eine Verbreitung, Anwendung und Weiterentwicklung zu ermöglichen.



### **2.10.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

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.

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 Quick-Check-Tool zu erstellen, müssen die zukünftigen Anwender in die Weiterentwicklung der Werkzeuge miteinbezogen 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.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

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 die 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.

#### **c) Energetische Benchmarks**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, 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 politische Entscheidungswege kritisch betrachtet und überdacht werden.

Der Performance Indikator des Benchmarks ist der spezifische Heizenergiebedarf der Liegenschaften. In der Ausgangssituation liegt dieser (als Median) bei 103 kWh/m<sup>2</sup>a (aus realen Verbräuchen ermittelt), nach kompletter Sanierung aller Liegenschaften (als Median) bei 33 kWh/m<sup>2</sup>a (anhand von Modellgebäuden errechnet).

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Im Rahmen des Projektes (HoEff) wurden alle eingesetzten Technologien und Systeme bei Begehungen im Bestand erfasst. Die daraus folgenden Auswirkungen auf den Energie- und Ressourcenverbrauch wurden bewertet, um einen Sanierungsfahrplan zu entwickeln. Das Ergebnis daraus ist ein Maßnahmenkatalog mit vielen energieeinsparenden Maßnahmen, welche sich auf die Bereiche Bauphysik, Sanitärtechnik, Wärmeerzeugung, -verteilung, -abgabe, Raumluftechnik, Kältetechnik, Elektrotechnik, Beleuchtung und MSR-Technik beziehen. Der Maßnahmenkatalog mit Berechnung des Wärme- und Stromeinsparpotenzials ist auf der Homepage [www.hoeff.info](http://www.hoeff.info) öffentlich zugänglich.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Tools- und Werkzeuge aus der Informationstechnologie sind notwendig, um große Liegenschaften erfassen und bewerten zu können. Die erweiterte Methodik der Referenz-Raum-Methode (RRM) hat zudem gezeigt, dass tiefgreifende Berechnungen über den Gebäude- und Anlagenbestand möglich sind und dem Detailierungsgrad einer thermischen Simulation gerecht werden. An der LMU konnte im Gebäudemanagement die Energiemonitoring-Software – EnMoLMU – weiter ausgebaut werden.

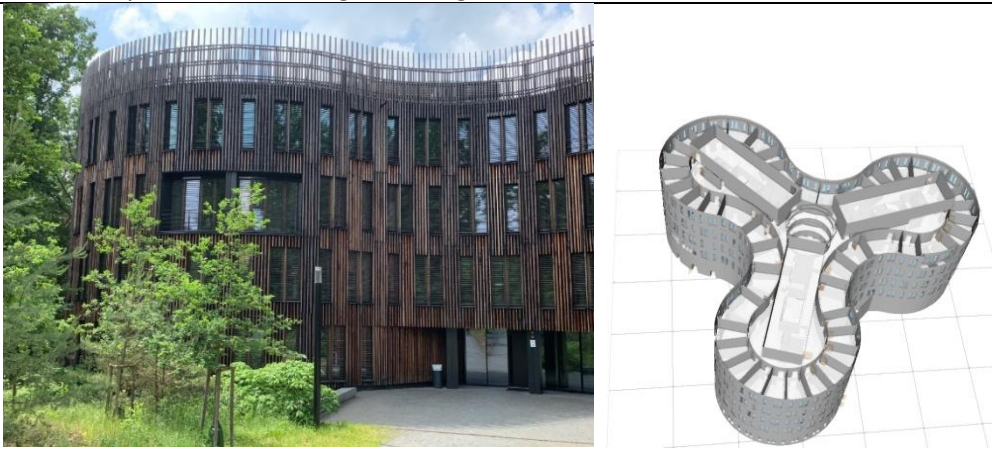
Im nachfolgenden NuData Campus werden neue, gewerkeübergreifende Planungstechnologien im Bereich des BIM (Building Information Modeling) tiefergehend betrachtet und entwickelt.

## 2.11 Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam

Autorenteam:

- Dipl.-Ing. Hans Petzold (TU Dresden, Institut für Bauklimatik)
- Dipl.-Ing. Jens Kaiser, Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann (TU Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung)
- Dipl.-Ing. Michael Neumann (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung)

### 2.11.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	EnEff:Campus Potsdam Telegrafenberg		
<b>Projektbild</b>	 <p>Links: Eingangsbereich des PIK-Neubaus mit der charakteristischen Holzfassade © PIK/M. Neumann; rechts: 3D-Modell des PIK-Neubaus © TU Dresden.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)</li> <li>- Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)</li> <li>- Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI)</li> <li>- Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)</li> <li>- Deutscher Wetterdienst DWD</li> </ul> <p>Telegrafenberg 14473 Potsdam</p>		
<b>Projektbeteiligte</b>	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)	Technische Universität Dresden	
<b>Anzahl und Art der beinhaltenen Gebäude</b>	Der Campus Telegraphenberg umfasst ca. 56 Gebäude, darunter befinden sich Instituts- und Lehrgebäude, Labore, eine Mensa/Kantine, Beobachtungsgebäude/Observatorien, ein Kindergarten, ein Gästehaus sowie Nebengebäude.		
<b>Neubauten im Projekt</b>	Forschungsneubau für PIK mit Arbeitsplätzen für ca. 190 Beschäftigte sowie einen Hochleistungsrechner		
<b>Baujahr der Gebäude</b>	1832 bis 2015		

<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die historischen Gebäude, die größtenteils unter Denkmalschutz stehen, sind in sehr gutem Zustand, aufgrund des Denkmalschutzes jedoch nur teilweise energetisch saniert</li> <li>- die Qualität der Neubauten (GFZ) entsprechen der Bauzeit, z. T. mit erhöhten Anforderungen durch Labore</li> </ul>							
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	ca. 25 dezentrale Gas-Brennwertheizungen (gesamt 3,3 MW), BHKW (2 x 293 kW <sub>th</sub> , 2 x 200 kW <sub>el</sub> ), Wärmepumpen (150 kW), Strom aus dem allgemeinen Stromnetz							
<b>Projektlaufzeit</b>	07/2011 – 12/2015							
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betriebsoptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung
	X	XX	XX					
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung	* Installation Monitoring, Vorbereitung der Messung			
	X	XX	XX	X *				
<b>Projekthalt</b>	Für das PIK wird auf dem Potsdamer Telegrafenberg ein neues Forschungsgebäude für ca. 190 Mitarbeiter errichtet, in dessen Untergeschoss ein Hochleistungsrechner eingebaut wird. Ein Teil der Abwärme des Rechners wird zur Gebäudeheizung des Neubaus genutzt. Für die verbleibende Abwärme soll ein Nutzungskonzept im Rahmen der Campusenergieversorgung entwickelt und bewertet sowie ggf. dessen Umsetzung vorbereitet werden. Im PIK-Neubau werden neben Energieeffizienzmaßnahmen zur Erreichung des Ziels "EnEV minus 50 %" eine energetische Optimierung des Rechenzentrums durchgeführt, Vorhaltungen zum Anschluss an ein Campus-Nahwärmenetz geschaffen sowie ein Gebäudeenergie-Monitoring installiert.							
<b>Projektmittel</b>	Förderung BMWi insgesamt: 1.999.786 € (PIK) + 1.264.638 € (TUD) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 1.933.300 €							
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Neubau: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fenster mit Vakuumverglasung bzw. Dreifachverglasung</li> <li>- Vakuumdämmung (aus Brandschutzgründen gegenüber Antrag stark reduziert)</li> <li>- raumklimaaktive Wandmaterialien in ausgewählten Räumen</li> <li>- Warmwasserkühlung für einen Teil der Platinen des Hochleistungsrechners</li> <li>- Vorhaltung für Anschluss der Warmwasserkühlung</li> <li>- Kaltgang-Einhausung im Rechenzentrum</li> <li>- Installation Gebäudeenergie-Monitoring</li> </ul>							
<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	Heizungsanbindung zwischen PIK-Neubau und Nachbargebäude A26 Wärmepumpe zur Abwärmenutzung aus dem Rechenzentrum zur Gebäudebeheizung PIK-Neubau und Nachbargebäude A26, Gas-Brennwertkessel als Backup							

<b>Beheizte Net- togrundfläche</b> (Campus ge- samt)	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	45.225 m <sup>2</sup> 28.005 m <sup>2</sup> (Hauptnutzfläche)		56.753 m <sup>2</sup>			
<b>Energie: Verbrauch und Kosten vor dem Projekt</b> (gemessen im Jahr 2016)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	4.956	110	k. A.	k. A.	k. A.
	Kälte	52	1	k. A.	k. A.	k. A.
	Strom *	12.066	267	k. A.	k. A.	k. A.
	Summe	17.074	378	k. A.	k. A.	k. A.
* für Gebäude, Großrechner, Kälte						
<b>Energie: Verbrauch und Kosten nach dem Projekt</b>		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	Die Verbrauchswerte nach dem Projekt sind durch wei- tere, nicht im Projekt behandelte Neubauten auf dem				k. A.
	Kälte	Campus nicht sinnvoll mit den Werten vor dem Projekt				k. A.
	Strom	vergleichbar.				k. A.
Summe					k. A.	
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DesignBuilder/EnergyPlus für Gebäudesimulation</li> <li>- TRNSYS TUD für Gebäudesimulation</li> <li>- DIN V 18599 für Energieausweise (Planungsbüro)</li> <li>- DELPHIN für Fassadendetails (Wärmebrücken)</li> </ul>					
<b>Bereits erhält- liche Projekter- gebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planung und Bau des PIK Forschungsneubaus, Eröffnung im September 2015</li> <li>- Fenster mit Vakuumverglasung</li> <li>- LED-Beleuchtung</li> <li>- Hochleistungsrechner mit Warmwasserkühlung (Direct Water Cooling)</li> <li>- Heizungsanbindung Nachbargebäude A26</li> <li>- Vorhaltung für Anschluss an Campus-Nahwärmenetz</li> <li>- Veröffentlichungen [82] bis [90]</li> </ul>					

## 2.11.2 Projektbeschreibung

### 2.11.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Auf dem Campus Telegrafenberg Potsdam des Wissenschaftsparks Albert Einstein befinden sich fünf rechtlich eigenständige Forschungsinstitute: Das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), das Astrophysikalische Institut Potsdam (AIP), das Deutsche Geoforschungszentrum (GFZ), der Deutsche Wetterdienst (DWD) sowie das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Sie beschäftigen zusammen nahezu 1.600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Zur Verwaltung des Campus sind die auf dem Telegrafenberg untergebrachten Institute in einer Nutzergemeinschaft zusammengeschlossen. Die Nutzergemeinschaft hat die Aufgabe, alle auf dem Gelände befindlichen Gebäude sowie die sonstige Infrastruktur

zu betreuen und zu verwalten. Die Aufgaben des Betreibers wurden zu Projektbeginn von einer externen Betreiberfirma ausgeführt; inzwischen werden sie im Auftrag der Nutzergemeinschaft vom GFZ übernommen.

Insgesamt befinden sich auf dem Campus Telegrafenberg 56 Gebäude unterschiedlichen Baualters auf einer Fläche von ca. 24 ha. Der Campus als Ganzes sowie eine Vielzahl der Gebäude stehen unter Denkmalschutz. Zusätzlich befindet sich das Campusgelände inmitten eines Landschaftsschutzgebietes. Dies stellt eine Herausforderung für das Rahmenkonzept dar, da hierdurch die Möglichkeiten für größere bauliche Umgestaltungen eingeschränkt sind.

Viele Gebäude der historischen Bausubstanz wurden innerhalb der vergangenen 25 Jahre einer schrittweisen Revitalisierung unterzogen. Im Rahmen dieser Aktivitäten erfolgte zumeist ein Austausch der Wärmeerzeuger der Heizungsanlagen mit der zum Revitalisierungszeitpunkt verfügbaren Geräteklasse. Das historische Gebäudeensemble wurde 1998 durch moderne Zweckbauten erweitert (Haus B bis H).

Die Wärmeversorgung der Gebäude des Wissenschaftscampus basiert mit wenigen Ausnahmen auf dem fossilen Energieträger Erdgas. Ein verzweigtes Gas-Versorgungsnetz erschließt ca. 2/3 der Gebäude direkt. Die Verbindung des campusinternen Gasversorgungsnetzes mit dem städtischen Versorgungsnetz erfolgt wiederum an drei Einspeisepunkten. Die Wärmeerzeugung erfolgt im Wesentlichen durch ein heterogenes Portfolio von Gas(-Brennwert)geräten mit einem Baujahr ab 1992 und verschiedenen Leistungsklassen mit einer thermischen Leistung von 22 kW bis zu 1.100 kW. Es existieren vier Wärmeversorgungsinseln, innerhalb derer mehrere Gebäude über Nahwärmeleitungen miteinander verbunden sind. Im Einzelnen handelt es sich um

- (1) die Gebäude A43 sowie die Gebäude B bis H,
- (2) die Gebäude A35/A36/A37/A38 und A54,
- (3) die Gebäude A17/A19 sowie
- (4) die Gebäude A26/A51-A und
- (5) die Gebäude A31/A32.

Neben den Gasheizkesseln zur Erzeugung von Wärme existieren ein modernes Blockheizkraftwerk (BHKW) (Gebäude D) und außerdem zwei Absorptionswärmepumpen (Gebäude A31) sowie ein Klima-Split-Gerät (Gebäude A8) zur thermischen Konditionierung von Büro- bzw. Technikflächen. Das in Gebäude D positionierte BHKW versorgt in Kombination mit einem gasbefeuerten Spitzenlastkessel den gesamten Komplex der Gebäude B-G des GFZ sowie die zentrale Kantine in Gebäude H. Das vorgenannte BHKW trägt mit einer elektrischen Leistung von 2 x 200 kW ebenfalls zur Elektroenergieversorgung des Campus-Bereiches bei. Etwa 1/3 der Gebäude auf dem Campus werden aufgrund ihrer temporären Nutzung mit Elektroenergie beheizt.

Insbesondere bei Neubauvorhaben wie bei den Gebäuden A69/A70 besteht die Intention, künftig eine engere wärmetechnische Verknüpfung von Gebäuden, die in räumlicher Nähe zueinander erstellt werden, zu realisieren.

### **2.11.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Die Projektidee ging von der überschüssigen Abwärme des Hochleistungsrechners im PIK-Forschungsneubau aus. Dabei ist das PIK als Leibniz-Institut für die ihm zugehörigen Gebäude entscheidungsbefugt. Alle über die Gebäude hinausgehenden Einrichtungen, insbesondere die Infrastruktur des Campus, sind Angelegenheit der Nutzergemeinschaft (NUGEM), in der alle ansässigen Instituten vertreten sind. Das GFZ als größtes dieser Institute übernahm mit seiner Abteilung Technische Dienste die Funktion des Betreibers und ist damit auch Ansprechpartner für alle technischen Informationen wie Energie- und Medienverbräuche, Pläne u. ä.

Die vorgenannten Eigentums- und Betreiberverhältnisse erfordern, dass größere Veränderungen an der Campus-Energieversorgung von allen Instituten als Teil der NUGEM mitgetragen werden. Ein gemeinsames Energiekonzept sollte also nicht nur gesamt-energetisch sinnvoll, sondern im Idealfall auch für alle Beteiligten wirtschaftlich vorteilhaft sein.

#### **b) am Projekt**

Die Aufgaben im Projekt sind im Wesentlichen nach Arbeitspaketen aufgeteilt. Das PIK übernimmt als Nutzer und Bauherr das aus Sicht der Investitionssumme größte Arbeitspaket 5 "Bauliche Umsetzung" für den PIK-Neubau sowie die Koordination aller beteiligten Institute auf dem Campus Telegrafenberg einschließlich der Kommunikation mit der NUGEM.

Universitärer Forschungspartner und Verbundprojektkoordinator ist die TU Dresden (mit dem Institut für Bauklimatik (Leiter: Prof. John Grunewald) und der Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung am Institut für Energietechnik (Leiter der Professur: Prof. Clemens Felsmann)). Die wissenschaftliche Leitung richtet sich nach der Zuständigkeit in den Kompetenzbereichen. Prof. Felsmann übernahm die Leitung für den Bereich Gebäude- und Anlagentechnik, Prof. Grunewald war für die Bauphysik/Baukonstruktion zuständig. Die Beauftragung von Unterauftragnehmern erfolgte für spezifische Teilaufgaben des Projektes in den Bereichen Monitoring, Datenbeschaffung, Internetportal und Facility Management. In regelmäßigen Treffen findet ein Austausch zwischen allen Beteiligten statt.

### c) Organisationsstruktur



Bild 41: Akteure im Projekt EnEff:Campus Potsdam Telegrafenberg. © TU Dresden.

#### 2.11.2.3 Der Projektinhalt

Im Rahmen der Planung des PIK-Neubaus entstand der Gedanke, einen Teil der Abwärme des Hochleistungsrechners mit einer Leistung von 750 kW (Planungswert) zur Heizung des Neubaus zu nutzen und mit dem deutlich größeren verbleibenden Teil die Heizung von Nachbargebäuden zu unterstützen, wobei das Nachbargebäude A26 (Sitz der Verwaltung des PIK) direkt angeschlossen wird. Für die restliche Abwärme, die im Standardfall über drei Kältemaschinen auf dem Dach abgeführt werden muss, sollten in der Projektphase 1 ein Nutzungskonzept erstellt und die Möglichkeit für dessen Umsetzung auf dem Telegrafenberg analysiert werden. Im Erfolgsfall soll dieses Konzept in einer späteren Phase 2 realisiert werden. Insofern steht dieses Projekt an der Schnittstelle von einer gebäudebezogenen zu einer campusbezogenen Forschung.

#### a) Projektziele

- Planung und Bau des Forschungsneubaus für das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung einschließlich energetischem Gebäude-Monitoring
- Energetische Optimierung des Rechenzentrums und des gesamten Neubaus mit energetischer Gebäudesimulation
- Erstellung eines Konzepts für die Abwärmenutzung des Rechenzentrums im Rahmen eines Energiekonzeptes für den Campus Telegrafenberg
- Vorbereitung der baulichen Umsetzung des Campus-Energiekonzeptes für Projektphase 2



## b) Projektarbeiten

Gemäß der Projektstruktur gliedern sich die Arbeiten in die Schwerpunkte Gebäude – (PIK Forschungsneubau, Arbeitspakete 1 – 6) – und Campus-Energieverbundkonzept (AP 7). Für den Neubau sollte durch den Einsatz innovativer baulicher Komponenten und Anlagenteile das Kriterium EnEV 2009 -50 % erfüllt werden. Der Nachweis erfolgte zunächst nach den Vorgaben der DIN 18599 mit handelsüblicher Software. Um energetische Optimierungspotenziale nutzen zu können, die durch ein Energiemanagement des Gebäudes erzielbar sind (z. B. optimierter Betrieb von HLK-Anlagen, Verschattungseinrichtungen, Nutzung von Speichereffekten), ist die Abbildung der zeitlichen Verläufe aller Lastgänge auf Stundenbasis notwendig. Dazu wurden Simulationswerkzeuge eingesetzt (Energy Plus/Designbuilder und vergleichend TRNSYS-TUD).

Unmittelbar nach Projektbeginn starteten die Analyse des bereits bis zur Ausführungsplanung fortgeschrittenen Planungsprozesses der Gebäude- und Anlagenlösung für den PIK-Forschungsneubau und die begleitende energetische Optimierung bis zum Baubeginn.

Darauf aufbauend wurden Lastgänge des Heiz- und Kühlenergiebedarfs des PIK-Neubaus für die anschließenden Arbeitspakete ermittelt (AP 1.3). Diese wurden mit Hilfe von Simulationsuntersuchungen ermittelt. Sowohl für die energetisch-raumklimatische Auslegung des Rechenzentrums (AP 2), die integrale Betriebskostenprognose (AP 3), die ganzheitliche energetische Bewertung (AP 4) und die Erarbeitung eines Konzeptes für den Energieverbund Telegrafenberg (AP 7) ist die Kenntnis dieser Lastgänge hilfreich.

Der Stand der Genehmigungsplanung wurde in ein Gebäudesimulationsmodell umgesetzt (AP 1.1). Das betraf die Daten der Gebäudegeometrie, der Baukonstruktion, der Zonierung, der Nutzerprofile, der HLK-Technik und der Beleuchtungstechnik. Diese Daten werden durch Standortdaten (geografische Daten, Wind- und Strahlungsexposition, Bebauung, Bepflanzung) und Klimadaten (energetisches Referenzjahr Potsdam) ergänzt. Aufbauend auf den 2D-Grundrissdaten des Gebäudes wurde die 3D-Geometrie des Gebäudes mit Zonierung entwickelt. Die Datensätze für Nutzungsprofile wurden mit Bezug zur DIN 18599 erstellt, sofern die in der Norm vorhandenen Daten im konkreten Fall anwendbar waren. Das Gebäudesimulationsmodell wurde schrittweise aufgebaut und im Weiteren um eine stark vereinfachte Modellierung der HLK-Anlagen sowie der Beleuchtungstechnik ergänzt.

Neben der wissenschaftlichen Begleitung der Ausführungsplanung (AP 1.2) war in den drei „Zylindern“ des Baukörpers beabsichtigt, unterschiedliche Außen- bzw. Innenwandvarianten zu realisieren. Die vorgehängten Fassadenelemente waren im Ausgangsentwurf im ersten Zylinder mit einer Dämmschicht von 16 cm Mineralwolle ausgestattet. An einem zweiten Zylinder sollte Vakuumdämmung und – soweit am Markt verfügbar – Vakuumverglasung in Teilflächen eingesetzt werden. Vorgesehen war dafür die im EnOB-Technologieprojekt ProVIG entwickelte Vakuumverglasung. Im dritten Zylinder lag der Untersuchungsschwerpunkt auf der Raumklimaqualität. Für die Innenoberflächen wurden anstelle der innenliegenden Beplankung (Gipskarton) verschie-

dene Materialien eingesetzt, die eine klimaaktive Wirkung haben, d. h. die über Eigenschaften für Feuchtepufferung und Bindung von Schad- und Geruchsstoffen verfügen und somit die Raumklimaqualität positiv beeinflussen.

Für die Anforderungen der Arbeitspakete 2, 3, 4 und 7 waren die Ergebnisse aus den Simulationsuntersuchungen in geeigneter Form aufzubereiten. Die hohen Anforderungen an die Energieeffizienz gelten für den PIK-Neubau einschließlich des Rechenzentrums. Das Rechenzentrum als Raum mit der höchsten Energiedichte genießt dabei eine besonders hohe Priorität. Ziel war die Minimierung des Aufwandes zur Klimatisierung der Rechnerräume unter Ausnutzung modernster Technologien (AP 2: Energetisch-raumklimatische Auslegung des Rechenzentrums des PIK-Neubaus).

Durch den Aufbau eines projektspezifischen Internetportals (AP 3) wurde in Verbindung mit einem nachgelagerten Datenbanksystem ein zentraler Datenpool geschaffen, für den alle autorisierten Projektbeteiligten Zugang erhielten. Ziel war ein projektphasenübergreifendes Datenmanagement über eine auf die Verwaltung und Strukturierung von Immobiliendaten ausgerichtete Internetplattform. Diese wurde auch zur Erstellung eines Raumbuches genutzt. Gleichzeitig wurden die Datenerfassung und -visualisierung für das Gebäudeenergie-Monitoring über die Internetplattform durch die Einbindung der durch Monitoring und GLT-System gewonnenen Daten vorbereitet.

Um zu klären, inwieweit sich nicht nur finanzielle, sondern insbesondere energetische Investitionen über die Lebenszeit eines Bauwerks amortisieren, wurde als Arbeitspaket 4 eine energetische Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Dies erfolgte zunächst für den PIK-Neubau und soll später auch für das Campuswärmenetz erfolgen.

Im Rahmen von Arbeitspaket 5 "Bauliche Umsetzung der Innovationsziele der Gebäude- und Anlagenlösung des PIK-Neubaus" wurden die aus wissenschaftlicher Sicht erarbeiteten sinnvollen Lösungsmöglichkeiten in realisierbare, auf dem Markt verfügbare Techniken überführt. Dies schloss Vergabe, Projektsteuerung und Projektleitung für die entsprechenden Leistungsphasen der HOAI sowie den Abstimmungsprozess mit den beteiligten Architekten und Fachplanern, den Unterauftragnehmern und den Nutzern ein.

Parallel dazu erfolgte in Arbeitspaket 6 die Konzipierung des Monitoring-Systems für den Neubau und dessen Integration in die Bauablaufplanung sowie die Abstimmung zwischen der TUD, den einzelnen Nutzern der Nutzergemeinschaft auf dem Telegrafenberg und dem PIK.

Die Untersuchungen zum Konzept für den Energieverbund Telegrafenberg wurden in AP 7 bearbeitet. Um die Funktion eines Energieverbundes realitätsnah abbilden zu können, wurde ein Berechnungsmodell entwickelt und für Konzepterstellung und Variantenstudien angewendet. Anschließend wurden mit den ermittelten Lastgängen für verschiedene Netzvarianten und Abwärme-Temperaturniveaus Kostenvergleiche durchgeführt. Daneben sollte auch die Möglichkeit einer saisonalen Wärmespeicherung der sommerlichen Abwärme untersucht werden.

### **c) Projektmittel**

Die Förderung durch das BMWi beträgt insgesamt 1.999.786 € (Anteil PIK) und 1.264.638 € (Anteil TUD), davon 1.933.300 € für Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400).

#### d) Projektstand

Das Gebäude wurde Ende September 2015 zur Nutzung übergeben. Die Inbetriebnahme des Monitoring-Systems war zu diesem Zeitpunkt nur testweise erfolgt. Das wissenschaftliche Gebäudeenergie-Monitoring soll in einer nachfolgenden Projektphase durchgeführt werden. Erst danach sind auch detaillierte Auswertungen zum Gebäudeenergieverbrauch möglich. Anschließend werden die erhobenen Daten der Nachhaltigkeits- und Lebenszyklusanalyse zusammengeführt und bewertet.

Durch Variantenanalysen wurde eine ökonomisch sinnvolle Lösung des Netzbetriebes erarbeitet. Dabei kristallisierte sich heraus, dass eine Kombination aus kleineren Verbundlösungen (PIK-Neubau und benachbarte Gebäude mit Abwärmenutzung, Gebäude B-G mit BHKW) und dezentraler Wärmeversorgung (einzelnstehende Gebäude mehrheitlich mit Gas-Brennwertthermen) sinnvoll ist. Die Einsparungen durch Abwärmenutzung könnten bei Nutzung der Warmwasserkühlung bei bis zu 25.000 € pro Jahr liegen. Diese Berechnungen beruhen jedoch auf den Planungsdaten. Durch die komplexen gesetzlichen Vorgaben bei der Ausschreibung und Vergabe des Hochleistungsrechners verzögerte sich dessen Beschaffung. Letztendlich stellte sich heraus, dass mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln trotz erheblicher Aufstockung aus Eigenmitteln des PIK zunächst nur eine erste Ausbaustufe des Rechners von geringerem Umfang eingebaut werden konnte. Dieser hat lediglich eine Anschlussleistung von maximal 180 kW, wobei die rechentechnische Auslastung und somit auch die thermische Abwärmeleistung im Betrieb durch IT-seitige Optimierung noch wesentlich geringer sein kann. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt und mit dieser ersten Ausbaustufe ist damit der Bau eines Nahwärmenetzes für die Abwärmenutzung nicht ökonomisch sinnvoll darstellbar. Es bleibt abzuwarten, wie sich der weitere Ausbau des Hochleistungsrechners gestaltet. Ggf. muss das Energiekonzept nochmals angepasst werden. Ob das Energieverbundkonzept auch wirtschaftlich tragfähig ist, hängt dabei auch von der Entwicklung der Energiepreise, speziell für Erdgas, ab. Eine Minimalvariante mit Nutzung der Rechnerabwärme innerhalb des PIK einschließlich einer gegenseitigen Besicherung, z. B. in dem Büroneubau benachbarten Gebäude A26 bietet sich aber in jedem Fall an.

