Abschlussbericht Forschungsprojekt
EnEff Campus 2020

Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung und Monitoring

TU Braunschweig

Institut für Gebäude- und Solartechnik

Mühlenpfordtstraße 23

D-38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch

Tel. +49 (0) 531 391-3555

Fax +49 (0) 531 391-8125

igs@tu-bs.de

www.igs.tu-bs.de

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Antragsteller:	Technische Universität Braunschweig
Ausführende Stelle:	Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS),
	Univ.- Prof. Dr.- Ing. M. Norbert Fisch
	Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen,
	Umweltwissenschaften
	Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig
Projektleitung:	Dipl.-Ing. Tanja Wenhake
Förderung:	Bundesministerium für Wirtschaft u. Technologie
Laufzeit:	01.09.2015 – 31.03.2019
Stand:	30.09.2019

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03ET1307A gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kooperationspartner

Gebäudemanagement der TU Braunschweig
Technische Universität Braunschweig - Geschäftsbereich 3
Leitung: Herr Jörg Jaspers
Spielmannstraße 10, 38106 Braunschweig

elenia - Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen
Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
Schleinitzstraße 23, D-38106 Braunschweig

ISE - Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik
Prof. Uwe Brederlau
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig

IfP - Institut für Psychologie
Univ.-Prof. Dr. Simone Kauffeld
Fakultät für Lebenswissenschaften - Lehrstuhl Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie
Spielmannstr. 19, 38106 Braunschweig

IfN - Institut für Nachrichtentechnik
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers
Fakultät Elektrotechnik, Informationstechnik und Physik
Schleinitzstraße 22, 38106 Braunschweig

IBR - Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund
Prof. Dr.- Ing. Lars Wolf
Carl-Friedrich-Gauß- Fakultät, Informatik
Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig

SIZ - Steinbeis Innovationszentrum energie+ (SIZ e+)
Dr.-Ing. Stefan Plesser
Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig

BS|Energy
Braunschweiger Versorgungs-Aktiengesellschaft & Co. KG
Taubenstraße 7, 38106 Braunschweig

1 Inhaltsverzeichnis

2 PROJEKTVORSTELLUNG 6

2.1 GESAMTZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS 6
2.2 BEZUG ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN 7
2.3 WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ARBEITSZIELE 8

3 STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK 9

3.1 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK 9

4 AUSGANGSSITUATION 10

4.1.1 Szenarien „Gebäude“ 12
4.1.2 Szenarien „Mobilität“ 14
4.2 AUSBLICK 17

5 AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DES ARBEITSPLANS 18

5.1 AUFBAU UND METHODIK 18
SCHWERPUNKTTHEMA I – DEMONSTRATION 18
5.2 SCHWERPUNKTTHEMA II – TECHNOLOGIEFORSCHUNGSPLATTFORM „REAL-LIFE-LAB CAMPUS TUBS“ 20
5.3 PROJEKTDATEN UND FÖRDERGEBER 21
5.4 AKZEPTANZBEWERTUNG TU BRAUNSCHWEIG 22
5.5 WISSENSCHAFTLICHE PROJEKTPARTNER 22

6 TU BRAUNSCHWEIG 24

6.1 ENERGETISCHE AUSGANGSSITUATION 24
6.2 DATENBASIS 27
6.2.1 Energiekosten 27
6.3 ENERGIEKOSTENBUDGETIERUNG 28
6.4 GESAMTENERGIEVERBRAUCH WÄRME UND STROM 29

7 SCHWERPUNKTTHEMEN 31

7.1 NEUBAU, SANIERUNG, INSTANDHALTUNG (IGS) 32
7.1.1 Umsetzungskonzept 33
7.1.2 Umsetzung Maßnahmen 36
7.1.3 Maßnahmendokumentation 50
7.1.4 Neubauten TU Braunschweig 57
7.1.5 Denkmalgeschützte Gebäude TU Braunschweig 60
7.1.6 Überprüfung und Validierung entwickelter Werkzeuge 61
7.2 ENERGIEVERSORGUNG (ELENIA IN KOOPERATION MIT BS I ENERGY) 65
7.2.1 Teilstrategie Energieerzeugung und –speicherung 65
7.2.2 Teilstrategie Energieverteilung und Netzstabilität 74
7.2.3 Teilstrategie Netzinfrastruktur und Netzintegration bei einem Ausbau leistungsintensiver Stromverbraucher (Elektromobilität) 104
7.3 INTERFACE „MENSCH – TECHNOLOGIE (IFP) 119
7.3.1 Ausbildung der Energienutzungskoordinator/innen 120
7.3.2 Arbeitspaket Nutzerworkshops 124
7.3.3 CO_2 Challenge 128
7.3.4 Der Königsweg zur Energieeffizienz: Investitionen oder Verhalten? 137
7.4 STÄDTEBAULICHE ENTWICKLUNG (ISE) 139
7.4.1 Abstimmung mit TU Braunschweig 139
7.4.2 Kriterienkatalog 152
7.4.3 Projektsammlung und Einzelszenarien 166

7.4.4 Masterplan (Überarbeitung und Adaption) ... 170
7.4.5 Fazit ... 176
7.5 TRANSPARENZ DES ENERGIEVERBRAUCHS MIT HILFE VON SIGNALANALYSE (IFN) / INTELLIGENTE STEUERUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS IM INTERNET DER DINGE (IBR) ... 177
7.5.1 Teil 1: Kommunikationsstruktur ... 180
7.5.2 Teil 2: Einbindung von Geräten ... 192
7.5.3 Teil 3: Anwendungen zum Energiemanagement ... 206
7.6 TEIL-AUTOMATISIERTE BETRIEBSOPTIMIERUNG (SIZ+) ... 217
7.6.1 Methodisches Vorgehen ... 217
7.6.2 Bearbeitung von 3 Gebäuden ... 218
7.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der teil-automatisierten Betriebsoptimierung ... 236
7.6.4 Zusätzliche wissenschaftliche Arbeiten und Ergebnisse ... 236

8 ZUSAMMENFASSUNG DER SCHWERPUNKTTHEMEN ... 240

8.1 NEUBAU, SANIERUNG, INSTANDHALTUNG ... 240
8.2 ENERGIEVERSORGUNG ... 241
8.3 INTERFACE „MENSCH – TECHNOLOGIE ... 242
8.4 STÄDTEBAULICHE ENTWICKLUNG ... 243
8.5 TRANSPARENZ DES ENERGIEVERBRAUCHS MIT HILFE VON SIGNALANALYSE / INTELLIGENTE STEUERUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS IM INTERNET DER DINGE ... 243
8.6 TEIL-AUTOMATISIERTE BETRIEBSOPTIMIERUNG ... 244

9 ERGEBNISSE ... 246

9.1.2 Entwicklung Gesamtenergieverbrauch TU Braunschweig ... 249

10 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT ... 257

10.1 VERÖFFENTLICHUNGEN IN PRESSE UND FACHLITERATUR ... 257
10.2 VORTRÄGE ... 260
10.3 INFORMATIONSSTÄNDE ... 263

11 AUSBLICK ... 264

12 QUELLEN UND LITERATUR ZUM PROJEKT ... 267

13 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ... 273

14 ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 274

15 TABELLENVERZEICHNIS ... 281

16 ANHANG ... 284

16.1 NEUBAU, SANIERUNG, INSTANDHALTUNG ... 284
16.1.1 Denkmalschutz ... 284
16.1.2 Neubauten - Steckbriefe ... 288
16.2 ENERGIEVERSORGUNG ... 289
16.2.1 Berechnungsgrundlage Fallstudie Ladeinfrastruktur ... 289

LITERATURVERZEICHNIS ... 291

16.2.2 Elektrische Versorgungsnetze ... 294
16.2.3 Übersicht Erzeuger ... 297
16.2.4 Übersicht Verbraucher ... 298
16.2.5 Übersicht elektrische Energiebilanzen Teil I ... 300
16.2.6 Übersicht elektrische Energiebilanzen Teil II ... 301
16.2.7 Szenario Elektromobilität Teil I ... 307
16.2.8 Szenario Elektromobilität Teil II ... 307
16.3 STÄDTEBAULICHE ENTWICKLUNG ... 308

16.3.1 Masterplan ... 308
16.3.2 CoLiving Campus ... 309
16.3.3 Kriterienkatalog ... 309
16.3.4 Projektsammlung ... 309

2 PROJEKTVORSTELLUNG

Im Rahmen der Energiewende und bedingt durch die ehrgeizigen Ziele des 6. Energieforschungsprogramms [1] gewinnen Ansätze für die gebäudeübergreifende energetische Sanierung städtischer Strukturen und Quartiere zunehmend an Gewicht. In diesem Zusammenhang müssen sich insbesondere die deutschen Hochschulen ihrer zweifachen Verantwortung als Gebäudebetreiber und Bildungsstätten stellen. Mit ihren stadtähnlichen Campusarealen als Reallaboren und der universitätseigenen Interdisziplinarität der Fachgebiete bieten die deutschen Hochschulen ein besonders großes Innovations- und Vorbildpotenzial für die Entwicklung und Erprobung zukunftsweisender Energiekonzepte. Die Optimierung der stadtquartierähnlichen Gebäudebestände erfordert eine große technische Bandbreite innovativer Lösungen Zudem findet ihre Umsetzung in der Hochschullandschaft zwischen Lehre und Forschung der Bildungsrepublik Deutschland einen idealen Resonanzboden für die Multiplikation.

Als eine der ersten deutschen Universitäten hat die TU Braunschweig im Rahmen eines dreijährigen, interdisziplinär bearbeiten Forschungsprojektes „EnEff Campus:*blue*MAP TU Braunschweig“ einen energetischen Masterplan mit einem mehrdimensionalen Umsetzungskonzept zur energetischen Optimierung des Campus als Stadtquartier entwickelt.

Um den Anspruch der wissenschaftlichen Einrichtungen bei der Planung und Erarbeitung innovativer Konzepte zu dokumentieren, wurden die politisch vorgegebenen Teilziele, z.B. für die Reduzierung von CO2-Emissionen bis 2020, verdoppelt und Visionen für eine nachhaltige Energieversorgung des Campus bis 2050 entwickelt.

Das Anschlussvorhaben „EnEff Campus 2020“ arbeitet an der konkreten Umsetzung und wissenschaftlichen Begleitung dieses Masterplans. Die TU Braunschweig nutzt ihren Campus als Reallabor für die Entwicklung übertragbarer Prozesse, Werkzeuge und Methoden, und erfüllt somit den Anspruch an die deutschen Hochschulen als ideale Katalysatoren und Multiplikatoren für Innovationen.

2.1 Gesamtziele des Forschungsvorhabens

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 Folgeprojektes „EnEff Campus 2020“ ist es, sich dieser Aufgabe zu stellen und die gegebenen Potentiale aus der ersten Phase 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 m² 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 der 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 CO2-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. Durch die Evaluierung der Ergebnisse im „Real-Life-Lab Campus TUBS“ und die Umsetzung dieser im Campus-Quartier findet ein kontinuierlicher Austausch bei der Entwicklung, Umsetzung und Erprobung innovativer Technologien statt.

Die Kombination „anspruchsvolle Ziele - innovative Maßnahmen - konkrete Umsetzung“ bildet den optimalen Resonanzboden für die Energieforschung zur Multiplikation der Energiewende im Gebäudebestand. Damit wird die TU Braunschweig zum wichtigen Impulsgeber für die Energiewende in der Stadt und zum Vorreiter der energetischen Optimierung von Hochschulen in Deutschland.

2.2 Bezug zu den Förderpolitischen Zielen

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich hohe Klimaschutzziele gesteckt und im Energiekonzept der Bundesregierung verankert. Dabei werden Teilziele benannt und Zeitschiene bis 2050 abgesteckt. Im ersten Schritt soll bis 2020 u.a. der Wärmebedarf der Gebäude um 20% reduziert werden. Dafür sind für den Gebäudebestand Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik beschrieben und der verstärkte Einsatz von erneuerbaren Energien vorgesehen. Bis 2050 soll durch diese Maßnahmen ein klimaneutraler Gebäudebestand mit einem sehr geringen Energiebedarf und einer überwiegenden Deckung aus erneuerbaren Energien erreicht werden.

Das 6. Energieforschungsprogramm reagiert auf diese Herausforderungen mit Forschungsschwerpunkten neben der Integralen Planung von Neu- und Bestandsbauten, innovativen Technologien und Betriebsoptimierung auch mit der Erforschung von Entwicklungspotenzialen auf Stadt- und Quartiersebene. Im Bereich der Nicht-Wohngebäude bieten die deutschen Hochschulen dabei ein besonders großes Innovations- und Vorbildpotenzial, wie es auch in der EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden formuliert wird.

Den Hochschulen in Deutschland kommt deshalb eine Schlüsselrolle zur Erreichung der Klimaschutzziele zu. Sie sind nicht nur für Lehre und Forschung verantwortlich, sondern mit ihrem umfangreichen und heterogenen Gebäudebestand sowie ihren Neubauten auch selbst dazu prädestiniert, ein Lernlabor für ´Energieoptimiertes Bauen und Betreiben´ (EnOB/ EnBop/ EnEff:Stadt, etc.) zu bilden. Unter diesem Aspekt ist das Forschungsprojekt EnEff Campus 2020 der ideale Katalysator und Multiplikator für Innovationen.

2.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Mit einem interdisziplinär aufgestellten Forschungsteam erfolgt der Aufbau einer Technologieforschungsplattform für hochinnovative integrale Entwicklungen sowie die wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung des mehrdimensionalen Konzepts aus der ersten Phase. Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele sind:

Kurzfristige Ziele

- Umsetzung von Maßnahmenpaketen des energetischen Masterplans
- Verankerung der Ziele in den Planungsprozessen des Baumanagements der TU BS
- Kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung forschungsrelevanter Themen
- Ausbau eines Energie- und Qualitätsmanagements und Begleitung der Implementierung in den Prozessen
- Durchgängiges Monitoring der Maßnahmen zur Erfolgskontrolle
- Identifikation gering-investiver Maßnahmen durch Entwicklung strategischer Prinzipien für große Liegenschaften
- Evaluierung von Energiecoachings und Nutzerworkshops zur Erschließung und Bewertung des Nutzereinflusses und Quantifizierung der energetischen Relevanz
- Überprüfung und Validierung der entwickelten Werkzeuge und Methoden
- Entwicklung von Konzepten zur Übertragbarkeit auf andere Campusstandorte Quartiersstrukturen/ Vorbereitung der jeweiligen Anwendung zur Validierung
- Implementierung und Fortschreibung der entwickelten EnEff Campus Rechenwerkzeuge
- Formulierung des Ziels: Campus TU Braunschweig als Energie- u. Forschungslabors

Mittelfristige Ziele

- Wissenschaftlichen Begleitung von Sanierung und Neubau von Hochschulgebäuden nach den entwickelten Standards und Methoden, Qualitätssicherung als wissenschaftliche Begleitung beim Aufbau und der Nutzung von automatisierten Strukturen zum Monitoring
- Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Übertragung auf andere Quartiersstrukturen mit wissenschaftlicher Begleitung
- Erarbeitung von Konzepten für alternative Energieversorgungssysteme auf dem Campus und angrenzenden Stadtgebieten in Kooperation mit dem örtlichen Energieversorger BS | Energy
- Ersatz konventioneller Systeme als Chance für die Integration hocheffizienter Technologien/ Erstellung von Studien
- Verankerung des Campus der TU-BS als interdisziplinäre Energie- und Forschungsplattform/ Korrelation mit dem Forschungsschwerpunkt "Stadt der Zukunft" an der TU-BS

Langfristige Ziele

- Entwicklung von Strategien für den Campus unter Einbindung des Energie- und Forschungslabors
- Erforschung städtischer Strukturen für eine klimaneutrale Versorgung

- Nutzung der Kapazitäten und Disziplinen an der TU-BS zur Etablierung des Campus als Energie- und Forschungslabors/ Simulation und Abbildung von Zukunftsszenarien
- wissenschaftliche Begleitung und Justierung der strategischen Konzeptentwicklung einer nachhaltigen Energieversorgung für Wärme-, Strom- und Kälteerzeugung unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien
- Überprüfung des Ausbaus erneuerbarer Strukturen auf der Ebene der Metropolregion

3 STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

3.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Zum Wintersemester 2014/2015 waren laut HIS in Deutschland 425 Hochschulen statistisch erfasst: 107 Universitäten, 215 Fachhochschulen, 52 Kunsthochschulen und 51 Pädagogische, Theologische sowie Verwaltungshochschulen. Der Jahres-Endenergieverbrauch aller Standorte liegt nach Schätzungen der HIS bei insgesamt ca. 7.000 GWh/a. Die Kosten von rund 750 Mio. €/a werden voraussichtlich in den nächsten Jahren weiter steigen und belasten so die Gesamtbudgets der Hochschulen. Daten zum Energieverbrauch einzelner Bildungsgebäude lassen sich auf Grundlage der bereits durchgeführten Projekte und vorliegender Projektergebnisse aus der ersten Phase „EnEff Campus“ auf erhebliche Energieeinsparpotentiale schließen. Weiterhin werden Online-Befragungen zur Konkretisierung von Bedarfs- und Verbrauchsszenarien durchgeführt.

Durch die interdisziplinäre Bearbeitung hat das Campusprojekt ein Vorbildcharakter und lässt sich aufgrund seiner übertragbaren städtischen und gebäudetypischen Strukturen als Pilot- und Demonstrationsprojekt mit großem Multiplikationspotenzial identifizieren. Insbesondere ist das Gebäudemanagement der TU Braunschweig mit der Analyse und Erfassung auf der Basis einer hervorragenden Datenlage zum Energieverbrauch von über 500 Messstellen prädestiniert, als Leuchtturmprojekt zu fungieren und im Rahmen der umsetzungsorientierten Phase den Erfolg durch messbare Werte darzustellen und zu belegen.

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 Folgeprojektes „EnEff Campus 2020“ ist es, sich dieser Aufgabe zu stellen und die gegebenen Potentiale aus der ersten Phase durch einen intelligenten Einsatz und Vernetzung neuer Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz auf Quartiersebene systematisch zu nutzen und umzusetzen.

Des weiteren werden die in der ersten Phase entwickelten Werkzeuge zur Ermittlung des Sanierungsbedarfs sowie zur Abschätzung und Bewertung der energetischen Auswirkungen und notwendigen Investitionen auf Gebäude- wie auf Campusebene in der Umsetzungsphase (Phase II) erprobt und zur tatsächlichen Anwendung gebracht. Geprüft wird, ob die entwickelten Werkzeuge sich in gleicher Weise für die Sanierung von z.B. größeren öffentlichen Liegenschaften oder Stadtquartieren nutzen lassen.

4 AUSGANGSSITUATION

Am Beispiel des innerstädtischen Campus der TU Braunschweig wurden im Forschungsprojekt „EnEff Campus:*blue*MAP TU Braunschweig“ (Laufzeit 04/2012 – 03/2015, Förderkennzeichen: 03ET1004B) beispielhaft Planungs- und Optimierungsmethoden zur Verbesserung der Energieeffizienz von Stadtquartieren entwickelt und erprobt. Aufbauend auf der evaluierten Ausgangssituation (Flächen-, Energie-, Kosten- Kennzahlen etc.) werden Szenarien zur Reduzierung des Energieverbrauchs auf Gebäudeebene, dem rationellen Energieeinsatz und der Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf dem Hochschulcampus unter ökologischen und ökonomischen Randbedingungen untersucht.

Die fachliche Bearbeitung der Schwerpunktthemen: Städtebau, Gebäude, Energieversorgung, Mobilität und Nutzerverhalten fand durch ein interdisziplinäres Forschungsteam aus Instituten der TU Braunschweig und externen Projektpartnern, wie beispielsweise dem lokalen Energieversorger, statt. Die Einbindung in eine hochschulübergreifende Perspektive wurde durch die Hochschulentwicklung (HIS-HE) hergestellt.

Mit Bezug auf das Energiekonzept der Bundesregierung und das 6. Energieforschungsprogramm wurde seit dem 01.04.2012 in einem Zeitraum von 36 Monaten ein integraler energetischer Masterplan erstellt. Um den Anspruch der wissenschaftlichen Einrichtungen bei der Planung und Erarbeitung innovativer Konzepte zu dokumentieren, wurden die politisch vorgegebenen Teilziele, z.B. für die Reduzierung von CO_2 Emissionen bis 2020, verdoppelt und Visionen für eine nachhaltige Energieversorgung des Campus bis 2050 entwickelt.

Die Ergebnisse zeigen einen konkreten Entwicklungsplan für den Campus der TUBS bis 2020, der mit der Hochschulleitung und den weiteren verantwortlichen Institutionen auf Landesebene zu einem konkreten Umsetzungsplan unter Berücksichtigung technischer, finanzieller und administrativer Aspekte entwickelt wird. Die finanzielle Umsetzung ist auf Landesebene in Abstimmung.

Die darüber hinaus dargestellten Szenarien für die langfristige Perspektive 2050 bildet die Grundlage für eine dauerhaftes „Commitment“ der Hochschule für eine nachhaltige Campusentwicklung.

Im Folgenden sind die Einzelmaßnahmen zusammengestellt, die im Rahmen des Projekts „EnEff Campus:*blue*MAP TU Braunschweig“ als Teilaspekt für den Masterplan entwickelt wurden:

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Kosten	
Gebäudehülle	Energetische Sanierung der Gebäudehülle nach EnEV 2009 für alle relevanten Gebäude auf dem Campus der TU BS.	Investitionskosten: Kosteneinsparung: Amortisation: Primärenergie: CO_2-Emission:	120 Mio.€ 1,6 Mio. €/a >20 a -9% -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 Nord-Campus	Investitionskosten: Kosteneinsparung: Amortisation: Primärenergie: CO_2-Emission:	590 T € 320 T €/a 2 bzw. 6 Jahre -3% -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: Einsparung Strom: Kosteneinsparung: Amortisation: Primärenergie: CO_2-Emission:	2.500 €/kWp 2.590 MWh/a 480 T €/a 10-12 a -6% -5%
Flächeneffizienz	Reduzierung der vorhandenen Büroarbeitsflächen von ca. 60.000 m² bzw. 15m²/Person (Bewertung gem. DIN V 18599-10 als geringe bis mittlere Belegung) auf ca. 10 m²/Person (hohe Belegung). Dies entspricht einer Büroflächenreduzierung von ca. 20.000 m².	Investitionskosten: Einsparung Wärme: Einsparung Strom: Kosteneinsparung: Primärenergie: CO_2-Emission:	- 2.680 MWh/a 670 MWh/a 436 T €/a -3% -3%
Gebäudetechnik	Energetische Optimierung aller vorhandenen raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) >1.000 m³/h.	Investitionskosten: Einsparung Strom: Kosteneinsparung: Amortisation: Primärenergie: CO_2-Emission:	4 Mio. € 5.950 MWh/a 1,1 Mio. €/a 2,5 a -14% -12%
Beleuchtung	Austausch der installierten Beleuchtung in allen Verkehrsflächen (Flure und Treppenhäuser), Büroflächen und Laborflächen, Einsatz von LED Beleuchtung.	Investitionskosten: Einsparung Strom: Kosteneinsparung: Amortisation: Primärenergie: CO_2-Emission:	2,57 Mio. € 3.050 MWh/a 570 T €/a 3 a -8% -6%
Tech. Ausstattung	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: Einsparung Strom: Kosteneinsparung: Amortisation: Primärenergie: CO_2-Emission:	1 Mio. € 950 MWh/a 175 T €/a 5 a -3% -2%
Nutzerverhalten	Energieeinsparungen mittels verschiedener Maßnahmenarten: Partizipation/Interaktion mit den Nutzern; Information (Kampagnen) und Feedback (z.B. über den Energie-Verbrauch)	Investitionskosten: Kosteneinsparung: Primärenergie: CO_2-Emission:	120 T € 900 T €/a -8% -7%
Mobilität	Einführung eines Mobilitätsmanagements mittels systemisch integrierter Maßnahmen zur Reduzierung, Bündelung oder Verlagerung von Verkehrsaufkommen.	Investitionskosten: Kosteneinsparung: Primärenergie:	267 T €/a 655 T €/a -25%

Abbildung 1 Einzelmaßnahmen im Masterplan EnEff Campus:blueMAP TU Braunschweig

Aus den vorangestellten, beschriebenen Einzelmaßnahmen wurden für die Themenbereiche "Gebäude" und "Mobilität" jeweils drei verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung des Projektziels „Reduzierung der Primärenergie um -40%“ für den Gesamt-Campus abgeleitet. Die Höhe der durch die Umsetzung der Maßnahmen prognostizierten Senkung des Primärenergieverbrauchs (Status 2011) ermöglicht einen Vergleich der einzelnen Szenarien. Das Ergebnis ist ein mehrdimensionales Umsetzungskonzept für die nächsten vier Jahre, das im Folgeprojekt „EnEff Campus 2020“ die Grundlage bilden wird für

1. die intensive praktische Umsetzung der energetischen Optimierung des Campus bis 2020 und
2. begleitende präzise Variantenuntersuchungen für das langfristige Ziel eines weitgehend CO_2-neutralen Campus und die Entwicklung langfristiger Strategien.

Die Einzelmaßnahmen des Bearbeitungsschwerpunkts „Städtebau“ sind direkt in der Maßnahme Flächeneffizienz bzw. indirekt in den Szenarien „Gebäude“ reflektiert.

4.1.1 Szenarien „Gebäude“

Auf Gebäudeebene wurden aus den in Abbildung 1 beschriebenen Einzelmaßnahmen folgende Szenarien abgeleitet:

Tabelle 1 Ableitung Szenarien „Gebäude“

Maßnahmen	**Szenario 01** (alle Einzelmaßnahmen)	**Szenario 02**	**Szenario 03** kurzfristig umsetzbar
Gebäudehülle	X	-	-
Betriebsoptimierung RLT-Anlagen	X	X	X
Beleuchtung	X	X	X
Technische Ausstattung	X	X	X
PV	X	X	-
BHKW	X	-	-
Flächeneffizienz	X	X	-
Nutzer	X	X	X

Szenario 01 beinhaltet sämtliche untersuchten Maßnahmen, Szenario 02 setzt sich aus Maßnahmen zusammen, die kurz- bis mittelfristig umsetzbar sind und Szenario 03, das Minimal-Szenario, enthält kurzfristig umsetzbare, gering-investive Maßnahmen.

In Abbildung 2 werden die drei verschiedenen Szenarien unter Berücksichtigung des Projektziels „Reduzierung der Primärenergie um 40%“ für den Gesamt-Campus dargestellt.

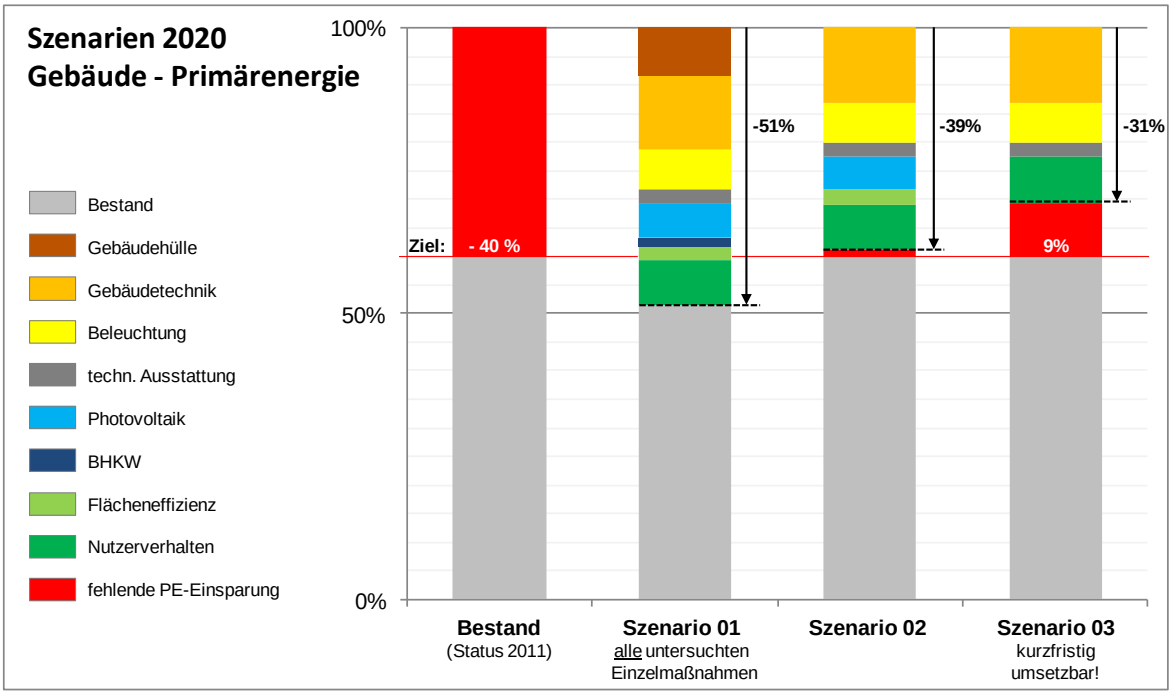


Abbildung 2 Szenarien 2020 „Gebäude“ – Primärenergieeinsparung [IGS]

In Szenario 01 wird das Projektziel „Reduzierung der Primärenergie um -40%“ mit einer Gesamteinsparung von 51% deutlich überschritten. In Szenario 02 wird das Projektziel mit einer Einsparung von 39% annähernd erreicht, obwohl auf die kostenintensiven Maßnahmen „Gebäudehülle“ und „BHKW“ verzichtet wird. In Szenario 03 wird der Zielwert nicht erreicht, jedoch kann über diese kurzfristig umsetzbaren Maßnahmen, wie Betriebsoptimierung der RLT-Anlagen, Austausch der Beleuchtung in den Verkehrszonen, Austausch von Altgeräten an Kühl- und Gefrierschränken sowie Einsparungen über das Nutzerverhalten der Primärenergieverbrauch um 31% reduziert werden.

In Abbildung 3 werden die drei Szenarien unter Berücksichtigung des Projektziels „Reduzierung der CO_2-Emissionen um -40%“ für den Gesamt-Campus dargestellt.

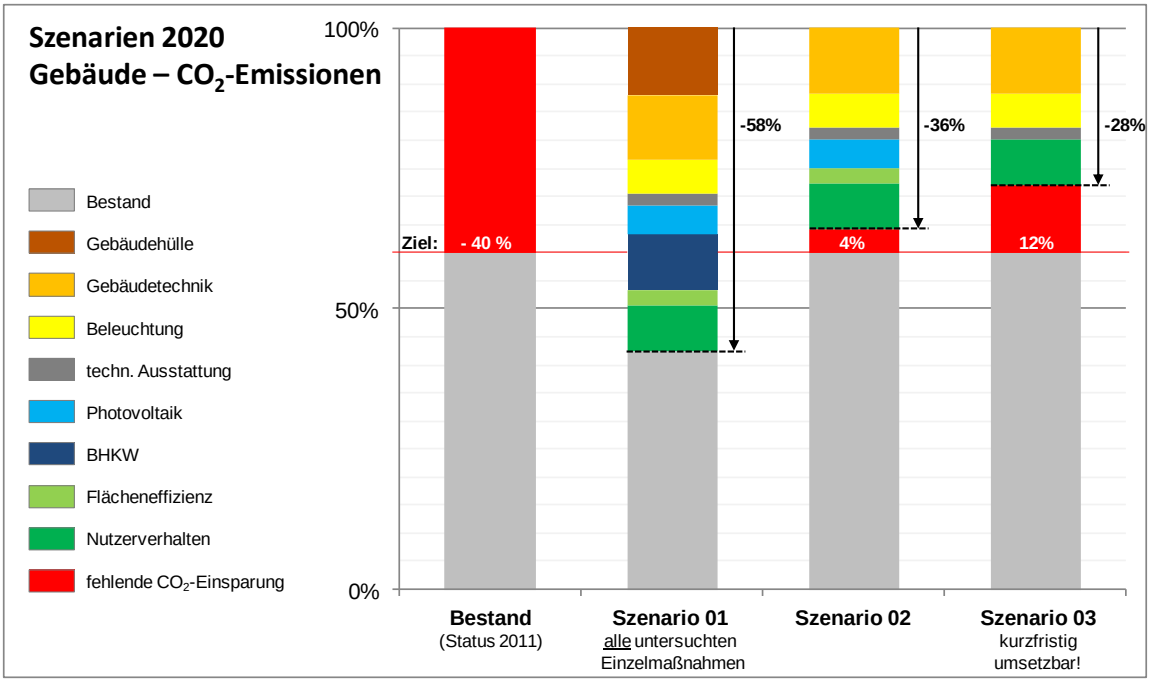


Abbildung 3 Szenarien 2020 „Gebäude" – Einsparung CO_2-Emissionen [IGS]

Über Szenario 01 kann mit einer Einsparung von 58% das Projektziel einer Reduzierung der CO_2-Emissionen um -40% bis 2020 erreicht werden. In Szenario 02 und 03 wird der Zielwert mit 36% bzw. 28% nicht erreicht.

4.1.2 Szenarien „Mobilität"

Im Bereich Mobilität wurden Maßnahmen zur Energieeinsparung und Kostenreduzierung durch Verkehrsvermeidung und -verlagerung untersucht. Dazu wurden einerseits punktuelle Maßnahmen in den Bereichen Mitarbeitermobilität, Dienstreisen und Dienstfahrzeuge entwickelt. Diese sehen im Detail die Einführung von Home-Office-Tagen, aber auch die Bereitstellung von Videokonferenzräumen und E-Fahrzeugen vor. Auch die Vorgabe eines Mindestbestellwertes dient in diesem Zusammenhang der Senkung von Kosten, indem durch die Bündelung von Bestellungen Transportenergie eingespart wird.

Neben den punktuellen Maßnahmen wurden andererseits systemisch integrierte Maßnahmen im Bereich des Mobilitätsmanagements erörtert, die in Öffentlichkeitsarbeit, Push- und Pull-Maßnahmen unterteilt werden können. Diese sollen den Umstieg vom PKW auf andere Verkehrsmittel bzw. auf Fahrgemeinschaften fördern. Zu solchen Maßnahmen zählen beispielsweise Jobtickets, Carsharing, eine Mietradflotte, ein Online-Mobilitätsportal, Aktionstage oder auch eine interne Mitfahrbörse. Die Einführung der Maßnahmen soll fortlaufend mittels qualitativer Interviews, Workshops und Umfragen evaluiert werden, sodass eine kontinuierliche Adaptierung der Maßnahmen gewährleistet wird. Um den Bedürfnissen der Nutzer gerecht zu werden, benötigt Mobilitätsmanagement ein hohes Maß an Flexibilität.

Im Folgenden werden die Maßnahmenpakete noch einmal stichwortartig zusammengestellt:

1 - Mobilitätsmanagement

Systemisch integrierte Maßnahmen

Förderung von ÖPNV, Fahrradverkehr, Fahrgemeinschaften

Öffentlichkeitsarbeit

Pull-Maßnahmen

Push-Maßnahmen

2 - Punktuelle Maßnahmen

Dienstreisen: Videokonferenzen, Beratung

Bestellungen: Mindestbestellwert

Dienstfahrzeuge: Elektrofahrzeuge

Daraus wurden drei Szenarien mit zunehmendem Umfang der einzelnen Maßnahmenbündel zusammengestellt. Das bedeutet in der Konsequenz, dass Sach- und Personalkosten von Szenario 01 zu Szenario 03 steigen. Die Szenarien beziehen sich auf verschiedene Maßnahmenbündel der im Vorfeld aufgezeigten Einzelmaßnahmen, die wie folgt gegliedert sind:

Szenario 01	Szenario 02	Szenario 03
Öffentlichkeitsarbeit	Öffentlichkeitsarbeit	Öffentlichkeitsarbeit
• Online-Mobilitätsportal • Öffentliche Kommunikation	• Online-Mobilitätsportal • Öffentliche Kommunikation • Aktionstage	• Online-Mobilitätsportal • Öffentliche Kommunikation • Aktionstage • Change-Agenten Mobilität
	Pull-Maßnahmen	Pull-Maßnahmen
	• Jobtickets • Carsharing • Interne Mitfahrbörse • Fahrradinfrastruktur	• Jobtickets • Carsharing • Interne Mitfahrbörse • Fahrradinfrastruktur • Fahrradstellplätze an Haltestellen • Mietradflotte
		Push-Maßnahmen
		• Parkraumbewirtschaftung

Abbildung 4 Maßnahmenpakete Verkehr und Mobilität [ITD]

In Abbildung 5 werden die drei verschiedenen Szenarien für den Bereich Mobilität unter Berücksichtigung des Projektziels „Reduzierung der Primärenergie um -40%“ für den Gesamt-Campus dargestellt.

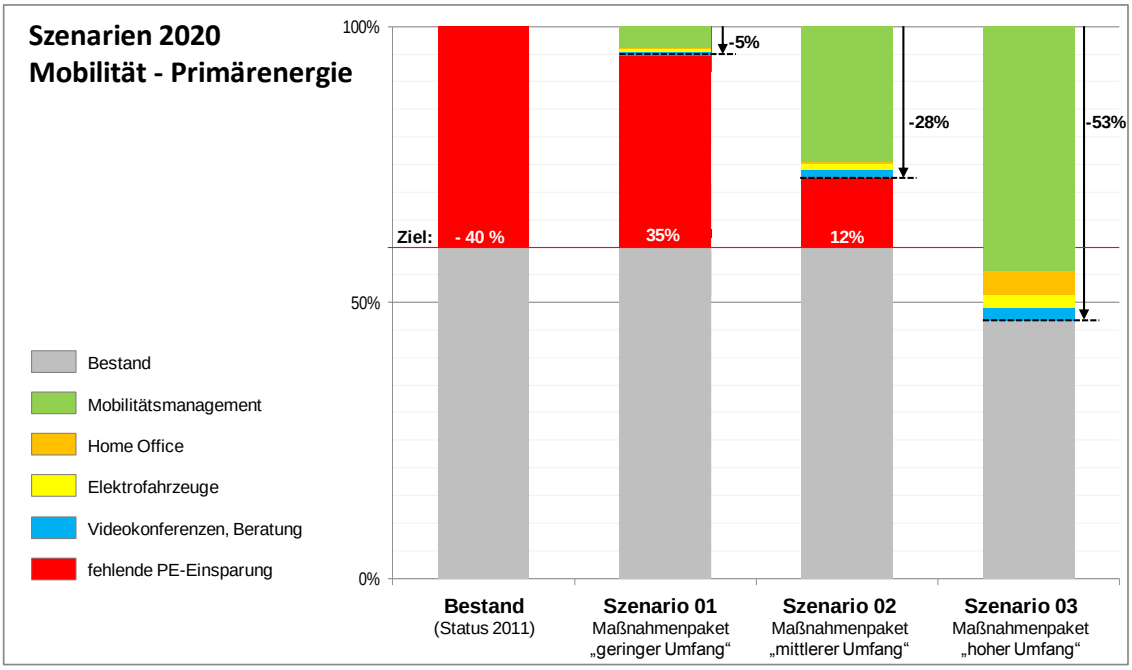


Abbildung 5 Szenarien 2020 „Mobilität“ – Primärenergieeinsparung [IGS]

In Abbildung 6 werden die Szenarien unter Berücksichtigung des Projektziels „Reduzierung der CO_2-Emissionen um -40%“ für den Gesamt-Campus dargestellt.

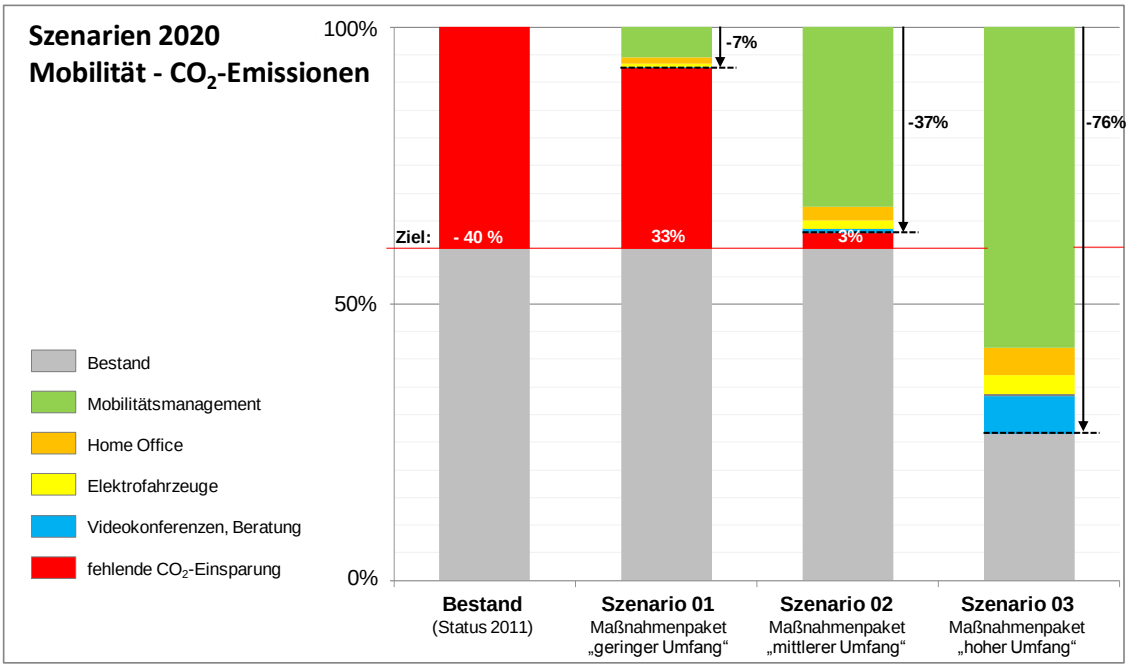


Abbildung 6 Szenarien 2020 „Mobilität“ – CO2-Emissionen [IGS]

Die mit Abstand größten Einsparungen sind durch das Mobilitätsmanagement zu erwarten, jedoch ist zu beachten, dass in diesem Maßnahmenpaket viele Einzelmaßnahmen zusammengefasst sind. Durch ein umfassendes Mobilitätsmanagement könnten bereits über 40% der für Mobilität benötigten Energie eingespart werden. Bei Einführung regelmäßiger Home-Office Tage können auch mit dieser Maßnahme mit geringem finanziellem Aufwand hohe Einsparungen erzielt werden. Das Einsparpotenzial der Maßnahmen im Bereich Dienstreisen und Dienstfahrzeuge liegt ähnlich hoch, jedoch sind die Investitionen für den Kauf von Elektrofahrzeugen deutlich höher. Die Einsparungen durch den Mindestbestellwert sind im Vergleich zu den übrigen Maßnahmen zu vernachlässigen, da eine Einführung große organisatorische Herausforderungen mit sich bringt.

4.2 Anschlussvorhaben

Mit dem Folgeprojekt „EnEff Campus 2020“ startete im September 2015 die TU Braunschweig mit der Umsetzungsphase des Masterplans 2020. In enger Abstimmung zwischen der Hochschulleitung, der Landesebene, den beteiligten Fachinstituten und dem lokalen Energieversorger wird in den kommenden 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_p PV-Anlagen

BHKWs

- Dezentrale Versorgung mit mehr als 750 kW KWK
- Reduzierung zentraler 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

Damit wird die TU Braunschweig zum wichtigen Impulsgeber für die Energiewende in der Stadt und zum Vorreiter der energetischen Optimierung von Hochschulen in Deutschland.

5 AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DES ARBEITSPLANS

Für die Umsetzung des in der ersten Phase entwickelten integralen energetischen Masterplans wurden zwei Schwerpunktthemen gewählt:

Schwerpunkt I - Demonstration
Kombination aus einzelnen Strategien, die die energetische Optimierung des Campus bis 2020 als Demonstrationsprojekt intensiv in der Praxis vorantreiben soll

Schwerpunkt II - Technologieforschungsplattform „Real-Life-Lab Campus TUBS“
Aufbau einer Technologieforschungsplattform für hochinnovative integrale Entwicklungen unter Nutzung der einmaligen Datenverfügbarkeit

5.1 Aufbau und Methodik

Für die Umsetzung werden innerhalb der beiden Schwerpunktthemen folgende Strategien gewählt:

Schwerpunktthema I – Demonstration

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 m² 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:

1. Neubau, Sanierung, Instandhaltung
2. Energieversorgung
3. Nutzermotivation und –information
4. 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 CO2-neutralen Campus in eine präzisere Variantenuntersuchung überführt und entsprechende langfristige Strategien entwickelt.

Die einzelnen Strategien werden auf einander 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.

Abbildung 7 Umsetzung [IGS]

5.2 Schwerpunktthema II – Technologieforschungsplattform „Real-Life-Lab Campus TUBS“

Im zweiten Schwerpunkt wird unter Nutzung der einmaligen Datenverfügbarkeit an der TU Braunschweig eine Technologieforschungsplattform "Real-Life-Lab Campus TU Braunschweig" mit vernetzten Technologieforschungsstrategien für hochinnovative integrale Entwicklungen aufgebaut. Nachdem im vorangegangenen Projekt der Energieverbrauch auf Gebäudeebene und teilweise auf Systemebene erfasst worden ist, wird im Projekt Campus II diese Technologieplattform für die Nutzung von Gebäudedaten zur Optimierung der Gebäudeperformance entwickelt. Dabei werden folgende Schwerpunkte gesetzt:

1. Transparenz des Energieverbrauchs (Signalanalyse)
2. Intelligente Steuerung (Internet der Dinge)
3. Automatisiertes Monitoring (Zustandsautomaten)

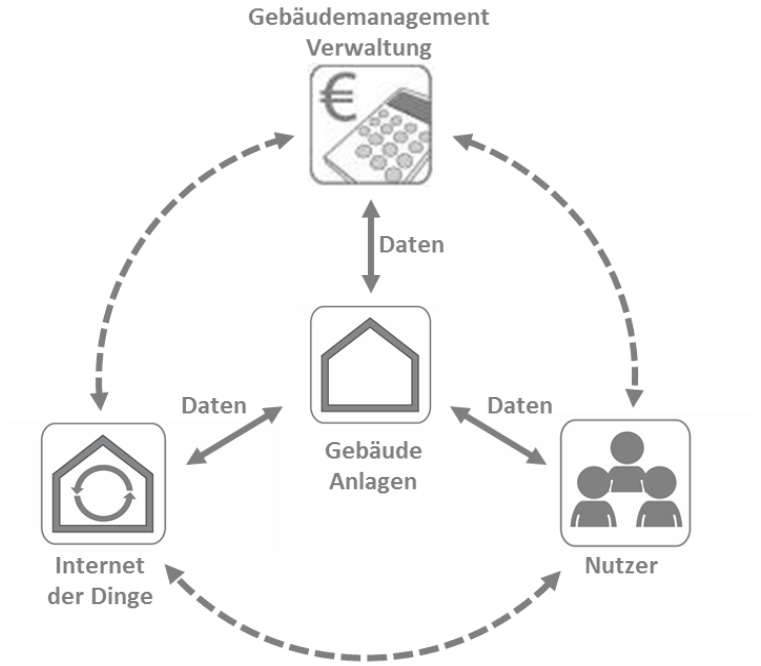


Abbildung 8 Integrales Technologiekonzept „Real-Life-Lab Campus TUBS“ [IGS]

Durch die Evaluierung der Ergebnisse im „Real-Life-Lab Campus TUBS“ 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.