Bei der Erstellung des Forschungsgebäudes wurden die meisten der vorgesehenen Maßnahmen umgesetzt. Für das Rechenzentrum wurde zunächst eine Kaltgangeinhaltung (Cold Aisle Containment) zur strikten Trennung von Kalt- und Warmluftbereichen als finanziell sinnvollste Maßnahme realisiert. Ein Teil der Rechnerhardware wurde in Form von Platinen mit einer innovativen Warmwasserkühlung beschafft. Dabei werden die Prozessoren nicht über Luft, sondern direkt mit Wasser gekühlt, so dass deren Abwärme auf einem höheren Niveau von ca. 45 bis 50 °C bereitsteht. Auch wenn die Abwärmenutzung geplant wurde, stand jedoch die Rechenleistung im Vordergrund. Eine saisonale Speicherung der Abwärme ist aufgrund des relativ niedrigen Temperaturniveaus und der begrenzten baulichen Eingriffsmöglichkeiten auf dem Campus nicht sinnvoll durchführbar.

Die vorgesehene Vakuumdämmung an der Fassade des PIK-Neubaus konnte aus Brandschutzgründen (zusätzliche Brandlast zur bestehenden Holzfassade) nicht realisiert werden. Die ursprünglich geplante Vakuumverglasung aus dem EnOB-Technologiepro-

jekt ProVIG erlangte aufgrund dortiger technologischer Schwierigkeiten nicht die notwendige Marktreife für eine Verwendung im PIK-Neubau. Es konnte jedoch eine vergleichbare Lösung bestehend aus einer Kombination einer Vakuumverglasung ( $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) mit einer zusätzlichen Scheibe gefunden werden, die einen Piloteinsatz darstellt und im längerfristigen Einsatz noch zu bewerten sein wird.

#### **2.11.2.4 Die Projektergebnisse**

##### **a) Geplante Ergebnisse**

Auch wenn mit der jetzigen ersten Ausbaustufe des Hochleistungsrechners nicht ausreichend Abwärme für das konzipierte Wärmenetz zur Verfügung steht, bleibt die grundsätzliche Konzeption bestehen. Bei Planung der nächsten Ausbaustufe und weiteren energetisch relevanten Baumaßnahmen auf dem Campus soll der Projektstand aufgegriffen und wenn möglich das Energiekonzept mit entsprechenden Anpassungen umgesetzt werden. Ein entsprechender Forschungsantrag ist bereits eingereicht worden. Monitoring-Daten wurden nach Anlaufen des Gebäudebetriebs zwar erfasst, aber nicht im Rahmen des hier beschriebenen Projekts ausgewertet. Eine darauf basierende wissenschaftlich fundierte Betriebsoptimierung unter Verwendung dieser Daten sowie eine Nutzerverhaltensanalyse ist in einer zweiten Projektphase geplant. Bislang erfolgten ähnliche Aktivitäten lediglich im Rahmen der Betreiberverantwortung durch das GFZ.

##### **b) Bereits erhältliche Ergebnisse**

Baulich umgesetztes Ergebnis ist der Forschungsneubau für das PIK. Architektonisches Ziel war dessen harmonische und unauffällige Integration in das denkmalgeschützte Ensemble, was in beispielhafter Weise gelungen ist. Dazu zählt auch der Hochleistungsrechner. Das Internetportal mit dem Raumbuch wurde ebenfalls erstellt und konnte während der Projektlaufzeit genutzt werden. Eine Weiternutzung in nachgelagerten Projektphasen ist möglich.

Im Rahmen der energetischen Simulation erfolgte eine tiefgehende Einarbeitung in die Software EnergyPlus. Um die Bearbeitung komplexer Gebäude mit einer großen Anzahl von Zonen praktikabel zu machen, wurden ergänzende Softwaretools programmiert. Diese sind von der TU Dresden, Institut für Bauklimatik auf Anfrage erhältlich. Um das Wissen praktisch zu verbreiten, wurde Schulungsmaterial für ein Seminar erstellt, was bereits mehrfach bei mittelständischen Planungsbüros zum Einsatz kam. Eine ausführliche Darstellung aller Projektergebnisse ist im Abschlussbericht [90] verfügbar.

#### **2.11.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Im Projekt erfolgte keine Nutzerbefragung.

#### **2.11.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Das Projekt wird regelmäßig in Vorlesungen und Seminaren in der Lehre für Studierende im Fach Bauingenieurwesen (speziell in der Vertiefung Gebäudeenergiemanagement) und Architektur (Energieoptimiertes Bauen) verwendet. Hier müssen allerdings

einzelne Punkte herausgegriffen werden, da die Komplexität des Gebäudes und der Berechnungen den Rahmen üblicher Lehrveranstaltungen übersteigt. Einzelne Themen zur Simulation des Gebäudes und des Energieverbunds waren Gegenstand mehrerer Projekt- und Diplomarbeiten.

### **2.11.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Durch die Eigentums- und Nutzungsverhältnisse auf dem Potsdamer Telegrafenberg müssen bei campusrelevanten Entscheidungen jeweils alle Nutzer bzw. die Nutzergemeinschaft einbezogen werden. Dies erfordert naturgemäß einen größeren Abstimmungs- und Kommunikationsaufwand. Hierbei ist auch immer die Bereitschaft der Partner zu Innovation und dem damit verbundenen Mehraufwand und zur Übernahme eines ggf. begrenzten wirtschaftlichen Risikos notwendig.

Durch die bei Projektbeginn bereits laufende Fachplanung stellten sich in einigen Fällen die relativ knappen Zeitfenster für Entscheidungen als problematisch dar. Die Simulationsberechnungen benötigten einschließlich Eingabe, Auswertung und Variantenstudien zum Teil mehr Zeit als im Planungs- und Bauablaufprozess für Entscheidungsfindung zur Verfügung stand. Es war hier aber letztlich immer möglich, auch mit unvollständigen Daten die Entscheidungen der Fachplaner zu unterstützen.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Die vertragsmäßige Umsetzung der Ausschreibung und Abrechnung des Monitorings war relativ aufwendig, da das Budget dafür bei der TU Dresden lag und es sich damit rechtlich um Baumaßnahmen an einer fremden Immobilie handelt, die jedoch aus Kosten-, Haftungs- und Bauablaufgründen möglichst zusammen mit den restlichen Arbeiten ausgeschrieben und durchgeführt werden sollten. Durch entsprechende Gestattungsvereinbarungen und Haftungsausschlüsse konnte dies geregelt werden. Günstiger dürfte es hier sein, wenn das Budget für die Monitoringmaßnahmen direkt beim Bauherrn liegt.

#### **c) Energetische Benchmarks**

Keine.

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Vakuumdämmtechnologie: Die vorgesehene Vakuumdämmung an der Fassade eines Gebäudeteils konnte aus Brandschutzgründen nicht eingesetzt werden. Die Fassade besteht aus einer Lärchenholzverkleidung, bei der der Brandschutzprüfer zur Bedingung machte, dass keine weitere Brandlast an der Fassade installiert wird. Die Fassadengestaltung ist zentrales Element des Baus, der sich damit in die naturnahe Umgebung einpasst. Letztlich war es nicht möglich, eine Vakuumdämmung zu finden, die diesen Anforderungen genügt, da die Folien der Dämmelemente als brennbar eingestuft werden müssen.

Die Vakuumverglasung aus dem Projekt ProVIG konnte nicht wie vorgesehen verwendet werden, da es dort zu keiner marktreifen Entwicklung kam. Es wurde daher eine

Vakuumverglasung mit  $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  mit einer weiteren Scheibe kombiniert. Damit ist ein deutlich schmalerer Rahmen möglich. Zusätzlich musste aus Sicherheitsgründen auf der Innenscheibe eine Splitterschutzfolie aufgebracht werden. Dieser Aufwand ist als Piloteinsatz zu vertreten; langfristig wäre es weiterhin wünschenswert, eine energetisch hochwertige Vakuumverglasung zu entwickeln.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**


Die Simulation von Gebäuden und Quartieren erfordert derzeit noch den Einsatz mehrerer Softwaretools und bringt einen erheblichen Eingabeaufwand mit sich. Um einen effizienten Einsatz dieser Tools auch in der Planungspraxis zu ermöglichen, ist ein einheitlicher Datenfluss wünschenswert. Im Projekt wurde dies in der Verbindung Design-Builder (graphische Eingabe der Gebäude-, Klima- und Nutzungsdaten) -> EnergyPlus (Gebäudesimulation) -> TRNSYS-TUD (Gebäudesimulation, Quartierssimulation) -> STE-FaN (Software zur Trassen-Erschließung Fernwärme) umgesetzt, wobei jeweils Konvertierungssoftware programmiert werden musste. Hier besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um einen effektiven Datenfluss von den Plänen der Architekten und Fachplaner bis hin zum Simulationsergebnis zu ermöglichen.

## 2.12 Rng-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen

Autorenteam:

- Dr.-Ing. Francesco Massa Gray, Dr.-Ing. Jan Gall, Dr. Georgios Georgiadis, Dipl.-Ing. Sven Braun, Dr.-Ing. Klaus Klimke, Dipl.-Ing. Guillaume Huard, Dr. Henrik Dibowski (Robert Bosch GmbH)
- Dipl.-Ing. Nicolas Réhault, Dr. Gesa Benndorf, Dr.-Ing. Dominik Wystrcil, Dipl.-Phys. Tim Rist, Paula Maria Alfonso, M. Sc. Ing., Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Zehnle (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme)

### 2.12.1 Projektsteckbrief

<b>Projektname</b>	Rng-Opt: BIM gestütztes Facility Management und netzreaktive Betriebsoptimierung am Bosch Forschungscampus Renningen		
<b>Projektbild</b>	 <p>Bosch-Campus für Forschung und Voraufwicklung in Renningen. © Robert Bosch GmbH.</p>		
<b>Hochschule bzw. sonstiger Campus</b>	Corporate Research Robert Bosch GmbH Robert-Bosch-Campus 1 71272 Renningen Deutschland		
<b>Projektbeteiligte</b>	Robert Bosch GmbH	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme	
<b>Anzahl und Art der beinhalteten Gebäude</b>	1 Hochhaus als Zentralgebäude (60 Meter hoch, 12 Stockwerke), 11 Labor- und Werkstattgebäude (zwischen 10 und 19 Meter hoch, 2-3 Stockwerke) und 2 Gebäude für die Standortinfrastruktur. In Summe: 14 Gebäude		
<b>Neubauten im Projekt</b>	keine		

<b>Baujahr der Gebäude</b>	Baubeginn: Juni 2012 Eröffnung: Oktober 2015									
<b>Bauqualität vor dem Projekt</b>	Entsprechend des Baualters									
<b>Energieversorgung vor dem Projekt</b>	<p>Wärmeversorgung durch eine Heizungszentrale bestehend aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Heizkessel (Erdgas) 1,5 MW</li> <li>- 3 Heizkessel (Erdgas), jeweils mit 3 MW</li> <li>- 2 Wärmepumpen, jeweils mit 1 MW</li> </ul> <p>Kälteversorgung durch eine Kältezentrale bestehend aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Kältemaschine (Schraubenverdichter) 1,25 MW</li> <li>- 4 Kältemaschinen (Turboverdichter), jeweils mit 2,5 MW</li> <li>- 8 Kühltürme, jeweils mit 1,9 MW</li> </ul> <p>Die Verteilung erfolgt über ein Nahwärme- und Nahkältenetz an den Gebäuden. Strom aus dem allgemeinen Stromnetz, mit einer Peakleistung von ca. 5,2 MW.</p>									
<b>Projektlaufzeit</b>	01/2016 – 12/2018									
<b>Projektart</b>	Masterplan/ Energiekonzept Campus	Netzplanung für zentrale Nah- wärme	Hocheffizienter Neubau	Energetische Ge- bäudesanierung	Betrieboptimie- rung (Digitaler Zwilling)	Werkzeug-/ Toolentwicklung	Finanzierungsme- thode	Nutzersensibili- sierung		
					XX	X				
<b>Projektphasen</b>	Planung	Simulation	Umset- zung	Messung	Planung/Umsetzung: Nach- rüstung von Aktoren und Sen- soren					
	X	XX	X	X	Messung: Betriebsphase des Gebäudes					
<b>Projekthalt</b>	Das vom BMWi geförderte Forschungsprojekt Rng-Opt zielte auf die Entwicklung und Implementierung von neuen Methoden und Werkzeugen ab, die das technische Facility Management bei der energetischen Betriebsführung komplexer Liegenschaften unterstützen sollen. Dabei strebte das Projekt Rng-Opt die Entwicklung von Bauwerksinformationsmodellen (engl. Building Information Model - BIM), von Algorithmen zur Fehlererkennung und Diagnose gebäudetechnischer Anlagen (TGA-Anlagen) und von Methoden für eine hohe Netzdienlichkeit der Liegenschaft und deren Integration in eine Gesamtlösung an. Die neu entwickelten Werkzeuge sollten an ausgewählten Bereichen und Anlagen des Forschungscampus in Reninggen demonstriert und validiert werden.									
<b>Projektmittel</b>	Förderung BMWi insgesamt: 610.040 € (RB, FKZ: 03ET1373B) + 494.417 € (ISE, FKZ: 03ET1373A) davon Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400): 101.000 €									
<b>Maßnahmen an den Gebäuden</b>	Nachrüstung von Sensoren und Aktoren in einem Bürogebäude (eine Etage und im Lüftungssystem) und in der Technikzentrale, um die entwickelte Ansätze demonstrieren zu können.									



<b>Maßnahmen an der Energieversorgung</b>	Keine					
<b>Beheizte Nettogrundfläche</b>	Vor dem Projekt		Nach dem Projekt			
	700 m <sup>2</sup> *		700 m <sup>2</sup> *			
<b>Energieverbrauch und Kosten vor dem Projekt *</b> (simulierte Ergebnisse, gerundet)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	29	41	32	45	k. A.
	Kälte	12	17	10	14	k. A.
	Strom	10	14	27	39	k. A.
	Summe	51	73	68	98	k. A.
<b>Energieverbrauch und Kosten nach dem Projekt *</b> (simulierte Ergebnisse, gerundet)		Endenergie		Primärenergie		Energiekosten
		MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	MWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	€/a
	Wärme	22	32	24	35	k. A.
	Kälte	13	18	10	14	k. A.
	Strom	8	11	23	33	k. A.
	Summe	43	61	58	82	k. A.
<p>* Der simulierte Gebäudeteil befindet sich im ersten Obergeschoss. Die Außenfläche begrenzt sich hauptsächlich auf eine Südfassade. Alle angrenzenden Räume und Geschosse werden beheizt/klimatisiert. Das führt zu einem geringeren Energieverbrauch. Außerdem werden hier nur die Verbräuche der HLK-Anlage gezeigt. (Wärme = Heizkörper und Heizregister, Kälte = Kühlregister, Strom = Ventilatoren und Pumpen). EER der Kältemaschine = 3,5. Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599-1:2011-12: Gas = 1,1; Strom = 2,8.</p>						
<b>Eingesetzte Planungstools</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revit für die Erstellung des BIM</li> <li>- Matlab, Modelica und Python für die Entwicklung von Regelungen und Optimierungsalgorithmen (Potentialanalyse)</li> </ul>					
<b>Bereits erhältliche Projektergebnisse</b>	<p>Im Projekt wurde eine detaillierte Analyse des Status-Quo der Facility- (FM) und Energie-Management-Prozesse (EM) am Forschungsstandort Renningen. Aus der Analyse wurden sechs BIM-basierte Anwendungsfälle abgeleitet und implementiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anwendungsfall #1 „Instandhaltung“: In diesem Anwendungsfall wurde eine App entwickelt, die mittels Augmented Reality, BIM und einer Live-Anbindung an die Gebäudeautomation die Möglichkeit bietet, die technische Gebäudeausrüstung und die passenden Messwerte zu visualisieren und Sollwerte anzupassen.</li> <li>- Anwendungsfälle #2 und #3 „Smarte Vorschläge“ und „Social Ticketing“: Für diese Anwendungsfälle wurde ebenfalls eine BIM-basierte App entwickelt, die es den Nutzern ermöglicht, mit wenig Aufwand Feedback abzugeben.</li> <li>- Anwendungsfall #4 „FED-Automatisierung und Präsentationserweiterung“: Für diesen Anwendungsfall wurden Informationen aus BIM-Modellen genutzt, um geeignete Routinen zur Fehlererkennung und Diagnose (FED) auszuwählen, zu parametrieren und anzuwenden.</li> </ul>					

	<p>- Anwendungsfall #5 „Kontinuierliche Verbesserung von FED“: Das Verfahren beruht auf einer Kombination von Methoden zur Fehlererkennung und einem Feedback-Mechanismus. Das Verfahren wurde auf reale Daten angewendet und evaluiert.</p> <p>- Anwendungsfall #6 „Visualisierung“: In diesem Anwendungsfall wurde eine Webanwendung erstellt, die aktuelle Sensorwerte mit einer 3D-Darstellung des Gebäudes überlagert.</p> <p>Außerdem wurde eine simulationsbasierte Potentialanalyse des netzdienlichen Potentials durchgeführt. Diese Analyse zeigte, dass für den betrachteten Forschungscampus Renningen die Steuerung von KWK-Anlagen nach dynamischen Preissignalen zu beträchtlichen Kosteneinsparungen bzw. Erlössteigerungen führen kann. Demgegenüber stehen zusätzliche Investitionen für Pufferspeicherkapazitäten bzw. die Implementierung optimierter Betriebsstrategien.</p> <p>Die detaillierten Projektergebnisse sind im Endbericht [93] veröffentlicht.</p>
--	--

## 2.12.2 Projektbeschreibung

### 2.12.2.1 Der Campus vor dem Projekt

Das rund 100 Hektar große Grundstück mit vierzehn Gebäuden und einer Gesamtnutzfläche von fast 110.000 m<sup>2</sup> (ein Zentralgebäude, elf Labor- und Werkstattgebäude, zwei Gebäude für die Standortinfrastruktur) ist der neue Standort der Zentralen Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH.

Am Standort arbeiten ca. 1.900 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, die meisten davon in Forschungsabteilungen, in denen Grundlagen- und Systemforschung für die Bosch-Geschäftsbereiche betrieben wird. Das Forschungszentrum bildet in Zukunft einen wichtigen Knotenpunkt des internationalen Forschungsverbundes der Robert Bosch GmbH.

Bei der Planung und dem Standortbetrieb legt Bosch besonderen Wert auf eine umweltschonende Bauweise sowie Energie- und ressourcensparende Materialien, Anlagen und Einrichtungen. Auf den begrünten Dachflächen befinden sich Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von 500 kWp. Für Heizung, Klimatisierung, Zugangskontrolle, Gebäudeautomatisierung sowie Einbruchs- und Brandmeldeanlagen setzt Bosch eigene Produkte und Systeme ein.

Alle Gebäude des Standortes werden über Nahversorgungsnetze zentral mit Kälte, Warmwasser sowie Druckluft versorgt. Die einzelnen Gebäude enthalten die Raumlufttechnik und hydraulische Wärme-/Kälteübergabe. Der gesamte Campus wird zentral durch eine vorhandene Leittechnik überwacht und gesteuert. Diese integriert die Gebäudeautomation und sicherheitstechnische Funktionen. Insbesondere wird auch der Zugriff auf weitere Gebäude-Automationsfunktionen wie Licht und Verschattung ermöglicht.

Das Forschungsvorhaben wurde in zwei Gebäuden am Campus Renningen demonstriert. Hierzu wurde ein Gebäude mit Büro- und Labornutzung ausgewählt (Rng111). Die Anlagentechnik in der Energiezentrale im Untergeschoss des Hochhauses (Rng100) wurde ebenfalls berücksichtigt.

### **2.12.2.2 Die beteiligten Akteure**

#### **a) an den Prozessen der Universität**

Das Facility Management am Campus (FCM-Rng) war dafür verantwortlich, die Nachrüstungsmaßnahmen freizugeben und zu koordinieren. Alle Grundlagen (Pläne, Messungen und sonstige Informationen) wurden von FCM-Rng zur Verfügung gestellt. FCM-Rng ist direkt der Standortleitung Renningen unterstellt und in drei Einheiten eingeteilt: FCM1-Rng „Bau-, Flächen- und Technikmanagement“, FCM2-Rng „Betrieb und Instandhaltung“ und FCM3-Rng „Infrastrukturelle Dienstleistungen, Kaufmännische Aufgaben, Protection and Security, Werkfeuerwehr“. FCM-Rng deckt alle operativen Aktivitäten des Gebäudemanagements im Sinne der DIN 32736 ab. Diese sind das kaufmännische Gebäudemanagement, das technische Gebäudemanagement und das infrastrukturelle Gebäudemanagement.

#### **b) am Projekt**

Das Projektteam setzt sich aus Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern verschiedener Einrichtungen und Fachgebiete zusammen. Ein Projektpartner ist die zentrale Forschung der Robert Bosch GmbH, mit Mitarbeitern aus den Abteilungen für Gebäudetechnik, Regelungstechnik und Informatik. Der andere Projektpartner ist das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), mit der Abteilung für Energy Efficient Buildings.

Der Fokus der Robert Bosch GmbH lag in der Entwicklung und Demonstration verschiedener Use Cases für BIM im Betrieb, u. a. eine Augmented Reality App, eine Feedback App und die dafür notwendige Ontologie. Der Fokus des Fraunhofer ISE lag im Aufbau des BIM der Demonstrationsobjekte und in der Entwicklung und Demonstration von Fehlererkennung- und -diagnose-Algorithmen.

Beide Projektpartner haben an der Schätzung des netzreaktiven Potentials des Campus gearbeitet und waren in der Planung der Nachrüstung der Demonstrationsobjekte beteiligt.

### c) Organisationsstruktur

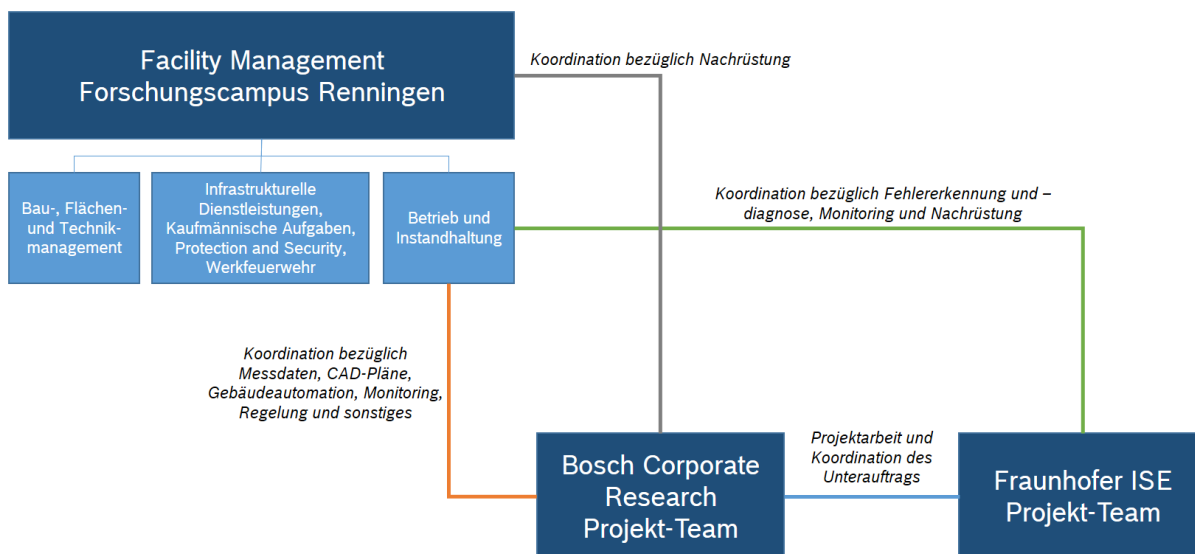


Bild 42: Organisationsstruktur im Projekt Rng-Opt. © Robert Bosch GmbH.

#### 2.12.2.3 Der Projektinhalt

##### a) Projektziele

Die Ziele des öffentlich geförderten Projekts „Rng-Opt“ lauten wie folgt:

- Entwicklung von Bauwerksinformationsmodellen (engl. Building Information Model - BIM)
- Entwicklung von Use Cases, die auf den Bauwerksinformationsmodellen basieren
- Entwicklung von Algorithmen zur Fehlererkennung und Diagnose gebäudetechnischer Anlagen
- Entwicklung von Methoden für eine hohe Netzdienlichkeit der Liegenschaft
- Demonstration der Entwicklungen in ausgewählten Bereichen und Anlagen des Forschungscampus in Renningen

##### b) Projektarbeiten

Ein Teil einer Etage im Gebäude Rng111 wurde für die Projektzwecke nachgerüstet. Im Rahmen der Nachrüstung wurden folgende Komponenten installiert und in einem zusätzlichen Schaltschrank auf der Etage mit einer Rexroth-SPS verbunden:

- 45 Stellglieder an den Klappen im Luftsystem: Mit den Stellgliedern ist es möglich, den Volumenstrom für fast jeden Auslass separat einzustellen. Das Stellglied wird als Nachrüstlösung auf das vorhandene Klappenverstellrad montiert. Es handelt sich nicht um einen aktiven Regler mit eigener Volumenstrommessung. Der resultierende Durchfluss wird in Abhängigkeit von der Einstellung der Radposition eingestellt. Dies funktioniert nur, wenn der Vordruck ausreicht, um den gewünschten Volumenstrom zu erreichen.
- 23 drahtlose Thermostate für Heizkörper: Die bestehenden Thermostate wurden durch drahtlose ersetzt. Die Thermostate liefern über eine bidirektionale EnOcean-

Schnittstelle die aktuelle Raumtemperatur, die Ventilstellung und den Status. Der aktuelle Raumtemperatur-Sollwert kann auch ferngesteuert eingestellt werden.