Um die gesamte Bandbreite der relevanten Themenstellungen für die Umsetzung des ganzheitlichen energetischen Masterplans und den Aufbau eines Energie- und Forschungslabors zu bearbeiten, bildet die TU Braunschweig wie bereits im Projekt EnEff Campus I ein interdisziplinäres Forschungsteam aus Fachinstituten verschiedener Fakultäten.

Zudem wird in die Bearbeitung auch die Hochschulleitung, das Gebäudemanagement, das Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) Niedersachsen sowie der örtliche Energieversorger eingebunden.

5.3 Projektdaten und Fördergeber

Tabelle 2 Projektdaten

Projekttitel	EnEff Campus 2020 Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung und Monitoring
Projektnummer	03ET1307A
Projektförderung	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Projektträger	PTJ - Projektträger Jülich - Forschungszentrum Jülich GmbH Ansprechpartner: Frau Doris Laase
Projektlaufzeit	01.09.2015 – 31.08.2018 (kostenneutrale Verlängerung bis 31.03.2019)
Förderung	1.534.629 € (Förderquote 92%)
Ausführende Stelle	Technische Universität Braunschweig Institut für Gebäude- und Solartechnik Univ.- Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch Mühlenpfordtstr. 23 D - 38106 Braunschweig Tel: 0531 / 391 3555, Fax: 0531 / 391 8125 Internet: www.tu-braunschweig.de/igs E-Mail: igs@tu-bs.de

Die Bearbeitung erfolgt unter der Leitung und Koordination des IGS zusammen mit dem TU-Forschungsteam und externen Projektpartnern.

Um den Projektablauf effektiv und zeitlich straff zu gewährleisten, wurde mit den Fachinstituten und der Verwaltung konkrete Zieldefinitionen vereinbart und eine Schnittstelle zum Präsidium der Hochschule eingerichtet.

Zum Austausch der Teilergebnisse und weiterem möglichen Abstimmungsbedarf finden je Quartal Projekttreffen mit allen Beteiligten statt.

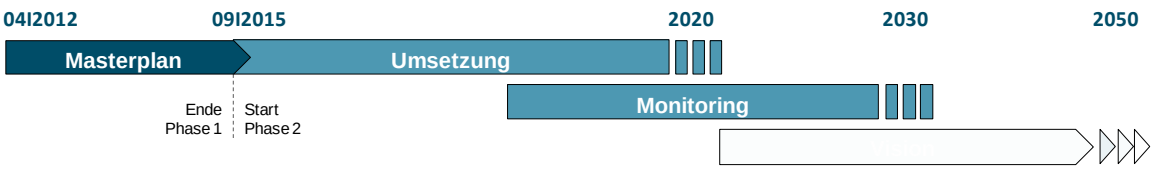


Abbildung 9 Zeitstrahl Projektablauf [IGS]

5.4 Akzeptanzbewertung TU Braunschweig

Das Präsidium der TU Braunschweig identifiziert sich in besonderer Weise mit dem Pilotprojekt „Energieeffizienter Campus 2020“, da die energetische Masterplanung für die Standortentwicklung des Campus weiter forciert und zielgerichtet vorangetrieben werden kann. Aus diesem Grund beteiligt sich die TU Braunschweig 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 Forschungsteams mit Instituten der TU Braunschweig begrüßt.

Der lokale Energieversorger BS I Energy ist ebenfalls in das Projekt eingebunden. Die bisher erarbeiteten Konzepte zur dezentralen Energieerzeugung auf dem Campusgelände sowie mögliche Betreibermodelle finden positive Resonanz.

Zudem ist das Forschungsprojekt EnEff Campus in der Hochschulöffentlichkeit und auch extern auf großes Interesse gestoßen.

Durch entsprechende Öffentlichkeitsarbeit im Hochschulbereich werden die Mitarbeiter und Studierenden fortlaufend über das Projekt informiert und zur Teilnahme an den verschiedenen Umfragen aufgerufen.

5.5 Wissenschaftliche Projektpartner

Um die gesamte Bandbreite der relevanten Themenstellungen für die Umsetzung des ganzheitlichen energetischen Masterplans und den Aufbau eines Energie- und Forschungslabors zu bearbeiten, bildet die TU Braunschweig ein interdisziplinäres Forschungsteam aus Fachinstituten verschiedener Fakultäten. In die Bearbeitung wird auch die Hochschulleitung, das Gebäudemanagement, das Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) Niedersachsen sowie der örtliche Energieversorger eingebunden.

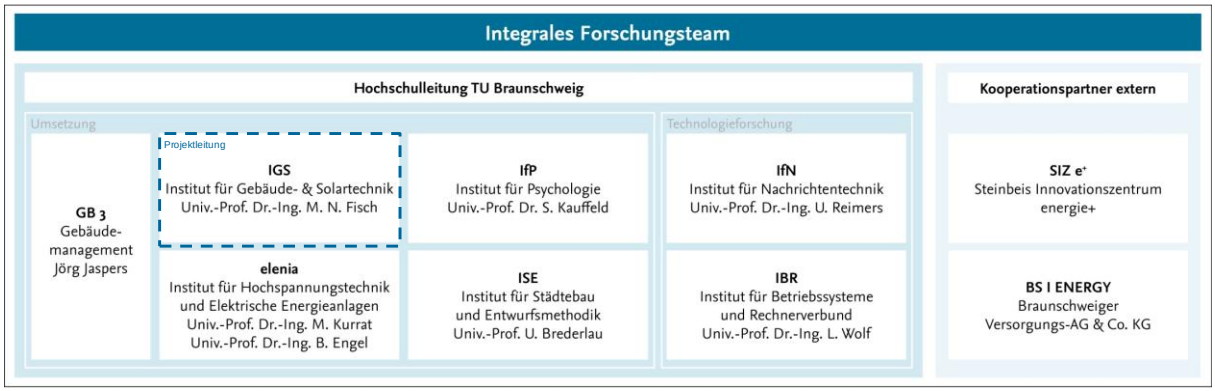


Abbildung 10 Integrales Forschungsteam [IGS]

Tabelle 3 Interdisziplinäres Forschungsteam TU Braunschweig

I	(Teil-) Strategien Demonstrationsprojekt	Bearbeitung TU Braunschweig
1	Kommunikation und Projektkoordination Neubau, Sanierung, Instandhaltung • Energiestandards Neubau und Sanierung • Optimierung in der Instandhaltung	IGS - Institut für Gebäude- und Solartechnik Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch
2	Energieversorgung • Energieerzeugung und -speicherung • Energieverteilung und Netzstabilität • Elektromobilität	elenia - Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
3	Interface „Mensch – Technologie“ • Kommunikationstrainings • Nutzer-Workshops	IfP - Institut für Psychologie Univ.-Prof. Dr. Simone Kauffeld
4	Städtebauliche Entwicklung • städtebauliche Optimierung des Campus TU BS • Nutzung von Synergien durch die Betrachtung angrenzender Stadtgebiete	ISE - Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik Univ.-Prof. U. Brederlau
II	**(Teil-) Strategien Technologieforschung**	
6	Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalanalyse	Institut für Nachrichtentechnik Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers
7	Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge	Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf
8	Teil-Automatisierte Betriebsoptimierung	Steinbeis Innovationszentrum energie+ (SIZ e+) Dr.-Ing. Stefan Plesser

6 TU BRAUNSCHWEIG

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 mit insgesamt 200 Gebäuden, die eine Gesamt-Nettogrundfläche von ca. 400.000 m² einnehmen. Den größten Anteil dieser Gebäude und Flächen beherbergen Verwaltungs- und Büroräume sowie Laboreinrichtungen.

Der jährliche Wärmeenergieverbrauch summiert sich auf ca. 44 GWh, der jährliche Stromverbrauch auf ca. 35 GWh im Basisjahr 2011. Im Bereich Wärme ist dieser Energieverbrauch mit ca. 2.200 Einfamilienhäusern und im Bereich Strom mit ca. 10.000 Einfamilienhäusern vergleichbar.

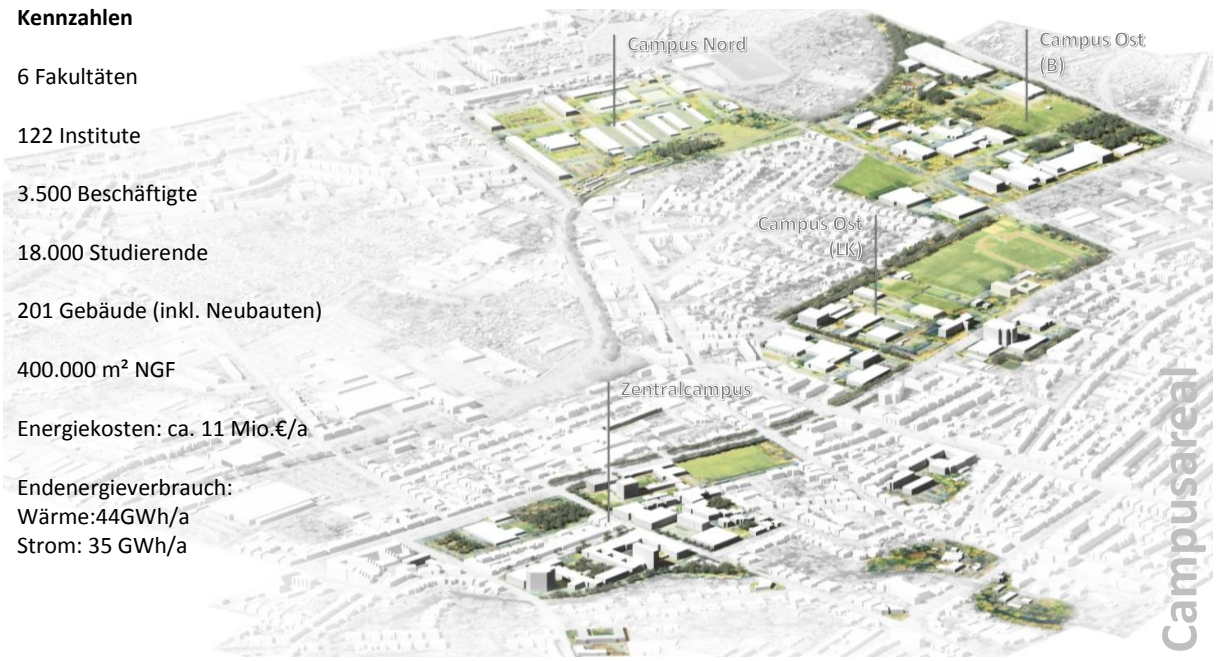


Abbildung 11 Innerstädtische Campus Areale der TU Braunschweig [ISE]

6.1 Energetische Ausgangssituation

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 50er Jahre, Funktionsbauten der 60- 70er Jahre, Neubauten):

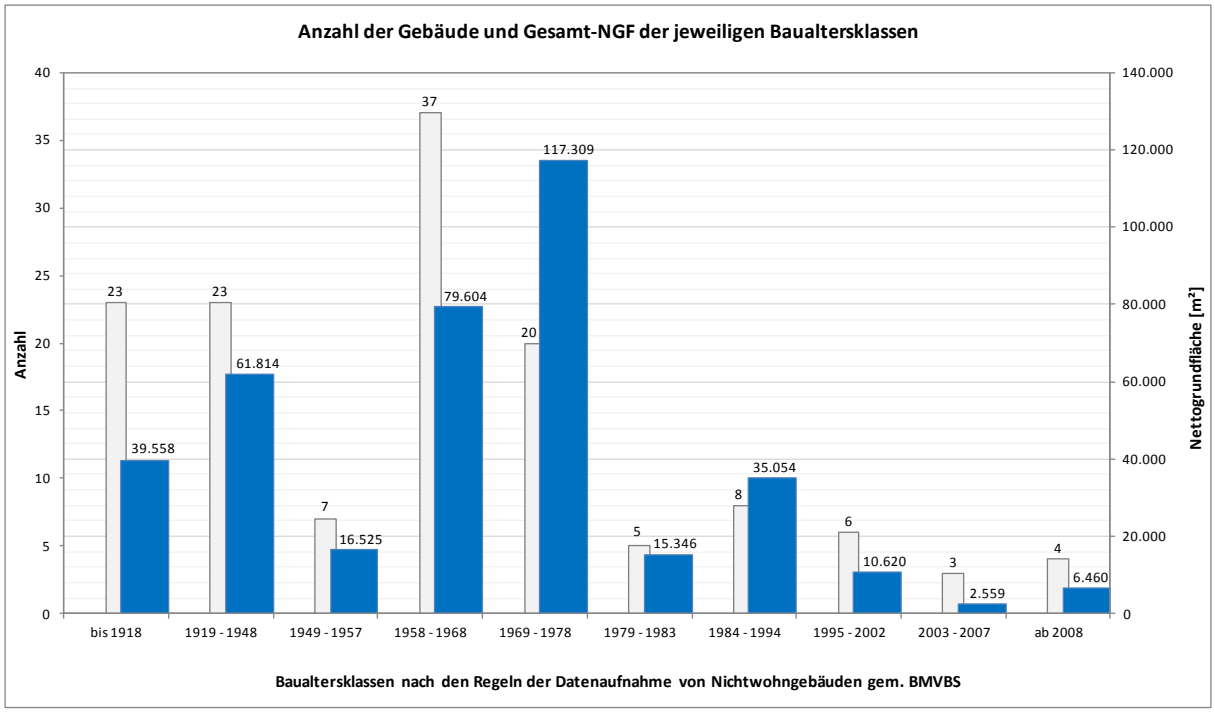


Abbildung 12 Gebäude und NGF nach Baualtersklassen [IGS]

Insgesamt kann der Campus der TU Braunschweig als sehr heterogen bezüglich seiner Gebäudestruktur, der Baualtersklassen [6] sowie der Nutzungen bezeichnet werden. Eine größere Anzahl der Gebäude entstand vor den 1940er Jahren und bildet die historische Baustruktur der Universität ab. Diese Gebäude sind auf ihre Grundfläche bezogen überwiegend kleiner als Gebäude jüngeren Baualters ab den 1960er Jahren und sind mehrheitlich als Bürogebäude bzw. Gebäude für Lehrveranstaltungen in Benutzung. Der überwiegende Anteil an den bestehenden Laborgebäuden wurde in den 1960er bis 1980er Jahren errichtet. Der Zuwachs durch Neubauten erfolgte in den vergangen 20 Jahren nur zu einem geringen Teil auf dem Campusgelände.

Eine Übersicht über die Verteilung der Gebäude nach Nutzung, Baualter und Nettogrundfläche gibt die nachfolgende Abbildung 13.

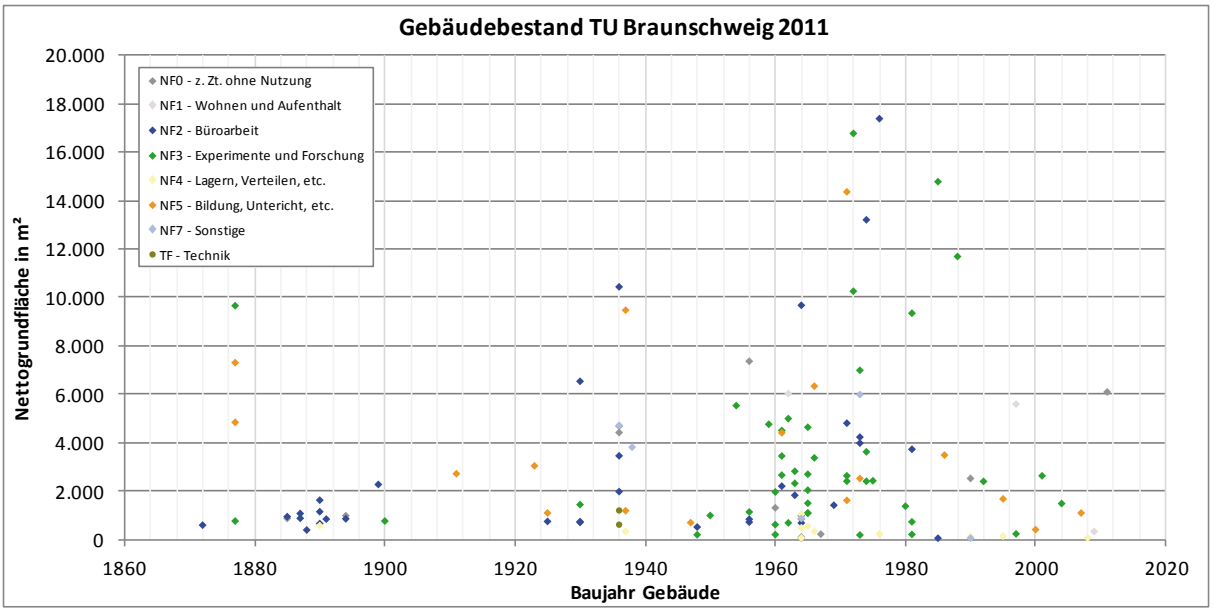


Abbildung 13 ***Aufteilung der Gebäude nach Nutzung, Baualter und Nettogrundfläche [IGS]***

Ein Großteil der Bestandsgebäude wurde in den Baualtersklassen vor Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung (WSVO 1977) errichtet (s. Abbildung 13). Dies deutet auf einen nicht den heutigen Regeln der Technik entsprechenden, niedrigen energetischen Standard hin. Bereits durchgeführte umfangreiche Sanierungsmaßnahmen zur Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäude wurden im ersten Schritt der Auswertungen nicht berücksichtigt. In der nachfolgenden Tabelle werden die Netto-Grundflächen ausschließlich bezogen auf ihre jeweilige Nutzung nach DIN 277-2 [4] dargestellt.

Tabelle 4 ***Gebäudegrundflächen nach Nutzung gem. DIN 277-2 und prozentualer Anteil an der Gesamcampusfläche [IGS]***

Nutzung nach DIN 277-2	**Anteil Netto-Grundfläche (NGF)**	**Anteil Gesamtfläche in %**
NF 0 nicht genutzte Flächen	8.421 m²	2 %
NF 1 Wohnen und Aufenthalt	7.610 m²	2 %
NF 2 Büroarbeit	71.419 m²	18 %
NF 3 Experimente und Forschung	76.345 m²	19 %
NF 4 Lagern, Verteilen	36.375 m²	9 %
NF 5 Bildung, Unterricht	59.708 m²	15 %
NF 6 Heilen und Pflegen	140 m²	0 %
NF 7 Sonstige Nutzflächen	25.889 m²	6 %
TF Technikflächen	30.915 m²	8 %
VF Verkehrsflächen	84.833 m²	21 %
Netto-Grundfläche gesamt	**401.655** m²	**100 %**

Nach Flächenverteilung der Nutzungsgruppen gemäß DIN 277 [4] liegen die Nutzungen der TU Braunschweig zum Großteil in den Bereichen Forschung (NF3), Lehre (NF5) und Bürotätigkeit (NF2). Aus der Betrachtung der Grundflächendaten der Bestandsgebäude, die durch das Gebäudemanagement digital im CAFM raumweise erfasst sind, wird für diese Nutzungen ein Flächenanteil von 52% an der Gesamt-Nettogrundfläche ersichtlich (s. Tabelle 4).

6.2 Datenbasis

Die Infrastruktur der Universität verfügt in der Regel über eine Messstelle je Gebäude und Energieart. Zum Zeitpunkt der Einführung der Energiekostenbudgetierung 2014 waren die TU-Gebäude mit rund 240 Strom- und 170 Wärmemengenzählern ausgestattet. Das Gebäudemanagement betreibt eine umfassende gebäudespezifische, zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Energieverbräuche mit Zuordnung zu Flächen gem. DIN 277, Nutzungen sowie zur zukünftigen Bedarfsentwicklung. Ein zentral eingerichtetes Energiemanagementsystem ermöglicht die Überwachung und Steuerung der gebäudetechnischen Anlagen, die zum Großteil mithilfe von Gebäudeleittechnik in das System integriert sind.

Des Weiteren lassen sich durch gezielte Montage von Zähl- und Messeinrichtungen schnell und einfach Teilenergiekennwerte in den Gebäuden ermitteln, um damit die Optimierung der Energieperformance effektiv zu unterstützen.
Darüber hinaus bietet das Gebäudemanagements durch seine Struktur und Leistungsfähigkeit die Möglichkeit, die im Forschungsprojekt entwickelten Konzepte zur energetischen Sanierung und zum langfristigen Umbau der Energieversorgung umzusetzen.

6.2.1 Energiekosten

Zur Deckung der Energiekosten wendet die TU Braunschweig 5% ihres Gesamtbudgets auf, dabei macht der Hauptkostenpunkt Strom 50% der Gesamtkosten aus.

Im Basisjahr 2011 lagen die Energiekosten für Fernwärme und Strom bei ca. 10,5 Mio. Euro.

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.

Die Entwicklung der Energiekosten von 2011 bis 2018 ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

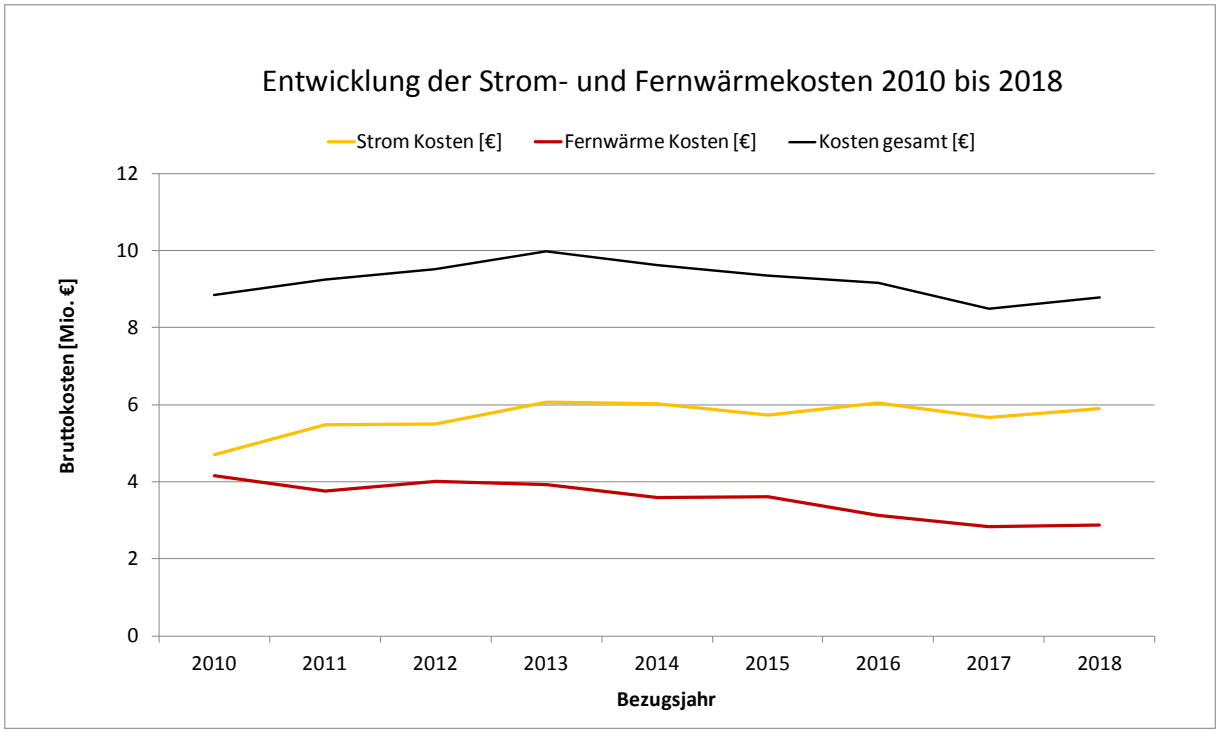


Abbildung 14 Entwicklung der Energiekosten von 2011 bis 2018 [GB3, IGS]

Die Kosten für Strom liegen im Basisjahr bei ca. 5 Mio. Euro und steigen in den Jahren 2013 bis 2018 auf ca. 6 Mio. Euro an. Die Fernwärmekosten reduzieren sich von 2011 bis 2018 um ca. 42%. Aktuell liegen die Energiekosten insgesamt für Wärme und Strom im Jahr 2018 bei ca. 9 Mio. Euro.

6.3 Energiekostenbudgetierung

Aufbauend auf der hervorragenden Datenlage wurden seitens des Gebäudemanagements 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. Alleine durch die Erhöhung der EEG-Umlage wurde das Budget der TU Braunschweig im Jahr 2013 zusätzlich um ca. 740.000 € brutto belastet.

Um diesem Trend entgegenzuwirken, wurde von der Strategiekommission 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 Braunschweig findet eine differenzierte Umlegung der Energiekosten auf die Fakultäten und Institute statt. Jede Kostenstelle mit Flächennutzung hat einen verantwortlichen Energienutzungskoordinator (ENKo) benannt, der als Schnittstelle zwischen dem Gebäudemanagement und der eigenen Einrichtung fungiert. Zudem wurden Anfang 2014 zwei Energieberater (EB) eingestellt,

die die Energienutzungskoordinatoren in alle Fragen zum Thema Energie beraten und bei der Durchführung ihrer Aufgaben unterstützen.

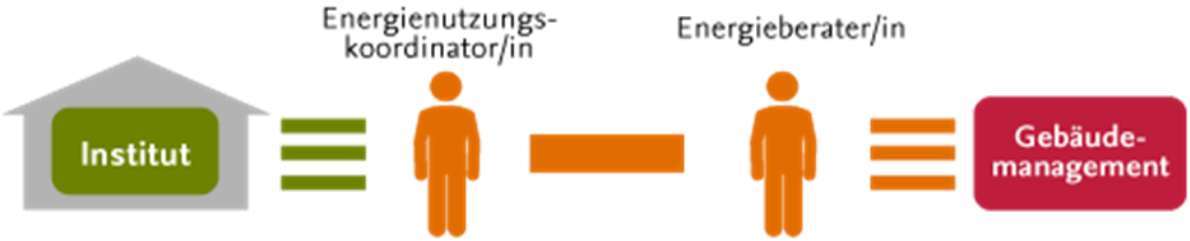


Abbildung 15 Struktur Energienutzungskoordinator / Energieberater (GB3)

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/Einrichtungen die Kostenverantwortung für den Energieverbrauch und können durch ein energiebewusstes Handeln oder durch die Förderung von energieeffizienten Maßnahmen direkt von der Kosteneinsparung profitieren.

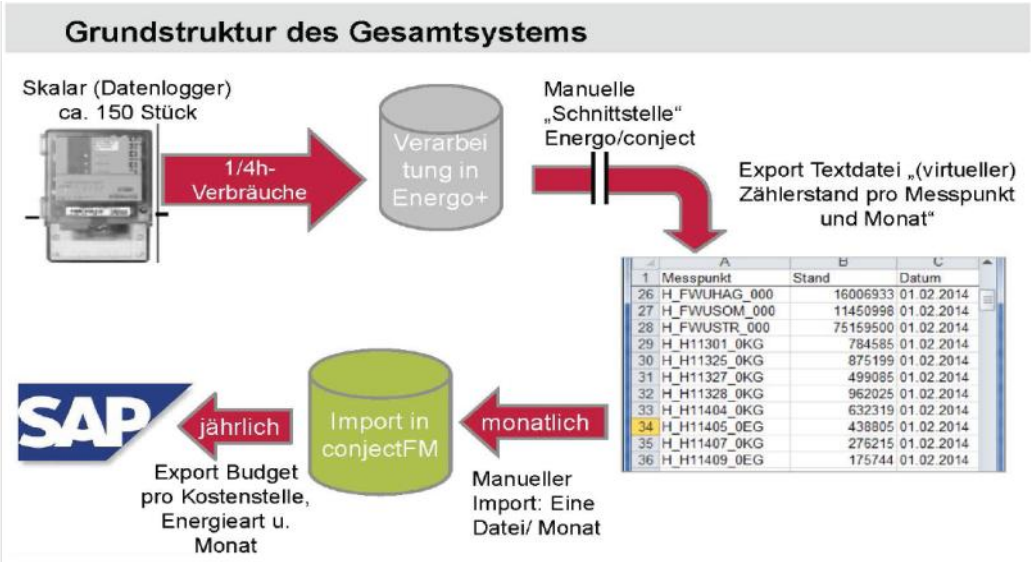


Abbildung 16 Grundstruktur Verbrauchserfassung (GB3)

6.4 Gesamtenergieverbrauch Wärme und Strom

Im Basisjahr 2011 lag der Energieverbrauch für Strom bei 35,5 GWh/a und für Fernwärme (witterungsbereinigt) bei 39 GWh/a. Die Entwicklung der Energieverbräuche von 2011 bis 2018 werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

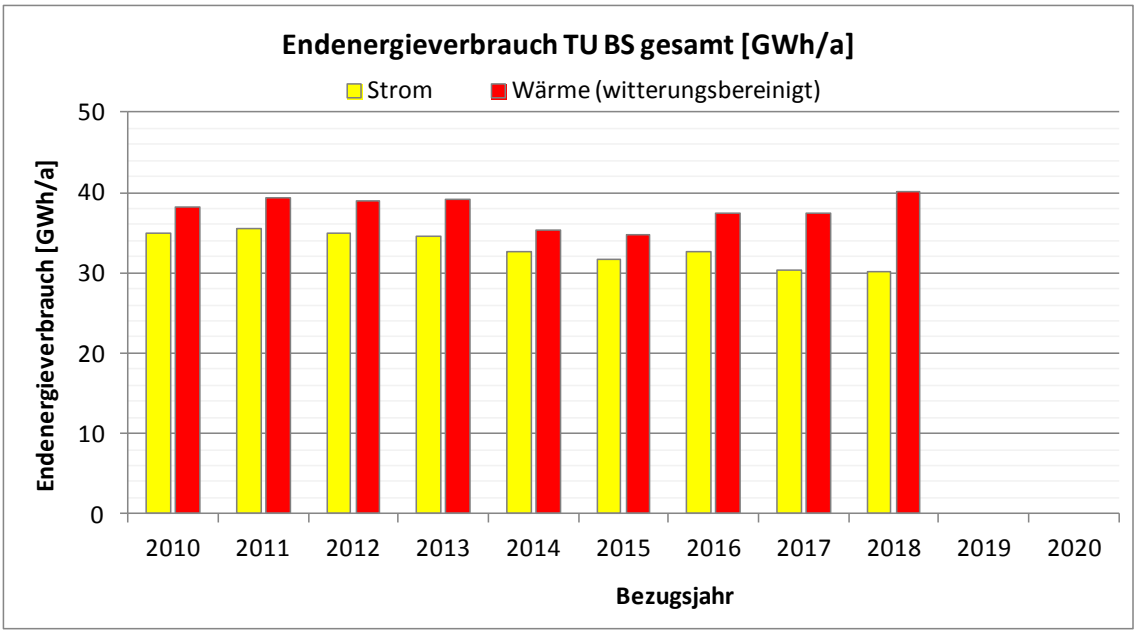


Abbildung 17 Entwicklung des Endenergieverbrauchs 2011 bis 2018 [IGS]

Der Endenergieverbrauch für Wärme reduziert sich von 2011 bis 2014 um ca. 18%, der Stromverbrauch um ca. 11%. Die deutliche Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs von 2013 zum Jahr 2014 ist zum Großteil auf die Einführung der Energiekostenbudgetierung zum 01.01.2014 zurückzuführen. Bis 2018 ist eine weitere Reduzierung des Stromverbrauchs auf ca. 30 GWh/a, bei der Fernwärme jedoch ein Anstieg auf ca. 40 GWh/a (witterungsbereinigt) zu verzeichnen.

Die vorhandenen Neubauten, die in den Jahren 2015 bis 2018 entstanden sind, sind in der Entwicklung der Energieverbauchsdaten berücksichtigt.

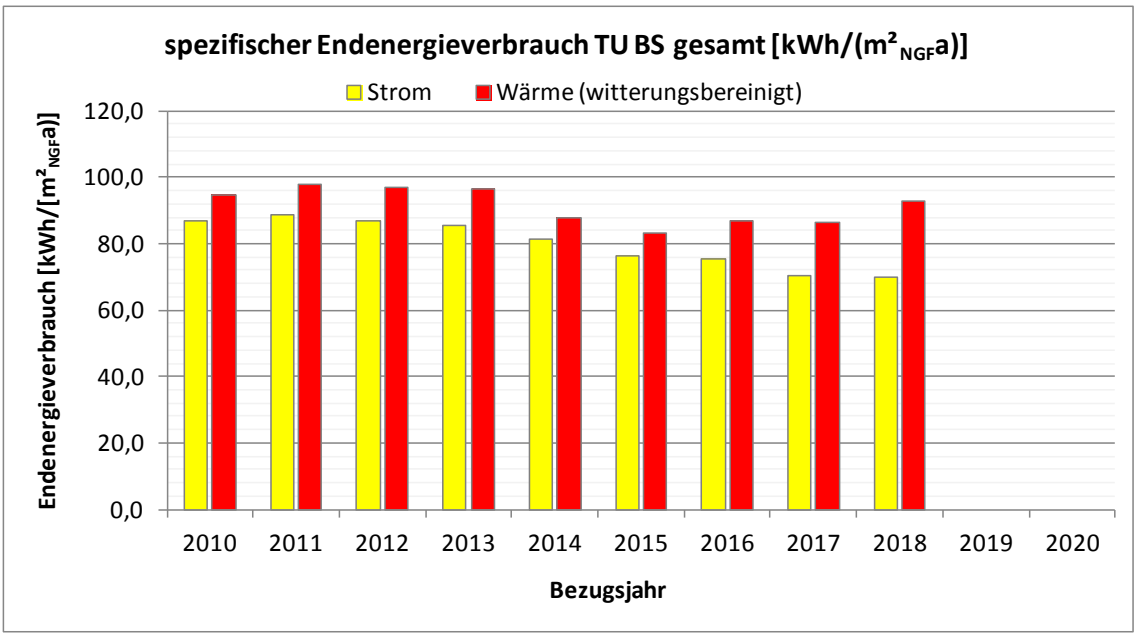


Abbildung 18 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs 2011 bis 2018 [IGS]

7 SCHWERPUNKTTHEMEN

Das Forschungsprojekt wird von allen Seiten des interdisziplinär aufgestellten Forschungsteam der TU Braunschweig und der externen Kooperationspartner engagiert bearbeitet. In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Strategien mit ihren Arbeitsinhalten und Ergebnissen ausführlich beschrieben:

7.1 Neubau, Sanierung, Instandhaltung

7.2 Energieversorgung

7.3 Interface „Mensch – Technologie

0 Städtebauliche Entwicklung

7.5 Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalanalyse

Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge

7.6 Teil-Automatisierte Betriebsoptimierung

7.1 Neubau, Sanierung, Instandhaltung (IGS)

Das Institut ist neben der Projektkoordination und Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten für die inhaltliche Bearbeitung der Gebäude unter Betrachtung der bauphysikalischen und anlagentechnischen Aspekte zuständig.

Innerhalb des Arbeitspakets werden die generierten Maßnahmen aus dem im Vorprojekt „EnEff Campus: *blue*MAP TU Braunschweig“ entwickelten konkreten Entwicklungsplan für den Campus der TU BS bis 2020 für die Umsetzung festgelegt, mit der Hochschulleitung und den weiteren verantwortlichen Institutionen zu einem konkreter Umsetzungsplan unter Berücksichtigung technischer, finanzieller und administrativer Aspekte entwickelt und zur Umsetzung gebracht. Vor Beginn der Umsetzung der Maßnahmen erfolgt die frühzeitige Einbindung des Nutzers auf Gebäudeebene. Nach erfolgter Umsetzung der Maßnahmen und dem anschließenden Monitoring erfolgt die Übertragung der an einem Gebäude umgesetzten Maßnahmen auf weitere Gebäude des gleichen Typs. Die unterschiedlichen Gebäudetypen mit möglicher Übertragbarkeit auf Bestandsgebäude ähnlicher Baualtersklasse, Nutzung (nach DIN 277) und Energieverbrauchsdaten Wärme und Strom des Campus der TU BS wurden in der ersten Phase des Vorprojektes definiert.

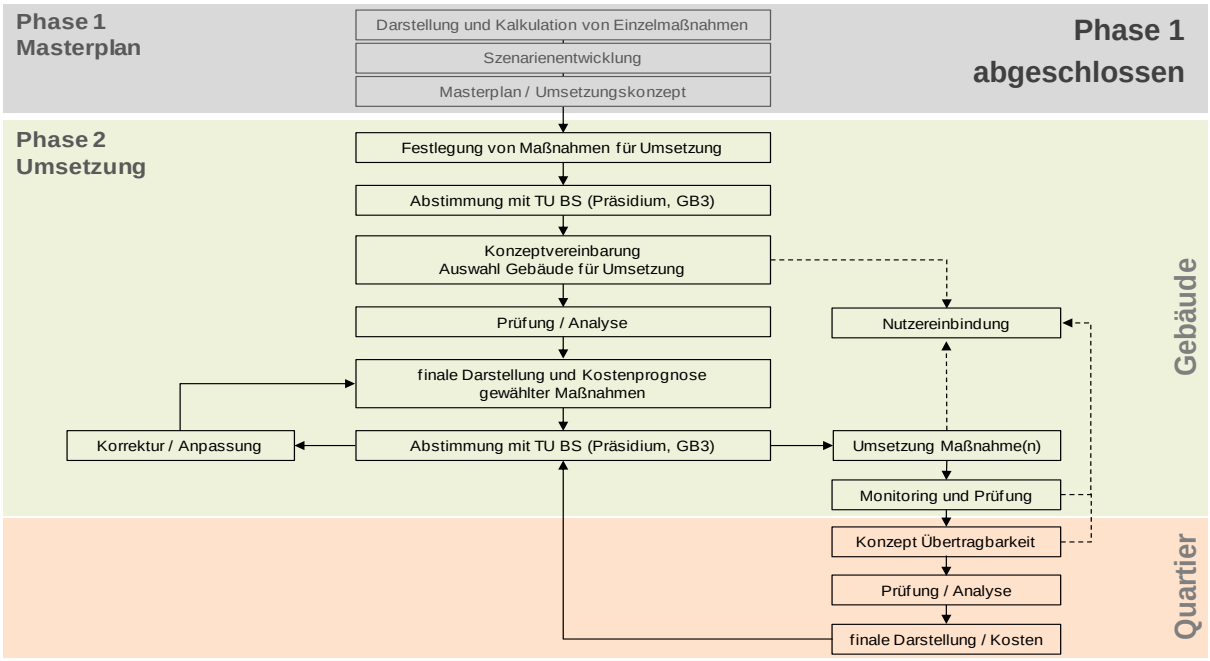


Abbildung 19 Ablaufplan zur Umsetzung auf Gebäude- und Quartiersebene [IGS]

Die Bearbeitung dieses Arbeitspakets erfolgt in enger Abstimmung mit dem Gebäudemanagement (GB3) der TU Braunschweig.

Parallel erfolgt die Integration von Teilaufgaben in die Lehre z.B. durch dem Angebot von Seminaren sowie Bachelor- und Masterarbeiten in den unterschiedlichen Fachrichtungen (Architektur, Bau- und Umweltingenieurwesen) des Instituts. So wurden während der Projektlaufzeit u.a. Ausarbeitungen in den Themenbereichen Neubauten, Denkmalschutz und „energetische Umsetzungskonzepte“ angefertigt. Ein Großteil der Ergebnisse dieser studentischen Arbeiten ist in die laufenden Bearbeitungen des Forschungsprojektes eingeflossen und wird in den nachfolgenden Kapiteln mit eingebunden.

7.1.1 Umsetzungskonzept

Die Grundlage der umsetzungsorientierten Phase bilden die im Vorprojekt detailliert dokumentierten Bestandsdaten der Gebäude hinsichtlich des Zustandes der Gebäudehülle, Anlagentechnik und technischen Ausstattung, der erstellten Sanierungsbausteine mit Angaben zu Energieeinsparpotentialen, eine Beschreibung der jeweiligen Maßnahme im Einzelnen sowie die daraus resultierenden erforderlichen Investitionskosten.
Gegenübergestellt wurden „dringend erforderliche“, „empfohlene“ oder „zukunftsorientierte“ Maßnahmen zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs für Strom und Wärme, so dass eine terminierte Einordnung nach den Kriterien kurzfristig, mittelfristig und langfristig erfolgen kann. Darüber hinaus ist es möglich, unter ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten die verschiedenen Sanierungsempfehlungen als variable, miteinander kombinierbare Bausteine in unterschiedlichen Investitionskostenbereichen (nicht investiv, gering/mittel investiv, stark investiv) zu gliedern.
Für die Berechnung der Investitionskosten wurde eine Kostendatenbank verwendet, die während der Entwicklungsphase der Maßnahmen aus Erfahrungswerten und Bauteilkatalogen erstellt wurde. Geplant ist eine Weiterführung und Fortschreibung dieser Datenbank im Zuge von Umsetzungen einzelner Maßnahmen. Somit lassen sich in Zukunft die unterschiedlichsten Sanierungsbausteine in kurzer Zeit über die energetischen Aspekte hinaus wirtschaftlich sehr genau bewerten. Zudem dienen Sie als Entscheidungsgrundlage für eine schnelle Umsetzung und können unmittelbar in die laufenden Prozesse des Hochschulbaus und der Instandhaltung einfließen.
Alle Maßnahmen werden in das Konzept der Energiekostenbudgetierung (Kap. 6.3), einer differenzierten Umlegung der Energiekosten auf die Fakultäten und Institute, der TUBS integriert.

Um die primärenergetischen Zielvorgaben des Projekts, die Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um 40 % bis 2020 in Bezug auf das Basisjahr 2011 zu erreichen, war zum Start der Umsetzungsphase 2015 ein kurzfristiger Umsetzungsplan erforderlich. Aus den Erfahrungen und Berechnungsergebnissen der ersten, abgeschlossenen Projektphase und den Querauswertungen der bisher umgesetzten Maßnahmen wurde Anfang 2016 ein jährlich umzusetzendes Maßnahmenpaket zusammengestellt. Die Empfehlungen sowie die prognostizierte Entwicklung des Primärenergieverbrauchs für den Campus der TU Braunschweig werden in der nachfolgenden Abbildung 20 aufgezeigt.

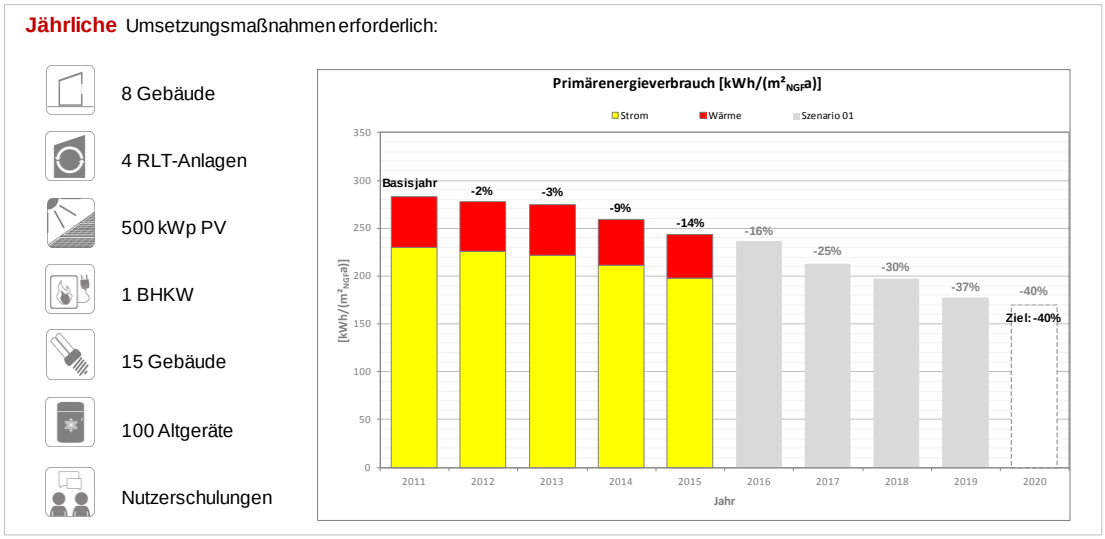


Abbildung 20 ***Prognose Primärenergieverbrauch - Umsetzung erforderlichen Maßnahmen [IGS]***

Zum Erreichen der geplanten Primärenergieeinsparung sind Maßnahmen aus fast allen Bereichen umzusetzen. So ist die umfangreiche energetische Sanierung der Gebäudehülle von 8 Bestandsgebäuden pro Jahr erforderlich. Des Weiteren sind jährlich 4 raumlufttechnische Anlagen hinsichtlich ihrer Lauf- und Betriebszeiten sowie der erforderlichen Volumenströme zu prüfen und optimieren. Eine Photovoltaik-Installation von 500 kWp pro Jahr, die Errichtung eines BHKW alle zwei Jahre, der Austausch von Bestandbeleuchtung in Flurzonen, Büro und Laborräumen in 15 Gebäuden und die Außerbetriebnahme bzw. der Austausch von 100 ineffizienten Kühl- und Gefriergeräten sind ebenfalls jährlich umzusetzen.
Schulungen und Workshops zur Beratung und Sensibilisierung auf energierelevante Themen müssen ebenfalls kontinuierlich durchgeführt werden, um eine dauerhafte Energiereduzierung aus Nutzungs- und Nutzeränderung zu erreichen.