- 2 EnOcean-Sender: Für die Kommunikation mit EnOcean-basierten Komponenten wurden zwei entsprechende Sender in die Zwischendecke der Etage eingebaut.
- 10 Multisensoren zur Luftqualitätsmessung: Um die Luftqualität in verschiedenen Räumen und im offenen Bürobereich zu messen, wurden entsprechende Sensoren in den Abluftkanälen installiert. Diese Sensoren messen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO<sub>2</sub> und VOC (flüchtige organische Verbindungen (Volatile Organic Compounds)) der Luft.
- 3 Wärmemengenzähler: Wärmemengenzähler wurden für die Heiz- bzw. Kühlkreise der Heiz- und Kühlregister der Lüftungsanlage LL311 und sowie der statischen Heizung der Etage installiert. Darüber werden Durchfluss, Vor- und Rücklauftemperatur sowie die gesamte Wärmeenergie erfasst.
- 5 Differenzdruckmessgeräte: Da sich die Stelle mit dem höchsten Druckverlust aufgrund von Änderungen der Klappenpositionen innerhalb des Kanalsystems bewegt, wurden zusätzliche Differenzdruck-transmitter installiert, um immer einen ausreichend hohen Druck im System zu gewährleisten.
- 8 Fensterkontakte: Zur Erkennung des Öffnens der Fenster und der Fluchttür wurden EnOcean-basierte Fensterkontakte eingesetzt.
- 2 Handsender: Für das Feedback der Anwender wurden zwei EnOcean-basierte Handsender in das System integriert.
- 5 Kinects zur Anwesenheitserkennung (Microsoft): Microsoft Kinects wurden zur Anwesenheitserkennung über fünf Türen im Demonstrator installiert. Die Software verwendet den vorhandenen Tiefensensor, um Personen zu erkennen, die durchlaufen. Jedes Kinect ist mit einem ODROID Single-Board-Computer verbunden, der die Anwesenheitserkennungssoftware lokal ausführt.

Bild 43 stellt eine Übersicht über die in Rng111 installierten Sensoren und Stellglieder dar.

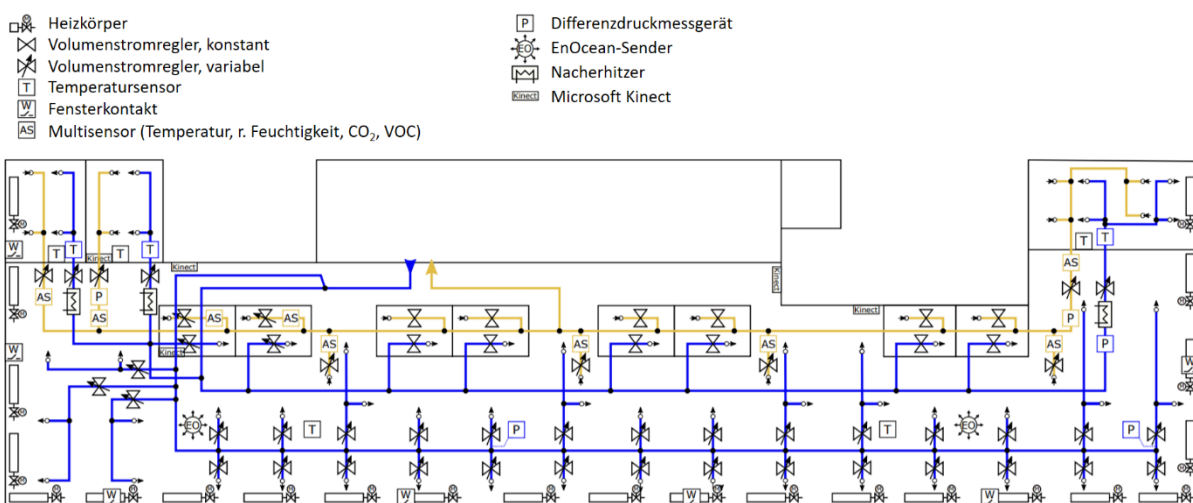


Bild 43: Platzierung neuer Sensoren und Stellglieder in Rng111/1. © Robert Bosch GmbH.

### c) Projektmittel

Die Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie beläuft sich auf 1.104.457 €. Davon wurden 610.040 € für die Robert Bosch GmbH und 494.417 € für das Fraunhofer ISE bewilligt. Die Umsetzungsmaßnahmen (KG 300-400) haben Kosten in Höhe von ca. 101.000 € verursacht und wurden hauptsächlich von der Robert Bosch GmbH getragen.

### d) Projektstand

Das Projekt ist abgeschlossen.

## 2.12.2.4 Die Projektergebnisse

### a) Geplante Ergebnisse

Das Projekt ist seit dem 31.12.2018 abgeschlossen.

### b) Bereits erhältliche Ergebnisse

Im Projekt wurde eine detaillierte Analyse des Status-quo der Facility- (FM) und Energie-Management-Prozesse (EM) am Forschungsstandort Renningen durchgeführt. Aus der Analyse wurden sechs BIM-basierte Anwendungsfälle implementiert:

- Anwendungsfall #1: „Instandhaltung“: In diesem Anwendungsfall wurde eine App entwickelt, die mittels Augmented Reality, BIM und einer Live-Anbindung an die Gebäudeautomation die Möglichkeit bietet, die technische Gebäudeausrüstung und die passenden Messwerte zu visualisieren und Sollwerte anzupassen. Damit können Wartungstechniker u. a. die Position von Komponenten der HLK-Anlage vor Ort identifizieren, auch wenn diese hinter Wänden oder Decken versteckt sind.
- Anwendungsfälle #2 und #3: „Smarte Vorschläge“ und „Social Ticketing“: Für diese Anwendungsfälle wurde ebenfalls eine App entwickelt, die es den Nutzern ermöglicht, mit geringem Aufwand vollständiges und genaues Feedback abzugeben. Die App nutzt die Position des Nutzers im Gebäude, Information aus einem BIM, aktuelle Messwerte aus der Gebäudeleittechnik und existierende Beschwerden, um dem Nutzer für ihn relevante Beschwerden vorzuschlagen. Damit kann der Nutzer seine Beschwerde schnell finden und dem Facility Management mitteilen.
- Anwendungsfall #4: „FED-Automatisierung und Präsentationserweiterung“: Für diesen Anwendungsfall wurden Informationen aus BIM-Modellen genutzt, um geeignete Routinen zur Fehlererkennung und Diagnose (FED) auszuwählen, zu parametrieren und anzuwenden. Weiterhin wurde im Fall eines identifizierten Fehlers Informationen zu einer betroffenen Komponente aus dem BIM-Modell extrahiert, um kontextbezogene Informationen den Nutzern über ein neues Widget in der mondas® Software bereitzustellen.
- Anwendungsfall #5: „Kontinuierliche Verbesserung von FED“: Dieser Anwendungsfall basiert auf der Nutzung neu entwickelter Verfahren zur automatisierten Erkennung von Fehlern im Anlagen- und Gebäudebetrieb. Das Verfahren beruht auf einer Kombination von Methoden zur Fehlererkennung und einem Feedback-Mechanismus. Das Verfahren wurde auf reale Daten angewendet und evaluiert.

- Anwendungsfall #6: „Visualisierung“: In diesem Anwendungsfall wurde eine Webanwendung erstellt, die aktuelle Sensorwerte mit einer 3D-Darstellung des Gebäudes überlagert. Die 3D-Informationen stammen aus einer IFC-Datei und die Messwerte aus der Gebäudeleittechnik. Sowohl Temperatur-, Feuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Sensoren, als auch Personenzähler wurden in die Anwendung integriert.

Um die Anwendungsfälle realisieren zu können, wurden das nachgerüstete Gebäude und die Technikzentrale des Campus vom Fraunhofer ISE digitalisiert, indem BIM-Modelle mit der Software Revit® erstellt wurden. Da es in Revit® nicht möglich war, alle Daten standardisiert abzubilden, wurde eine Software in Python entwickelt, die mittels ifcOpenShell zusätzliche Information in die exportierte IFC-Datei hinzufügen kann, wie z. B. Sensorinformation. Diese Software wurde auch verwendet, um die IFC-Datei mittels COBie-Datenblätter mit zusätzlichen Daten zu ergänzen, die für die Wartung- und die Instandhaltung von TGA-Anlagen notwendig sind.

Außerdem wurde eine simulationsbasierte Potentialanalyse des netzdienlichen Potentials durchgeführt. Diese Analyse zeigte, dass für den betrachteten Forschungscampus Renningen die Steuerung von KWK-Anlagen nach dynamischen Preissignalen zu beträchtlichen Kosteneinsparungen bzw. Erlössteigerungen führen kann. Demgegenüber stehen zusätzliche Investitionen für Pufferspeicherkapazitäten bzw. die Implementierung optimierter Betriebsstrategien. Tiefergehende Untersuchungen zur Nutzbarmachung dieses Potentials sind erforderlich. Dies beinhaltet die Berücksichtigung von Vorhersagegenauigkeiten sowohl bezüglich des EEX-Preises als auch des realen Systemverhaltens.

Eine Liste der bereits veröffentlichten Berichte, wissenschaftlichen Beiträge und Vorträge kann in den Referenzen ([91]-[102]) gefunden werden.

#### **2.12.2.5 Nutzerintegration/Nutzersensibilisierung**

Das Projektteam seitens Bosch hat im nachgerüsteten Gebäude direkt gearbeitet und war somit gleichzeitig Nutzer und Bearbeiter. Der Rest der Nutzer wurde aktiv über Nachrüstungsmaßnahmen informiert. Im Fall der entwickelten Feedback-App wurden zahlreiche Interviews geführt, um die Wünsche der Nutzer in die App aufzunehmen. Die App wurde aktiv von den Nutzern über mehrere Monate verwendet.

Das Facility Management (FM) wurde am Anfang des Projektes vom Fraunhofer ISE bezüglich der FM- und Energiemanagementprozesse befragt. Am Ende des Projektes wurde das FM in der Diskussion und Bewertung der Ergebnisse der Fehlererkennung und -diagnose einbezogen.

#### **2.12.2.6 Umsetzung in die Lehre**

Das Projekt wurde nicht in die Lehre einbezogen.

### **2.12.2.7 Lessons Learned**

#### **a) Erfahrungen mit Entscheidungsprozessen**

Da das Projekt nur aus zwei Partnern bestand (Bosch und Fraunhofer ISE), waren die Entscheidungswege kurz und übersichtlich. Außerdem hat die enge Kooperation mit dem Facility Management am Campus, das auch am Projekt involviert war, die Genehmigung und Umsetzung von Nachrüstungs- und Regelungsmaßnahmen deutlich vereinfacht.

#### **b) Hemmnisse und deren Überwindung**

Ein Hemmnis war die geringe Wirtschaftlichkeit der Nachrüstungsmaßnahmen. Die aktuell niedrigen Preise für Energie (Gas und Strom) führen dazu, dass der Return on Investment (ROI) der Nachrüstungsmaßnahmen mehrere Jahre bis zu Jahrzehnte betragen kann. Aus diesem Grund wurde nur eine Etage – statt ein gesamtes Gebäude – nachgerüstet. Dafür wurden auf der kleineren Fläche deutlich mehr Sensoren und Aktoren nachgerüstet, als man sie in Bürogebäuden typischerweise vorfinden kann. Dies erlaubt eine feingranulare Regelung und Beobachtung der nachgerüsteten Fläche.

#### **c) Energetische Benchmarks**

Es war eine Herausforderung, repräsentative und vergleichbare Messdaten des Energieverbrauchs zu besorgen. Da die Flächennutzung über die Jahre dynamisch war (unterschiedliche Nutzung und Belegung) ist die Vergleichbarkeit der Daten gering. Außerdem ist es für saisonale Untersuchungen der Regelungsansätze notwendig, Daten aus vergleichbaren Testphasen unter unterschiedlichen Wetterbedingungen zu sammeln, was auch nicht immer möglich war. Aus diesen Gründen wurden vor allem Simulationen verwendet, um die verschiedenen Regelungsansätze zu vergleichen.

#### **d) Erfahrungen mit Technologien**

Lediglich der Betrieb mit Funkthermostatventilen war nicht immer zufriedenstellend, da die Lebensdauer der Batterien zum Teil deutlich unter den Erwartungen lag. Dies verursachte zusätzliche Arbeit und Verzögerungen.

#### **e) Erfahrungen mit Planungshilfsmitteln**

Obwohl Revit eines der meistbenutzten Tools im Bereich BIM ist, ist der Export von IFC-Dateien (ein BIM-Austauschformat) nicht immer problemlos. Dies hat dazu geführt, dass ein zusätzliches Python-Skript geschrieben wurde, um die notwendigen Informationen in die IFC-Datei nachträglich hinzuzufügen.



### **3 Quervergleich der Campus-Projekte**

#### **3.1 Gesamtübersicht über die zwölf Campus-Projekte**

In Tabelle 10 werden die zwölf analysierten Campus-Projekte einander vergleichend gegenübergestellt, um den jeweiligen Fokus, vergleichbare Ansätze, aber auch Unterschiede, sowie die geplanten und bereits erzielten Ergebnisse zusammenzufassen.

Tabelle 10: Vergleichende Gegenüberstellung der Projektmerkmale der zwölf Campus-Projekte. (S. 192-202: Projekte 1-6, S. 203-213: Projekte 7-12).

Projektmerkmal		EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching	
Projektgröße	Anzahl Gebäude	321	48	136	27	150 Einzel-/Teilgebäude	63	
	Beheizte Nettogrundfläche	vorher: 457.600 m <sup>2</sup> nachher: 432.000 m <sup>2</sup>	vorher: 417.040 m <sup>2</sup> nachher: 450.151 m <sup>2</sup>	vorher: 401.000 m <sup>2</sup> nachher: 402.904 m <sup>2</sup>	150.000 m <sup>2</sup>	vorher: 610.000 m <sup>2</sup> nachher: 660.000 m <sup>2</sup> (ges. NGF)	vorher: 413.000 m <sup>2</sup> nachher: 583.500 m <sup>2</sup>	
Hauptnutzen	Gebäudeanteil	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	
		mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	
		hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	
				nicht unterteilt				
Baualter	Bestand: Bauperioden	1861 bis 2015	1883 bis 2012	vor 1918 bis nach 2008	1967 bis 1969, 1983 bis 1986, 2000 bis heute	1890 bis 2018 ca. die Hälfte der Gebäude unter Denkmalschutz	vor 1957 bis nach 2009	
	Neubau	diverse Neubauten	- Mathematikgebäude - Interdisziplinäres Zentrum für Modellierung und Simulation	5 Forschungszentren	-	7 Gebäude, darunter Hochleistungszentrum, Institutsgebäude Physik, Neubau/Sanierung im Botanischen Garten	bis 2040: 52 Gebäude darunter Mensa, Hörsaal, 3 Institutsgebäude, 4 Parkhäuser, 3 Wohnheime	

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Bauliche Sanierungen/Schäden	bereits einige Sanierungen durchgeführt	bereits durchgeführte energetische Sanierungen	- altersbedingte Mängel und Schäden - Ermüdungserscheinungen am Tragwerk	- überwiegend unsaniert - teilw. monolith. Beton, Einfachverglasung, thermisch ungetr. Rahmen - Undichtheiten, Wärmebrücken - Fensterlüftung, Lüftung o. WRG	- teilweise ist Abriss geplant - Großteil der Gebäude ist sanierungsbedürftig - einige Gebäude sind teil-/komplett saniert - Sanierungsstau	stark variierende Bauqualität, noch keine Sanierungsmaßnahmen
	Wärme	Fernwärme	Fernwärme	Nahwärme: 3 Erdgas-BHKW, 6 Erdgasheizkessel	Fernwärme, Nahwärme mit Abwärmenutzung des Rechenzentrums	Nahwärme mit Gasturbine mit Dampfeindüsung, 2 Gasheizkessel
	Kälte	kleine Kältezentrale	-	Nahkälte aus BHKW-gespeisten AKM und KKM	7 kleine Nahkältenetze (Kälteinseln mit großen Kältezentralen)	3 Absorptionskältemaschinen, Kompressionskältemaschinen
	Strom	allgemeines Stromnetz	allgemeines Stromnetz	BHKW, allgemeines Stromnetz	allgem. Stromnetz, PV-Strom in campusinternen Mittelspannungsringen	Stromerzeugung über Gasturbine, allgemeines Stromnetz
	Wärme	-	vereinzelt Erdgaskessel, auch für ein BHKW und Dampf-erzeugung	-	Erdgas-/Ölkessel, Erdgas für Kraftwerkssimulator mit Einspeisung der Wärme in das Fernwärmenetz	-
	Kälte	dezentr. Anlagen in Einzelgebäuden	160 Kälteerzeuger (KKM)	-	-	-
Strom	-	-	-	-	-	-
Energieversorgung im Bestand			zentral (Nahwärme/Fernwärme)		dezentral (gebäudeweise)	

Projektmerkmal	EnEff: Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Projektlaufzeit	10/2014-09/2016	Phase 1: 03/2016-08/2018 Phase 2: 01/2019-12/2023	Phase 1: 04/2012-03/2015 Phase 2: 09/2015-03/2019	Phase 1: 01/2016-12/2018 Phase 2: 01/2019-12/2022	Phase 1: 10/2015-03/2019 Phase 2: 04/2019-03/2024	05/2016-10/2019
Projektart	Anteil	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet
	Masterplan/Energiekonzept Campus					
	Netzplanung für zentrale Nahwärme					
	Hocheffizienter Neubau					
	Energetische Gebäudesanierung					
	Betrieboptimierung (Digitaler Zwilling)					
	Werkzeug-/Toolentwicklung					
	Finanzierungsmethode					
	Nutzersensibilisierung					
	Fokus					
Projektphasen	Anteil	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet
	Planung					
	Simulation					
	Umsetzung					
	Messung					

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Energetische Projektziele	Reduzierung des nutzflächenbezogenen Primärenergieverbrauchs um 50 % bis 2025	Demonstration der Klimaschutzziele der Bundesregierung für 2050 bereits 2035	mittelfristig: Reduzierung des Primärenergiebedarfs um 40 % langfristig: Versorgung des Campus ausschließlich mit regenerativer Energie	Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen um 80 % gegenüber 1990 bis 2050	schrittweise Reduktion des Energieverbrauchs und der klima- und umweltschädlichen Emissionen	unterschiedliche Szenarios, z. B. 55 % CO <sub>2</sub> -Einsparung gegenüber 1990, bzw. 35 % CO <sub>2</sub> -Einsparung gegenüber einem "Weiter so"-Szenario
Projekthalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesamtkonzept für die energetische Sanierung</li> <li>- Datensammlung und Building Information Modeling</li> <li>- Dynamische Simulation der Energieversorgungskette</li> <li>- Einzelmaßnahmen und Optimierungsstrategie</li> <li>- GIS-basiertes 3-D-Modell des Campus</li> </ul>	Masterplan Energie: energetisch und ökonomisch sinnvolle Kombination aus Energieeinsparung (Gebäude-/Anlagensanierung), Nutzung von lokalen erneuerbaren Energien und Wärmenetzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung und Erprobung von Planungs- und Optimierungsmethoden für die Energieeffizienz von Stadtquartieren</li> <li>- ökologische und ökonomische Untersuchung von Szenarien</li> <li>- Realisierung und Messung eines mehrdimensionalen Sanierungskonzepts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- virtuelles Gesamtmodell basierend auf umfassendem Monitoring</li> <li>- Strategie zur Reduzierung der Fernwärmenetztemperaturen, Einbindung von erneuerbaren Energien</li> <li>- Abwärmenutzung des neuen Hochleistungsrechners</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenführung von Bestands-, Betriebs-, Verbrauchs- und Nutzungsinformationen</li> <li>- Analyse, Interpretation und Bewertung der Daten</li> <li>- Handlungsempfehlungen zur Energieverbrauchsreduktion</li> <li>- konkretere Umsetzungsvorschläge zur Entschleunigung der Maßnahmen zur Unterstützung eines energiesparenden Nutzerverhaltens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Methodik/Leitfaden zur übergreifenden Optimierung von Strom-, Wärme und Kälteversorgung</li> <li>- Entwicklung der Optimierungsoftware urbs zur niederschwiligen Anwendung der Methodik</li> <li>-Roadmap für den Campus</li> <li>-Empfehlungen für den Aus- und Umbau der Energieversorgung am Campus</li> </ul>

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Maßnahmen an den Gebäuden	Keine Maßnahmen, da Simulations- und Planungsprojekt	Untersuchung von möglichen Maßnahmen, noch keine Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Verbesserung der Gebäudehülle</li> <li>-Beleuchtungsaustausch</li> <li>-Betrieboptimierung von RLT-Anlagen</li> <li>-Erhöhung der Flächeneffizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hydraulischer Abgleich</li> <li>- differenzdruckgeregelte Heizkörperventile</li> <li>- NT-Flächenheizsysteme</li> <li>- drehzahlregelte Umwälzpumpen</li> <li>- Abdichtungsmaßnahmen</li> <li>- MSR-Technik</li> <li>- LED-Beleuchtung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Innendämmung</li> <li>- Reduktion sommerlicher Kühllasten (Verschattung)</li> <li>- Optimierung der Tageslichtnutzung</li> <li>- Neubau: Thermoaktive Bauteilsysteme, Phase Change Materials</li> </ul>	-
Maßnahmen an der Energieversorgung		Kälteverbundnetz, Mehrleiter-Wärme-Netz mit Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien	Installation von Photovoltaik-Anlagen auf Dächern	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erweiterung um einen Kältering</li> <li>- Überholung der BHKW, Ergänzung um 4. BHKW</li> <li>- Erfassung der thermischen und elektrischen Energieflüsse (Power Quality Management)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbau Nankälteverbund, hocheff. Kältemaschinen, freie Kühlung</li> <li>- PV-Nachrüstung für Eigenstromverbrauch</li> <li>- NT-Wärme, Abwärmennutzung aus Rechenzentren, Nutzung der Rücklauftemperaturen, Heiztemperaturenabsenkung</li> <li>- Weiterentwicklung des Energiemanagements</li> </ul>	-

Projektmerkmal		EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Endenergieverbrauch vorher	Wärme	237 kWh/m <sup>2</sup> a	134 kWh/m <sup>2</sup> a	98 kWh/m <sup>2</sup> a	150 kWh/m <sup>2</sup> a	105 kWh/m <sup>2</sup> a	189 kWh/m <sup>2</sup> a
	Kälte	nicht sinnvoll bestimmbar	27 kWh/m <sup>2</sup> a	-	keine Angabe	30 kWh/m <sup>2</sup> a	41 kWh/m <sup>2</sup> a
	Strom	171 kWh/m <sup>2</sup> a	84 kWh/m <sup>2</sup> a	88 kWh/m <sup>2</sup> a	206 kWh/m <sup>2</sup> a	89 kWh/m <sup>2</sup> a	218 kWh/m <sup>2</sup> a
	Summe	nicht sinnvoll bestimmbar	245 kWh/m <sup>2</sup> a	187 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	224 kWh/m <sup>2</sup> a	448 kWh/m <sup>2</sup> a
Endenergieverbrauch nachher	Wärme	171 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	88 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	keine Angabe	132 kWh/m <sup>2</sup> a
	Kälte	nicht sinnvoll bestimmbar	keine Angabe	-	keine Angabe	keine Angabe	18 kWh/m <sup>2</sup> a
	Strom	77 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	64 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	keine Angabe	183 kWh/m <sup>2</sup> a
	Summe	nicht sinnvoll bestimmbar	keine Angabe	152 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	keine Angabe	333 kWh/m <sup>2</sup> a
Eingesetzte Planungstools		MODELICA, TEASER, IDA ICE, PostgreSQL, pgModeler, QGIS Wien	MODELICA, DesignBuilder, IDA ICE, Polysun, Sunny Design, eigenes Tool	PV Sol, Energieberater, eigenes Tool auf MS Excel-Basis	MATLAB, Simulink & CARNOT-Toolbox, IDA ICE, Digsilent PowerFactory, Python, GAMS, MS Office	TRNSYS-TUD, PV*Sol, Polysun, BIM HVAC-Tool, EnergyPlus, EnergyCalc, MS Excel, MATLAB, graviss-CAFM	Optimierungsframework urbs, eigene Preprocessing-Tools, Qgis, AX3000, IDA ICE
Erhältliche Projektergebnisse		- AixLib - MODELICA Modell Bibliothek - TEASER: Tools for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit - Schlussbericht	- Methodik für Sanierungsfahrplankentwicklung - Gebäudeübergreifende Sanierungs- und Effizienzsteigerungsmaßnahmen - Schlussbericht der Phase I	- interaktive Campuskarte mit Gebäuden und Maßnahmen - CO <sub>2</sub> -Challenge: Wettbewerb zur Einsparung von CO <sub>2</sub> -Emissionen unter den Gebäuden - Schlussbericht der Phase I	- Konzept für Rechnerabwärmung - Sanierungsszenarien - Potenziale für Elektromobilität, elektrische Speicher, PV, Wärmepumpen, LED	- Abschlussbericht Phase 1 - weitere Veröffentlichungen	- Energiesystemoptimierungssoftware urbs - Vorträge

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Umsetzung in die Lehre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Abschlussarbeiten</li> <li>- Besichtigung der Versorgungsanlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Abschlussarbeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Motivierende Gesprächsführung zum Nutzerverhalten</li> <li>- Untersuchungen zum Mobilitätsverhalten und Förderung des Fahrradeinsatzes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Wissenstransfer durch Lehrveranstaltungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Verwendung in Lehrveranstaltungen</li> </ul>
Entscheidungsprozesse	-	persönliche Kontakte und das Vertrauensverhältnis sind extrem wichtig	Bearbeitung im Team und mit externen Partnern lief gut	zeitlich aufwändige Abstimmungsprozesse, deshalb Organigramme für interneren Gebrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bauliche Umsetzungen benötigen lange Zeiträume, Forschungsprojekte sind kürzer</li> <li>- unterschiedl. Verantwortlichkeiten/Interessen/Herangehensweisen erschweren Entscheidungen-/Planungs-/Umsetzungszesse</li> <li>- Beschaffung/Zusammenführung/Auswertung von Daten ist aufwändig und kompliziert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stelle für einen Energie- oder Nachhaltigkeitsmanager ist hilfreich</li> <li>- Vorschläge von Energieversorgungsexperten sollten einen direkten Weg zu Entscheidungsträgern finden</li> </ul>
Lessons Learned						



Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Lessons Learned	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begriffe und Zielsetzungen müssen geklärt werden</li> <li>- Aufgaben müssen klar gegliedert werden</li> <li>- unzureichende und widersprüchliche Datenlage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auffinden und Zugang zu Daten ist eine große Herausforderung</li> <li>- knappe personelle Besetzung des Gebäudemangements</li> <li>- schwierige Kostenbewertung der Maßnahmen (hohe Preisspannen, unklare Einausituation im Rahmen der Konzeptphase)</li> </ul>	<p>Online-Umfragen durch Datenschutz kompliziert</p>	<p>Abstimmung zwischen Projektbewilligung und Arbeitsabläufen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Existierende Betriebsstrukturen (Bauherr, Betreiber, Nutzer) setzen wenig Anreize zur Energieverbrauchsreduktion, z. B. bei Beschaffung</li> <li>- Hilfreich wären Zählerinfrastrukturen und Berechnungsmethoden, um Nutzern Konsequenzen des Verbrauchsverhaltens zu verdeutlichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Personal bzw. Erfahrung für Beantragung von Investitionsgeldern fehlt -&gt; Kopplung der Anträge an größere Bauvorhaben kann Lösung sein</li> <li>- viele Maßnahmen amortisieren sich nach wenigen Jahren -&gt; diese Investitionen sollten auch ohne andere Projekte getätigt werden, Aufteilung der reduzierten laufenden Kosten bietet sich an</li> <li>- möglich wäre die Beteiligung von Mitarbeitern und Studenten an Investitionen, z. B. für PV-Anlagen gegen Verzinsung</li> </ul>