7.1.1.1 Interaktive Campus-Karte

Zur verbesserten, öffentlichen Darstellung der Bestandssituation und der Sanierungsprognosen der TU-Gebäude wurden die Ergebnisse in einer interaktiven Campuskarte eingebunden. Als Web-Oberfläche wird eine Applikation des Kartendienstes von google.de verwendet, das dadurch eine einfache und unkomplizierte Anwendung möglich ist. Diese soll der Kartographierung und Darstellung der 200 Bestandsbauten sowie der seit 2012 errichteten Neubauten (s. Kap. 7.1.4) der TU Braunschweig dienen.
Die Darstellung aller Gebäude erfolgt als Piktogramm mit einem separaten Farbencode je Campusareal (s. Abbildung 21): Zentralcampus, Campus Nord, Campus Ost (Beethovenstraße), Campus Ost (Langer Kamp) und Forschungsflughafen. Somit können die Areale auf den ersten Blick schnell unterschieden und die räumliche Abgrenzung deutlich gemacht werden.

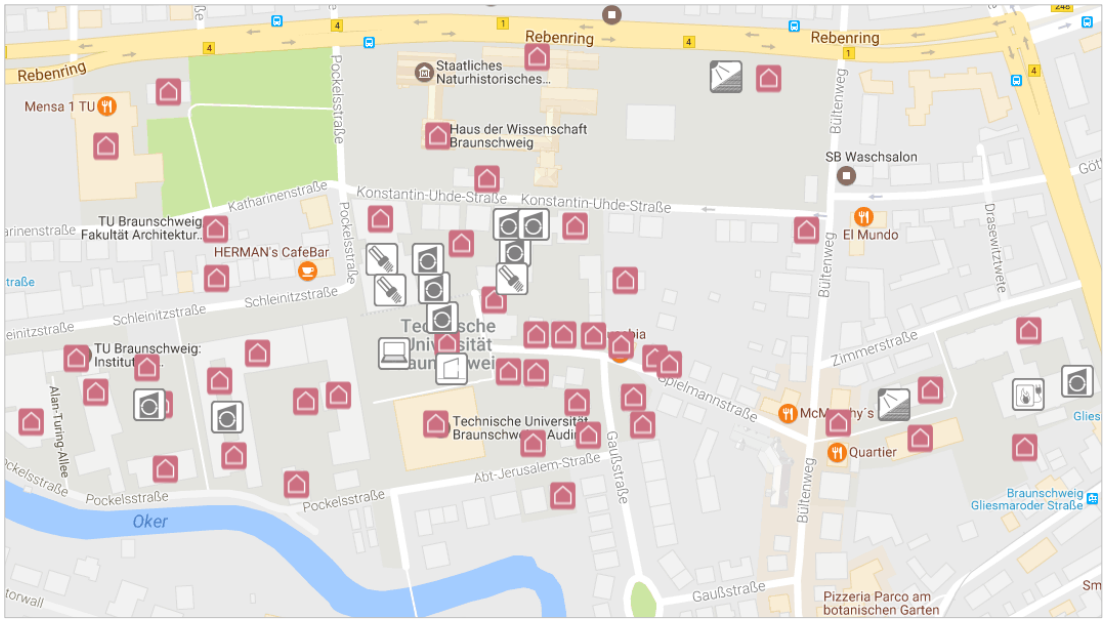


Abbildung 21 Ausschnitt Interaktive Campuskarte: Zentralcampus [www.google.de]

Jedem Gebäude ist dabei auf der Grundlage des Tools „AnSaGe“ (s. Kap. 7.1.6) ein Steckbrief mit allgemeinen Gebäudekenndaten, Flächen- und Raumdaten, Energieverbrauchsentwicklung für Wärme und Strom, sowie Sanierungsempfehlungen unterschiedlicher Schwerpunkte hinterlegt.

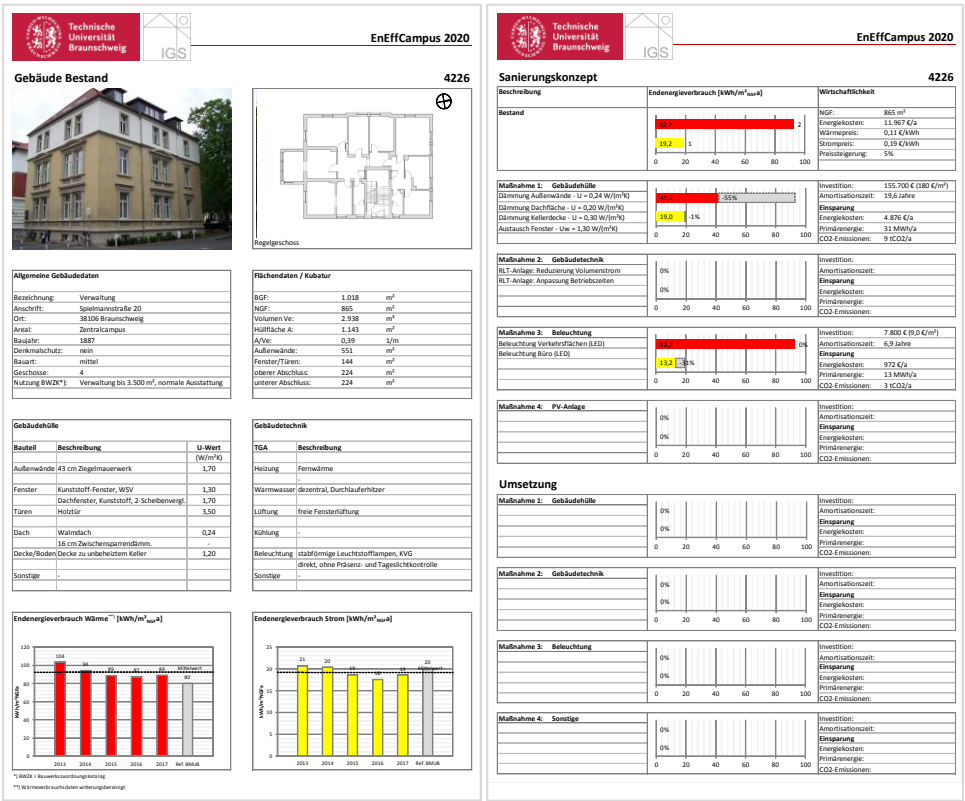


Abbildung 22 Beispiel Steckbrief Gebäude 4226 [IGS]

7.1.2 Umsetzung Maßnahmen

In Zusammenarbeit des IGS mit dem Gebäudemanagement (GB3) bzw. der Energieberatung der TU Braunschweig werden auf Basis der Ergebnisse aus dem Projekt „EnEffCampus: blueMAP TU Braunschweig“ Maßnahmen zur energetischen Verbesserung und Optimierung auf Gebäudeebene identifiziert und für eine Implementierung vorbereitet. Die Maßnahmen werden dabei in folgende Kategorien gegliedert:

- Gebäudehülle
- Gebäudetechnik (Betriebsoptimierung)
- Beleuchtung
- BHKW
- Photovoltaik
- technische Ausstattung
- Flächeneffizienz
- Nutzerverhalten

Vor der tatsächlichen Umsetzung prüft die Energieberatung jedoch nochmals die Umsetzbarkeit, indem Aufwand und Nutzen gegenübergestellt werden. Zur Abschätzung des Einsparpotentials wird das Verbrauchsverhalten des Gebäudes mit Hilfe der Lastgangkurve aus dem Energieerfassungssystem „Energo“ analysiert. Eine detaillierte Verbrauchsanalyse bestimmter Anlagen und Anlagenteile wird vom Energiemanagement des GB3 mit entsprechenden Messgeräten im Bedarfsfall durchgeführt. Im Anschluss entwickelt die Energieberatung verschiedene Varianten zur energetischen Verbesserung, schätzt die Kosten ab und berechnet die jeweilige statische Amortisationszeit.
Die Planung und Umsetzung von Maßnahmen erfolgt dabei in Zusammenarbeit mit den zuständigen Fachabteilungen im GB3. Bei der Auswahl der Gebäude und Gewerke werden die Maßnahmen nach folgenden Gesichtspunkten priorisiert:

- Realisierungsaufwand
- Liquiditätsbedarf
- Amortisationszeit
- Abhängigkeiten von kurz- und mittelfristig geplanten Baumaßnahmen
- verfügbare Kapazitäten für Planung, Ausschreibung, Vergabe und Durchführung am GB 3

Der planerische Aufwand von Maßnahmen wird jedoch durch die veraltete Infrastruktur des TU-Gebäudebestands sowie die Vielzahl an bautechnischen Mängeln erhöht. Häufig stehen einer zeitnahen wirtschaftlichen Realisierung von Maßnahmen auch verschärfte gesetzliche Randbedingungen z.B. zum Denkmalschutz, Brandschutz, Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz oder Bauphysik entgegen.

Die Maßnahmen werden seitens der Energieberatung aufbereitet und dem Energiebeirat vorgestellt. Dazu sind im Vorfeld folgende Punkte darzustellen:

- Beschreibung der Maßnahme
- Kostenschätzung
- Prognose der jährlichen Einsparung an Energie und Kosten
- Amortisationszeit
- Erklärung, ob institutseigene Mittel eingesetzt werden oder eine Finanzierung aus zentralen Energieeffizienzmitteln beantragt wird

Der Beschluss welche Maßnahmen umgesetzt werden erfolgt seitens des Energiebeirats.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Maßnahmen, die im Rahmen des Projekts umgesetzt wurden näher erläutert.

7.1.2.1 Gebäudehülle

Mit der Sanierung der Gebäudehülle gem. gültiger Energieeinsparverordnung 2014 (EnEV) [1] wurde mit einer Gesamtinvestitionskostensumme von ca. 16 Mio. EUR eine Energiekosteneinsparung von ca. 125.000 EUR/a erzielt. Durch die verschiedenen Maßnahmen, wie die Sanierung von Dachfläche, Erneuerung der Fenster, usw. die an einer Vielzahl von Gebäuden stattgefunden haben, konnte der Primärenergieverbrauch des Gesamtcampus um ca. 860 MWh/a und die CO2-Emissionen um ca. 245t/a reduziert werden.

Beispiel - Sanierung der Gebäudehülle

Tabelle 5 Gebäude 4201 - Übersicht der Maßnahme Gebäudehülle [IGS]

Gebäude 4201	Bezeichnung	Forumsgebäude
	Nutzung	Verwaltungsgebäude
	Baujahr	1964
	Fläche (NGF)	9.541 m²
	Einsparungen	
	Strom	94 MWh/a
	Wärme	710 MWh/a
Maßnahme Ganzheitliche Sanierung der Gebäudehülle	Energiekosten	71.000 €/a
	Primärenergie	497 MWh/a
	CO2-Emissionen	142 t/a
Investition: 6,42 Mio. €	Amortisation	>20a

Die Gebäudehülle des Forumsgebäudes der TU Braunschweig wurde 2015 ganzheitlich mit einer Investitionssumme von 6,4 Mio. Euro saniert. Die Bauteile werden im Folgenden kurz erläutert:

Das Dach besitzt eine Gefälledämmung (WLG 035) mit 18 cm und hat einen U-Wert von 0,19 W/m²K.

Die Verbundpaneele in der Fassade bestehen aus einer Außen- und Innenschale mit 2 mm Aluminium und einem Kern aus Mineralfaserdämmung (WLG 035) mit 52 mm.

Im Brüstungsbereich der Außenwände und auf der Innenseite der Unterzüge über dem Fensterband wurde eine Innendämmung (WLG 060) mit Kalziumsilikatplatten und einer Dicke von 10 cm aufgebracht.

Die Fenster bestehen aus einer 2-fach Wärmeschutzisolierverglasung mit einem mittleren U-Wert von 1,4 W/m²K und einem g-Wert der Verglasung von 61%. Ein außenliegender Sonnenschutz ist vom 1.-3. OG in Form von Aluminium-Lamellen vorhanden.

Insgesamt werden nach der Umsetzung Energiekosten von 71.000 Euro/a, CO2-Emissionen von ca. 140t/a und Primärenergie von 497 MWh/a eingespart.

Beispiel 2 - Fensterprogramm

Abbildung 23 Beispiel Fenster Bestandsgebäude TU Braunschweig [IGS]

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 folgend für 2019 das „Fensterprogramm“ zur Instandsetzung nicht voll funktionsfähiger Fenster initiiert. Die Maßnahmen dienen der Verbesserung der Fensterdichtigkeit, der Wiederherstellung der vollen Lüftungsfunktion, Austausch erblindeter Glasflächen in Räumen mit Aufenthaltsqualität, dem Austausch von Fenstern und Teilflächen von Fassaden. Für die Maßnahmen wurden für 2018 und 2019 jeweils Mittel von 250.000 Euro seitens der TU Braunschweig zur Verfügung gestellt.

7.1.2.2 Gebäudetechnik

Mit der Optimierung der RLT-Anlagen, der Austausch von Heizungspumpen, usw. wurde mit einer Gesamtinvestitionskostensumme von ca. 3,8 Mio. EUR eine Energiekosteneinsparung von ca. 462.000 EUR/a erzielt. Durch die verschiedenen Maßnahmen, konnte der Primärenergieverbrauch des Gesamtcampus um ca. 5.850 MWh/a und die CO2-Emissionen um ca. 1.400 t/a reduziert werden.

Beispiel 1 - Betriebsoptimierung RLT-Anlagen

Tabelle 6 Gebäude 4304 - Übersicht der Maßnahme RLT-Anlage [IGS]

Gebäude 4304	Bezeichnung	Chemie Neubau
	Nutzung	Institutsgebäude
	Baujahr	1985
	Fläche (NGF)	14.785 m²
	Einsparungen	
	Strom	860 MWh/a
	Wärme	692 MWh/a
Maßnahme Optimierung der RLT-Anlage durch eine Nachtabsenkung der Zulufttemperatur und des Volumenstroms zwischen 20:00 - 06:00 Uhr. **Investition: 2.600 €**	Energiekosten	232.600 €/a
	Primärenergie	2.720 MWh/a
	CO2-Emissionen	662 t/a
	Amortisation	-

Die bedarfsgerechte Regelung der Hauptlüftungsanlagen (ca. 200.000 m³/h, 250 kW Strom, 1.900.000 kW Wärme) im Gebäude Chemie Hagenring ist ein Beispiel für eine geringinvestive Maßnahme mit sehr hoher Einsparung. In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro energydesign hat der GB 3 die Volumenströme um ca. 50 % und die Zulufttemperaturen von 20°C auf 15°C über Nacht von 20.00 – 6.00 Uhr und an den Wochenenden von 20.00 – 9.00 Uhr abgesenkt [7].

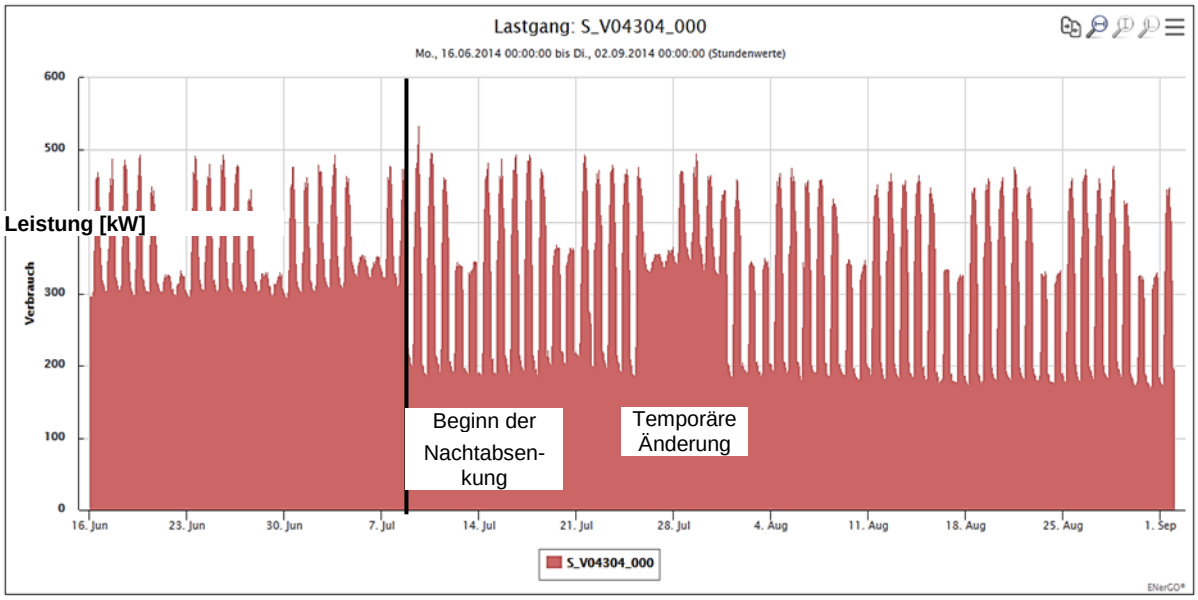


Abbildung 24 Gesamter Strom-Lastgang vom 16.06.14 bis 02.09.14 (Stundenwerte) [GB3]

Der Lastgang in Abbildung 24 zeigt, dass die Grundlast für Strom mit der Aktivierung der Nacht- und Wochenendabsenkung ab dem 08.07.2014 von ca. 300 kW auf ca. 200 kW redu-

ziert werden konnte. Die temporäre Erhöhung auf das alte Niveau ist durch eine zwischenzeitliche Erhöhung wegen Nutzerbeschwerden begründet.
Es haben sich mittlere Verbrauchseinsparungen im Jahr von ca. 860.000 kWh Strom und 692.000 kWh Wärme ergeben. Dies entspricht einer Kostenreduzierung von rund 230.000 €/a [7].

Beispiel 2 - Betriebsoptimierung RLT-Anlagen

Tabelle 7 Gebäude 9962 - Übersicht der Maßnahme RLT-Anlage [IGS]

Gebäude 9962	Bezeichnung	Rollei Gebäude
	Nutzung	Institutsgebäude
	Baujahr	1960
	Fläche (NGF)	1.953 m²
	Einsparungen	
	Strom	176 MWh/a
	Wärme	- MWh/a
Maßnahme Bedarfsgerechte Regelung der RLT-Anlagen (Reinräume), Optimierung der Regelung, Einbau eines Software-Schalters zur einfachen Gesamtabschaltung **Investition: 1.200 €**	Energiekosten	33.440 €/a
	Primärenergie	458 MWh/a
	CO2-Emissionen	107 t/a
	Amortisation	0,1 a

Für die Lüftungsanlagen der Reinräume (ca. 70.000 m³/h) im Gebäude 9962 „Alte Salzdahlumer Str.“ wurde ein Softwarehandschalter und ein Gesamtzeitschalter programmiert, um den anlagenübergreifenden Volumenstrom zu begrenzen. Die Volumenströme für die Reinräume konnten im laufenden Betrieb abgesenkt und die Zuluftkonditionierung (15.000 m³/h) korrigiert werden.

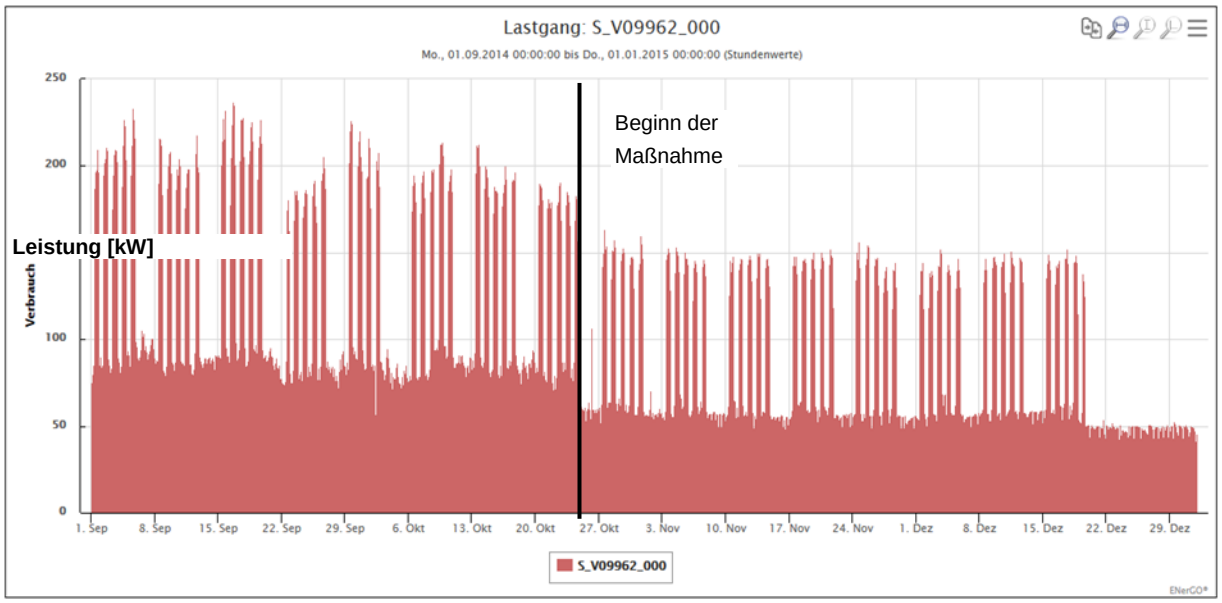


Abbildung 25 Gesamter Strom-Lastgang vom 01.09.14 bis 01.01.15 (Stundenwerte) [GB3]

Mit Änderung der Parameter zum 25.10.2014 hat sich die Grundlast für Strom von ca. 75 kW auf ca. 55 kW verringert (s. Abbildung 25). Der jährliche Stromverbrauch bis zum Jahr 2016 konnte dadurch um im Mittel 180.000 kWh abgesenkt werden, was einer Einsparung von ca. 35.000 € entspricht.

Beispiel - Einbau von Hocheffizienzpumpen

Tabelle 8 Gebäude 4207 - Übersicht der Maßnahme Umwälzpumpen [IGS]

Gebäude 4207	Bezeichnung	Hauptgebäude ehem. Chemietrakt
	Nutzung	Institutsgebäude
	Baujahr	1877
	Fläche (NGF)	9.658 m²
	Einsparungen	
	Strom	14 MWh/a
	Wärme	- MWh/a
Maßnahme Austausch von zwei Heizungsumwälzpumpen **Investition: 4.685 €**	Energiekosten	2.633 €/a
	Primärenergie	36 MWh/a
	CO2-Emissionen	8 t/a
	Amortisation	3 a

In den zentralen Heizungsanlagen des Hauptgebäudes 4207 sind im November 2015 zwei alte Umwälzpumpen für die Heizung und die Lüftung gegen neue Hocheffizienzpumpen ausgetauscht worden [7].

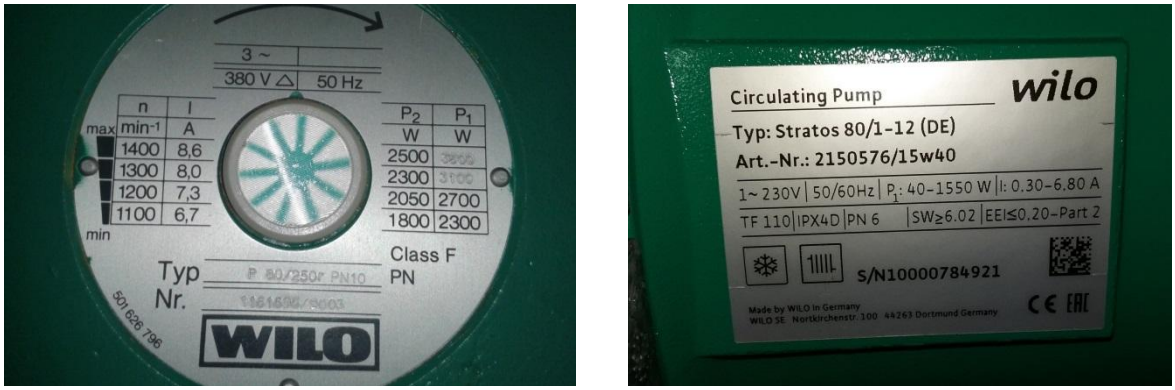


Abbildung 26 Alte und neue hocheffiziente Umwälzpumpe Heizung 4207 [GB3]

Mit dem Austausch einer Wilo P 80 Pumpe (Heizung) gegen eine Hocheffizienzpumpe Wilo Stratos 80 ist eine rechnerische Stromeinsparung von 75%, d.h. ca. 11.000 kWh/a erzielt worden. Der Pumpenaustausch für das Heizregister von einer Wilo P 65 Pumpe zu einer Wilo Stratos 65 spart rechnerisch 69 % Strom bzw. 2.400 kWh/a ein [7].

Beispiel 3 - Sanierung RLT-Anlagen

Auf Grund hoher Energieverbräuche, ineffizienter Wärmerückgewinnung, veralteter Antriebstechnik und abgängiger Regelungstechnik zentraler RLT-Anlagen, sollen im Jahr 2019 in folgenden drei Gebäuden Maßnahmen zur Optimierung der vorhandenen RLT-Anlagen umgesetzt werden:

Abbildung 27 Gebäude 4269 - Biozentrum [GB3]	***Abbildung 28 Gebäude 2424 - Pharmazie / Tierhaltung [GB3]***	***Abbildung 29 Gebäude 2423 - Pharmazie 2 [IGS]***

Für diese Maßnahmen wurden Ende 2018 EFRE-Förderanträge bei der N-Bank gestellt (siehe auch Kapitel 7.1.2.3). Ziel ist der Austausch zentraler Lüftungskomponenten, Motoren, Ventilatoren, Heizregister, Wärmerückgewinnung, usw. Die förderfähigen Kosten liegen insgesamt bei 4,4 Mio. Euro. Zusammen werden sie eine jährliche Einsparung an Strom von 424 MWh/a, an Wärme von 1.694 MWh/a und damit eine Einsparung von 230.000 Euro und 578 t/a CO2-Emissionen erzielen.

7.1.2.3 Photovoltaik

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 m² 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. Sie 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 CO2-Emissionen erzielen.

In der nachfolgenden Tabelle werden die Gebäude mit der jeweils geplanten PV-Anlage in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 9 Gebäudeauswahl Dachinstallation PV-Anlagen [IGS]

Gebäude	Maßnahme	Einsparungen
2401 TU Sporthalle	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach des Fitnesstrakts mit einer Gesamtleistung von 56 kWp Investition: 96.700 €	Strom: 54 MWh/a Energiekosten: 9.816 €/a Primärenergie: 139 MWh/a CO2-Emissionen: 30 t/a
2405 MPA	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf der Hallendachfläche mit einer Gesamtleistung von 63 kWp Investition: 109.200 €	Strom: 61 MWh/a Energiekosten: 11.082 €/a Primärenergie: 157 MWh/a CO2-Emissionen: 34 t/a
2410 Stahlbau	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach mit einer Gesamtleistung von 47 kWp Investition: 81.100 €	Strom: 45 MWh/a Energiekosten: 8.233 €/a Primärenergie: 117 MWh/a CO2-Emissionen: 25 t/a
3210 BRICS	Installation einer Photovoltaik-Anlage	Strom: 94 MWh/a

	auf dem Flachdach mit einer Gesamt-leistung von 98 kWp Investition: 169.500 €	Energiekosten: 17.204 €/a Primärenergie: 244 MWh/a CO2-Emissionen: 53 t/a
3302 Thermodynamik 	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach mit einer Gesamt-leistung von 65 kWp Investition: 113.400 €	Strom: 63 MWh/a Energiekosten: 11.505 €/a Primärenergie: 163 MWh/a CO2-Emissionen: 36 t/a
3329 PVZ 	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach mit einer Gesamt-leistung von 59 kWp Investition: 102.500 €	Strom: 57 MWh/a Energiekosten: 10.396 €/a Primärenergie: 148 MWh/a CO2-Emissionen: 32 t/a
3331 LENA 	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach mit einer Gesamt-leistung von 35 kWp Investition: 59.800 €	Strom: 33 MWh/a Energiekosten: 6.069 €/a Primärenergie: 86 MWh/a CO2-Emissionen: 19 t/a
3404 GITZ 	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach mit einer Gesamt-leistung von 52 kWp Investition: 90.500 €	Strom: 50 MWh/a Energiekosten: 9.183 €/a Primärenergie: 130 MWh/a CO2-Emissionen: 28 t/a
9988 NFF 	Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Hallenflachdach des Instituts-gebäudes mit einer Gesamtleistung von 285 kWp Investition: 494.000 €	Strom: 274 MWh/a Energiekosten: 50.135 €/a Primärenergie: 712 MWh/a CO2-Emissionen: 155 t/a

7.1.2.4 Beleuchtung

Mit dem Austausch der vorhandenen Beleuchtung durch LED-Beleuchtung wurde mit einer Gesamtinvestitionskostensumme von ca. 252.000 EUR eine Energiekosteneinsparung von ca. 58.600 EUR/a erzielt. Durch die verschiedenen Maßnahmen, konnte der Primärenergieverbrauch des Gesamtcampus um ca. 801 MWh/a und die CO2-Emissionen um ca. 188 t/a reduziert werden.

Beispiel 1 - LED Beleuchtung

Tabelle 10 Gebäude 4269 - Übersicht der Maßnahme LED Beleuchtung [IGS]

Gebäude 4269	Bezeichnung	Biozentrum
	Nutzung	Institutsgebäude
	Baujahr	1988
	Fläche (NGF)	11.640 m²
	Einsparungen	
	Strom	73 MWh/a
	Wärme	- MWh/a
Maßnahme Erneuerung der Flurbeleuchtung durch LED-Einbau in vorhandene Leuchtengehäuse **Investition: 52.000 €**	Energiekosten	13.946 €/a
	Primärenergie	191 MWh/a
	CO2-Emissionen	45 t/a
	Amortisation	4 a

Die Erneuerung der Beleuchtung der Verkehrszonen im Biozentrum wurde im Juli 2015 dezentral durch die Nutzer finanziert und in Abstimmung mit dem GB 3 umgesetzt [7].

Abbildung 30 Alte und neue LED-Beleuchtung Gebäude 4269 [GB3]

In den Fluren des Gebäudes waren 330 Leuchten (je 58 W) mit konventionellen Vorschaltgeräten und eine Steuerung über Zeitschaltuhren bzw. Tasterschaltung installiert. Eingebaut wurde die gleiche Anzahl an LED-Leuchten mit einer Nennleistung von je 36 W mit Steuerung über Bewegungsmelder. Zur Reduzierung des technischen und finanziellen Aufwands wurde der neue Geräteträger (Prolight Lichttechnik) mitsamt des Reflektors und des LED-Lichtbandes in das vorhandene Tragesystem montiert.

Die Gesamtleistungsaufnahme konnte von 23,7 kW auf 11,9 kW halbiert werden. In Verbindung mit den gleichzeitig installierten Bewegungsmeldern ist jetzt eine optimierte Lichtsteuerung möglich. Die rechnerische Gesamtabsenkung des Stromverbrauchs beträgt rund 71.000 kWh/a, was einer Kostenreduktion von 13.800 € p.a. entspricht [7].

Beispiel 2 - LED Beleuchtung

Tabelle 11 Gebäude 3402 - Übersicht der Maßnahme LED Beleuchtung [IGS]

Gebäude 3402	Bezeichnung	Halle Elektrotechnik
	Nutzung	Institutsgebäude
	Baujahr	1974
	Fläche (NGF)	3.613 m²
	Einsparungen	
	Strom	13 MWh/a
	Wärme	- MWh/a
Maßnahme Austausch von vorhandenen konventionellen Leuchtstofflampen KVG durch LED Leuchten 39 Watt (Trilux 7650 TB LED 5500-840 E) im Bereich der Werkstatt **Investition: 7.700 €**	Energiekosten	2.397 €/a
	Primärenergie	33 MWh/a
	CO2-Emissionen	8 t/a
	Amortisation	3 a

Im Januar 2016 wurde im Gebäude 3402 die Hallen- und Werkstattbeleuchtung ausgetauscht.

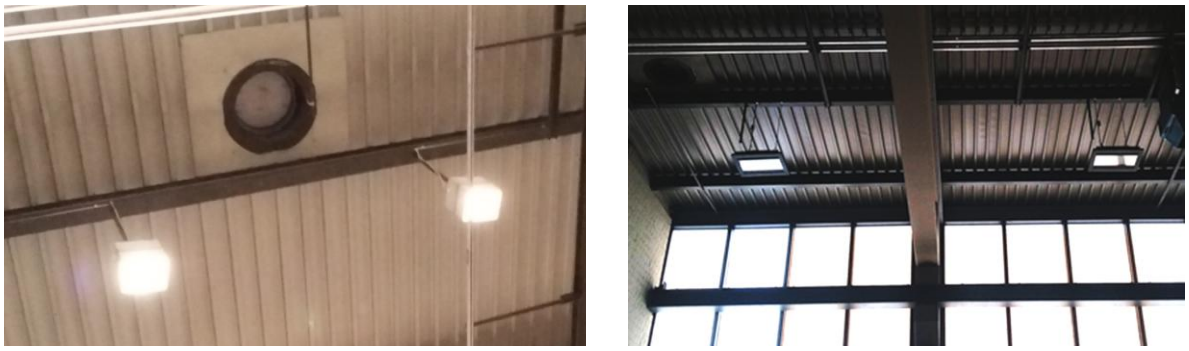


Abbildung 31 Alte und neue effiziente Hallenbeleuchtung 3402 [GB3]

In der Halle sind 16 HQL-Deckenstrahler mit je 250 W gegen 6 LED Deckenstrahler mit je 227 W gewechselt worden. Der rechnerische Stromverbrauch wurde von 3.700 kWh/a auf 1.000 kWh/a reduziert, was einer Einsparung von über 500 € entspricht.

In der Werkstatt waren 92 Leuchtstoffröhren (je 58 W) mit einer Gesamtleistung von 6,6 kW unter Berücksichtigung der konventionellen Vorschaltgeräte installiert. Ausgetauscht wurden sie gegen 32 LED-Leuchten mit je 39 W und einer Gesamtleistung von 1,2 kW. Der

Stromverbrauch konnte dadurch von 15.500 kWh/a auf 2.900 kWh/a abgesenkt werden. Das entspricht einer rechnerischen Kosteneinsparung von 2.500 € pro Jahr [7].

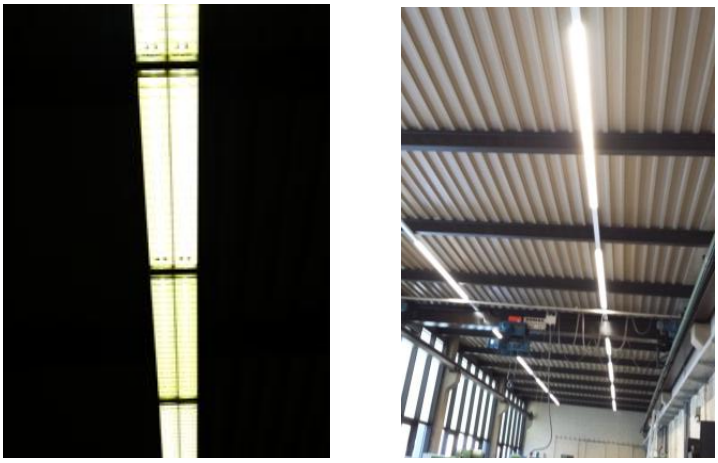


Abbildung 32 Alte und neue effiziente Werkstattbeleuchtung 3402 [GB3]

7.1.2.5 Technische Ausstattung

Resultierend aus den Dokumentationen und Berechnungen zum Bestand der Kühl- und Gefriergeräte im Projekt Campus I, die einen Handlungsbedarf im Bereich Energieeffizienz verdeutlichen, wurde seitens des Gebäudemanagements der TU Braunschweig eine Aktion zur Verbesserung der Effizienz dieser Geräte gestartet. Ziel des Programms „Abwrackprämie – Kühl- und Gefrierschränke“ war es, Altgeräte in den Gebäuden der TU, die eine mangelhafte Energieeffizienz und eine mäßige Nutzungseffizienz aufweisen vom Stromnetz zu nehmen und durch neue, effiziente Geräte zu ersetzen.

Abbildung 33 Kühl- und Gefriergeräte im Bestand [IGS]

In der Programmlaufzeit von 6 Monaten wurden im gesamten ersten Halbjahr 2015 ca. 140 Altgeräte außer Betrieb genommen und „abgewrackt“. Dabei wurde eine Gesamtprämie von

19.400 EUR an diverse Institute der TU Braunschweig vergeben. Eine Aussage zu den erzielten Energieeinsparungen liegt auf Grund fehlender Messwerte nicht vor.

Durch diese Maßnahme konnte der Primärenergieverbrauch des Gesamtcampus um ca. 225 MWh/a und die CO2-Emissionen um ca. 53 t/a reduziert werden.

7.1.2.6 Nutzerverhalten

Seitens des Nutzerverhaltens wurde eine Energiekosteneinsparung von ca. 45.000 EUR/a erzielt. Nach der Einführung der Energiekostenbudgetierung hat das veränderte Nutzerverhalten in den ersten Jahren bereits zu erheblichen Einsparungen geführt. In dieser Zeit wurden vorwiegend nicht- oder geringinvestive Maßnahmen priorisiert, die durch organisatorische Veränderungen der Arbeitsgewohnheiten in den Organisationseinheiten oder kleinere Umbaumaßnahmen zeitnah umgesetzt werden konnten. Es hat sich gezeigt, dass betriebstechnische Optimierungen - Änderungen in der Anlagenregelung, ein zeitlich besser aufeinander abgestimmter Betrieb der Anlagenkomponenten oder eine Anpassung des Nutzerverhaltens – in vielen Fällen ein deutlich höheres Einsparpotential aufweisen, als durch aufwändige technische und bauliche Veränderungen.
Fortführend konnte durch verschiedene Kampagnen (s. Kapitel 7.3) die Motivation und aktive Einbindung der Nutzer der Primärenergieverbrauch des Gesamtcampus um ca. 195 MWh/a und die CO2-Emissionen um ca. 46 t/a reduziert werden.

7.1.2.7 BHKW

Die zwei in Phase 1 geplanten BHKWs am Ost- und Nordcampus wurden im Rahmen der umsetzungsorientierten Phase nicht realisiert. Eine ausführliche Beschreibung hierzu erfolgt im Arbeitspaket „Energieversorgung“ in Kapitel 7.2.1.

Modernisierung Bestands - BHKW

Tabelle 12 Gebäude 4304 - Übersicht der Maßnahme Modernisierung BHKW [IGS]

Gebäude 4304	Bezeichnung	Chemie Neubau
	Nutzung	Institutsgebäude
	Baujahr	1985
	Fläche (NGF)	14.785 m²
	Einsparungen	
	Strom	58 MWh/a
	Wärme	58 MWh/a
Maßnahme Erneuerung des vorhandenen BHKW **Investition: 67.100 €**	Energiekosten	8.092 €/a
	Primärenergie	128 MWh/a
	CO2-Emissionen	44 t/a
	Amortisation	8

Das BHKW im Chemiegebäude Hagenring 30 wurde im März 2008 in Betrieb genommen und war im Zeitraum 2008 bis Ende 2015 insgesamt 42.000 Stunden im Betrieb. Das BHKW hat in der Zeit insgesamt 2.600 MWh Strom und 4.700 MWh Wärme produziert. BHKWs haben in der Regel eine Lebensdauer von ca. 60.000 Betriebsstunden oder entsprechend 10 Jahren. Ende 2015 wurde das Gesetz zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG) dahingehend novelliert, dass die bei BHKWs staatlich gezahlte KWK-Vergütung nach dem KWKG von 2012 im Folgejahr 2016 deutlich reduziert bzw. nach Anlagen-Modernisierungen überhaupt nicht mehr gezahlt würde. Aus diesem Grund wurde im Oktober 2015 beschlossen eine Ausschreibung zur Modernisierung des BHKWs zu starten, um erneut die KWK-Zulage nach dem Gesetzentwurf aus dem Jahre 2012 zu erhalten [7].

Abbildung 34 BHKW zum Zeitpunkt der Modernisierung - Januar 2016 [GB3]

Die Zielsetzung für eine Modernisierung des BHKWs sind die im Folgenden genannten Punkte:

- Neuauflage der KWK-Zulage. 3,45 € pro Vollbenutzungsstunde entsprechen bei 30.000h Vollbenutzungsstunden im Laufe von ca. 6-8 Jahren einer KWK-Zulage in Höhe von 103.500 €. Demgegenüber steht eine Investition für die Modernisierung von ca. 65.000 €.
- Bei durchschnittlich 5.000 Betriebsstunden im Jahr entspricht die KWK-Zulage einer Summe von 17.250 € jährlich.
- Das BHKW wird praktisch in den Neuzustand versetzt, das bedeutet 50% der wichtigen Bauteile wie Motor, Generator, Wärmetauscher, Pumpen, etc. werden erneuert. Die Lebensdauer wird damit wieder um mögliche 60.000 Betriebsstunden verlängert.

Die Modernisierung des BHKW wurde im Januar 2016 durchgeführt. Die Bewilligung der KWK-Zulage wurde am 27.10.2016 erteilt. Somit wird für die nächsten 30.000 Vollbenutzungsstunden zukünftig die KWK-Zulage in Höhe von 103.500 € gezahlt [7].

7.1.3 Maßnahmendokumentation

Um die einzelnen Maßnahmen nach erfolgter Umsetzung zu evaluieren ist eine umfangreiche Dokumentation bereits zu Beginn der Planung notwendig. Zur Dokumentation aller geplanten und bereits umgesetzten Sanierungsmaßnahmen wurde ein Katalog auf MS-Excel-Basis entwickelt. Zur Gewährleistung einer umfangreichen Auswertungsgrundlage werden dabei sämtliche Gebäude und die ihnen zugeordnete Maßnahmen in einer Gesamtübersicht erfasst und gegenübergestellt. Die Maßnahmen werden dabei wie in Kapitel 7.1.2 bereits erläutert gegliedert.
Die Zuordnung erfolgt primär über die 4-stelligen Gebäudenummern, die den jeweiligen Gebäuden zugeordnet ist. Die Gebäudebezeichnung wird dabei ebenso erfasst, wie die Angabe des Typs, die Zuordnung des Baujahrs, die Gesamt-Netto-Grundfläche sowie die Angabe der Hauptnutzung nach Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK). Damit bei der Zuordnung von Maßnahmen keine Doppelung erfolgt, wird jede Maßnahme mit einer Nummer dokumentiert. Diese setzt sich zusammen aus der Gebäudenummer, der Nummer für die Kategorie, sowie einer Indexnummer. Diese ist fortlaufend numerisch für die jeweiligen Kategorien zu vergeben. Eine automatische Prüfung dieser Indexnummer verhindert eine doppelte Vergabe. Somit wird eine eindeutige Zuordnung gewährleistet.

Beispiel: das Gebäude mit der Nummer 1301 wird energetisch an der Gebäudehülle saniert. Die Kategorie Gebäudehülle ist mit der Nummer 01 gekennzeichnet. Da dies die erste Maßnahme im Bereich Gebäudehülle für dieses Gebäude darstellt, ist hierfür der Index 1 auszuwählen. Daraus ergibt sich die Indexnummer mit der Kennung 1301_01.1. Wäre bereits eine Maßnahme für die Kategorie Gebäudehülle für dieses Gebäude erfasst und dokumentiert, so würde ein Hinweis erscheinen, dass die Nummer bereits vergeben ist (Abbildung 35).

Nr.	Bezeichnung	Kategorie	Index	Nummer	Prüfung Index
			[1-9		
1304	Stabsgebäude	01 Gebäudehülle	1	1304_01.1	
2401	TU-Sporthalle	01 Gebäudehülle	1	2401_01.1	**Index bereits vergeben!**
2401	TU-Sporthalle	01 Gebäudehülle	1	2401_01.1	**Index bereits vergeben!**
2401	TU-Sporthalle	01 Gebäudehülle	3	2401_01.3	
2401	TU-Sporthalle	01 Gebäudehülle	4	2401_01.4	

Abbildung 35 Maßnahmendokumentation – Indexprüfung [IGS]

Zu Dokumentationszwecken und einer verbesserten Zuordnung der durchgeführten Maßnahmen können diese mit Kurztexten und Langtexten beschrieben werden. Zur groben Gliederung und zur Kurzbeschreibung der Maßnahme werden die Kurztexte verwendet (z.B. „RLT-Anlagen / CO2-Regelung“). Zur detaillierteren Beschreibung einer Maßnahme, z.B. zur Angabe von Hauptkomponenten von Dämmmaßnahmen oder Leistungsbeschreibungen technischer Geräte, werden die Langtexte verwendet (z.B. „Optimierung des Betriebs der RLT-Anlagen durch Installation einer CO2-geführten Zuluft-Regelung“). Eine beispielhafte Darstellung der Auflistung ist in Abbildung 36 zu sehen.