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Energetische Benchmarks	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nutzflächenbezogener Primärenergiebedarf</li> <li>- absoluter und spezifischer Heizenergieverbrauch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- €/kWh Primärenergie</li> <li>- CO<sub>2</sub>-Einsparung</li> <li>- Amortisationszeit</li> </ul>	<p>Werte im Jahr 2018:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Endenergieverbrauch Wärme: 88 kWh/m<sup>2</sup>a</li> <li>- Endenergieverbrauch Strom: 64 kWh/m<sup>2</sup>a</li> <li>- Primärenergieverbrauch Wärme: 47 kWh/m<sup>2</sup>a</li> <li>- Primärenergieverbrauch Strom: 166 kWh/m<sup>2</sup>a</li> <li>- CO<sub>2</sub>-Emissionen: 54 kg/m<sup>2</sup>a</li> <li>- CO<sub>2</sub>-Emissionen: 1.081 kg/(Student*a)</li> <li>- CO<sub>2</sub>-Emissionen: 3.329 kg/(Mitarbeiter*a)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nutzflächenspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> <li>- Endenergiebedarfe für Wärme und Strom</li> </ul>	<p>Vergleich mit Benchmarks (BMW/BMUB 2015/VDI 3807-2) nur eingeschränkt möglich:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzfläche oft unbekannt, NGF beinhaltet Flächen ohne Energieversorg.</li> <li>- Zuordnung Gebäude nach BWZ schwierig: Nutzung d. unterschiedl. Fachbereiche, Integration von zentr. Hörsälen</li> <li>- unterschiedl. Art/Auslastung von Laboren</li> <li>- Witterungsbeurteilung aufgrund unzureich. Zählerinfrastrukturen unmöglich</li> <li>- Maßnahmenpriorisierung basierend auf flächenspezifischen Verbrauchsdatenwert und absolutem Verbrauch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- energetische Benchmarks sollten an den Treibhausgas-Ausstoß gekoppelt werden</li> <li>- bei KW(K)K-Anlagen ist eine separate Betrachtung der einzelnen Sektoren nur bedingt aussagekräftig</li> <li>- Zielfunktion war eine Minimierung der Gesamtkosten für den betrachteten Zeitraum unter Vorgabe von CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen</li> <li>- bei Übertragung der Treibhausreduktionsziele der Bundesregierung wurde prognostizierter Flächenzuwachs des Campus berücksichtigt</li> </ul>
Lessons Learned						

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Technologien	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biomethan-BHKW konnte mit 15 Jahren Amortisationszeit nicht umgesetzt werden</li> <li>- 9 Photovoltaik-Anlagen auf ausgewählten Dachflächen durch Co-Finanzierung und Amortisationszeit von 10 Jahren umgesetzt</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bei Kälteerzeugern des Nahkältenetzes wurden AKM mehrheitlich durch elektrische KKM ersetzt (Wartungsaufwand, Verschleiß, Lebensdauer, Energieeffizienz, Verbrauchskosten)</li> <li>- bei Abwärmennutzung sollte regelmäßige Überprüfung der tatsächlich genutzten Abwärmemengen Energiemanagementaufgabe sein</li> <li>- frühzeitige Einbindung der Behörden ermöglicht PV-Anlagen auch auf denkmalgeschützten Gebäuden (Einzelfallentscheidung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wirtschaftlich/ökologisch sinnvoll: PV und Gasmotoren-KW(K)K-Anlagen (für Übergangszeit von 15 Jahren)</li> <li>- nachhaltig gewonnene Biomasse zur Wärme-/Strombereitstellung kann bei hohen Temperaturen weas der Wärmerversorgung wichtige Beiträge für Klimaziele liefern</li> <li>- wenn der Strombedarf den Wärmebedarf deutlich übersteigt, sind rein elektrische Erzeugungsanlagen, z. B. PV und KWK-Anlagen mit hohem Strom-Wärme-Verhältnis wirtschaftlich interessant</li> </ul>
Lessons Learned						

Projektmerkmal	EnEff:Campus Roadmap RWTH Aachen II	HochschulCampus Berlin Charlottenburg	Campus TU Braunschweig	Campus Lichtwiese Darmstadt	CamperCAMPus/CAMPER-MOVE Dresden	CleanTechCampus Garching
Planungshilfsmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cloudbasierte Lösungen und Versionierungsoftware hilfreich gegen redundante Daten</li> <li>- integrales Planungshilfsmittel aus dem Vorkängerprojekt konnte gut integriert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoringkonzept an DIN V 18599 angelegt</li> <li>- Polysun enthält alle notwendigen Komponenten zur Abbildung des Kälteverbunds, kann allerdings nur sehr begrenzt für die geplanten Simulationsszenarien eingesetzt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zusammengefasstes MS Excel-Tool zur Vermeidung von zeitintensiven Einzeltools und zur Fehlerreduzierung</li> <li>- Berechnung von Sanierungsmaßnahmen nach DIN V 18599 konnte hinsichtlich Anwendbarkeit und Vergleichbarkeit überzeugen</li> </ul>	<p>MATLAB/Simulink in Verbindung mit der CARNOT-Toolbox und andere Toolboxen bieten umfangreichere Möglichkeiten ohne Aufwand für Pre- und Postprocessing bzw. Schnittstellen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verfügbare Softwaretools besitzen individuelle Vor-/Nachteile bzgl. Bilanzraum (Anzahl Gebäude), Detaillierungsgrad, Verfügbarkeit, Übertragbarkeit, Eingabe-/Bearbeitungsaufwand und Ergebnisqualität</li> <li>- Anpassungen in den Tools waren notwendig aufgrund heterogener Nutzung, Teilsanierungen, thermisch unkonform. Bereichen, hohem technischer Ausstattungsgrad, RLT nur in Teilbereichen, genaue Abbildung der TWW-Versorgung und des Nutzerverhaltens</li> </ul>	<p>Das Energiesystem des Campus ist mit rein linearer Optimierungsoftware bis zu einem bestimmten Detaillierungsgrad gut abbildbar. Sollen Prozesse noch präziser abgebildet werden, bietet sich ein gemischt-ganzheitliches Energiesystemoptimierungsmodell an.</p>
Lessons Learned						

Tabelle 10 (Fortsetz.): Vergleichende Gegenüberstellung der Projektmerkmale der zwölf Campus-Projekte. (S. 192-202: Projekte 1-6, S. 203-213: Projekte 7-12).

Projektmerkmal		Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen	
Projektgröße	Anzahl Gebäude	347 Gebäude	77 Gebäude	25 Gebäude	232 Gebäude	56 Gebäude	14 Gebäude	
	Beheizte Nettogrundfläche	350.000 m <sup>2</sup>	350.703 m <sup>2</sup>	vorher: 56.148 m <sup>2</sup> nachher: 80.581 m <sup>2</sup>	773.547 m <sup>2</sup>	vorher: 45.225 m <sup>2</sup> nachher: 56.753 m <sup>2</sup>	Insgesamt fast 110.000 m <sup>2</sup> Anwendung auf 700 m <sup>2</sup>	
Hauptnutzungen	Gebäudeanteil	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	
		mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	
		hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	
		Verwaltung						
		Institutsgebäude						
		Forschung						
		Unterricht						
		Wohnen						
		Technik						
		Sport						
Baualter	Lager/Werkstatt							
	Sonstiges							
Baualter	Bestand: Bauperioden	1918 bis 2019 (flächengewichteter Durchschnitt 1977)	1837 - 2015	1936, 1990, 1996, 2017	1840 bis 2016	1832 bis 2015	2012 bis 2015	
	Neubau	-	-	Zentralgebäude	-	Forschungsneubau mit Arbeitsplätzen für ca. 190 Beschäftigte und Hochleistungsrechner	-	

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Rng-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Bauliche Sanierungen/Schäden	teilweise bereits durchgeführte energetische Sanierungen	teilweise bereits durchgeführte energetische Sanierungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>in den Gebäuden von 1936 wurden Dach- und Heizungsanlagen durchgeführt</li> <li>Sanierung des Nahwärmesystems in 2010</li> </ul>	teilweise bereits durchgeführte Sanierungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>die historischen, meist denkmalgeschützten Gebäude sind in sehr gutem Zustand, aber nur teilweise energetisch saniert</li> <li>die Qualität der Neubauten entsprechen der Bauzeit</li> </ul>	-
Energieversorgung im Bestand	Wärme	Fernwärme des Braunkohlekraftwerks Weisweiler	Fernwärme aus Kraftwärmekopplung mit Erdgas	Fernwärme	-	Nahwärme: Heizungszentrale mit 4 Erdgasheizkesseln und 2 Wärmepumpen
	Kälte	3 Kältezentralen	-	-	-	Nahkälte: Kältezentrale mit Schraubenverdichter-KM, 4 Turboverdichter-KM und 8 Kühltürmen
	Strom	allgemeines Stromnetz	Ökostrombezug	allgemeines Stromnetz	allgemeines Stromnetz	allgemeines Stromnetz
	Wärme	-	Erdgaskessel	-	z. B. Erdgaskessel	-
	Kälte	-	-	-	-	-
	Strom	-	Eigenerzeugung: PV, BHKW	-	-	-
					15 Erdgas-Brennwertkessel, 2 BHKW, Wärmepumpen	

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Projektklaufzeit	01/2016-03/2019	12/2015-05/2021	Phase 1: 10/2010-12/2017 Phase 2: 09/2016-08/2020	Phase 1: 12/2008-11/2012 Phase 2: 05/2013-06/2017	07/2011-12/2015	01/2016-12/2018
Projektart	Anteil	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet
	Masterplan/Energiekonzept Campus					
	Netzplanung für zentrale Nahwärme					
	Hocheffizienter Neubau					
	Energetische Gebäudesanierung					
	Betrieboptimierung (Digitaler Zwilling)					
	Werkzeug-/Toolentwicklung					
	Finanzierungsmethode					
	Nutzersensibilisierung					
	Anteil	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet	beinhaltet
Projektphasen	Planung					
	Simulation					
	Umsetzung					
	Messung					

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Energetische Projektziele	Neuausrichtung der Energieversorgung	Erschließung von wirtschaftlichen Energiesparmaßnahmen zur Entlastung von Hochschulhaushalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Klimaneutrale Energieversorgung</li> <li>- 30 % Endenergieeinsparung</li> <li>- 50 % Primärenergieeinsparung</li> <li>- Neubau mit &lt;math&gt;&lt;100 \text{ kWh/m}^2\text{a}&lt;/math&gt; Endenergie</li> </ul>	Im Median kann der Heizenergiebedarf gemäß Berechnung um 67,5 % gesenkt werden. Eine konkrete Umsetzung war nicht Bestandteil des Projekts.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neubau: EnEV minus 50 %</li> <li>- energetische Optimierung des Rechenzentrums</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebsoptimierung</li> <li>- Steigerung der Netzdienlichkeit</li> </ul>
Projekthalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufbau eines ganzheitlichen Energiekonzepts</li> <li>- neues städtebauliches Konzept mit Verdichtung der Flächen, Neubaumaßnahmen und neue Raumkonzepte für die Forschung</li> </ul>	Systematische und übertragbare Ausarbeitung, wie das Modell des Intractings an Hochschulen implementiert werden kann, um wirtschaftliche Energiesparmaßnahmen zu erschließen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Klimaneutrale Energieversorgung, Endenergie- und Primärenergieeinsparung im Bestand, effizienter Neubau</li> <li>- Qualitätssicherung bei Fertigstellung, Inbetriebnahme, Eingeregulierung des Neubaus</li> <li>- Monitoring und Betriebsoptimierung des Neubaus</li> <li>- Nutzereinbindung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung und energetische Bewertung von Universitätsgebäuden</li> <li>- Entwicklung des Quick-Check-Tools (webbasierte Anwendung zur energetischen Bewertung von großen Liegenschaften mit ökologisch und ökonomisch sinnvollen Sanierungsmaßnahmen als Output)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Errichtung eines neuen Forschungsgebäudes mit Hochleistungsrechner</li> <li>- Energieeffizienzmaßnahmen am Gebäude und Optimierung des Rechenzentrums</li> <li>- Nutzung der Abwärme zur Gebäudeheizung</li> <li>- Vorhaltungen zum Anschluss an ein Campus-Nahwärmenetz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung und Implementierung von neuen Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung des Facility Managements: BIM, Algorithmen zur Fehlererkennung und Diagnose gebäudetechnischer Anlagen, Methoden für hohe Netzdienlichkeit der Liegenschaft</li> <li>- Demonstration und Validierung der Werkzeuge</li> </ul>



Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Maßnahmen an den Gebäuden	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lüftungssanierung</li> <li>- Pumpenaustausch</li> <li>- Beleuchtungssanierung</li> <li>- Gebäudedämmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestand: Heizkreisoptimierung, Abschaltung Nahwärme (Sommer), Effizienzpumpen, LED, Einzelraumregelung, Deckenstrahlplatten</li> <li>- Neubau: Kaskadierung Wärmeversorgung, LED-Tages- und Kunstlichtsystem, schaltbare Verglasungen, aktivierte PCM-Kühldecken, VIP, intel. Gebäudetechnik zur Nutzereinbindung</li> </ul>	keine während der Projektzeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vakuumverglasung</li> <li>- Vakuumdämmung</li> <li>- raumklimaaktive Wandmaterialien</li> <li>- Warmwasserkühlung für Platten des Hochleistungsrechners</li> <li>- Kaltgang-Einhausung im Rechenzentrum</li> </ul>	Nachrüstung von Sensoren und Aktoren in einem Bürogebäude (eine Etage und Lüftungssystem) und in der Technikzentrale
Maßnahmen an der Energieversorgung	-	Installation von PV-Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energieliefercontracting mit Energieeffizienz/erneuerbare Energienutzung/Preis</li> <li>- Modernisierung BHKW, Umstellung auf Biomethan, Option auf Aquiferspeicher, PV</li> </ul>	keine während der Projektzeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärmepumpe zur Abwärmenutzung aus dem Rechenzentrum zur Gebäudebeheizung</li> <li>PIK-Neubau und Nachgebäude</li> <li>- Gasbrennkessel als Backup</li> </ul>	-

Projektmerkmal		Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Endenergieverbrauch vorher	Wärme	273 kWh/m <sup>2</sup> a	94 kWh/m <sup>2</sup> a	84 kWh/m <sup>2</sup> a	103 kWh/m <sup>2</sup> a	110 kWh/m <sup>2</sup> a	41 kWh/m <sup>2</sup> a
	Kälte	103 kWh/m <sup>2</sup> a	-	-	3 kWh/m <sup>2</sup> a	1 kWh/m <sup>2</sup> a	17 kWh/m <sup>2</sup> a
	Strom	304 kWh/m <sup>2</sup> a	67 kWh/m <sup>2</sup> a	41 kWh/m <sup>2</sup> a	41 kWh/m <sup>2</sup> a	267 kWh/m <sup>2</sup> a	14 kWh/m <sup>2</sup> a
	Summe	680 kWh/m <sup>2</sup> a	161 kWh/m <sup>2</sup> a	125 kWh/m <sup>2</sup> a	147 kWh/m <sup>2</sup> a	378 kWh/m <sup>2</sup> a	73 kWh/m <sup>2</sup> a
	Wärme	keine Angabe	keine Angabe	73 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe	die Werte nach dem Projekt sind nicht sinnvoll vergleichbar (weitere Neubauten)	32 kWh/m <sup>2</sup> a
	Kälte	keine Angabe	keine Angabe	4 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe		18 kWh/m <sup>2</sup> a
	Strom	keine Angabe	keine Angabe	29 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe		11 kWh/m <sup>2</sup> a
	Summe	keine Angabe	keine Angabe	106 kWh/m <sup>2</sup> a	keine Angabe		61 kWh/m <sup>2</sup> a
Eingesetzte Planungstools	MODELICA, TEASER, uestraphs, Gurobi	MS Excel: Eigenes Tool für die strategische Planung, konzeptionelle Ausgestaltung sowie für die Dokumentation und das Controlling der Anwendung des Intractings	DOE2.E, synavision, FeFlow, TRNSYS	- eigenes Tool: Monte-Carlo-Simulation zur energet. Gebäudewertung bas. auf EnergyPlus - MS Excel: Energiebilanzen nach DIN V 18599 - Quick-Check-Tool	DesignBuilder/Energy Plus, TRNSYS-TUD, DIN V 18599, DELPHIN	Revit, Matlab, Modelica, Python	
Erhältliche Projektergebnisse	- AixLib: MODELICA Modell-Bibliothek - TEASER: Tool for Energy and Analysis Simulation for Efficient Retrofit - uestraph: Graphenframework f. Liegenschaftsenergienetze	Relevante Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Intracting	- Abschlussarbeiten und Konferenzbeiträge - Peer-reviewed Paper - Abschlussbericht der Phase 1	- Maßnahmenkatalog, Energieklassen f. Hochschulnutzungen - Tools: Quick-Check, EnMoLMU - Energiemasterplan (inkl. Nachhaltigkeit) - Referenz-Raum-Methode - Abschlussberichte	- Planung/Bau des PIK Forschungsneubaus - Hochleistungsrechner mit Warmwasserkühlung - Heizungsanbindung des Nachbargebäudes - Abschlussbericht	- detail. Analyse des Status-Quo der Facility- und Energie-Management-Prozesse, Ableitung von 6 BIM-basierten Anwendungsfällen - Veröffentlichungen - Abschlussbericht	

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Umsetzung in die Lehre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Verwendung in Lehrveranstaltungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Verwendung in Lehrveranstaltungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Verwendung in Lehrveranstaltungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Verwendung in Lehrveranstaltungen</li> <li>- Nutzung der Erkenntnisse durch Studierende</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studentische Arbeiten</li> <li>- Verwendung in Lehrveranstaltungen</li> </ul>	-
Entscheidungsprozesse	Bei Nutzerumfragen ist ein erhöhter Abstimmungs- und Überarbeitungsaufwand zur berücksichtigen	noch keine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohes Maß an Kommunikation erforderlich</li> <li>- regelmäßige Steuerungsruunden als Voraussetzung f. integrale Prozesse</li> <li>- verbindl. Ziele durch Förderung sind wichtig als Durchsetzungsinstrument</li> <li>- Contracting für öffentl. Liegenschaften gut geeignet zur Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ein erfolgreiches Energiemanagement benötigt ein organisationspezifisches Energiecontrolling-Netzwerk mit geeigneter Zählerstruktur und technischer Infrastruktur</li> <li>- in die Entwicklung von Hilfsmitteln für das Energiemanagement müssen die zukünftigen Anwender mit einbezogen und das Hilfsmittel ausführlich in der Praxis erprobt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- großer Abstimmungs- und Kommunikationsaufwand, da alle Nutzer bzw. Nutzergemeinschaften einbezogen werden müssen</li> <li>- da die Fachplanung zu Beginn des Projekts bereits lief, gab es Probleme mit den Simulationsberechnungen, die mehr Zeit als vorhanden benötigten</li> </ul>	Die enge Kooperation mit dem Facility Management vereinfachte die Umsetzung von Nachrüstungs- und Regelungsmaßnahmen.
Lessons Learned						

Lessons Learned	Hemmnisse	Ein detaillierter Fragebogen (INKA/Berkeley) zur Nutzerpartizipation konnte aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht angewendet werden. Der Fragebogen musste stark reduziert werden.	noch keine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- der steigende Strombedarf durch das Wachstum der Universität konnte nur teilweise durch Einsparmaßnahmen ausgeglichen werden</li> <li>- durch MSR-Sanierung und zwischenzeitliche Handregulierung stieg der Heizwärmebedarf an, nach MSR-Sanierung steht eine Neuoptimierung an</li> <li>- der geplante Aquifer-Wärmespeicher konnte bisher nicht umgesetzt werden, weil Senkungsgebiete im Stadtkern befürchtet werden. Der geplante Standort weist jedoch keine geologischen Risiken auf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Aufrechterhaltung des Universitätsbetriebs während energetischen Sanierungsmaßnahmen führt zu Problemen und Verzögerungen</li> <li>- bei einer Sanierungsrate von 3 % müssen an der LMU die Nutzungen von sechs Gebäuden in anderen Liegenschaften untergebracht werden, was aufgrund von Platzproblematik nicht möglich ist</li> </ul>	Die Umsetzung der Ausschreibung und Abrechnung des Monitorings war aufwändig, da das Budget nicht beim Bauherrn, sondern bei einer anderen Universität lag (Baumaßnahmen an einer fremden Immobilie). Dies konnte durch Genehmigungsvereinbarungen und Haftungsausschlüsse geregelt werden. Günstiger ist es, wenn das Budget für Monitoringmaßnahmen direkt beim Bauherrn liegt.	Die aktuellen niedrigen Preise für Energie führen dazu, dass der Return on Investment der Nachrüstungsmaßnahmen mehrere Jahre bis Jahrzehnte beträgt. Aus diesem Grund wurde nur eine Etage statt ein gesamtes Gebäude nachgerüstet.
-----------------	-----------	---	------------	--	--	---	--

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Energetische Benchmarks	<ul style="list-style-type: none"> <li>- spezifischer thermischer Energieverbrauch</li> <li>- Referenzwerte für den Heizenergieverbrauch bei Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen nach VDI 3807-2</li> <li>- Nutzung von Gleichzeitigkeitsfaktoren zur Identifizierung geeigneter Gebäudegruppen für eine Abkopplung von der zentralen Versorgung</li> </ul>	noch keine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Heizsystemoptimierung führte zu 23 % Endenergieeinsparung</li> <li>- bisher nur geringe absolute Endenergieeinsparungen, nach MSR-Sanierung müssen Heizungsanlagen neu optimiert werden</li> <li>- der Strombedarf des Neubaus ist vergleichbar mit dem der anderen Campusgebäude: zusätzliche Lüftung und Kühlung wird durch effizientere Beleuchtung ausgeglichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energiemasterplan liefert gute Methodik zur Identifizierung der größten Energieverbraucher</li> <li>- Performance Indikator ist der spezifische Heizenergiebedarf: Median vorher 103 kWh/m<sup>2</sup>a, nachher 33 kWh/m<sup>2</sup>a</li> </ul>	-	<p>Repräsentative und vergleichbare Messdaten des Energieverbrauchs waren schwer zu finden, da die Nutzung und Belegung des Gebäudes über die Jahre dynamisch war. Stattdessen wurden Simulationen verwendet, um verschiedene Regelungsansätze zu vergleichen.</p>
Lessons Learned						

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Rng-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
Technologien	-	noch keine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die RL-Anlagen sind im Betrieb deutlich effizienter als berechnet</li> <li>- E-Control-Glas ist eine geeignete Option für sommerlichen Wärmeschutz</li> <li>- für 0,25 km<sup>2</sup> Mischgebiet niedriger Dichte mit Wärme aus Biomethan-KWK wird eine Anbaufläche von ca. 1 km<sup>2</sup> benötigt</li> <li>- Photovoltaik ist auch bei Ost-/Westausrichtung wirtschaftlich interessant</li> <li>- Kraft-Wärme-Kopplung eignet sich für Altbauten und ist komplementär zur dezentralen Energieerzeugung von Energieplus-Neubauten</li> </ul>	Es wurde ein Maßnahmenkatalog mit vielen energiesparenden Maßnahmen entwickelt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die vorgesehene Vakuumdämmung an der Fassade konnte aus Brand-schutzgründen nicht eingesetzt werden, da der Brandschutzprüfer keine weitere Brandlast zusätzlich zur Lärchenholzverkleidung zuließ</li> <li>- die Vakuumverglasung aus dem Projekt ProVIG konnte nicht verwendet werden, da es zu keiner marktreifen Entwicklung kam. Es wurde daher eine andere Vakuumverglasung mit einer weiteren Scheibe kombiniert.</li> </ul>	Der Betrieb mit Funkthermostaten war nicht zufriedenstellend, da die Lebensdauer der Batterien zum Teil deutlich unter den Erwartungen lag.
Lessons Learned						

Projektmerkmal	Living Lab Energy Campus Jülich	Intracting an Hochschulen, Kassel	Klimaneutr. Campus Leuphana Univ. Lüneburg	Campus Information Modeling, München	Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam	Ring-Opt: Bosch Forschungscampus Renningen
<p>Planungshilfsmittel</p>	<p>Es wurde eine virtuelle Liegenschaft entwickelt, die als Datenbanksystem das Planungshilfsmittel 3DCityDB nutzt</p>	<p>noch keine</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dynamische Modellierung verursacht immer noch hohen Aufwand, ist aber für Speicherauslegung/Planung der Kältebereitstellung bei variablen und hohen Nutzererfordernissen fast unerlässlich</li> <li>- das Risiko von Fehleinschätzung steigt mit dem Grad der Komplexität der Technik und Nutzungsarten</li> <li>- die Eingabe der Gebäudehülle ist eindeutig u. fehlerunanfällig, die Nutzungsszenarien und die Eingabe der Haustechnik beeinflussen die Ergebnisse stark</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Referenz-Raum-Methode ermöglicht tiefgreifende Berechnungen über den Gebäude- und Anlagenbestand</li> <li>- die Energiemonitoring Software EnMOLMU unterstützt das Gebäudemangement</li> </ul>	<p>Die Simulation von Gebäuden und Quartieren erfordert derzeit noch den Einsatz mehrerer Softwaretools mit erheblichem Eingabeaufwand. Hier wäre ein einheitlicher Datenfluss wünschenswert. Im Projekt wurde die in der Verbindung DesignBuilder - EnergyPlus - TRNSYS-TUD - STEFaN umgesetzt, wobei jeweils Konvertierungssoftware programmiert werden musste.</p>	<p>Der Export von IFC-Dateien (BIM-Austauschformat) aus Revit ist nicht immer problemlos. Ein zusätzliches Python-Skript musste geschrieben werden, um die Informationen in die IFC-Datei nachträglich hinzuzufügen.</p>
<p>Lessons Learned</p>						

### 3.2 Campusgrößen

Die zwölf Projekte beinhalten eine sehr unterschiedlich große Anzahl Gebäude von 14 Gebäuden (Forschungscampus Renningen) bis zu 347 Gebäuden (Campus Jülich). Der Mittelwert der Anzahl der Gebäude beträgt 125 Gebäude. Bild 44 zeigt die Übersicht über die Anzahl der Gebäude in den jeweiligen Hochschul- oder Forschungscampus-Standorten.

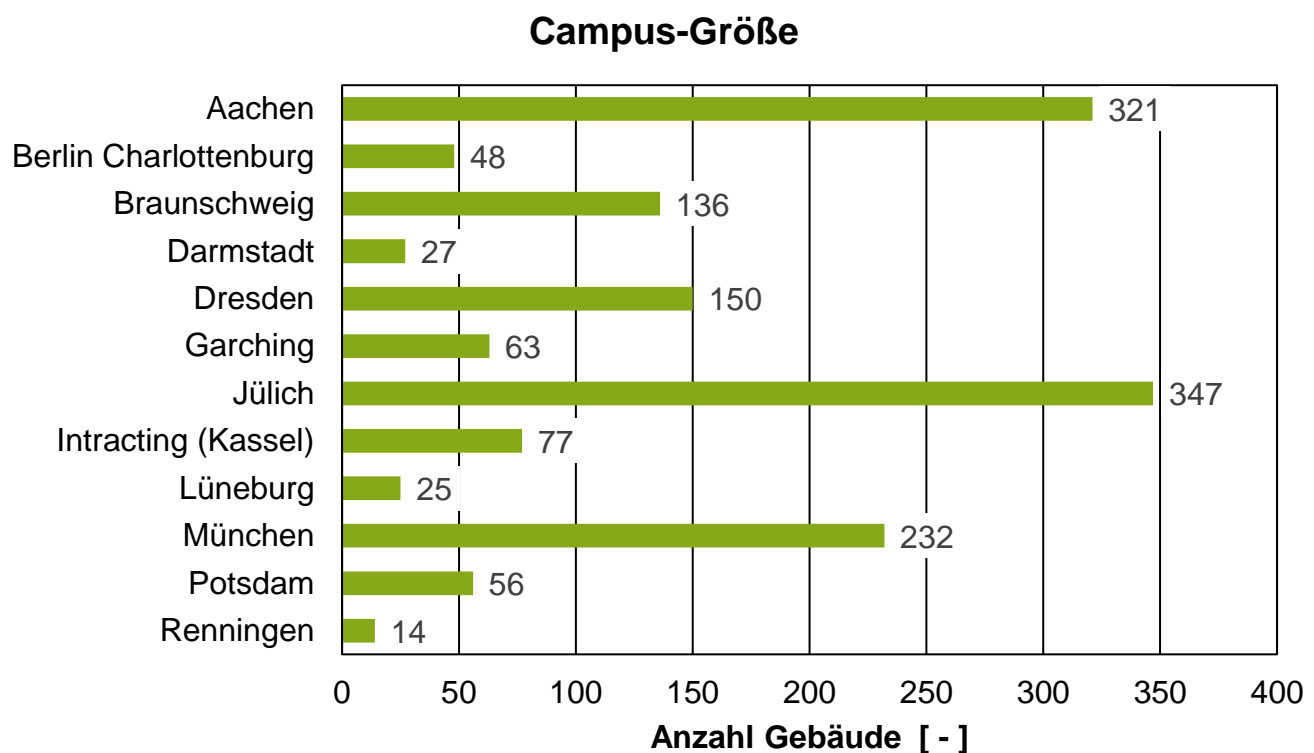


Bild 44: Anzahl der Gebäude in den 12 Campus-Standorten der beschriebenen Vorhaben.

Die in den Projekten berücksichtigten Nettogrundflächen reichen von 45.225 m<sup>2</sup> (Wissenschaftspark Telegrafenberg Potsdam, vorher) bis zu 773.547 m<sup>2</sup> (Campus Information Modeling, München). Der Mittelwert der Nettogrundfläche der zwölf Projekte vor Projektbeginn beträgt 344.522 m<sup>2</sup> und nach Projektende 359.178 m<sup>2</sup>, da einige Projekte Neubauten beinhalten. Bild 45 enthält den Vergleich der Nettogrundflächen der Campusprojekte vor und nach der Projektphase.



## Campus-Größe

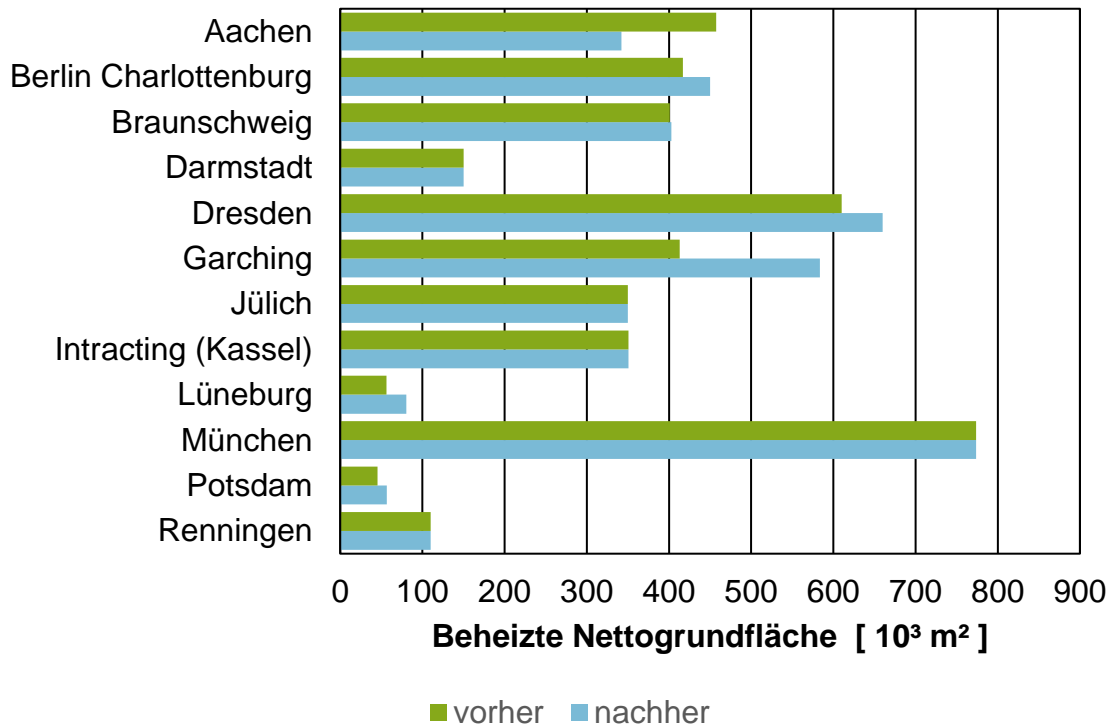


Bild 45: Beheizte Nettogrundfläche in den 12 Campus-Projekten.

### 3.3 Hauptnutzungen

Die Hauptnutzungen der ausgewerteten Campus-Projekte sind Institutsgebäude, gefolgt von Forschungsgebäuden, Verwaltungsgebäuden und Unterrichtsgebäuden sowie sonstigen Gebäuden. Technikgebäude, Lager/Werkstätten, Wohngebäude und Sportgebäude sind nur in geringerem Maße vertreten. Einen höheren Anteil an Forschungsgebäuden weisen der Campus Lichtwiese in Darmstadt und der Forschungscampus in Renningen auf. Die Campusse in Aachen, München, Braunschweig, Dresden und Potsdam beinhalten eine sehr breite Palette von Hauptnutzungen.

### 3.4 Baualter

Die beinhalteten Gebäude wurden in fast allen Campus-Projekten zu sehr unterschiedlichen Zeiten gebaut, insgesamt von 1832 bis 2019. Die Bauperioden umfassen in neun Projekten mindestens 80 Jahre. Die Ausnahmen sind Campus Lichtwiese Darmstadt mit Bauperioden zwischen 1967 und 2019, Campus Garching mit Bauperioden zwischen 1957 und 2009 und Forschungscampus Renningen mit Bauperioden zwischen 2012 und 2015.

Sieben Vorhaben beinhalten Neubauprojekte, davon haben zwei Projekte einen eigenen Fokus auf ein hocheffizientes Neubauprojekt, Campus Lüneburg und Campus Potsdam Telegrafenberg.

### 3.5 Status der Bestandsgebäude vor dem Projekt

Der Zustand der Bestandsgebäude ist zumeist typisch für Gebäude aus dem entsprechenden Baualter. In vielen Projekten wurden jedoch zumindest teilweise Sanierungen vor dem eigentlichen Projektstart durchgeführt, diese umfassten aber nicht die Gesamtheit der Gebäude und manchmal auch nur einzelne Bauteile. In anderen Vorhaben, wie z. B. dem Campus der TU Braunschweig, wird explizit von altersbedingten Mängeln und Schäden oder von ungedämmten Wänden und Einfachverglasung (Campus Lichtwiese Darmstadt) bzw. Sanierungsstau (Campus Dresden) berichtet.

### 3.6 Energieversorgung vor dem Projekt

In 11 von 12 Vorhaben liegt als Wärmeversorgung im Ausgangszustand ein campuszentrales System vor, entweder Fernwärme (über einen externen Versorger, acht Vorhaben) oder Nahwärme (erzeugt am Standort, fünf Vorhaben). Zwei Vorhaben werden dabei sowohl mit Fernwärme als auch Nachwärme versorgt. Die Nahwärmesysteme beinhalten in zwei Fällen Kraft-Wärme-Kopplung und in jeweils einem Fall eine Erdgasturbine mit Dampfeindüsung, die Abwärmenutzung eines Rechenzentrums oder Wärmepumpen. Damit erfolgt die Nahwärmeezeugung in drei von fünf Fällen in Kombination mit einer campuszentralen Stromerzeugung. Erdgas(-Brennwert)kessel ergänzen zumeist die anderen Erzeuger.

In sieben der Campusprojekte wird auch Kälte bereits vor dem geförderten Projekt campus-zentral erzeugt und in einem lokalen Kältenetz verteilt. Die Erzeugungsarten sind unterschiedlich und beinhalten oft Kombinationen aus Absorptionskältemaschinen und Kompressionskältemaschinen.

Strom wird in allen Vorhaben aus dem allgemeinen Stromnetz bezogen. In vier Fällen wird dies durch die Stromerzeugung aus den eigenen Blockheizkraftwerken, sowie in einem Fall über die Erdgasturbine unterstützt. In zwei Projekten (Campus Dresden und Campus Kassel) wird bereits vor dem Projekt selbstgenerierter PV-Strom über campusinterne Mittelspannungsringe verteilt.

Eine gebäudeweise (dezentrale) Wärmeversorgung findet in sechs Vorhaben vor dem Projektstart statt. Lediglich der Campus Potsdam wird ausschließlich dezentral versorgt, die anderen vier Vorhaben nutzen die dezentrale Versorgung für einzelne (entferntere) Gebäude als Ergänzung zur campuszentralen Wärmeversorgung. Die dezentralen Erzeuger sind meist Erdgaskessel, teilweise Wärmepumpen, BHKW oder Ölkessel. Drei Vorhaben beinhalten gebäudeweise Kälteversorgungen (Campus Aachen, Campus Berlin Charlottenburg und Campus Dresden). Im Fall von Berlin Charlottenburg sind es insgesamt 160 dezentrale Kälteerzeuger.

Die Energiekosten an den Standorten weisen, in Verbindung mit der jeweiligen Energieversorgung vor dem Projekt, große Unterschiede auf. Bei der Wärmeversorgung beträgt der Mittelwert der spezifischen Energiekosten aus fünf Projekten mit entsprechenden Angaben 8,7 ct./kWh. Die höchsten spezifischen Wärmekosten wies dabei der Campus Lüneburg mit 13,4 ct./kWh auf, die niedrigsten der Campus Aachen mit 5,8 ct./kWh. Bei den Stromkosten beträgt der Mittelwert aus ebenfalls vier Projekten 14,9 ct./kWh. Die höchsten spezifischen Stromkosten wurden für den Campus Kassel mit 17,9 ct./kWh (Ökostrom) bezahlt, die niedrigsten für den Campus Aachen mit 12,6 ct./kWh. Vereinfacht wurden hier die spezifischen Kosten aus den jeweiligen Gesamtkosten pro Jahr und dem zugehörigen Energieverbrauch pro Jahr berechnet.

### 3.7 Projektlaufzeiten

Sechs der 12 Vorhaben weisen bereits zwei Projektphasen auf. Dabei wird meist zwischen Energiekonzept/Umsetzung (Phase 1) und Messphase (Phase 2) unterschieden oder in die Entwicklung eines Simulationstools (Phase 1) und die spätere Anwendung auf einen konkreten Hochschulcampus (Phase 2). Die Länge der Projektlaufzeiten reicht von 30 Monaten bis zu 119 Monaten. Durchschnittlich beträgt eine Projektlaufzeit 70 Monate.

### 3.8 Projektarten

Bei der Projektart wird in acht unterschiedliche Aufgaben unterschieden, die in den Projekten abgedeckt sein können. Dabei konnten die Autoren der Projektbeschreibungen jeweils zwischen beinhalteten Aufgaben (1 Punkt) und Fokusaufgabe (2 Punkte) wählen. Bild 46 veranschaulicht, welche Aufgaben in vielen bzw. weniger Projekten bearbeitet wurden. Es zeigt sich, dass die Entwicklung eines Masterplans bzw. Energiekonzepts für den Campus von 11 Projekten durchgeführt wurde oder wird, und dabei viermal eine Fokusaufgabe war oder ist. Eine Toolentwicklung wurde/wird von 9 Projekten gemacht und war/ist dabei sechsmal ein Projektfokus. Am drittmeisten wird eine Betriebsoptimierung durchgeführt (8 Projekte/dreimal Fokusaufgabe), gefolgt von der energetischen Gebäudesanierung (7 Projekte/sechsmal Fokusaufgabe). Die Nahwärmenetzplanung (5/7), ein hocheffizienter Neubau (4/5), eine Finanzierungsmethode (4/5) und die Sensibilisierung der Nutzer (3/4) waren/sind weniger oft Projektinhalt.

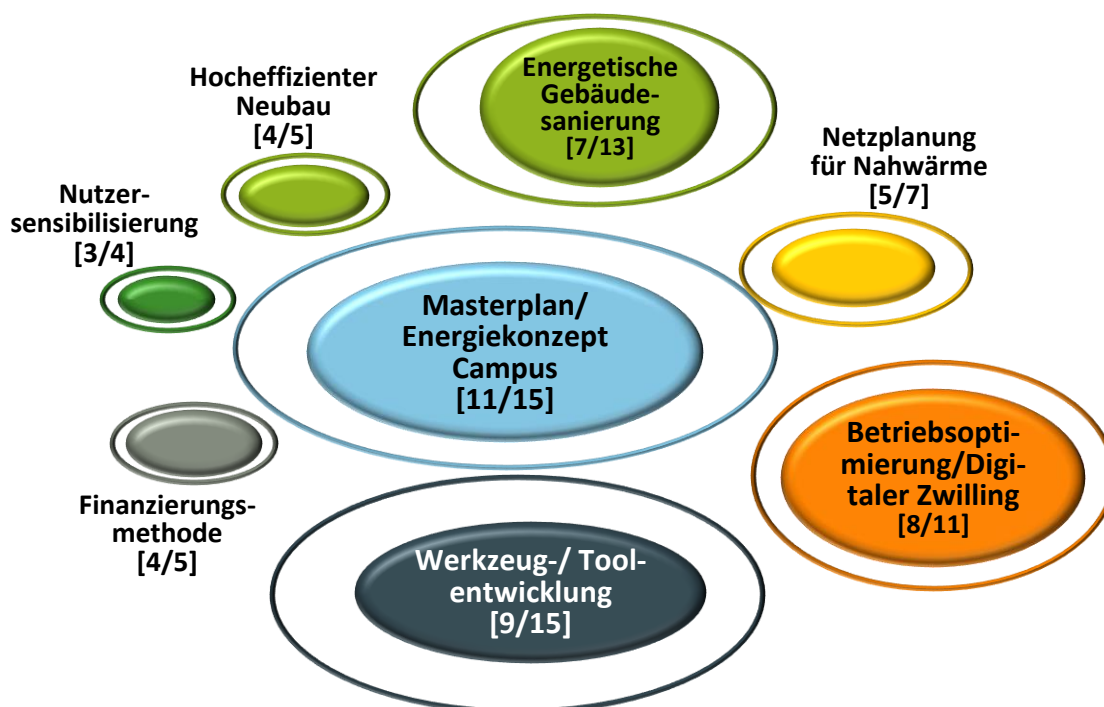


Bild 46: Beinhaltete Aufgaben in den 12 Campus-Projekten. Das gefüllte innere Oval zeigt die Anzahl der Projekte, die die Aufgaben bearbeiten (erste Zahl in der eckigen Klammer), das äußere leere Oval verdeutlicht die Summe der Punkte, die eine Aufgabe von den jeweiligen Projektleitern erhielt (zweite Zahl in der eckigen Klammer, dabei 2 Punkte = Fokusaufgabe, 1 Punkt = Aufgabe beinhaltet).

### 3.9 Projektphasen

Die Projektleiter wurden gebeten, die beinhalteten Projektphasen aufgeteilt in Planung, Simulation, Umsetzung und Messung einzutragen bzw. mit einem Punkt zu bewerten, wenn sie Teil des Projekts sind und mit zwei Punkten, wenn sie im Projektfokus stehen. Bild 47 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Projekte, die die vier Projektphasen beinhalten, sowie ob die Phasen einem Projektfokus entsprechen. Es zeigt sich, dass alle 12 Projekte eine Simulationsphase beinhalten, 10 Projekte eine Planungsphase, acht Projekte eine Messphase und 7 Projekte eine Umsetzungsphase. Die Simulationsphase wird auch als Fokus in 10 von 12 Projekten, die Planung in 7 Projekten und die Umsetzung in 2 Projekten benannt. Letzteres ist etwas enttäuschend, da eigentlich die Umsetzung (sofern in den Projekten enthalten) immer ein Fokus sein sollte. Nur durch die Umsetzung der Planung und Simulation können reale Energieeinsparungen erzielt werden. Die Bewertungen können jedoch auch in Verbindung mit den reinen Forschungsprojekten gesehen werden, in denen die Umsetzung, wie auch die Kosten

für die Umsetzungen zeigen, meist eher untergeordnet vorgesehen sind bzw. aus anderen Quellen finanziert werden. Die Messungen werden von keinem Projekt als Fokusphase bezeichnet.

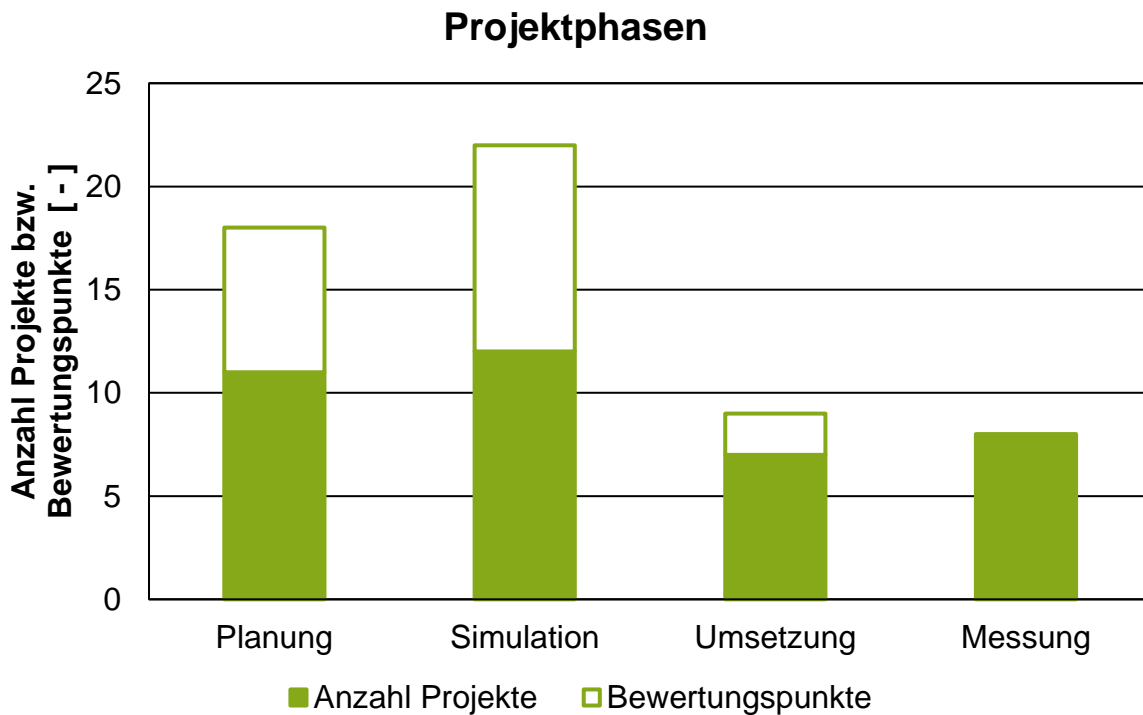


Bild 47: Beinhaltete Projektphasen in den 12 Campus-Projekten. Der untere gefüllte Bereich zeigt die Anzahl der Projekte, die die jeweilige Projektphase beinhalten, der gesamte umrandete Bereich verdeutlicht die Summe der Punkte, die eine Phase von den jeweiligen Projektleitern erhielt (dabei 2 Punkte = Fokusphase, 1 Punkt = Phase beinhaltet).

### 3.10 Energetische Projektziele

Die 12 Campus-Vorhaben weisen zusätzlich zu den konkreten Forschungszielen unterschiedliche übergeordnete energetische Ziele in Bezug auf die Entwicklung des jeweiligen Standorts auf. Die Zusammenfassung der von den Projektverantwortlichen angegebenen Projektziele ist in Tabelle 10 enthalten. Dabei haben die Projektleiter von vier Projekten primärenergetische Ziele eingetragen. Diese sind im Einzelnen: Reduzierung des nutzflächenbezogenen Primärenergieverbrauchs um 50 % bis 2025 (Campus Aachen), mittelfristige Reduzierung des Primärenergiebedarfs um 40 % (Campus Braunschweig), 50 % Primärenergieeinsparung (Campus Lüneburg), Neubau: EnEV minus 50 % (Campus Potsdam)). Drei Vorhaben haben sich CO<sub>2</sub>-bezogene bzw. Klimaschutz-

bezogene Ziele gesteckt: Demonstration der Klimaschutzziele der Bundesregierung für 2050 bereits 2035 (Campus Berlin Charlottenburg), Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % gegenüber 1990 bis 2050 (Campus Darmstadt) und, als eine von mehreren durchgerechneten Zielvarianten im Projekt, 55 % CO<sub>2</sub>-Einsparung gegenüber 1990 bis 2030 (Campus Garching). Weitere angegebene quantitative Ziele sind: langfristige Versorgung ausschließlich mit regenerativen Energien (Campus Braunschweig), klimaneutrale Energieversorgung, 30 % Endenergieeinsparung, Neubau mit weniger als 100 kWh/m<sup>2</sup>a Endenergie (alles Campus Lüneburg), Senkung des Heizenergiebedarfs um 67,5 % (Campus München).

Vier Vorhaben weisen gemäß den Projektbeschreibungen qualitative Ziele aus: schrittweise Reduktion des Energieverbrauchs und der klimaschädlichen Emissionen (Campus Dresden), Neuausrichtung der Energieversorgung (Campus Jülich), Erschließung von wirtschaftlichen Energiesparmaßnahmen zur Entlastung von Hochschulhaushalten (Intracting – Kassel), Betriebsoptimierung und Steigerung der Netzdienlichkeit (Forschungscampus Renningen).

Alle Projekte haben das Ziel, die deutschen Klimaschutzziele standortspezifisch frühzeitig zu erreichen und dazu Methoden und Lösungswege zu erarbeiten. Fast alle Campusvorhaben, die einen gebäudeübergreifenden Entwicklungsansatz im Fokus thematisierten, streben übergeordnet die Entwicklung eines ganzheitlichen, energetischen Masterplans für die zukünftigen Energiesysteme an. Darüber hinaus setzten die einzelnen Hochschulen verschiedene Forschungsschwerpunkte zu standorttypischen Anforderungen. Beispielsweise wurden an den Hochschulen in München und Darmstadt Konzepte zur Energiebereitstellung, Energieversorgungsnetze und Speicherung mit Hilfe von Simulationsmodellen untersucht, um die effizienteste, flexibelste und wirtschaftlichste Versorgungsvariante zu identifizieren. Für den Wärme- und Kältebedarf wurden Modelle zu Netz- und Speicherverlusten entwickelt. An zahlreichen Standorten (München, Potsdam, Darmstadt, Jülich) wurden innovative Wege zu einer effizienten Abwärmenutzung aus Rechenzentralen beschritten. Häufig ließen sich die Ergebnisse in Handlungsempfehlungen für andere Hochschulen zusammenfassen, die sich perspektivisch auch auf städtische Quartiere und ähnliche Gebäudeensemble übertragen lassen.

In fast allen Campusprojekten gab es bereits während der Projektphase eine intensive Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Lehrstühlen, der Verwaltung, dem Facility-Management, dem Dekan und teilweise mit den Studierenden sowie mit den örtlichen Energieversorgern. Dies war in der Regel mit einem sehr hohen Koordinations- und Zeitaufwand verbunden, jedoch stellt dieser Austausch und die Unterstützung auf höchster Verwaltungsebene eine essentielle Voraussetzung dar, damit die erarbeiteten Maßnahmen und Strategien eine ernsthafte Chance für eine Umsetzungsphase haben. Unter Lessons Learned wurde angegeben, dass die Definition konkreter Zielwerte im Forschungsprojekt als Durchsetzungsinstrument bei Entscheidungen hilfreich ist (Campus Lüneburg). Ohne diesen Rückhalt besteht die Gefahr, dass aus Kostengründen die eigentlich vorgesehenen energetischen Maßnahmen im Projektverlauf gekürzt werden.

Mehrere Projekte verfolgen den Ansatz komplexe Optimierungsrechnungen mit diversen Szenarien durchzuführen, um daraus Informationen für die Entscheidungsträger zusammenzustellen und darauf basierend das konkrete energetische Konzept des Standorts festzulegen. Hier wird es interessant sein zu sehen, in welcher Höhe die schließlich umgesetzten Konzepte Energieeinsparungen bzw. Einsparungen an klimaschädlichen Emissionen aufweisen werden und ob sie über die rein wirtschaftlichen Maßnahmen hinausgehen können, um weitere Schritte für den Klimaschutz zu gehen.

### 3.11 Projektinhalte

Die Projektinhalte der 12 Vorhaben sind vielseitig, wie Tabelle 10 zeigt. Natürlich beinhalten sie die in Kapitel 3.8 aufgeschlüsselten Aufgaben (bzw. Projektarten)

- Masterplan/Energiekonzept Campus,
- Netzplanung für zentrale Nahwärme,
- Hocheffizienter Neubau,
- Energetische Gebäudesanierung,
- Betriebsoptimierung (Digitaler Zwilling),
- Werkzeug-/Toolentwicklung,
- Finanzierungsmethode,
- Nutzersensibilisierung.

Die jeweiligen Stichpunkte zum Projektinhalt geben jedoch noch detailliertere Information je Projekt wieder. Sie zeigen aber ebenfalls, dass die Projekte mehr als eine Aufgabe bearbeiten und dass die verschiedenen Inhalte miteinander vernetzt sind. Bild 48 zeigt eine Wordcloud aus den gesammelten Stichpunkten zu den Projektinhalten. Dominiert wird die Wordcloud u. a. von den Begriffen Entwicklung, Bewertung, Energien, Methoden, Optimierung, Monitoring, Nutzung, Unterstützung, Energieversorgung, energetisch und erneuerbar. Eine recht gute allgemeine Zusammenfassung aber keine wirklich überraschenden Begriffe.





Bild 49 zeigt, welcher Maßnahmenbereich an wie vielen Campusprojekten zum Einsatz gekommen ist. Dabei ist zu beachten, dass insgesamt vier Projekte (noch) keine Gebäude- und Energieversorgungsmaßnahmen angegeben haben. An jeweils vier Campus-Projekten wurden Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle durchgeführt und das Tageslicht optimiert bzw. die Beleuchtung ausgetauscht. An jeweils drei Vorhaben wurden Maßnahmen an der Heizungsanlage und der MSR-Technik bzw. an der Steuerung umgesetzt und Bauteilspeicher bzw. Phase Change Material (PCM) eingesetzt. Teile der Fenster wurden an zwei Projekten ausgewechselt, ebenso wie Maßnahmen an der Lüftung bzw. RLT-Anlage ausgeführt. An je nur einem Projekt wurden Maßnahmen an der Kühlung, zur Verbesserung der Luftdichtheit, am Sonnenschutz (Verschattung) und für eine höhere Flächeneffizienz durchgeführt.