Nr.	Bezeichnung	Anmerkungen	Maßnahme Langtext	Titel
			lang	
1304	Stabsgebäude	neu aus Conject	Umbau ehemaliges Stabsgebäude, 1.BA Umbau KG/EG	Umbau 1.BA KG/EG
2401	TU-Sporthalle	Berechnung Einsparung möglich	Energetische Sanierung der Flachdachflächen der Sporthalle sowie des Sanita	Sanierung Gebäudehülle
2401	TU-Sporthalle	Berechnung Einsparung möglich	Energetische Ertüchtigung Süd-Fassade Sozialtrakt; 2.BA	Sanierung Gebäudehülle
2401	TU-Sporthalle	Berechnung Einsparung möglich	Energetische Ertüchtigung Süd-Fassade Sozialtrakt; 2. BA	Sanierung Gebäudehülle
2401	TU-Sporthalle	Berechnung Einsparung möglich	Erneuerung Türen und Fenster Westfassade; Sozialtrakt	Sanierung Gebäudehülle
2402	Halle 5/6	Berechnung Einsparung möglich	Fassadensanierung Halle 5 (Berufung Prof. Zehfuß)	Sanierung Gebäudehülle
2402	Halle 5/6	Berechnung Einsparung möglich, aber 2010	Dachsanierung der Geb 2402 und 2403	Sanierung Gebäudehülle
3302	Hauptgebäude	Angaben komplett	Sanierung der Sheddächer durch Aufbringung von 16cm MF-Dämmung (WLG	Sanierung Gebäudehülle
3302	Hauptgebäude	Angaben komplett	Teilsanierung der Flachdachbereiche des Bürotrakts mit 18cm MF-Dämmung	Sanierung Gebäudehülle
3304	Institutsgebäude IWF	neu aus Conject	Sanierung der Flachdachfläche zwischen Sheds und Verwaltung; vorab nur Pl	Sanierung Gebäudehülle

Abbildung 36 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 1 [IGS]

Für die spätere Querauswertung von Maßnahmen werden die Gebäude nach der Gebäudetypisierung aus „EnEff Campus I“, sowie nach Nutzung gemäß Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK) gekennzeichnet. Die Angaben von Baujahr und Netto-Grundfläche des jeweiligen Gebäudes sind dabei obligatorisch. Wenn sich die Maßnahmen nicht explizit auf ein Gebäude beziehen, sondern auf ein Campusareal (z.B. für ein Quartiers-BHKW, Fernwärmeleitung in einem Areal, etc.), sind diese als 4-stellige Nummer beginnend mit der zweistelligen Planquadrats-Kennung sowie zwei Nullen zu kennzeichnen. Exemplarisch für das Areal „Campus Nord“ wird die Arealnummer 1300 vergeben. Bezieht sich eine Maßnahme auf den gesamten Campus (z.B. Energieeffizienzkampagnen) ist die 4-stellige Zahl 1000 anzugeben.
Die anzugebene Gesamt-Netto-Grundfläche ist dabei als Summe aller auf dem betreffenden Areal befindlichen Netto-Grundflächen der Einzelgebäude zu verstehen. Baujahr und Gebäudetyp können hierbei vernachlässigt werden.

Den Stand der Maßnahmen betreffend kann zwischen Planung (vor Beginn einer Maßnahme) und Umsetzung (in Umsetzung befindlich bzw. bereits umgesetzt) gewählt werden. Dies dient in erster Linie der groben zeitlichen Zuordnung und ob eine Maßnahme in den Unterbereichen „Planung“ oder „Umsetzung“ erfasst werden muss. Dies wird im späteren Verlauf erläutert.

Differenzierter zu betrachten und für die spätere Auswertung relevanter ist das genaue Datum der Umsetzung – gemeint ist die Inbetriebnahme bzw. der Beginn der Wirksamkeit einer Maßnahme. Aus dieser zeitlichen Eingrenzung kann auf Grundlage der 15-minütigen Lastprofile, die für jedes Gebäude vorliegen, eine Analyse der Verbrauchsentwicklung durch eine Vorher-Nachher-Messung erfolgen.

Index	Nummer	Prüfung Index	Typ	Nutzung	Baujahr	NGF	Bauauftragsnummer	Veröffentlichung	Stand	Umsetzung	KG 300	KG 400
[1-9						[m²]	GB3			[tt.mm.jjj	[€]	[€]
1	1304_01.1		Typ_02	Institutsgebäude I	1936	2.325	17-BH-02172	auf Homepage	Planung		1.100.000	
1	2401_01.1		Typ_S	Sportbauten	1973	2.511	12-BH-01513	auf Homepage	Umsetzung	01.12.2012	714.560	
2	2401_01.2		Typ_S	Sportbauten	1973	2.511	15-BB-02042	auf Homepage	Umsetzung		20.000	
3	2401_01.3		Typ_S	Sportbauten	1973	2.511	15-BB-02020	auf Homepage	Umsetzung		20.000	
4	2401_01.4		Typ_S	Sportbauten	1973	2.511	12-BB-01543	auf Homepage	Umsetzung		40.000	
1	2402_01.1		Typ_04	Institut für Forschung und	1965	2.687	13-BH-01862	auf Homepage	Umsetzung		272.000	
2	2402_01.2		Typ_04	Institut für Forschung und	1965	2.687	10-BB-01299	auf Homepage	Umsetzung		430.000	
1	3302_01.1		Typ_03	Institutsgebäude III	1954	5.504	14-BH-01966	auf Homepage	Umsetzung	01.08.2016	670.000	

Abbildung 37 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 2 [IGS]

Eine Erfassung von Investitionskosten der Maßnahmen ist in die Unterkategorien der Kostengruppen gegliedert: KG 300 für Baukonstruktion und KG 400 für anlagentechnische Komponenten. Hierbei sollen alle zur Umsetzung und Wirksamkeit der Maßnahme relevanten Investitionskosten zusammengefasst werden. Sekundäre Kosten, die keinen energetischen

Hauptbezug zur jeweiligen Maßnahme darstellen, sollen hierbei nach Möglichkeit entfallen, sodass eine objektive ökonomische Bewertung der Maßnahme erfolgen kann.

Wie bereits in der vorangegangenen Projektphase werden die Gesamtkosten zur Bewertung und zur Übertragbarkeit auf andere Gebäude als spezifische Investitionskosten mit Bezug auf die Netto-Grundfläche (NGF) ausgewiesen.

Gesamt		QE Wärme	QE Strom	QE Erdgas	Gesamt		f_P Wärme	f_P Strom	f_P Erdgas	PE-Wärme	PE-Strom	PE-Erdgas	PE-Gesamt	
[€]	[€/m²]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/(m²a				[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/(m²a
1.100.000	473,12				0	0,00	0,70	2,60	0,50	0	0	0	0	0,00
714.560	284,57	125.000			125.000	49,78	0,70	2,60	0,50	87.500	0	0	87.500	34,85
20.000	7,96	14.000			14.000	5,58	0,70	2,60	0,50	9.800	0	0	9.800	3,90
20.000	7,96	16.000			16.000	6,37	0,70	2,60	0,50	11.200	0	0	11.200	4,46
40.000	15,93	20.000			20.000	7,96	0,70	2,60	0,50	14.000	0	0	14.000	5,58
272.000	101,23	21.000			21.000	7,82	0,70	2,60	0,50	14.700	0	0	14.700	5,47
430.000	160,03	71.000			71.000	26,42	0,70	2,60	0,50	49.700	0	0	49.700	18,50
670.000	121,73	137.085			137.085	24,91	0,70	2,60	0,50	95.959	0	0	95.959	17,43

Abbildung 38 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 3 [IGS]

Im Weiteren werden die zu erwartenden, berechneten oder prognostizierten Energieverbrauchsreduzierungen (hier auf Endenergie bezogen) für Wärme und Strom dokumentiert. Die Umrechnung auf Primärenergie, CO2-Emissionen und Energiekosten erfolgt dabei anhand der vorgegebenen spezifischen Grundparameter der Primärenergiefaktoren, CO2-Äquivalente und Energiebezugspreise. Auch hierbei werden absolute und flächenspezifische Kennwerte gebildet, sodass eine Übertragbarkeit der Maßnahmen mittels flächengewichteter Prognoseberechnung ermöglicht wird.

$CO2_{equ}$ Wärme	$CO2_{equ}$ Strom	$CO2_{equ}$ Erdgas	CO2 Wärme	CO2 Strom	CO2 Erdgas	CO2 Gesamt		AP Wärme	AP Strom	AP Erdgas	Wärmekosten	Stromkosten	Erdgas	Kosten Gesamt		Amortisation
[kg/kWh]	[kg/kWh]	[kg/kWh]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/(m²a]	[€/kWh]	[€/kWh]	[€/kWh]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/(m²a)]	[a]
0,200	0,609	0,020	0	0	0	0	0,00	0,100	0,190	0,068	0	0	0	0	0,00	-
0,200	0,609	0,020	25.000	0	0	25.000	9,96	0,100	0,190	0,068	12.500	0	0	12.500	4,98	> 20
0,200	0,609	0,020	2.800	0	0	2.800	1,12	0,100	0,190	0,068	1.400	0	0	1.400	0,56	14,29
0,200	0,609	0,020	3.200	0	0	3.200	1,27	0,100	0,190	0,068	1.600	0	0	1.600	0,64	12,50
0,200	0,609	0,020	4.000	0	0	4.000	1,59	0,100	0,190	0,068	2.000	0	0	2.000	0,80	20,00
0,200	0,609	0,020	4.200	0	0	4.200	1,56	0,100	0,190	0,068	2.100	0	0	2.100	0,78	> 20
0,200	0,609	0,020	14.200	0	0	14.200	5,28	0,100	0,190	0,068	7.100	0	0	7.100	2,64	> 20
0,200	0,609	0,020	27.417	0	0	27.417	4,98	0,100	0,190	0,068	13.708	0	0	13.708	2,49	> 20

Abbildung 39 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 4 [IGS]

Für eine grundlegende Beurteilung der Relevanz zur Planung und Umsetzung einer Maßnahme wird ein Organigramm entwickelt, welches unterstützend als Entscheidungsgrundlage für kurzfristig, mittelfristig und langfristig umsetzbare Sanierungsmaßnahmen sowohl der TU Braunschweig, dem Gebäudemanagement als auch dem IGS dienen soll.

Primäre Entscheidungsparameter bilden hierbei sowohl ökologische und projektzielrelevante Aspekte wie die Primärenergiereduzierung und Verringerung von CO2-Emmissionen, als auch ökonomische Faktoren wie Investitionen, Energiekosteneinsparungen und Amortisationszeiträume. Des Weiteren wird die Möglichkeit einer finanziellen Bezuschussung durch Förderprogramme berücksichtigt und die ggf. erforderliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angepasst. Ziel dieser Entscheidungsgrundlage ist es, den zeitlichen Ablauf in der Entscheidungsfindung für die Planung und Umsetzung standardisierter, energetisch und wirtschaftlich sinnvoller Maßnahmen zu reduzieren.

Die Umsetzung von energetisch relevanten Maßnahmen erfolgt federführend durch das Gebäudemanagement der TU Braunschweig (GB3). Hierbei werden sowohl organisatorisch-energetische Maßnahmen (z.B. Betriebsoptimierungen technischer Anlagen, Nutzerinformationen), wie auch kostenintensivere Maßnahmen (z.B. Sanierung der Gebäudehülle, Beleuchtungserneuerung, Installation von Photovoltaik, usw.) durchgeführt. (s. Kap. 7.1.2)

Auf Basis des in der ersten Phase entwickelten Masterplans wird im Hinblick auf die prognostizierten Einsparungspotenziale in den Bereichen Endenergie, Primärenergie, CO2-Emissionen und Energiekosten der Fokus auf die Umsetzung im Bereich Betriebsoptimierung RLT-Anlagen, Austausch der Beleuchtung und Integration von PV auf den Dachflächen der Gebäude der TU Braunschweig gelegt. Im Rahmen der Umsetzung der jeweiligen Maßnahme erfolgt kontinuierlich eine Abstimmung zwischen dem GB3 und dem IGS.

Seit Einführung der universitätsinternen Energiekostenbudgetierung zum 01.01.2014 wurden bereits erste gering investive Maßnahmen umgesetzt, die zur Evaluierung eine rückwirkende Dokumentation erfordern. Diese Einzelmaßnahmen wurden unter Anwendung des beschriebenen Maßnahmenkatalogs nachträglich erfasst.

Die Dokumentation beinhaltet wie bereits erläutert eine kurze Beschreibung zur Art und dem Umfang der Maßnahme, den prognostizierten und ggf. bereits evaluierten Energieverbrauchsdaten und Investitionskosten, sowie die Angabe von relevanten Hauptkomponenten und Kenndaten. Darüber hinaus werden die Umsetzungszeiträume und der Zeitpunkt der Wirksamkeit, d.h. der Zeitpunkt der Inbetriebnahme oder des Maßnahmenabschlusses, erfasst. Somit ist eine zeitliche Einordnung der Energieverbrauchs-Kennwerte vor und nach erfolgter Umsetzung einer Maßnahme möglich. Die Grundlage hierfür liefert das Gebäudemanagement der TU Braunschweig. Es besitzt eine hervorragende Datenlage zum Energieverbrauch (Wärme und Strom) auf Basis von 500 installierten Messstellen. Die Evaluation der prognostizierten Energieeinsparungen erfolgt mithilfe dieser gemessenen 15-minütigen Wärme- und Stromverbräuche aus den Messdaten der ENerGO+-Erfassungsoberfläche. Für die Betrachtung liegen vollständige Gebäude-Verbrauchsdaten rückwirkend bis zum 01.01.2011 vor, welche für die Analyse verwendet werden können.

Die Dokumentation von Maßnahmen erfolgt in unterschiedlichen Kategorie: zum einen gering investive Maßnahmen, wie institutsinterne Umsetzungen, die z.B. aus der Energiekostenbudgetierung resultieren. Dies sind u.a. Beratungen zur Energieeinsparung durch die Energieberater, institutsinterne Kampagnen oder die Optimierung von technischen Anlagen; zum anderen kostenintensive Maßnahmen aus der Sanierungs- und Bauunterhaltungsplanung des Gebäudemanagements (GB3). Eine nachträglich detaillierte und lückenlose Dokumentation gestaltet sich anspruchsvoll, da eine zentrale Registrierung von umgesetzten Maßnahmen bisher nicht erfolgt ist, so dass im Rahmen der Maßnahmendokumentation eine einheitliche Erfassungsstrategie entwickelt wurde.

Darüber hinaus werden mittelfristig geplante Umsetzungen und deren berechnete Einsparprognosen ebenso erfasst, wie bereits ausgeführte und umgesetzte Maßnahmen. So kann im weiteren Verlauf und für spätere Sanierungsempfehlungen ein Planungsverlauf hinsicht-

lich prognostizierten, erwarteten Kosten- und Energieverbrauchsänderungen und tatsächlich erzielten Einsparungen abgeleitet werden. Ziel ist die Entwicklung eines Katalogs für Handlungsempfehlungen zukünftiger investiver Maßnahmen.

7.1.3.1 Lastganganalyse zur Maßnahmenbewertung

Aufbauend auf der Datenerfassung werden jeweils für den Strom- und Wärmeverbrauch Methoden entwickelt, die eine Gegenüberstellung der Gebäudeenergieverbräuche als Lastprofile abbilden und analysieren. Dabei erfolgen die Betrachtungen für die Zeiträume vor, während und nach Umsetzung einer jeweiligen Maßnahme. Die Zeiträume sind dabei separat wählbar und können dynamisch angepasst werden. Veränderungen der Lastprofile werden anschließend in ein festgelegtes Bezugs- bzw. Basisjahr aufsummiert, um einen Jahresvergleichswert zu erhalten. Die Gesamtbetrachtung über einen Zeitraum von einem Jahr ist z.B. für den Strombezug erforderlich, da es insbesondere bei Gebäuden mit komplexer stromrelevanter Ausstattung wie z.B. Kälteanlagen, RLT-Anlagen oder Laborausstattung zum Teil große saisonale Unterschiede geben kann, die auf Basis eines zu geringen Referenz-Messzeitraums zu Fehlinterpretationen der Stromlast- und Stromverbrauchsänderung führen können. Zur Auswertung der Einsparungen aus wärmerelevanten Maßnahmen ist der Betrachtungszeitraum von 365 Tagen / 1 Jahr obligatorisch, da aufgrund der jahreszeitlichen und klimatischen Unterschiede über ein Jahr erhebliche Schwankungen des Energiebezugs entstehen.

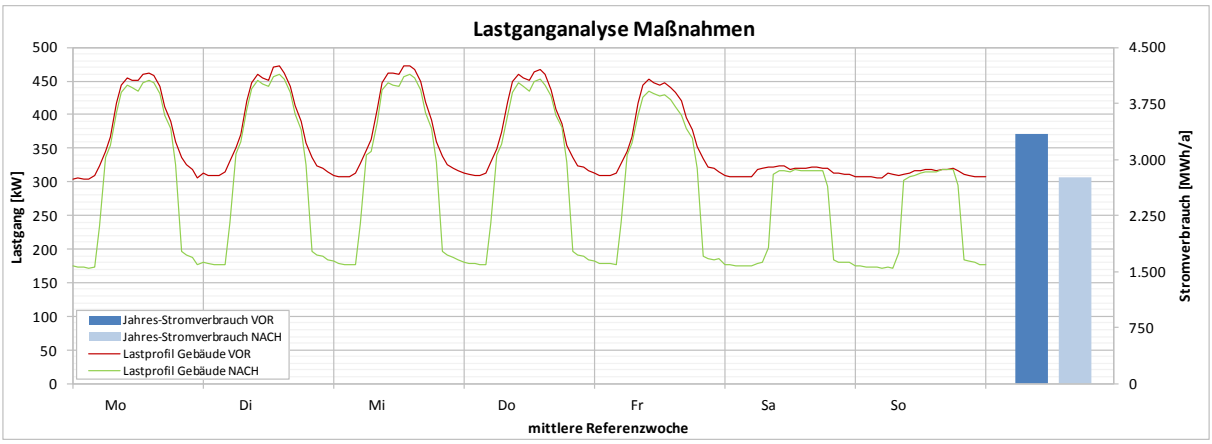


Abbildung 40 ***Methodik Lastganganalyse zur Maßnahmenbewertung Stromlastprofil 4304 Chemie-Neubau [IGS]***

Die Auswertung der Energiereduzierungen über die Betrachtung eines sehr kurzen Messzeitraum kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht genau bestimmt werden, eine Strategie bzw. Methode hierfür wird jedoch im weiteren Verlauf des Projekts erarbeitet. Die vorgezogene Testdokumentation einer Betriebsoptimierung vorhandener raumlufttechnischer Anlagen im Gebäude „4304 Chemie-Neubau“ konnte bereits analysiert und ausgewertet werden (s. Abbildung 40).

Nach Überprüfung und Anpassung der Rechenmodelle und Analysemethode können nun aus vorliegenden empirischen Energieverbrauchswerten und detaillierten Gebäudelastgängen umgesetzte Energieeffizienzmaßnahmen identifiziert und bewertet werden. Dabei werden gemessene Strom-Referenzlastprofile des betreffenden Gebäudes vor Durchführung einer Maßnahme mit vergleichbaren gemessenen Gebäudelastprofilen nach Umsetzung einer Maßnahme übereinandergelegt und rechnerisch verglichen. Unumgänglich hierbei ist der tatsächliche Zeitpunkt der Wirksamkeit einer jeweiligen umgesetzten Maßnahme, um zeitlich parallel auftretende Wechselwirkungen anderer Einflussfaktoren, wie z.B. Nutzer- und Nutzungsänderungen oder andere externe Effizienzmaßnahmen, vermeiden bzw. differenzieren zu können.

Werden aus organisatorischen, planungs- und ausführungsrelevanten Gründen Maßnahmen zeitgleich umgesetzt oder können aufgrund von langwierigen Umsetzungen nicht voneinander getrennt ausgeführt werden, sind virtuelle Anpassungen erforderlich. Für die Bewertung der Maßnahmen aus gemessenen Stromlastprofilen werden hierfür im ersten Schritt die absoluten tatsächlichen Lastgänge vergleichbarer Messintervalle gegenübergestellt und bewertet (s. Abbildung 41 und Abbildung 42). In diesem gezeigten Beispiel des Gebäudes 4269 (Biozentrum) wird eine Veränderung der Grundlast in den Jahren von 2013 bis 2016 bei einem scheinbar gleichbleibenden Spitzenlastbezug deutlich. Diese sind auf eine Optimierung der RLT-Anlagen im Zeitraum von 16 Monaten von 2014 – 2015 zurückzuführen, wobei eine Reduzierung der Volumenströme bei gleichbleibender Betriebszeit umgesetzt wurde. Die vollständig gemessene Reduzierung des Endenergieverbrauchs für Strom wird mit 607.000 kWh/a angegeben.

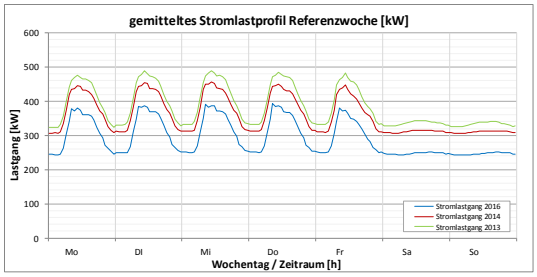


Abbildung 41 Stromlastprofil gemessen [IGS]

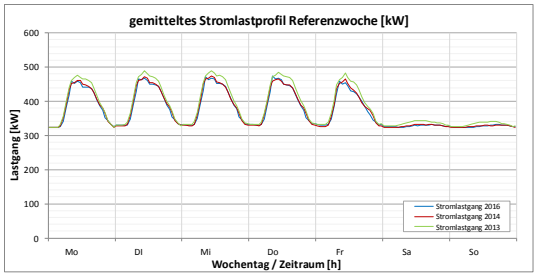


Abbildung 42 Stromlastprofil virtuell angepasst [IGS]

Da parallel zu dieser Maßnahme auch die Beleuchtung der Flurzonen durch den Einsatz von LED-Lampen erneuert wurde, sind die Veränderungen aus den Tagesspitzen des Strombezugs zu differenzieren. Um dies zu erreichen wird eine virtuelle Angleichung der Lastprofile bezogen auf ihre Dauergrundlasten erzeugt (s. Abbildung 42). Dabei werden die tatsächlichen Differenzen der Grundlast der Basis-Referenzwoche (hier: 2013) und der Ziel-Referenzwochen (hier: 2015 und 2016) virtuell bereinigt, sodass die Dauergrundlastverläufe sich virtuell überlagern. In den Lastspitzen der verschiedenen Referenzprofile werden nun Abweichungen in den Spitzenlastbezügen sichtbar und messbar, was in der genannten Abbildung verdeutlicht wird. Basierend auf der auffälligen Konstanz dieser Veränderungen, welche an allen fünf Werktagen während der Hauptnutzungszeiten des Gebäudes sowie an

den Wochenenden auftreten, wird hier der Einfluss aus der Erneuerung der Verkehrswegebeleuchtung zugrunde gelegt.

Als Resultat aus dieser Analyse kann eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs für Strom mit rund 540.000 kWh/a auf die Betriebsoptimierung der RLT-Anlage zurückgeführt werden. Der Stromverbrauch aus der Erneuerung der Flurbeleuchtung wird um 67.000 kWh/a reduziert.

Zur Bewertung von Maßnahmen, die für die Veränderungen des Wärmeverbrauchs relevant sind, wird eine andere Analyse durchgeführt. Da der Wärmeverbrauch einer großen jahreszeitlichen Schwankung unterliegt, ist eine Betrachtung und Auswertung allein für eine gemittelte Referenzwoche schwierig und wenig aussagekräftig. Die Analyse erfolgt daher über den Zeitraum eines gesamten Jahres als Tagesverbrauchswerte. Ähnlich wie in der beschriebenen Gegenüberstellung der Stromlastprofile wird ein gemessener Basis-Wärmeverbrauch eines Gebäudes ausgewählt und mit bis zu zwei gemessenen Ziel-Wärmeverbräuchen verglichen. Um eine möglichst objektive Vergleichbarkeit zu erreichen, müssen diese aufgrund der witterungs- und klimabedingten Schwankungen in den unterschiedlichen Jahren bereinigt werden. Entsprechend den Vorgaben der VDI 2067 werden hierfür aus den gemessenen Tages-Außentemperaturen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) tagesweise Gradtagszahlen für die jeweiligen Datenpunkte gebildet und mit langjährigen Mittelwerten (hier: MW 2000 – 2015) des entsprechenden Tages gegenübergestellt. Aus dem daraus resultierenden Tagesklimafaktor wird je ein witterungsbereinigter Tageswärmeverbrauch für die zu betrachtenden Wärmeverbräuche erstellt. In Abbildung 43 wird exemplarisch die Entwicklung für das Gebäude 2401 TU Sporthalle dargestellt. Nach einer energetischen Sanierung der Flachdachbereiche sowie Teilbereichen der Außenfassade im Jahr 2012 ist dieses Gebäude sehr gut für die längerfristige Evaluation der Messergebnisse geeignet.