### Gebäudemaßnahmen

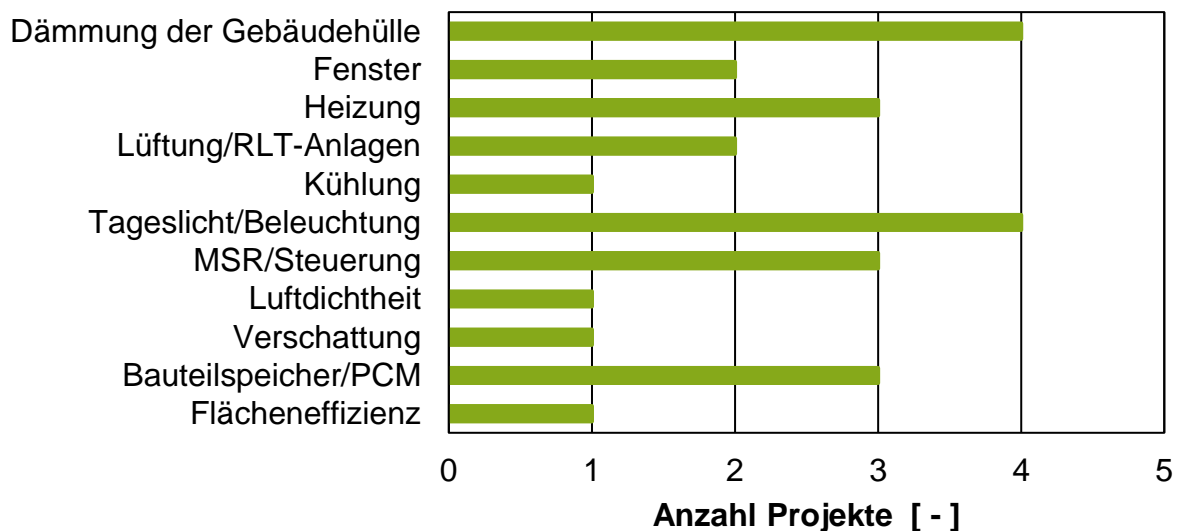


Bild 49: Übersicht über die eingesetzten Gebäudemaßnahmen an insgesamt 8 Campusvorhaben, aufgeteilt in 11 unterschiedliche Bereiche.

### 3.13 Maßnahmen an der Energieversorgung

Auch die Maßnahmen an der Energieversorgung wurden in verschiedene Bereiche eingeteilt und anschließend untersucht, welche Projekte entsprechende Maßnahmen umgesetzt haben. Die Maßnahmenbereiche sind

- Nahwärmeerzeugung
- Abwärme/erneuerbare Energien
- Biomethan
- Wärmenetz
- Kälteerzeugung
- Kältenetz

- Speicher
- Steuerung
- Photovoltaik
- Contracting

Hier beträgt die mögliche Maximalzahl der Umsetzung in Projekten sieben. Vier Projekte haben Photovoltaik (meist auf den Gebäudedächern) installiert. Jeweils drei Projekte führten/führen Maßnahmen an der Nahwärmeerzeugung und am Kältenetz durch oder nutzen Abwärme bzw. erneuerbare Energien. Maßnahmen am Wärmenetz sowie an der zentralen Steuerung wurden/werden in zwei Vorhaben eingesetzt. Biomethan, Änderungen an der Kälteerzeugung, ein zentraler Speicher und Energieliefercontracting werden jeweils nur in einem Projekt umgesetzt.

### Energieversorgungsmaßnahmen

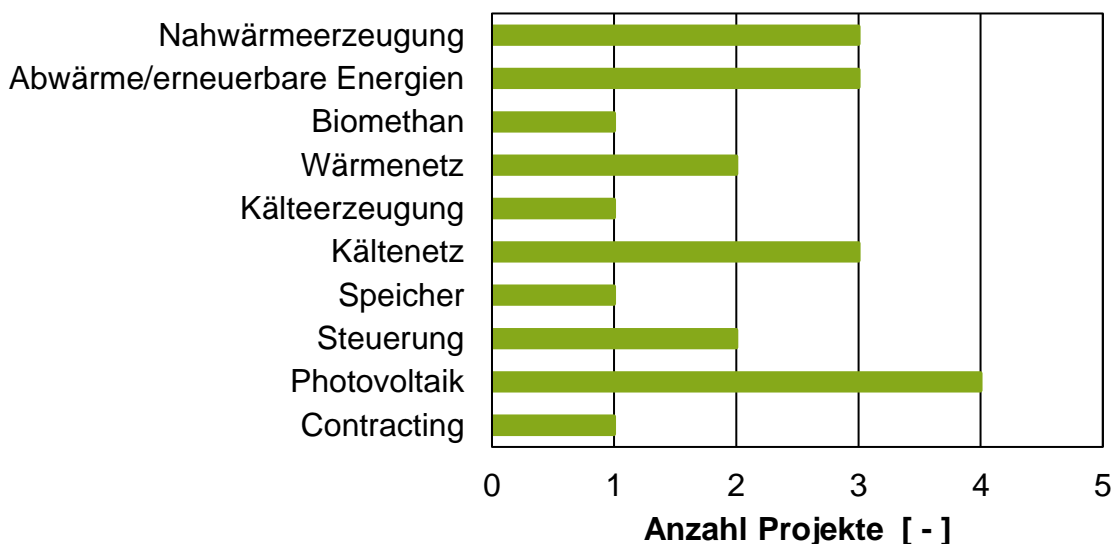


Bild 50: Übersicht über die eingesetzten Energieversorgungsmaßnahmen an insgesamt 7 Campusvorhaben, aufgeteilt in 10 unterschiedliche Bereiche.

Auch die Energiekosten an den Standorten nach dem Projekt weisen Unterschiede auf. Bei der Wärmeversorgung beträgt der Mittelwert der spezifischen Energiekosten aus drei Projekten mit entsprechenden Angaben 8,3 ct./kWh. Die höchsten spezifischen Wärmekosten wies dabei der Campus Lüneburg mit 9,4 ct./kWh auf, die niedrigsten der Campus Aachen mit 7,4 ct./kWh. Bei den Stromkosten beträgt der Mittelwert aus ebenfalls drei Projekten 16,7 ct./kWh. Die höchsten spezifischen Stromkosten wurden für den Campus Braunschweig mit 23,0 ct./kWh bezahlt, die niedrigsten für den Campus Aachen mit 10,1 ct./kWh. Vereinfacht wurden auch hier die spezifischen Kosten aus den jeweiligen Gesamtkosten pro Jahr und dem zugehörigen Energieverbrauch pro Jahr berechnet.

### 3.14 Eingesetzte Technologien

Die Projektleiter wurden gebeten, in einer innerhalb der Begleitforschung EnEff:Stadt [104] erarbeitete Technologiematrix die in ihrem Projekt eingesetzten (teilweise innovativen) Technologien zu markieren und ggf. um weitere angewendete innovative Technologien zu ergänzen. Das Grundgerüst bilden die Technologien, die in den damals 25 analysierten Quartiersprojekten aus Zwischen- und Abschlussberichten identifiziert wurden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 11 bis Tabelle 14 gezeigt.

Den Beginn macht Tabelle 11 mit der Übersicht über die energetischen Gebäudeniveaus. In sechs von insgesamt 10 Projekten mit Einträgen stehen die Bestandsgebäude teilweise unter Denkmalschutz oder unter Bestandsschutz. Ebenfalls in sechs (aber zum Teil anderen) Projekten wurden teilweise bereits Sanierungen vor dem Projekt durchgeführt. Drei Vorhaben führten innerhalb der Projektlaufzeit keine Sanierung durch, die anderen sieben mit detaillierten Eintragungen beinhalteten Sanierungen auf EnEV-Niveau. In sieben Vorhaben wurden Neubauten auf EnEV-Niveau gebaut, nur der Neubau im Projekt Campus Leuphana Lüneburg wurde als Plusenergiegebäude geplant und umgesetzt.

In Tabelle 12 werden die eingesetzten baulichen Technologien zusammengestellt. Neben Technologien, die heute Standard sind wie Wärmedämmverbundsysteme und vorgehängte Fassade, Kellerdeckendämmung und Dämmung der obersten Geschossdecke sowie sommerlicher Wärmeschutz, werden oft 3-fach-Verglasungen, aber vereinzelt auch Vakuumverglasungen, Vakuumdämmung, Phase Change Material (PCM), Klimaputz und Kapillarrohrmatten eingesetzt.

Tabelle 11: Energetische Gebäudeniveaus in den 12 Campus-Vorhaben.

Eingesetzte Technologien bzw. energetische Gebäudeniveaus		Campus Aachen	Campus Berlin Charlottenburg	Campus Braunschweig	Campus Darmstadt	Campus Dresden	Campus Garching	Campus Jülich *	Campus Lüneburg	Campus Potsdam	Forschungscampus Renningen	Intracting (Kassel)	HoEff-CIM (München)
Bestandsgebäude	Denkmal-/Bestandsschutz Bereits (teilweise) saniert keine Sanierung im Projekt	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	Klima-hülle	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Plusenergie	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus	KfW-Effizienzhaus Passivhaus Nullenergiehaus
Neubau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau	EnEV KfW Passivhaus Plusenergie Sonstiges Niveau

\* Bei den hier angezeigten Maßnahmen handelt es sich um Umsetzungen, welche numerisch (Simulation, Optimierung, o.ä.) näher untersucht wurden. In Living Roadmap selbst wurden keine Umsetzungen durchgeführt, der Campus entwickelt sich jedoch parallel, so dass das Projekt mit Planungshilfsmitteln diese Entwicklung begleitet hat.

Tabelle 12: Eingesetzte bauliche Technologien zur Energieeinsparung in den 12 Campus-Vorhaben.

Eingesetzte Technologien		Campus Aachen	Campus Berlin Charlottenburg	Campus Braunschweig	Campus Darmstadt	Campus Dresden	Campus Garching	Campus Jülich *	Campus Lüneburg	Campus Potsdam	Forschungscampus Renningen	Intracting (Kassel)	HoEff-CIM (München)
Fenster	Vakuumverglasung												Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.
	3-fach-Verglasung												
Außenwand	Schaltbare Verglasung												Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.
	Sonstige Maßnahmen												
	Vakuumdämmung												
	Aerogel												
	Resol-Hartschaum												
	Porenlüftungsfassade												
	PCM												
	Klimaputz												
	Ziegel mit Hohlraumfüllung												
	Kapillaraktive Kalziumsilikatplatte												
Dach/oberste Geschossdecke	Sonstige Maßnahmen												Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.
	Dämmung												
Bodenplatte/Kellerdecke	Dämmung oberseitig												Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.
	Dämmung kellerseitig												
	Sonstige Maßnahmen												
bauliche Energieeinsparung													

Eingesetzte Technologien	Reduktion/Vermeiden von Wärmebrücken			Sonstige Maßnahmen	bauliche Energieeinsparung
	Sonstige Maßnahmen	Sommerlicher Wärmeschutz	Luftdichtheit		
HoEff-CIM (München)					
Intracting (Kassel)					
Forschungscampus Renningen					
Campus Potsdam					
Campus Lüneburg					
Campus Jülich *					
Campus Garching				(Nacht- u. Wochenend- absenkung)	
Campus Dresden				außenliegende Verschattungen	
Campus Darmstadt					
Campus Braunschweig					
Campus Berlin Charlottenburg					
Campus Aachen					

\* Bei den hier angezeigten Maßnahmen handelt es sich um Umsetzungen, welche numerisch (Simulation, Optimierung, o.ä.) näher untersucht wurden. In Living Roadmap selbst wurden keine Umsetzungen durchgeführt, der Campus entwickelt sich jedoch parallel, so dass das Projekt mit Planungshilfsmitteln diese Entwicklung begleitet hat.

Tabelle 13: Eingesetzte Technologien im Bereich quartierszentrale Energieversorgung in den 12 Campus-Vorhaben.

Eingesetzte Technologien		Campus																
Ver-tei-lung	Über-gabe	Dämmung des Net-zes	Sonstige Maßnah-men	Verbesserte Überga-bestation	Rücklaufanzapfung	Hydraul. Trennung	Sonstige Maßnah-men	Solarthermie	PVT	BHKW	KWK	Spitzenlastkessel	Grundlastkessel	Einspeisung ins Fernwärmenetz	Wärmepumpe	Wärmerückgew.	Sonstige Maßnah-men	
		Fernwärme							Nahwärme									
zentrale netzgebundene Versorgung																		
anlagentechnische Effizienzmaßnahmen																		
HoEff-CIM (München)		Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.																
Intracting (Kassel)		Das Projekt beinhaltet im geförderten Forschungsvorhaben keine Technologieanwendung. Deshalb wurden diese detaillierten Informationen nicht eingetragen.																
Forschungs-campus Renningen																		
Campus Potsdam																		
Campus Lüneburg																		Kaska-die-rung
Campus Jülich *							Ver-bess. Netz-betrieb durch Simu-lation											
Campus Garching																		Hoch-temp.-Wärme-pumpe
Campus Dresden																		
Campus Darmstadt																		
Campus Braunschweig																		
Campus Berlin Charlottenburg							Ab-wär-me-nut-zung											HTC-Reak-tor/BHKW
Campus Aachen																		





Eingesetzte Technologien		Nahkälte		Strom		zentrale netzgebundene Versorgung		anlagentechnische Effizienzmaßnahmen							
		Wärmepumpe	Wasser	Luft	Sonstige Maßnahmen	Strombezug netzseitig	Stromerzeugnis Eigennutzung	Stromerzeugnis Einspeisung	Smart Grid	PV-Anlage	Windkraft	Wasserkraft	Speichertechnologie	Gleichstrom-Netz	Sonstige Maßnahmen
HoEff-CIM (München)	Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.														
Intracting (Kassel)	Das Projekt beinhaltet im geförderten Forschungsvorhaben keine Technologieanwendung. Deshalb wurden diese detaillierten Informationen nicht eingetragen.														
Forschungscampus Renningen															
Campus Potsdam															
Campus Lüneburg					Kompressionskältemaschine										
Campus Jülich *															
Campus Garching					KWKK, Absorptionskälte										
Campus Dresden															
Campus Darmstadt															
Campus Braunschweig															
Campus Berlin Charlottenburg					Freie Kühlung										
Campus Aachen															

\* Bei den hier angezeigten Maßnahmen handelt es sich um Umsetzungen, welche numerisch (Simulation, Optimierung, o.ä.) näher untersucht wurden. In Living Roadmap selbst wurden keine Umsetzungen durchgeführt, der Campus entwickelt sich jedoch parallel, so dass das Projekt mit Planungshilfsmitteln diese Entwicklung begleitet hat.



HoEff-CIM (München)	Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.		
Intracting (Kassel)	Das Projekt beinhaltet im geförderten Forschungsvorhaben keine Technologieanwendung. Deshalb wurden diese detaillierten Informationen nicht eingetragen		
Forschungscampus Renningen		Funkthermostattventile	
Campus Potsdam			
Campus Lüneburg		Fußbodenheizung	
Campus Jülich *			
Campus Garching			
Campus Dresden			Freie Kühlung
Campus Darmstadt		Heizsegel, eingeputzte Decken-Heizmatten, differenzdruckregelte Heizkörperventile	
Campus Braunschweig			
Campus Berlin Charlottenburg			adiabatische Kühlung
Campus Aachen		Nachtabsenkung	
Eingesetzte Technologien	Über-gabe	Flächenheizkörper Niedertemp.-Heizkörper Sonstige Maßnahmen	
	Kühlung	Wärmepumpe Wasser Sonstige Maßnahmen	
	dezentrale Versorgung (gebäudeweise)		
	anlagentechnische Effizienzmaßnahmen		

HoEff-CIM (München)	Das Ausfüllen der Technologiematrix ist für die HoEff-Projekte nicht sinnvoll. Die betrachteten 275 Gebäude sind bautechnisch, wie auch in der Nutzung, äußerst heterogen.			
Intracting (Kassel)	Das Projekt beinhaltet im geförderten Forschungsvorhaben keine Technologieanwendung. Deshalb wurden diese detaillierten Informationen nicht eingetragen			
Forschungs-campus Renningen				Volumenstromregler und Kombisensoren: Temp., Feuchtigkeit, CO <sub>2</sub> , VOC
Campus Potsdam	tageslichtadaptive Regelung, LED mit anpassbarer Lichtfarbe			
Campus Lüneburg	Präsenz- und tageslichtabh. Regelung			
Campus Jülich *				
Campus Garching				
Campus Dresden				
Campus Darmstadt				
Campus Braunschweig				
Campus Berlin Charlottenburg				
Campus Aachen				
Eingesetzte Technologien	LED	Sonstige Maßnahmen	Wärmerückgewinnung Steuerung	Nachtlüftung
	Beleuchtung			
				Sonstige Maßnahmen
			Lüftungstechnik	
dezentrale Versorgung (gebäudeweise)				
anlagentechnische Effizienzmaßnahmen				

Eingesetzte Technologien		Strom	PV-Anlage	HoEff-CIM (München)	Intracting (Kassel)	Forschungs-campus Renningen	Campus Potsdam	Campus Lüneburg	Campus Jülich *	Campus Garching	Campus Dresden	Campus Darmstadt	Campus Braunschweig	Campus Berlin Charlottenburg	Campus Aachen	
																Gleichstrom-Netz
											PV-Anlagen mit campus-internem Verteilnetz zur kompletten Eigennutzung					

\* Bei den hier angezeigten Maßnahmen handelt es sich um Umsetzungen, welche numerisch (Simulation, Optimierung, o.ä.) näher untersucht wurden. In Living Roadmap selbst wurden keine Umsetzungen durchgeführt, der Campus entwickelt sich jedoch parallel, so dass das Projekt mit Planungshilfsmitteln diese Entwicklung begleitet hat.

Die angewandten Technologien im Bereich der quartierszentralen Energieversorgung sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Im Bereich der Fernwärmenutzung werden Rücklaufanzapfung, hydraulische Trennung, Abwärmenutzung und Verbesserung des Netzbetriebs durch Simulation angewendet.

Nahwärme wird vermehrt durch folgende Technologien erzeugt: BHKW (6 Vorhaben), Spitzenlastkessel (5), Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (4), Wärmepumpen (4), Solarthermie (3), Wärmerückgewinnung (3) und Grundlastkessel (3). Zusätzlich wurden noch folgende Technologien angegeben: Hochtemperatur-Wärmepumpen, Kaskadierung und ein HTC-Reaktor. Der HTC-Reaktor stellt Kohle aus Biomasse durch das Verfahren der Hydrothermalen Karbonisierung her. Die Kohle kann dann in einem BHKW verbrannt werden, um Strom und Wärme zu erzeugen. Zur Nahwärmespeicherung werden sowohl Pufferspeicher (4 Vorhaben), als auch das Netz selbst (3) genutzt. Ein Projekt plant einen Aquifer-Speicher. Die Nahwärmeverteilung wird durch Niedertemperaturnetze (5 Vorhaben), Senkung der Vorlauftemperatur (4), Rücklaufanzapfung (1), Verkürzung der Leitungsstrecke (1), Absenkung der Fernwärmerücklauftemperatur (1) und Netz-dämmung (1) optimiert. Im Bereich der Übergabe kommen verbesserte Übergabestationen und hydraulische Trennung (2 Vorhaben) zum Einsatz.

Nahkälte wird in zwei Vorhaben über Wärmepumpen erzeugt. Es handelt sich meist um ein wassergeführtes System (4 Vorhaben), ein Vorhaben nutzt zusätzlich auch ein luftgeführtes System. Als weitere Maßnahmen gaben die Projektleiter freie Kühlung, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung und Absorptionskälte- bzw. Kompressionskältemaschinen an. Der Strombezug erfolgt in acht der 10 Projekte mit detaillierten Angaben netzseitig. Sechs Projekte erzeugen Strom zur Eigennutzung, zwei davon auch zur Einspeisung ins Netz. PV-Anlagen zur Stromerzeugung werden in fünf Vorhaben eingesetzt, Windkraft soll zusätzlich in einem Vorhaben umgesetzt werden, in dem auch Stromspeicherung geplant ist. Ein Vorhaben untersucht ein Smart Grid.

Die eingesetzten dezentralen (gebäudeweisen) Energieversorgungstechnologien sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Obwohl acht der 10 Vorhaben mit detaillierten Angaben eine quartierszentrale Wärmeversorgung vorliegen haben, gibt es in insgesamt sechs Vorhaben dezentrale (gebäudeweise) Wärmeversorgungssysteme. Diese sind oftmals in abgelegenen Gebäuden zu finden. Die Erzeugereinheiten bestehen aus Wärmepumpen (3 Vorhaben), BHKW (1), Wärmerückgewinnung (4) und Solarthermie (1). In drei Vorhaben wird dezentral ins Nah- bzw. Fernwärmenetz eingespeist. Ein Projekt gibt zusätzlich an, Abwärme von Servern und einer Versuchsanlage zu nutzen und ein anderes Projekt setzt ein Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssystem in einem Gebäude ein. Gespeichert wird in Pufferspeichern (2 Vorhaben) und Akkumulatoren (1). Im Bereich der Verteilung werden Maßnahmen wie dezentrale Heizungspumpen (1 Vorhaben), optimierte Umwälzpumpen (1), Senkung der Vorlauftemperaturen (2) und druckunabhängige Steuerreguliertventile (1) eingesetzt. Die Wärmeübergabe erfolgt in drei Energiekonzepten über Flächenheizkörper. Sonstige Maßnahmen beinhalten Nachtabsenkung, Heizsegel, eingeputzte Decken-Heizmänder, differenzdruckgeregelt Heizekörperventile, Fußbodenheizung und Funkthermostatventile.

Im Bereich der dezentralen Kühlung werden vor allem wassergeführte Kühlsysteme eingesetzt (3 Vorhaben) und in jeweils einem Vorhaben eine (reversible) Wärmepumpe, adiabatische Kühlung sowie freie Kühlung. Die innovativen Maßnahmen bei der Beleuchtung beinhalten LEDs (4 Vorhaben), tageslichtabhängige Regelung (1), präsenz- und tageslichtabhängige Regelung (1) und LEDs mit anpassbarer Lichtfarbe. In sieben Vorhaben werden Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung eingesetzt, in fünf Vorhaben erhalten Lüftungsanlagen effizientere Steuerungen, in zwei Vorhaben wird Nachlüftung zur sommerlichen Kühlung genutzt. Ein Vorhaben erprobt Volumenstromregler und Kombisensoren (Temperatur, Feuchtigkeit, CO<sub>2</sub> und VOC).

Als Maßnahme im Bereich dezentraler (gebäudeweiser) Strom werden von sechs Vorhaben PV-Anlagen installiert. Ein Projekt plant dazu ein campus-internes Verteilnetz zur kompletten Eigennutzung des erzeugten PV-Stroms.

Bei den eingetragenen Technologienutzungen ist zu beachten, dass in einigen Vorhaben die Umsetzung bereits erfolgt ist, wohingegen andere Projekte noch planen bzw. das Energiekonzept aufwändig optimieren.

### 3.15 Energieverbräuche vor und nach dem Projekt

#### 3.15.1 Endenergie

Die von den Projektleitern eingetragenen auf die Nettogrundfläche bezogenen Endenergieverbräuche bzw. Endenergiebedarfe vor und nach dem Projekt werden in Tabelle 15 einander gegenübergestellt. Dabei werden jeweils der Mittelwert, der Maximalwert und der Minimalwert angegeben. Es stehen aus mehr Vorhaben Daten für den Zustand vor dem Projekt zur Verfügung als für den Zustand nach dem Projekt. Damit sind die Kennwerte vorher und nachher nicht direkt vergleichbar, wenn jeweils die gesamte Datenmenge ausgewertet wird. Deshalb wurden zusätzlich der Mittelwert, der Maximalwert und der Minimalwert aus den Projekten, für die Kennwerte nach dem Projekt zur Verfügung stehen, auch separat vor dem Projekt bestimmt. Es stehen jeweils mehr Kennwerte für die Heizenergie und den Strom zur Verfügung als für die Kälte. Für die Kälte wurde teilweise eingetragen „keine Angabe“ oder „nicht sinnvoll bestimmbar“.

Tabelle 15: Mittelwerte, Minimum und Maximum des auf die Nettogrundfläche bezogenen Endenergieverbrauchs bzw. -bedarfs vor und nach der Projektlaufzeit. Die Projektanzahlen in der Klammer geben jeweils an, wie viele Projekte zu den Bereichen Wärme, Kälte und Strom ausgewertet werden konnten.

	Endenergieverbrauch/-bedarf [kWh/m <sup>2</sup> a]								
	Vor dem Projekt (Daten aus 12/8/12 Projekten)			Vor dem Projekt (Daten aus 5/4/5 Projekten)			Nach dem Projekt (Daten aus 5/4/5 Projekten)		
	Wärme	Kälte	Strom	Wärme	Kälte	Strom	Wärme	Kälte	Strom
Arithmet. Mittelwert	138	33	140	137	25	123	99	10	73
Flächengew. Mittelwert	150	28	127	186	22	160	128	10	108
Minimum	84	0	41	84	0	88	73	0	29
Maximum	273	103	304	273	41	218	171	18	183

Bild 51 zeigt den graphischen Vergleich der Endenergiekennwerte vor und nach der Projektlaufzeit. Die ersten beiden Diagramme veranschaulichen, dass die reduzierte ausgewertete Projektzahl bereits zu geringeren arithmetischen Mittelwerten bei allen drei Endenergieanteilen führt. Der größere Sprung entsteht jedoch trotzdem durch die Projektumsetzung. Der arithmetische Mittelwert der Heizenergie (Wärme) reduziert sich von 137 kWh/m<sup>2</sup>a auf 99 kWh/m<sup>2</sup>a (28 %), der arithmetische Mittelwert der Kälteenergie verringert sich von 25 kWh/m<sup>2</sup>a auf 10 kWh/m<sup>2</sup>a (60 %) und der arithmetische Mittelwert des Stroms von 123 kWh/m<sup>2</sup>a auf 73 kWh/m<sup>2</sup>a (41 %).



## Endenergie

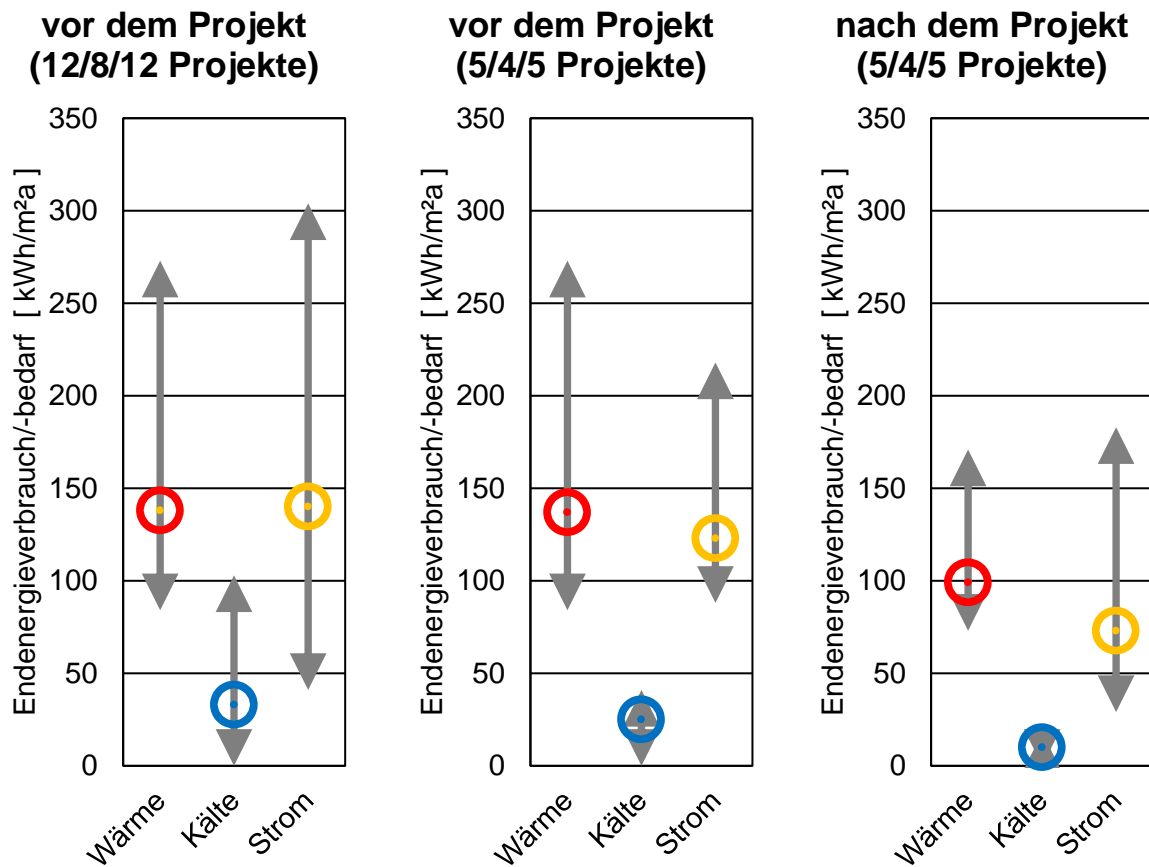


Bild 51: Auf die Nettogrundfläche bezogene arithmetische Mittelwerte (Kreise), Maximalwerte (obere Pfeile) und Minimalwerte (untere Pfeile) der Endenergie vor und nach der Projektlaufzeit. (Links: alle Vorhaben mit verfügbaren Daten; Mitte und rechts: nur die Vorhaben mit verfügbaren Daten vor und nach dem Projekt).

### 3.15.2 Primärenergie

Die entsprechende Auswertung der Primärenergieverbräuche bzw. berechneten -bedarfe ist in Tabelle 16 zusammengefasst. Für die Primärenergie wurden zusätzlich auch die jeweiligen Summen berechnet. Auch hier gilt, dass für eine unterschiedliche Anzahl von Projekten die jeweiligen Kennzahlen eingetragen wurden.

Tabelle 16: Mittelwerte, Minimum und Maximum des auf die Nettogrundfläche bezogenen Primärenergieverbrauchs bzw. -bedarfs vor und nach der Projektlaufzeit. Die Projektanzahlen in der Klammer geben jeweils an, wie viele Projekte zu den Bereichen Wärme, Kälte, Strom und Summe ausgewertet werden konnten.

	Primärenergieverbrauch/-bedarf [kWh/m <sup>2</sup> a]											
	Vor dem Projekt (Daten aus 10/5/10/8 Projekten)				Vor dem Projekt (Daten aus 5/4/5/4 Projekten)				Nach dem Projekt (Daten aus 5/4/5/4 Projekten)			
	Wärme	Kälte	Strom	Summe	Wärme	Kälte	Strom	Summe	Wärme	Kälte	Strom	Summe
Arithmet. Mittelwert	92	33	247	317	111	16	212	269	77	11	129	193
Flächengew. Mittelwert	106	37	282	425	121	14	165	300	156	23	310	489
Minimum	22	0	108	142	34	0	108	142	-19	0	53	35
Maximum	216	48	547	781	216	48	388	552	222	29	312	443

Bild 52 beinhaltet entsprechend den graphischen Vergleich der Primärenergiekennwerte vor und nach der Projektlaufzeit. Die ersten beiden Diagramme veranschaulichen, dass die reduzierte Projektzahl bereits zu geringeren Mittelwerten bei drei von vier Primärenergieanteilen führt.

Durch die eigentliche Projektumsetzung (Vergleich des mittleren Bildes zum rechten Bild) reduziert sich der arithmetische Mittelwert der Primärenergie für die Heizung (Wärme) von 111 kWh/m<sup>2</sup>a auf 77 kWh/m<sup>2</sup>a (31 %), der Mittelwert der Kälteprimärenergie verringert sich von 16 kWh/m<sup>2</sup>a auf 11 kWh/m<sup>2</sup>a (31 %) und der Mittelwert der Primärenergie für Strom von 212 kWh/m<sup>2</sup>a auf 129 kWh/m<sup>2</sup>a (39 %). Der Summenwert der Primärenergie reduziert sich von 269 kWh/m<sup>2</sup>a auf 193 kWh/m<sup>2</sup>a (28 %).

## Primärenergie

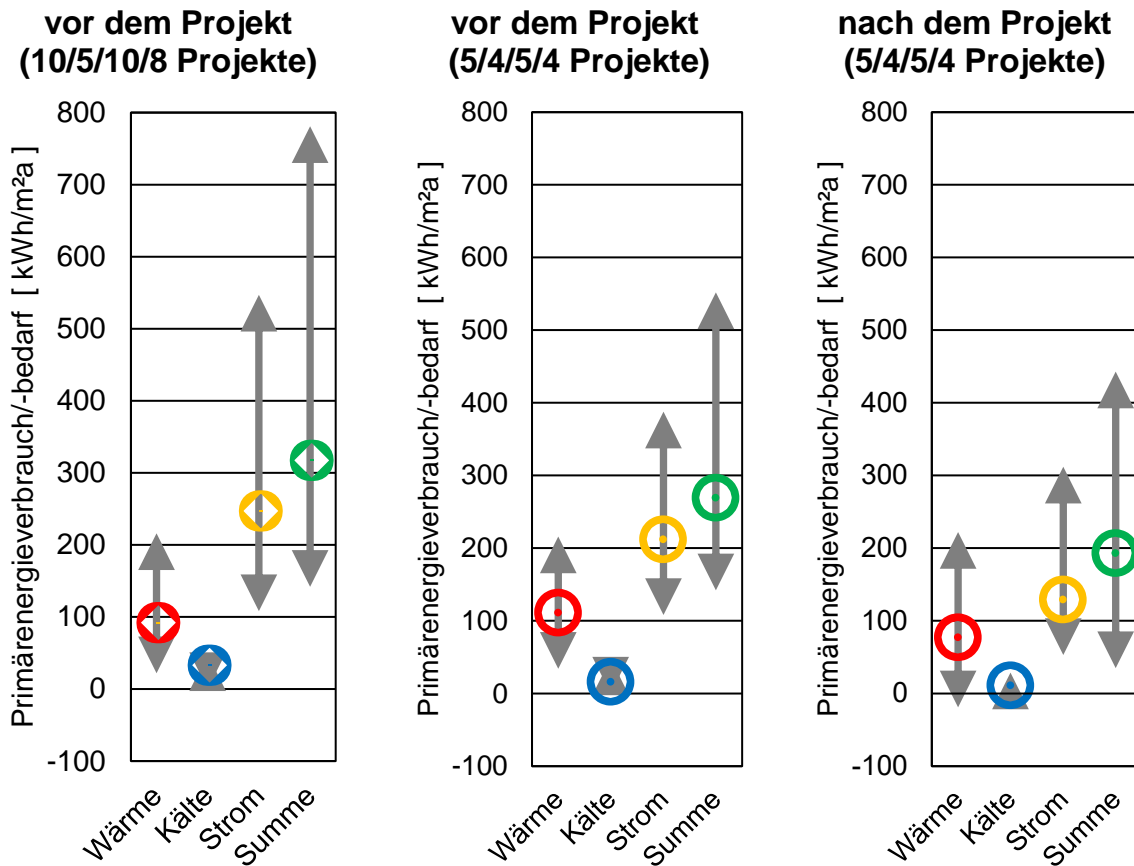


Bild 52: Auf die Nettogrundfläche bezogene arithmetische Mittelwerte (Punkte), Maximalwerte (obere Pfeile) und Minimalwerte (untere Pfeile) der Primärenergie vor und nach der Projektlaufzeit.

Tabelle 17 vergleicht die u. a. Einsparungen bei Endenergie- und Primärenergie zwischen vor und nach den Projekten, die in den beiden Phasen direkt miteinander vergleichbar waren. Es zeigt sich, dass auf der Wärmeseite die Einsparungen sowohl als bezogene Energiemenge (38 bzw. 34 kWh/m<sup>2</sup>a) als auch als relative Einsparung (28 bzw. 31 %) ähnlich sind. Bei der Kälte ist zwar die eingesparte bezogene Energiemenge gleich (15 kWh/m<sup>2</sup>a), die relative Einsparung aber fast doppelt so hoch bei der Endenergie (60 zu 30 %). Stromseitig ist die relative Einsparung fast gleich (41 bzw. 39 %), aber die eingesparte bezogene Energiemenge deutlich unterschiedlich hoch (50 zu 83 kWh/m<sup>2</sup>a).

Tabelle 17: Vergleich der Endenergie- und Primärenergieeinsparungen.

	Endenergieverbrauch/-bedarf [ kWh/m <sup>2</sup> a ]			Primärenergieverbrauch/-bedarf [ kWh/m <sup>2</sup> a ]		
	Wärme	Kälte	Strom	Wärme	Kälte	Strom
Arithmetischer Mittelwert vor dem Projekt (5/4/5 Projekte)	137	25	123	111	16	212
Arithmetischer Mittelwert nach dem Projekt (5/4/5 Projekte)	99	10	73	77	11	129
Differenz	-38 (28 %)	-15 (60 %)	-50 (41 %)	-34 (31 %)	-15 (31 %)	-83 (39 %)

### 3.16 Eingesetzte Planungstools

In den 12 Vorhaben werden insgesamt mehr als 40 unterschiedliche Tools eingesetzt. Bild 53 zeigt die Wordcloud zu den von den Projektleitern angegebenen Planungstools. Auffällig ist, dass neben IDA ICE und MODELICA MS Excel und „eigenes Tool“ am meisten genannt wurde. Mehrmals wurden auch TRNSYS-TUD, Python (eher eine Programmiersprache), PV\*Sol, QGIS, Energy Plus, MATLAB, Polysun, TEASER und die Anwendung der DIN V 18599 genannt. Viele Softwaretools werden nur in einem Vorhaben eingesetzt, teilweise werden sie in den konkreten Projekten selbst entwickelt.

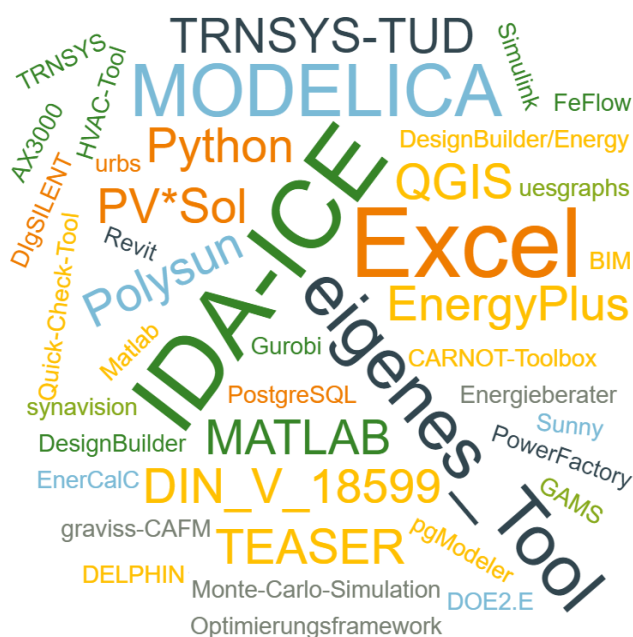


Bild 53: Wordcloud aus den in den 12 Vorhaben eingesetzten Tools.

### 3.17 Bereits erhältliche Projektergebnisse

Die bereits erhältlichen Projektergebnisse der Vorhaben umfassen diverse Vorträge und Veröffentlichungen, darunter bei acht Vorhaben die Abschlussberichte, teilweise aus früheren Projektphasen. Vier Projekte haben Tools erarbeitet, ebenfalls vier Projekte Methoden, z. B. für Sanierungsfahrpläne, einen Wettbewerb zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen unter den Gebäuden („CO<sub>2</sub>-Challenge“), Sanierungsszenarien, Maßnahmenkataloge, Energieklassen für Hochschulnutzungen, relevante Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Intracting, eine Referenz-Raum-Methode und BIM-basierte Anwendungsfälle für das Facility Management. Es wäre wünschenswert, wenn die Methoden und Tools in weiteren Projekten angewendet und getestet würden. Bei vier Projekten ist die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und/oder die Nutzung von erneuerbaren Energien bereits ein Teil der Ergebnisse des Vorhabens.

### 3.18 Umsetzung in die Lehre

Bei Quartiersprojekten, die an Hochschulen umgesetzt werden ist ein großer Vorteil, dass die Projektarbeiten und -ergebnisse direkt in die Lehre einfließen können. Entsprechende Ansätze wurden in 11 von 12 Vorhaben umgesetzt und umfassen z. B. studentische Abschlussarbeiten, Wissenstransfer durch Lehrveranstaltungen, Besichtigung der Versorgungsanlagen und motivierende Gesprächsführungen zum Nutzerverhalten. Die studentischen Abschlussarbeiten sind oftmals direkter Bestandteil der Projektarbeiten, so z. B. bei der Analyse von Bestandsgebäuden oder bei der Entwicklung von Tools.

### 3.19 Lessons Learned

#### 3.19.1 Entscheidungsprozesse

Viele Projektleiter gaben an, dass die Entscheidungsprozesse innerhalb der komplexen Strukturen an Hochschulen einen hohen Abstimmungs- und Kommunikationsaufwand benötigen. Als unterstützend wurden Maßnahmen wie regelmäßige Steuerungsunden, persönliche Kontakte und Vertrauensverhältnisse, enge Kooperation mit dem Facility Management, Organigramme, die Einführung eines Energie- oder Nachhaltigkeitsmanagers und die Einbeziehung der Nutzer angeführt. Die Organisationstruktur in den Projekten ist jeweils unter 2.X.2.2 in den Projektbeschreibungen im Kapitel 2 dargestellt.

Die Projektleiter verwiesen auch auf die Problematik, dass die Laufzeit der Forschungsprojekte (obwohl durchschnittlich 70 Monate, siehe Kapitel 3.7) deutlich kürzer ist als die benötigte Zeit für die baulichen Umsetzungen im Campus. Ein Vorhaben wies darauf hin, dass verbindliche Projektziele aus dem Forschungsvorhaben ein wichtiges Durchsetzungsinstrument für die angestrebten energetischen Ziele sind, die sonst oftmals

aus ökonomischen Zielen vor der Umsetzung reduziert werden. Ein Projekt gab an, dass der Planungsfortschritt schneller war als die dafür benötigten Simulationsergebnisse. Die Grundlage für Entscheidungen bilden oft die möglichst genauen Kenntnisse der Energiekennzahlen des Campus und der einzelnen Gebäude. Hierfür ist ein detailliertes technisches Monitoring erforderlich. Das Projekt „Campus Information Modeling“ entwickelt hierfür ein organisations-spezifisches Energiecontrolling-Netzwerk mit geeigneter Zählerstruktur und technischer Infrastruktur.

### **3.19.2 Hemmnisse**

Drei Projektleiter berichteten, dass die Datenlage unzureichend und teilweise widersprüchlich war. Das Auffinden und der Zugang zu den Daten stellte eine Herausforderung dar. Für eine integrale Planung müssen Begriffe und Zielsetzungen geklärt und Aufgaben klar gegliedert werden.

Kostenbewertungen erwiesen sich als schwierig, weil es hohe Preisspannen und unklare Einbausituationen in der Konzeptphase gab. Ein Projektleiter gab an, dass es an erfahrenem Personal für die Beantragung von Investitionsgeldern fehlte. Ein generelles finanzielles Hemmnis sind auch die aktuellen niedrigen Preise für Energie, die zu langen Amortisationszeiten führen, so dass manche Maßnahmen nicht umgesetzt werden können. Im Projekt „Intracting an Hochschulen“ wird ein Konzept für die Finanzierung von energetischen Maßnahmen aus Eigenmitteln erarbeitet.

Wenn einzelne investive Forschungsbudgetanteile (z. B. Messinstallationen) nicht beim Bauherrn, sondern bei einer anderen Organisation liegen, müssen teilweise komplizierte Gestattungsvereinbarungen und Haftungsausschlüsse getroffen werden.

Nutzerumfragen zur Vorbereitung von Entscheidungen erwiesen sich aufgrund der Datenschutzproblematik in mehreren Projekten als kompliziert. Hier sollte vorab genau geklärt werden, was abgefragt werden soll und zu welchem Zweck die Ergebnisse genutzt werden sollen.

Der steigende Strombedarf an Universitäten erweist sich oftmals als Hemmnis für das Erreichen der Einsparziele. Hier müssen neben dem Einsatz von LED-Beleuchtung noch weitere Maßnahmen angedacht werden.

Bei den konkreten Umsetzungen von Einsparmaßnahmen ist zu beachten, dass die Aufrechterhaltung des Universitätsbetriebs während der Sanierungsmaßnahme zu Problemen und Verzögerungen führt. Die Unterbringung von Gebäudenutzungen in anderen Liegenschaften ist aufgrund von Platzproblematik nicht immer möglich.

### **3.19.3 Energetische Benchmarks**

Die Vorhaben wählten unterschiedliche energetische Benchmarks zur Bestimmung des Ist-Zustands, des Projektziels und der Überprüfung durch Messungen. Dabei werden in fünf Vorhaben der Kennwert Endenergie Wärme (Heizenergie) herangezogen, in drei Vorhaben die CO<sub>2</sub>-Emissionen, in jeweils zwei Vorhaben die Primärenergie und die Endenergie für Strom, sowie einmal die CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit erfolgt durch die Amortisation (1 Vorhaben) bzw. die eingesetzten Kosten je eingesparter Kilowattstunde Primärenergie (1 Vorhaben). Hierbei waren Mehrfachnennungen durch die Projektleiter möglich und es ist auch zu vermuten, dass nicht alle Projektleiter alle benutzten Kennwerte angegeben haben.

Die Projektbearbeiter machen sich dabei auch Gedanken, ob flächenbezogene Kennwerte richtig sind oder eher personenbezogene (Anzahl Studenten bzw. Mitarbeiter) und wie mit dem Flächenzuwachs während der Projektlaufzeit und danach umzugehen ist.

Konkrete Benchmarks bzw. erreichte Einsparungen werden für drei Vorhaben angegeben. Ein Projekt (Campus Lüneburg) erreicht dabei eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz nach der Umsetzung des Energiekonzepts.

Zwei Projektverantwortliche gaben an, dass der Vergleich mit bereits vorhandenen Benchmarks schwierig ist. Gründe dafür sind die dynamische Nutzung und Belegung der Gebäude, die unterschiedliche Art und Auslastung von Laboren und Probleme bei der Witterungsbereinigung aufgrund unzureichender Zählerinfrastrukturen.

#### **3.19.4 Technologien**

Die unter Lessons Learned von den Projektleitern eingetragenen Erfahrungen beinhalten mehrere Technologien mit interessanten Amortisationszeiten, so z. B. PV-Anlagen (in 3 Vorhaben), Kraft-Wärme-Kopplung (in 2 Vorhaben) und in einem Vorhaben als Kälteerzeuger im Nahwärmenetz eher Kompressionskältemaschinen als Absorptionskältemaschinen (aufgrund von weniger Wartungsaufwand, längerer Lebensdauer, höherer Effizienz und geringeren Verbrauchskosten).

Eine Amortisationszeit von 15 Jahren erreichten sowohl eine Gasmotor-Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung als auch ein Biomethan-BHKW. Erstere wurde umgesetzt, das Biomethan-BHKW in einem anderen Projekt hingegen wegen zu hoher Amortisationszeit nicht.

Im Vorhaben Campus Lüneburg laufen die RLT-Anlagen effizienter als berechnet und das E-Control-Glas erwies sich als geeignet für den sommerlichen Wärmeschutz. Lüneburg liefert auch einen Benchmark für die benötigte Anbaufläche von Biomethan: man benötigt ca. 1 km<sup>2</sup> für die Versorgung eines 0,25 km<sup>2</sup> großen Mischgebiets mit niedriger Dichte.

Bei rechtzeitiger Einbindung der Behörden kann PV auch auf denkmalgeschützten Gebäuden umgesetzt werden, so die Erfahrung im Projekt Campus Dresden. Im Campus Potsdam konnte die geplante Vakuumverglasung nicht umgesetzt werden, da das entsprechende Glas nicht marktreif war und die Vakuumdämmung durfte aufgrund zusätzlicher Brandlast nicht in einer Holzfassade eingesetzt werden.

Im Projekt Forschungscampus Renningen hatten die Batterien der Funkthermostatventile zu kurze Lebensdauern, deshalb war der Einsatz der Funkthermostatventile nicht zufriedenstellend.

#### **3.19.5 Planungshilfsmittel**

Auch die Lessons Learned im Bereich Planungshilfsmittel sind vielschichtig, umso mehr, als dass auch schon die eingesetzten Planungshilfsmittel sehr unterschiedlich sind (siehe auch Kapitel 3.16). In mehreren Vorhaben wurden die entwickelten Planungshilfsmittel aus Vorgängerprojekten oder früheren Projektphasen eingesetzt.

Die Simulation von Gebäuden und Quartieren erfordert derzeit noch den Einsatz mehrerer Softwaretools mit erheblichem Eingabeaufwand. Hier wäre ein einheitlicher Datenfluss wünschenswert. Weitere generelle Aussagen waren, dass die verfügbaren

Softwaretools individuelle Vor- und Nachteile bezüglich Bilanzraum, Detaillierungsgrad, Verfügbarkeit, Übertragbarkeit, Eingabe- und Bearbeitungsaufwand und Qualität der Ergebnisse besitzen. In mehreren Projekten waren Anpassungen in den Tools notwendig.

Während einige Projekte angaben, dass die Berechnung von Sanierungsmaßnahmen nach DIN V 18599 hinsichtlich Anwendbarkeit und Vergleichbarkeit überzeugen konnte, wiesen andere auf die Notwendigkeit von dynamischer Modellierung (trotz hohem Aufwand) für Speicherauslegungen und die Kältebereitstellung hin. Das Risiko der Fehleinschätzung steigt mit dem Grad der Komplexität der Technik und der Nutzungsarten. Dabei ist die Eingabe der Gebäudehülle eindeutig und fehlerunanfällig, unterschiedliche Nutzungsszenarien und die Haustechnik dagegen beeinflussen die Ergebnisse stark.

Einige Projekte setzten selbstentwickelte MS Excel-Tools für Sonderaufgaben, aber auch zur Vermeidung von zeitintensiven Einzeltools und zur Fehlerreduzierung ein. In anderen Vorhaben wurden detaillierte Liegenschaftsmodelle entwickelt, u. a. durch die Nutzung von MATLAB/Simulink in Verbindung mit der Carnot-Toolbox. Im Bereich der Optimierungsmodelle für die Campusroadmap stoßen lineare Optimierungen an ihre Grenzen. Der Tipp aus dem Projekt Campus Garching ist: Sollen Prozesse noch präziser abgebildet werden, bietet sich ein gemischt ganzzahliges Energiesystemoptimierungsmodell an. Gegen redundante Daten erwiesen sich cloudbasierte Lösungen und Versionierungssoftware als hilfreich.

Die Monitoringkonzepte wurden (wie auch im Energiewendebauen- und EnEff:Stadt-Messleitfaden [105] gefordert) an die DIN V 18599 angelegt. Ein Vorhaben entwickelt eine Energiemonitoring Software zur Unterstützung des Gebäudemanagements.

Der Export von IFC-Dateien (ein BIM-Austauschformat) aus Revit war nicht immer problemlos. Ein zusätzliches Python-Skript musste im Vorhaben „Forschungscampus Renningen“ geschrieben werden, um die Informationen in die IFC-Datei nachträglich hinzuzufügen.

## 4 Danksagung

Für den umfänglichen Review des Dokumentes durch die Mitarbeiter des Forschungszentrums Jülich bedanken sich die Autoren herzlich. Ein großer Dank gilt auch den Projektleitern und -bearbeitern der querausgewerteten Campus-Projekte für die Beschreibung der Vorhaben auf Basis der vorgegebenen Struktur.



## 5 Referenzen

- [1] Projektträger Jülich: EnArgus – Zentrales Informationssystem Energieforschungsförderung. Verfügbar unter <https://www.enargus.de>.
- [2] Erhorn-Kluttig, H.; Doster, S.; Erhorn, H.: Der energieeffiziente Universitäts-campus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt. Schriftenreihe der Begleitforschung EnEff:Stadt. IRB-Verlag 2016. ISBN 978-3-8167-9631-2. Verfügbar unter <https://www.baufachinformation.de/der-energieeffiziente-universitaetscampus/buecher/244972>.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Bekanntmachung – Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ vom 8. Dezember 2014. Bundesanzeiger, veröffentlicht am 30. Dezember 2014. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-forschungsfoerderung-im-6-energieforschungsprogramm.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-forschungsfoerderung-im-6-energieforschungsprogramm.pdf?__blob=publicationFile&v=3).
- [4] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen: Projektleitertreffen „Cross-sektorale Campus-Konzepte für die Wärmewende. Dokumentation des 6. Projektleitertreffens in Potsdam, 6.–7. Mai 2019. ISBN: 978-3-948234-86-7. Verfügbar unter [https://projektinfos.energiewendebauen.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/Veranstaltungsdokumentationen/Publikation\\_6\\_PL-Treffen\\_Potsdam\\_web.pdf](https://projektinfos.energiewendebauen.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Veranstaltungsdokumentationen/Publikation_6_PL-Treffen_Potsdam_web.pdf).
- [5] o.V.: Energieberichte aus den Jahren 2010 bis 2014 erstellt vom Dezernat 10.0 Facility Management der RWTH Aachen University. Aachen, 2015. Erhältlich unter [http://www.rwth-aachen.de/cms/root/Die-RWTH/Einrichtungen/Verwaltung/Dezernate/~pvm/10\\_0\\_Facility\\_Management/](http://www.rwth-aachen.de/cms/root/Die-RWTH/Einrichtungen/Verwaltung/Dezernate/~pvm/10_0_Facility_Management/), Stand 24.09.2015.
- [6] Müller, D.; von Treeck, C.; Braun, H.; Wenner, D.: EnEff:Campus:RoadMap RWTH Aachen: Schlussbericht. Bericht der RWTH Aachen. 2017. Erhältlich unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1009837389/>.
- [7] Fuchs, M. et al.: Visualizing Simulation Results from Modelica Fluid Models Using Graph Drawing in Python. 11<sup>th</sup> International Modelica Conference, Versailles, France, 2015.
- [8] Brüntjen, J. et al., 2017, “Comparison of chosen measures based on performance simulations using Low Order Models parametrized by archetype buildings and detailed building models in IDA ICE”, 15th IBPSA Conference, San Francisco, CA, USA, 2017.
- [9] Fliegner, C. et al.: Database Development with “3D-CityGML“- and “EnergyADE“-Schema for City-District-Simulation Modelling. BauSIM 2016: Sechste deutsch-österreichische IBPSA-Konferenz, S. 235-242, 14.-16. September 2016, Dresden.
- [10] Dirutigliano, D. et al.: Case Study for Energy Efficiency Measures of Buildings on an Urban Scale. Proceedings of BSA 2017: 3rd Building Simulation Applications Conference, 08.-10. Februar 2017, Bozen.

- [11] Brüntjen, J. et al. [2017]: Building Simulation 2017: "Comparison of chosen measures based on performance simulations using Low Order Models parametrized by archetype buildings and detailed building models in IDA ICE". Proceedings of BS 2017: 15th Conference of International Building Performance Simulation Association, S. 1558-1566, San Francisco, 07.-09. August 2017, San Francisco.
- [12] Fliegner, C. et al. [2017]: Building Simulation 2017: "Determination of heat flux coefficient inquiry methods for city district simulation". Proceedings of BS 2017: 15th Conference of International Building Performance Simulation Association, S. 1567-1575, 07.-09. August 2017, San Francisco.
- [13] Münch, B.; Brandt, D.; Hantouch, Y. et al.: EnEff: HCBC - HochschulCampus Berlin-Charlottenburg – Demonstration eines innovativen Wärmeenergie-managements für ein Bestandsquartier: Schlussbericht der TU Berlin und Universität der Künste Berlin. 2018. Erhältlich unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1669018652/Eneff-HCBC-HochschulCampus-Berlin-Charlottenburg>.
- [14] Inderfurth, A.; Karasu, A.; Nytsch-Geussen, C.; Staffan, C.: Architectural-Geometrical Simplification for Multi-Zone Building Models for Urban Refurbishment Projects. Building Simulation. 2017. Erhältlich unter: [https://www.researchgate.net/publication/319666130\\_Architectural-Geometrical\\_Simplification\\_for\\_Multi-Zone\\_Building\\_Models\\_for\\_Urban\\_Refurbishment\\_Projects](https://www.researchgate.net/publication/319666130_Architectural-Geometrical_Simplification_for_Multi-Zone_Building_Models_for_Urban_Refurbishment_Projects).
- [15] Kononenko, N.; Munch, B.; Stanica, D.; Ziegler, F.; Kriegel, M.: Vereinfachte Methode zur Abschätzung des Kältebedarfs eines Quartiers mit unterschiedlichen Kälteerzeugern am Beispiel des Hochschulcampus der Technischen Universität Berlin. Proceedings der Deutschen Kälte- und Klimatagung. Bremen, 2017. Erhältlich unter: <http://toc.proceedings.com/38542web-toc.pdf>.
- [16] Fisch, M. N.; Beier, T.: EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig: integraler energetischer Masterplan TU Braunschweig 2020/2050. Abschlussbericht. 2015. Erhältlich unter: <https://www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:863188079/>
- [17] Abschlussbericht EnEff Campus 2020. Erhältlich unter: <https://www.tu-braunschweig.de/igs/forschung/eneffcampus2>.
- [18] Fisch, M. N.; Beier, T.: Energieplus für städtische Quartiere – Campus TU BS. Beitrag in Buch „EnergiePLUS –Gebäude und Quartiere als erneuerbare Energiequellen“. Leonberg, 2012.
- [19] Klonek, F. E.; Kauffeld, S.: "Muss, kann ... oder will ich was verändern?" Welche Chancen bietet die Motivierende Gesprächsführung in Organisationen. Artikel in Zeitschrift „Wirtschaftspsychologie“. Lengerich, 2012.
- [20] Beier, T.; Schulze, S.; Wöhrer, S.: Optimierung der Quartiersentwicklung, Integraler energetischer Masterplan TUBS 2020/2050. Artikel in Zeitschrift „tab – Das Fachmedium der TGA-Branche“. Gütersloh, 2015.
- [21] Beier, T.: "Forschungslabor für energetische Quartierssanierung", DBZ Deutsche BauZeitschrift, Ausgabe 04, Digitales Planen und Bauen, 2016, S. 36.

- [22] Walz, S.: „Energie sparen mit Hilfe des Internet der Dinge (IoT)“, FKT Fachzeitschrift für Fernsehen, Film und elektronische Medien, Ausgabe 8–9, S. 366-370.
- [23] Beier, T.; Schulze, S.: "Demonstrationsvorhaben Braunschweig (Campus): blueMAP TU Braunschweig" ein Beitrag, in: Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H.: Energetische Bilanzierung von Quartieren, Ergebnisse und Benchmarks aus Pilotprojekten – Forschung zur Energieeffizienten Stadt, Bonn, 2016, S. 24 ff.
- [24] Beier, T.; Schulze, S.: "EnEff Campus TU Braunschweig" ein Beitrag in: Erhorn-Kluttig, S. Doster, H.; Erhorn, H.: Der energieeffiziente Universitätscampus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt, Bonn, 2016, S. 41-53.
- [25] Walz, S.; Schröder, Y.: „A privacy-preserving system architecture for applications raising the energy efficiency“, In Proc. of 2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics – Berlin (ICCE-Berlin), Berlin, 2016, S. 62-66.
- [26] Beier, T.: " EnEff Campus 2020 – TU Braunschweig, Forschungslabor für eine energetische Quartierssanierung", OTTI: 2. Fachforum – Green Buildings, Innovative Gebäude und Quartiere mit erneuerbaren Energien 26.-27.10.2016, Tagungsband, Frankfurt am Main, 2016, S. 131-135
- [27] Oltmanns, J.; Freystein, M.; Dammel F.; Stephan, P.: Improving the operation of a district heating and a district cooling network. Energy Procedia 149 (2018), S. 539–548, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.218>
- [28] v. Stein, T.; Sauerwein, D.; Kuhn, C.: Verbrauchsprognosen für Sanierungskonzepte von Gebäuden und Quartieren. Bauphysik, 1/2018, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [29] Wörner, P.; Müller A.; Sauerwein, D.: Dynamische CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für den deutschen Strom-Mix: Möglichkeiten zur realistischen Bewertung zukünftiger Energieversorgungskonzepte auf Gebäudeebene. Bauphysik, 2/2019, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [30] Dammel, F.; Oltmanns, J.; Stephan, P.: Nutzung der Abwärme eines Hochleistungsrechners am Campus Lichtwiese der TU Darmstadt. EuroHeat &Power, 2019.
- [31] Gritzki, A.; Thorwarth, D.; Sonntag, H. et al.: CAMPER – CAMPusEnergieverbrauchsReduktion. Auf dem Weg zum Energieeffizienz-Campus der TU Dresden. TU Dresden, Institut für Energietechnik. Dresden, Oktober 2019. Erhältlich unter: [www.tib.eu/de](http://www.tib.eu/de).
- [32] Felsmann, C.; Grunewald, J.: CAMPER – CAMPusEnergieverbrauchsReduktion an der TU Dresden. 5. Kongress Zukunftsraum Schule, Stuttgart, 14./15. November 2017. Erhältlich unter: [https://www.zukunftsraum-schule.de/pdf/kongress-2017/2017\\_EE\\_Felsmann.pdf](https://www.zukunftsraum-schule.de/pdf/kongress-2017/2017_EE_Felsmann.pdf).
- [33] Thorwarth, D.; van Roosmalen, M.: Betrachtung von Baudenkmalen in der Quartiersebene. In: Weller, B.; Horn, S. (Hrsg.): Denkmal und Energie 2017 – Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016. Erhältlich unter: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-16454-6\\_16](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-16454-6_16).

- [34] Thorwarth, D.; Gritzki, A. et al.: Nutzung von Solarenergie im Campusquartier. Denkmal und Energie 2018 – Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort. Tagungsband, Springer Fachmedien, Wiesbaden, April 2017. ISBN 978-3-658-19671-4. Erhältlich unter: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19672-1\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-19672-1_1).
- [35] Gritzki, A.; Felsmann, C.: CAMPER – CAMPUSenergieverbrauchsReduktion. Auf dem Weg zum Energieeffizienz-Campus der TU Dresden. TGA-Kongress 2018, Berlin, 22./23. März 2018. Erhältlich unter: <http://tga-kongress.de>.
- [36] Thorwarth, D.; Gritzki, A. et al.: Nutzung von Solarenergie im Campusquartier. Potentiale und Herausforderungen bei Baudenkmalen auf dem Hauptcampus der TU Dresden. GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Heft 02/2018. ITM Innotech Medien GmbH, Augsburg, April 2018.
- [37] TU Dresden: Energieverbrauch der TU Dresden. Posterbeitrag zum „Aktions-tag Energie“ des Umweltmanagements der TU Dresden in Kooperation mit CAMPER, 28.06.2018: <https://tu-dresden.de/tu-dresden/arbeitschutz-umwelt/ressourcen/dateien/umweltschutz/informationsblaetter/poster-energieverbraeuche-der-tu-dresden?lang=de>.
- [38] Roosmalen, M.; Thorwarth, D.; Weller, B.: Bewertung der energetischen Qualität von Verglasungen am Campus der TU Dresden. Denkmal und Energie 2019 – Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort. Tagungsband, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-23636-6. Erhältlich unter: <https://www.springer.com/de/book/9783658236366>.
- [39] Gritzki, A.; Seeger, J.; Felsmann, C.: Wärmeschutz: Entwicklung des Energieverbrauches im Bestand am Beispiel des TU Dresden-Campus. Denkmal und Energie 2020 – Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort. Tagungsband, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-28752-8. Erhältlich unter: <https://www.springerprofessional.de/denkmal-und-energie-2020/17422700>.
- [40] Gritzki, A.; Seeger, J.; Felsmann, C.: Wärmeschutz: Viel hilft viel? Entwicklung des Energieverbrauches auf dem Campus der TU Dresden, Teil 1 – Bestandsaufnahme. B+B Bauen im Bestand. Hefte 02/2020. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co, Köln.
- [41] Gritzki, A.; Seeger, J.; Felsmann, C.: Wärmeschutz: Klimawandel beeinflusst Sanierungsstrategien. Entwicklung des Energieverbrauches auf dem Campus der TU Dresden, Teil 2 – Zukunftsszenarien. B+B Bauen im Bestand. Hefte 03/2020. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co, Köln.
- [42] Remmen, P. et. al.: CityGML Import and Export for Dynamic Building Performance Simulation in Modelica. Building Simulation and Optimization 2016. Third IBPSA – England Conference.
- [43] Spinnraker, E. et. al.: Software-supported identification of an economically optimized retrofit order by minimizing life-cycle costs using a genetic algorithm including constraints. CISBAT: International Conference Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, 2017.

- [44] Spinnräker, E. et. al.: Entwicklung eines Monitoringsystems für Gebäude und Quartiere zur Evaluierung des Nutzerkomforts im Rahmen des Aufbaus eines webbasierten Informationssystems“. Bauphysiktage Kaiserslautern, Bauphysik in Forschung und Praxis, 2017.
- [45] Spinnräker, E. et. al.: Webbasiertes Energie-Informationssystem für urbane Räume. Bauingenieur: die richtungsweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen, 2018.
- [46] Remmen, P. et. al.: Refinement of Dynamic Non-Residential Building Archetypes Using Measurement Data and Bayesian Calibration. Building Simulation 2019. IBPSA – Conference, 2019.
- [47] Vogt, M. et. al.: Selecting statistical indices for calibrating building energy models. Building and Environment, 2018.
- [48] Mans, M. et. al.: Using Evolutionary Algorithms to Design Energy Supply Systems for a Changing Building Stock. Building Simulation 2017. IBPSA – Conference, 2017.
- [49] Mans, M. et. al.: Automated model generation and simplification for district heating and cooling networks. Modelica Conference 2019.
- [50] Vajen, K.; Emmerich, P.; Biechele, B.: Energieeffizienz an Hochschulen. Interdisziplinäres Seminar zu Ökologie und Zukunftssicherung. Universität Kassel, November 2012.
- [51] Plößer, T.; Maihöfner, D.; Hanson, J.: Integration of a thermal energy storage as a dynamic load into the electrical grid of an urban quarter. 24th International Conference on Electricity distribution (Cired 2017), Glasgow, Scotland, 2017.
- [52] Maihöfner, D.; Vetter M.; Plößer, T.; Hanson, J.: Integration of Possible Charging Infrastructures for Electric Vehicles in an Existing Distribution Network. International ETG Congress 2017, Bonn, 28.–29. November 2017.
- [53] Maihöfner, D.; Plößer, T.; Hanson, J.; Sauerwein, D.; vom Stein, T.; Kuhn, C.: Comparison of University Departments Regarding Their Area and Load Profile of an Existing Campus. 2018 IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 1–6, Denver/CO, USA, 20.–23. April 2018.
- [54] Maihöfner, D.; Rosbach, N.; Plößer, T.; Hanson, J.: Influence of a Decentralized Heat Supply on the Electrical Grid of a Campus Quarter. 53rd International Universities Power Engineering Conference UPEC, Glasgow, UK, 4.–7. September 2018.
- [55] Opel, O.; Strodel, N.; Werner, K.; Geffken, J.; Tribel, A.; Ruck, W.: Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lüneburg. In Energy – The International Journal, Volume 141, p. 2628–2639. 2017.
- [56] Opel, O.; Werner, K.; Geffken, J.; Tribel, A.; Strodel, N.; Brüggem, I.; Ruck, W.: Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg, Scharnhorststraße/Bockelsberg: Schlussbericht Teile I + II. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/GBV:104574428X>.

- [57] Lutzenberger, A.: Nachwachsende Rohstoffe zur Substitution von Mineralkraftstoffen. SVH Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften. Dissertation, 2009. ISBN 973-3-8381-0076-0.
- [58] Arnold, K.; Dienst, C.; Lechtenböhmer, S.: Integrierte Treibhausgasbewertung der Prozessketten von Erdgas und industriellem Biomethan in Deutschland. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, 22, 135–152. 2010. DOI: 10.1007/s12302-010-0125-6.
- [59] Vetter, A.; Arnold, K.: Klima- und Umwelteffekte von Biomethan: Anlagentechnik und Substratauswahl. Wuppertal Papers Nr. 182. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 2010. ISSN 0949-5266.
- [60] Adelt, M.: LCA of Biomethane. International Gas Union Research Conference (IGRC), 19.-21. Oktober 2011, Seoul, Korea, 2011. ISBN: 978-1-6227-6385-6.
- [61] REHVA Guidebook „HVAC Commissioning Process“.
- [62] Opel, O.; Werner, K.; Ohse, S.: Campusprojekt Leuphana Universität Lüneburg. In: Erhorn-Kluttig, H.; Doster, S.; Erhorn, H. (Ed.): Der energieeffiziente Universitätscampus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt (S. 54–64). Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- [63] Strodel, N.; Werner, K.; Opel, O.; Ruck, W.: Integrales Energiekonzept für eine klimaneutrale Universität – Projekt "klimaneutraler Campus", Einordnung in den Gesamtkontext. Fachforum Thermische Energiespeicher, Volume: 4, Neumarkt, Juli 2015.
- [64] Strodel, N.; Opel, O.; Werner, K.; Ruck, W.: Ausbau und Energieeffizienzerhöhung des Energiesystems der Leuphana Universität Lüneburg. NEIS Konferenz 2015, 10.–11. September 2015, Hamburg.
- [65] Strodel, N.; Opel, O.; Werner, K.; Ruck, W.: Green city – A sustainable energy concept for a climate neutral university. In: Palocz-Andresen et al. (Eds.): International Climate Protection, Springer International Publishing, 2019.
- [66] Strodel, N.; Opel, O.; Kranz, S.; Werner, K.; Ruck, W.: Optimization of Cogeneration by Seasonal Heat Storage in an Aquifer. In: Schulz, D. (Ed.): Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern, Chapter: Energy Storage Systems, Springer, Berlin/Heidelberg, 2016.
- [67] Geffken, J.: Ambient Intelligence & Nutzerverhalten – Entwicklung eines digitalen Feedbacksystems zur Veränderung des energetischen Nutzungsverhaltens an der Leuphana Universität. Master Thesis, Leuphana University of Lüneburg, Lüneburg, Germany, 2013.
- [68] Rausch, D.; Wayaspathy, V.: Optimierung von effizienten Gebäuden mittels Ambient Intelligence. Bachelor Thesis, Leuphana University of Lüneburg, Lüneburg, Germany, 2014.

- [69] Tribel, A.; Opel, O.; Geffken, J.: Like! You saved #energy today. Fostering Energy Efficiency in Buildings – The implementation of social media patterns as symbols in Building Management Systems' Graphical User Interfaces using Peirce's semeiosis as a communication concept. *EnviroInfo 2014 – ICT for Energy Efficiency, At Oldenburg, Volume: Proceedings of the 28th International Conference on Informatics for Environmental Protection*, S. 597-604, 2014.
- [70] David, R.; Jainta, O.; Regel, R. und Jensch, W.: Die Hochschule auf dem Weg zu einem energieeffizienten Gebäudebetrieb: HoEff; Schlussbericht für das Forschungsvorhaben HoEff im Rahmen des Förderkonzeptes: EnBop – Energetische Betriebsoptimierung. Projektlaufzeit: 01.12.2008 – 31.03.2012/30.11.2012. Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Fak. 05 – Versorgungs- und Gebäudetechnik, Papier und Verpackung, Druck- und Medientechnik. München, 2013. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/GBV:773577017>.
- [71] Buchholz, S.; David, R.; Jainta, O.; Jensch, W.; Konz, A. und Pfeifroth, P.: Schlussbericht Forschungsvorhaben HoEff-CIM : Energieeffiziente Hochschule – Campus Information Modeling: Teilvorhaben "Entwicklung ganzheitlicher Technikkonzepte". Projektlaufzeit 01.05.2013-30.04.2017. BROCHIER Consulting + Innovation GmbH. Nürnberg 2017. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/GBV:1010599569>.
- [72] Regel, R.; Januzaj, E.; Jensch, W.: HoEff-CIM: Energieeffiziente Hochschule – Campus Information Modeling: AP 4.3. Referenzraummethode: Endbericht. Hochschule München – Competence Center Energieeffiziente Gebäude und Quartiere. München, 2017. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/KXP:1684867223>.
- [73] Botzler, S.; Buchholz, S.; Dotzler, C.; Eichel, P.; Hofbauer, J.; Januzaj, E.: HoEff-CIM – Energieeffiziente Hochschule, Campus Information Modeling: Erstellung eines Stufenplans zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen auf einem Hochschulcampus im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung im Förderschwerpunkt EnBop: Schlussbericht. Technische Universität München, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen. München, 2017. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/GBV:1003394280>. ISBN 978-3-941370-97-5.
- [74] Eichel, P.; Hofbauer, J.: HoEff-CIM: Energieeffiziente Hochschule – Campus Information Modeling: Teilberichte Ludwig-Maximilians-Universität München: Arbeitspaket 1: Darstellung der Liegenschaften und Verwaltung (Ist-Zustand LMU), Arbeitspaket 2: Werkzeuge, Arbeitspaket 3: Ausbau bzw. Integration Energiemanagement an der LMU. Ludwig-Maximilians-Universität München. München, 2017. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/GBV:1013692675>.

- [75] Kierdorf, D.; Dotzler, C.; Botzler, S.: Energy Efficient Campus HoEff-CIM (Campus Information Modeling). Smart Energy Regions International Conference Cardiff. COST Action TU1104. Posterbeitrag, Cardiff, Vereinigtes Königreich, 2016.
- [76] Jensch, W.; Lang, W.; Häufle, U.; Buchholz, S.; David, R.; Dotzler, C.; Eichel, P.; Hofbauer, J.; Jainta, O.; Kierdorf, D.; Regel, R.: Energieeffiziente Hochschule Campus Information Modeling: HoEff-CIM. Energieinnovationen in Neubau und Sanierung: EnOB-Symposium. S. 242. Hrsg. Projektträger Jülich (PTJ), 2014.
- [77] Dotzler, C.; Regel, R.; Kierdorf, D.: HoEff-CIM – Campus Information Modeling: Concepts and Tools for a Climate-Neutral Campus. BEHAVE 2016 – 4th European Conference on Behaviour and Energy Efficiency. Coimbra, Portugal, 08.-09. September 2016.
- [78] Regel, R.: Die Referenzraummethode als eine vereinfachte Bewertung komplexer Liegenschaften im Quartier am Beispiel von Hochschulen. Dissertation, Fakultät für Architektur, Technische Universität München, 2016. Erhältlich unter: <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1293442>.
- [79] Regel, R.; Jensch, W.; Lang, W.: The Pareto Principle for the Energy Assessment of Heterogeneous and Complex University Buildings – A Comparison. In: Hauser, G.; Lützkendorf, T.; Eßig, N. (Hrsg.): Sustainable Building Conference sb13 munich, 24.-26. April 2013, Implementing Sustainability – Barriers and Chances, Book of Full Papers, S. 1212-1221, Fraunhofer IRB Verlag, München 2013. ISBN 978-3-8167-8982-6.
- [80] Regel, R.; Jensch, W.; Jainta, O.: HoEff-QuickCheck: A Quick Evaluation Method for Existing University Buildings. In: Grunewald J. (Hrsg.): EnTool 2013 Symposium, Workshop & Summer School; Tools and Data for energy-optimized Buildings, Neighborhoods, Residential Areas and Cities, Dresden, 10.–14. Juni 2013. ISBN 978-3-86780-350-2.
- [81] Regel, R.; Jensch, W.; Lang, W.: Simplified Energy Performance Assessment Method to Consider User Behavior and to Identify Main Impact Factors on Energy. In: La Roche, P.; Schuler, M. (Ed.): Proceedings of the 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture – Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments, Los Angeles, USA 2016.
- [82] Weiß, D.; Petzold, H.: Optimized energy concept for an office building with waste heat from IT cooling using building energy simulation. 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, 2014.
- [83] Potsdamer Neueste Nachrichten zum Bau am 17.05.2013: "Glücksgefühle".
- [84] Märkische Allgemeine 25. Juni 2011: PIK baut "unsichtbares" Kleeblatt.
- [85] Steinbart, A.: Kostenmodelle und Lebenszyklusanalyse mit der Gebäudesimulationssoftware EnergyPlus. Diplomarbeit, TU Dresden, 2014.
- [86] Pfefferkorn, K.: Gebäudesimulation eines netzentkoppelten Mehrfamilienhauses mit Speicherbemessung. Diplomarbeit, TU Dresden, 2014.



- [87] Drechsel, M.: Bewertung verschiedener Berechnungsansätze für Energiebilanzen am Beispiel der Sanierung eines denkmalgeschützten Bestandsgebäudes. Diplomarbeit, TU Dresden, 2013.
- [88] Dube, S.: Validierung der Anlagenmodelle BHKW und Photovoltaik in EnergyPlus. Diplomarbeit, TU Dresden, 2014.
- [89] Hempel, U.: Grundlagen der Siedlungsabbildung in EnergyPlus. Diplomarbeit, TU Dresden, 2015.
- [90] Kaiser, J.; Petzold, H.; Möller, T.; Neumann, M.; Grunewald, J.; Felsmann, C.: Verbundprojekt Campus Telegrafenberg. Ein Campus-Energiekonzept der Zukunft für den Wissenschaftspark „Albert Einstein“ in Potsdam. Projekt-Abschlussbericht. Potsdam/Dresden, 2019.
- [91] Massa Gray, F.; Gall, J.; Georgiadis, G.; Braun, S.; Klimke, K.; Huard, G.; Dibowski, H.; Réhault, N.; Benndorf, G.; Wystrcil, D.; Rist, T.; Alfonso, P. M.; Zehnle, S.: RngOpt – BIM-gestütztes Facility Management und netzreaktive Betriebsoptimierung am Bosch Forschungscampus Renningen (Abschlussbericht), Förderkennzeichen 03ET1373 A-B, 2019. Erhältlich unter: <https://doi.org/10.2314/KXP:1691849782>
- [92] Benndorf, G.; Rist, T.; Réhault, N.: A fault detection system based on two complementary methods and continuous updates, IFAC-PapersOnLine, Vol. 51 (24), 2018, S. 353–358.
- [93] Alfonso, P.; Rist, T.; Benndorf, G.; Réhault, N.: BIM-based fault detection and diagnostics methods applied to an existing building, BAUSIM 2018, Karlsruhe.
- [94] Benndorf, G.; Wystrcil D.; Réhault, N.: Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control, Applied Physics Reviews 5, 2018.
- [95] Benndorf, G.; Rist, T.; Réhault, N.: Digitale Beschreibung von Regelungsmechanismen zur Betriebsüberwachung von TGA-Anlagen, in Fachzeitschrift HLH, Bd. 69, Nr. 11, 2018.
- [96] Klimke, K.: BIM – Gebäude effizient managen (Vortrag), Berliner Energietage, 03.05.2017, Berlin.
- [97] Réhault, N.: Digitale Methoden in der Betriebsführung von Gebäuden (Vortrag), VDMA Arbeitskreis BIM-Gebäudeautomation, 26.07.2017, Frankfurt.
- [98] Réhault, N.: Digitalisierung im Facility Management zur Steigerung der energetischen Gebäude-performance (Vortrag), StrategieTage Energie 2017, 18.11.2017, Bergisch-Gladbach.
- [99] Stinner F., RWTH Aachen, mit Beitrag vom Fraunhofer ISE zu RngOpt: Standardisierte digitale Daten für den energieeffizienten Betrieb von Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (Vortrag), TGA Kongress 2018, 23.03.2018, Berlin.
- [100] Welfonder, T.: BIM im Gebäudebetrieb (Vortrag), VDI-Fachkonferenz – „BIM in der Gebäudetechnik - Von der Planung bis zum Betrieb“, 05.06. – 06.06.2018, Düsseldorf.

- [101] Réhault, N.: Digitale Methoden in der Betriebsführung von Gebäuden (Vortrag), PitCup Anwendertreffen, 18.09.2018, Schloss Schwetzingen.
- [102] Alfonso, P. „BIM-based Fault detection and Diagnostics methods applied to an existing building“, Vortrag auf Bausim 2018, 26.09.2018, Karlsruhe.
- [103] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Förderkonzept „Energieeffiziente Stadt“ – Gebäude und Energieversorgung. 2007. Verfügbar unter: <https://www.dbz.de/download/74904/3004-EnEff.pdf>.
- [104] Beier, C.; Wrobel, P.; Schnier, M.; Kanngießer, A.; Erhorn, H.; Erhorn-Kluttig, H., et al.: EnEff:Stadt - Wissenschaftliche Begleitung für die Förderinitiative "Energieeffiziente Stadt" Phase 3. Schlussbericht, 2016. Verfügbar unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:874397138/>.
- [105] Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H. et al.: Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im BMWi-Forschungsbereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“. Herausgeber: Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen. 2020. ISBN 978-3-942789-87-5.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Impressum

Herausgeber: Wissenschaftliche Begleitforschung\_ENERGIEWENDEBAUEN  
RWTH Aachen University  
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik  
Mathieustraße 10  
52074 Aachen

E-Mail: [begleitforschung@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:begleitforschung@eonerc.rwth-aachen.de)  
Internet: [energiewendebauen.de](http://energiewendebauen.de)

Autoren: Heike Erhorn-Kluttig<sup>1</sup> und Hans Erhorn<sup>1</sup> aus der Wissenschaftlichen  
Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN mit umfänglichen Beiträgen  
der jeweiligen Projektteams

Bildquelle, sofern nicht explizit anders angegeben: Wissenschaftliche Begleitforschung

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen alleine die Autoren  
die Verantwortung.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Foto-  
kopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Heraus-  
gebers reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, ver-  
vielfältigt oder verbreitet werden.

**ISBN 978-3-00-068656-6**

---

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Bauphysik