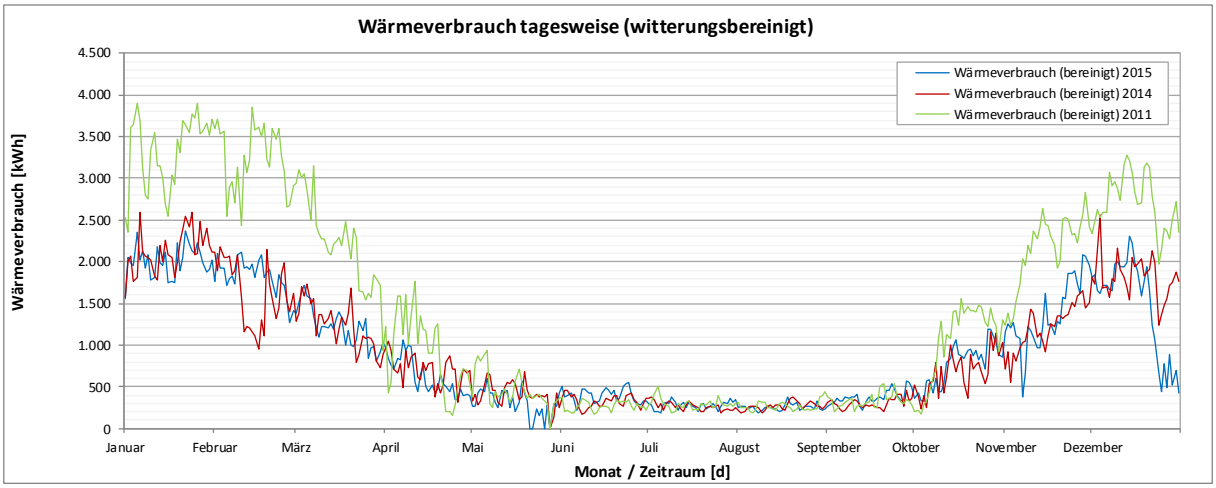


Abbildung 43 ***Lastganganalyse Wärme zur Maßnahmenbewertung Wärmeverbrauchsprofil 2401 TU Sporthalle [IGS]***

In der Abbildung wird deutlich, dass die Graphen der Jahre nach der Sanierung konstant verlaufen und bis auf einige nutzungsbedingte Veränderungen witterungsbereinigt ein ähnliches Bild aufzeigen. Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs aus der Sanierung kann nach der Analyse mit ca. 197.000 kWh/a angegeben werden, was einer Reduzierung des Endenergieverbrauchs für Wärme von 37 % entspricht.

Eine Unterscheidung von mehr als zwei zeitgleich auftretenden und in Umsetzung befindlicher Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht genau bestimmt werden, wird aber im weiteren Vorgehen untersucht. Grundlage für die exakte Identifikation der Maßnahmen ist eine erhöhte Dokumentationsgenauigkeit in Hinblick auf Umsetzungs- und Wirkungszeitpunkt. Insbesondere für bereits seit längerer Zeit umgesetzte und abgeschlossene Effizienzmaßnahmen, die rückwirkend erfasst werden müssen, sowie noch nicht direkter Gegenstand des Forschungsprojekts waren, ist eine detaillierte Nachführung der Daten zeitaufwendig. Des Weiteren werden Energieeffizienzmaßnahmen nicht immer als solche definiert, wenn beispielsweise eine kurzfristige Beratung bezüglich Einsparmaßnahmen stattgefunden hat.

Ebenso können Maßnahmen, die durch Forschungsinstitute direkt umgesetzt werden, kaum festgehalten werden, da hierfür keine Dokumentationsverpflichtung besteht. Beispiele hierfür sind die Anschaffung energiesparender Arbeitsgeräte, intern durchgeführte Energieeinsparschulungen oder Maßnahmen zur Erhöhung der Flächeneffizienz.

Der Dokumentation dieser Maßnahmen wird jedoch mittlerweile ein hoher Stellenwert beigemessen. Die bisherige, nach Priorität untergeordnete Dokumentationsrelevanz der ausführenden und umsetzenden Stelle ist durch Schaffung einer personellen Kommunikationsschnittstelle in den Vordergrund gerückt.

7.1.4 Neubauten TU Braunschweig

Der bisherige Betrachtungsschwerpunkt der Liegenschaften auf den Campusarealen der TU Braunschweig lag auf den ca. 200 Bestandsgebäuden. Seit 2011 ist jedoch ein Zuwachs an Neubauten mit einer Gesamt-Nettogrundfläche von ca. 35.000 m² zu verzeichnen. Da diese in Zukunft einen relevanten Teil des Energieverbrauchs der Hochschule einnehmen, wurde eine detaillierte Untersuchung dieser Gebäude durchgeführt. Dabei wurden Kenndaten zu Baukosten, Planungszeiträumen, Flächen- und Raumdaten, technische Ausstattungen sowie Energiebedarfs- und Verbrauchskennwerte untersucht und ausgewertet.

Abbildung 44 Übersicht Lageplan Neubauten [IGS]

Tabelle 13 Übersicht Neubauten [IGS]

2405		**MPA Halle** Nutzung: Materialprüfungs- u. Versuchsanstalt Adresse: Beethovenstraße 52 Fläche (NGF): 1.061 m² Bauzeit: 2014 - 2015 Baukosten: 2 Mio. €
2433		**Erweiterungsbau iBMB** Nutzung: Verwaltungsgebäude Adresse: Beethovenstraße 53 Fläche (NGF): 240 m² Bauzeit: 11/2012 - 09/2013 Baukosten: k.A.

3210		**Braunschweig Integrated Centre for Systems Biology (BRICS)** Nutzung: Institutsgebäude V Adresse: Konstantin-Uhde-Straße 13 Fläche (NGF): 6.684 m² Bauzeit: 11/2013 - 11/2015 Baukosten: 22,9 Mio. €
3329		**Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik (PVZ)** Nutzung: Institutsgebäude V Adresse: Franz-List-Straße 35a Fläche (NGF): 6.533 m² Bauzeit: 10/2014 - 04/2016 Baukosten: 24,2 Mio. €
3330		**Studierendenhaus FK4** Nutzung: Institutsgebäude Adresse: Langer Kamp 19d Fläche (NGF): 959 m² Bauzeit: 04/2015 - 05/2016 Baukosten: 2,35 Mio. €
3331		**Laboratory of Emerging Nanometrology and Analytics (LENA)** Nutzung: Institutsgebäude V Adresse: Langer Kamp 6a Fläche (NGF): 1.956 m² Bauzeit: 01/2015 - Baukosten: 6,6 Mio. €
9980		**Niedersächsisches Forschungszentrum Luftfahrt (NFL)** Nutzung: Institutsgebäude III Adresse: Hermann-Blenk-Straße 37 Fläche (NGF): 6.440 m² Bauzeit: 05/2010 – 04/2012 Baukosten: 26,5 Mio. €
9988		**Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF)** Nutzung: Institutsgebäude IV Adresse: Hermann-Blenk-Straße 42 Fläche (NGF): 10.644 m² Bauzeit: 06/2012 – 09/2014 Baukosten: 32,5 Mio. €

		Zentrum für leichte und umweltgerechte Bauten (ZELUBA) Nutzung: Forschungsgebäude Adresse: Beethovenstraße Fläche (NGF): 1.700 m² Bauzeit: 2017 - 2018 Baukosten: 10 Mio. €
		Zeichensaalgebäude FK 3 Nutzung: Zeichensaalgebäude Adresse: Pockelstraße Fläche (NGF): 1.160 m² Bauzeit: in Planung Baukosten: 2 Mio. €

Die Auswertung der Planungsunterlagen und dem Vergleich von Planung und Umsetzung der energetischen Gebäudequalität zeigt sich, dass zum großen Teil innovative Konzepte und hohe energetische Standards fehlen. Teilweise in der Planung noch berücksichtigt, werden diese in der Ausführung nicht weiterverfolgt oder gar umgesetzt. Die Einbeziehung von erneuerbaren Energien z.B. aus Photovoltaik oder Biomasse wurden bei keinem Neubau in der Ausführung umgesetzt, verbesserte Dämmstandards oder der Einbau von innovativer Gebäudetechnik sind nicht berücksichtigt. Die energetische Qualität beschränkt sich zumeist auf die Anforderung der jeweils gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV). Für zukünftige Neubauten sind daher zwingend verbesserte Energiestandards festzulegen und zu definieren, um eine aus energetischer Sicht zukunftsfähige Gebäudeinfrastruktur zu erreichen. Aufbauend auf der Grundlage der 2011 erstellten EU-Gebäuderichtlinie wird in den nächsten drei Jahren der noch zu definierende und festzulegende „Niedrigstenergiestandard“ für Gebäude verpflichtend, sodass eine Nichtberücksichtigung von erneuerbaren Energien nicht mehr möglich ist.

7.1.5 Denkmalgeschützte Gebäude TU Braunschweig

Durch die Dokumentation und Bewertung der Bestandsgebäude der TU Braunschweig in der abgeschlossenen Phase 1 und der Differenzierung dieser in 10 verschiedene „Typengebäude“ sowie eines Sondertypen konnte ein Querschnitt des TU-Campus und die Potenzialbewertung mittels Übertragbarkeit und Hochrechnungs-Simulationsprognosen abgebildet werden. Die Berücksichtigung und Bewertung von denkmalgeschützten Gebäuden wurde dabei bisher untergeordnet betrachtet.

Da der Denkmalschutz im Rahmen einer Sanierung keine unwesentliche Rolle spielt, erfolgt eine Analyse des Denkmalbestands der TU Braunschweig sowie die mögliche Definition eines Gebäudetyps „Denkmal“. Hierbei wird der vollständige Denkmalbestand von insgesamt 27 Gebäuden (detaillierte Aufstellung Anhang 16.1.1) nach Flächen- und Raumkenndaten, Nutzung dokumentiert sowie nach den vorliegenden Energieverbrauchsdaten für Strom und Wärme analysiert. Überwiegend ist das Baualter dieser Gebäude in der Gründerzeit (1871 –

1918) sowie in der Begründungszeit der „Braunschweiger Schule“ (1960er und 1970er Jahre) anzusetzen, welche auch die größeren Ausbau- und Erweiterungsphasen der TU Braunschweig widerspiegeln. In der durchgeführten Untersuchung wurden allgemeine Denkmalkriterien mit den spezifisch relevanten Kriterien der jeweiligen betrachteten Gebäude verglichen und Möglichkeiten verschiedener Sanierungsmaßnahmen untersucht.

Abbildung 45 Gebäude 4228 Ansicht Süd-West [IGS]

Abbildung 46 Gebäude 4228 Ansicht Ost [IGS]

Der Fokus der Untersuchung liegt darauf, dass eine Übertragbarkeit von Maßnahmen von einem Referenzgebäude auf andere Gebäude der vergleichbaren Kategorie „Denkmal“ möglich sein soll. Exemplarisch wird für die Detailuntersuchung ein Gebäude mit dem Baujahr 1880 gewählt, nach Vorgaben der DIN V 18599 [3] zoniert, berechnet und als Grundlage für die weiteren Gebäude des Typs in die Gebäudedatenbank übertragen.
Aufbauend auf den Berechnungen der energetischen Maßnahmen des Gebäudes wird ein Katalog mit Sanierungsempfehlungen als Katalog erstellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Optimierung und energieeffizienten Ertüchtigung von technischen Ausstattungen und Anlagen. Die energetische Sanierung der Gebäudehülle ist insgesamt aufgrund der denkmalrechtlichen Anforderungen und Kriterien oftmals nicht möglich. Lediglich Erneuerungen von Fenstern sowie Sanierungen ohne optische Veränderungseingriffe wie der Wärmedämmung von Dachflächen und Kellerdecken können ohne große Hindernisse umgesetzt werden.

7.1.6 Überprüfung und Validierung entwickelter Werkzeuge

Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Zusammenführung diverser Berechnungs-Tools für die Maßnahme- und Szenarienentwicklung, die im Zuge der ersten Projektphase entwickelt wurden. Grundlage hierfür liefert die Übersichtsstruktur der entwickelten Berechnungs-Modelle hinsichtlich ihrer Eingangsdaten, Grundlagen, Anwendungsbereichen und angestrebten bzw. erreichbaren Ergebnissen (s. Abbildung 47). Somit können Eingabe- und Grundlagendopplungen vermieden, Verknüpfungspotenziale besser erkannt werden.

Ein Großteil der Berechnungs-Programme wird in der weiteren Projektbearbeitung zur Evaluation der Ergebnisse angewendet und bedürfen daher der Verbesserung und Fortschreibung der Anwenderoberfläche.

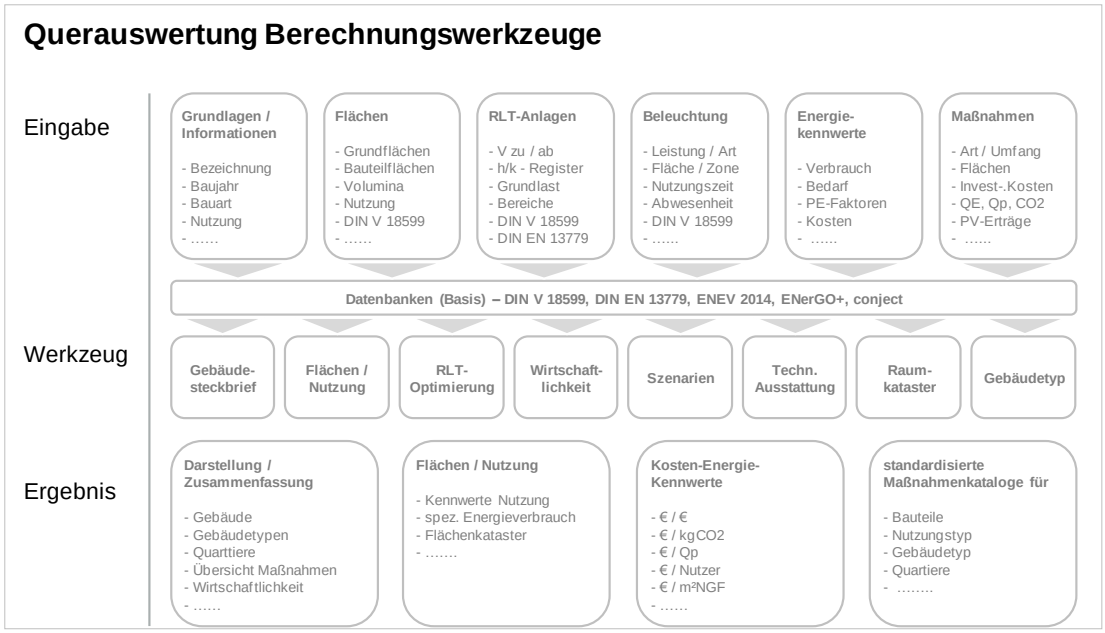


Abbildung 47 Übersicht Auswertung Berechnungs-Werkzeuge [IGS]

Die Vielzahl der in Phase I des Forschungsprojekts entwickelten Berechnungsmodelle sind auf Basis von MS-Excel entstanden. Beispielsweise werden auf Grundlage von Gebäudebestandsuntersuchungen Daten zur Beleuchtungsausstattung erfasst und nach ihrer jeweiligen Nutzung differenziert. Über daraus gebildete flächenspezifische Parameter lassen sich die Ausstattungsstandards auf andere Gebäude mit ähnlichen Nutzungseigenschaften übertragen. Das primäre Ziel dabei ist die Abbildung des Bestands eines Gebäudes zu simulieren, ohne eine detaillierte Gebäudeaufnahme durchgeführt zu haben. Darauf aufbauend werden Sanierungsmaßnahmen zur energieeffizienten Verbesserung der Beleuchtungsausstattung gebildet, die als Ergebnis sowohl die energetischen und ökonomischen Einsparungseffekte liefern, sondern auch eine Aussage zu Anschaffungs- und Investitionskosten treffen.

Weitere vergleichbare Berechnungsmodelle zur Bestimmung von Energieeinsparpotenzialen wurden für die Betriebsoptimierung von raumlufttechnischen Anlagen (RLT), Bewertung von Photovoltaik-Dachflächeninstallationen sowie von energetischen Veränderungen von Gebäudehüllflächen entwickelt. Die Ergebnisse der Berechnungen daraus wurden bisher separat erstellt und als Gesamtergebnisse manuell zusammengetragen.

7.1.6.1 Analysetools zur Sanierung von Gebäuden „AnSaGe“

Aufgrund der großen Gebäudeanzahl sowie der Komplexität der Berechnungs- und Ausgabeparameter ist die Bearbeitungsdauer mit den einzelnen Berechnungswerkzeugen sehr zeitintensiv und es fällt ein erhöhtes Fehlerpotenzial an. Um dieses zu vermeiden werden die Tools zu einem **An**alysetools zur **Sa**nierung von **Ge**bäuden „AnSaGe“ im MS-Excel-Format zusammengefasst.. Eine allgemeine schematische Berechnungsübersicht wird in der nachfolgenden Abbildung 48 dargestellt.

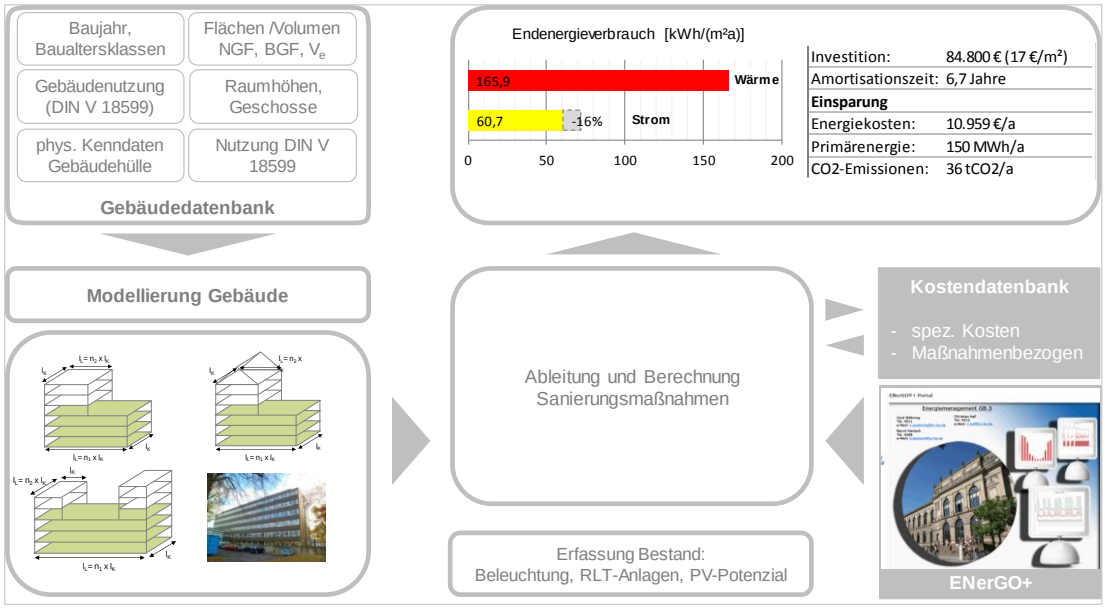


Abbildung 48 Struktur des Analysetools zur Sanierung von Gebäuden „AnSaGe“ [IGS]

Das mittelfristige Ziel ist die Anwendbarkeit der Berechnungswerkzeuge auf andere Bestandsquartiere. So soll der Dokumentationsleitfaden für die Bestandsaufnahme als Grundlage der Berechnungen dienen. Eine standardisierte und detaillierte Gebäudedokumentation unter Berücksichtigung der Gebäude- und Flächenkenndaten sowie der gebäudespezifischen Energieverbrauchskenndaten für Wärme und Strom sind dabei obligatorisch. Hierfür bietet das in der Zusammenstellung befindliche AnSaGe-Tool eine sehr gute und umfangreiche Basis.

Nach erfolgter Bestandserfassung der grundlegenden Kenndaten werden die Gebäude entsprechend der Baualtersklassen und baulicher Konstruktionsmerkmale automatisch nach Gebäudetypen eingeteilt. Die extern eingefügten Bestandsgebäude werden hierbei bereits mit den in der Datenbank hinterlegten Typen-Referenzgebäuden verglichen und mit energetischen Sanierungspotenzialen hinterlegt. Eine detaillierte Erfassung und Eingabe von mehreren Referenzgebäuden des zu untersuchenden Campusareals wird darüber hinaus zwingend empfohlen, da sich die Besonderheiten unterschiedlicher Standorte hinsichtlich technischer Ausstattung nicht ohne weiteres übertragen lassen.

7.1.6.2 Kostendatenbank

Einen weiteren Teil der Entwicklung von Berechnungsgrundlagen bildet die seit dem Beginn des Forschungsprojekts angewendete Kostendatenbank zur energetischen Kostenbewertung. Bisher als statische Tabelle in MS-Excel mit ausschließlich dokumentarischem Umfang sollte diese im Rahmen einer studentischen Ausarbeitung weiterentwickelt werden. Das verfolgte Ziel dabei ist eine Kostenplanungsgrundlage für Maßnahmen der Kostengruppen KG 300 und KG 400 bis in die 3. Ebene sowie das Aufzeigen der daraus erzielten energetischen Veränderungen. In einem ersten Schritt werden die energetischen Kennwerte €/kWhQ_E, €/kWhPE und €/kgCO2 zur Bestimmung der Effizienzpotenziale jeder Maßnahme definiert.

Die Kostengrundlage der einzelnen Maßnahmen bilden sowohl Erfahrungswerte aus tatsächlich umgesetzten Bauvorhaben, spezifische Kostenkennwerte aus den Tabellen des Baukosteninformationszentrums (BKI) sowie Angaben von Herstellern zu technischen oder baukonstruktiven Anlagen. Diese lassen sich in der Datenbank nachträglich verändern, sodass eine Aktualität der Kostenkennwerte gewährleistet werden kann.

Für die energetische Bewertung können sowohl berechnete Prognosen als auch empirische Messdaten als Grundlage angesetzt werden. Eine nachträgliche Anpassung und Änderung in der Datenbank ist ebenfalls jederzeit möglich und ist gewünscht.

Aus den Einzelpositionen und Kostenbausteinen werden die Gesamtinvestitionen der jeweiligen Maßnahme zusammengestellt und die berechneten Energiebedarfs- bzw. gemessenen Energieverbrauchswerte erfasst. Daraus lassen sich spezifische Kennwerte je Gebäudetyp ermitteln und können in den relevanten Kostenpositionen eingefügt werden, sodass für weitere Maßnahmenbetrachtungen bereits Einsparungen im Vorfeld prognostiziert werden können.

In Abbildung 49 ist exemplarisch die entwickelte Eingabeoberfläche des Tools der Kostendatenbank dargestellt.

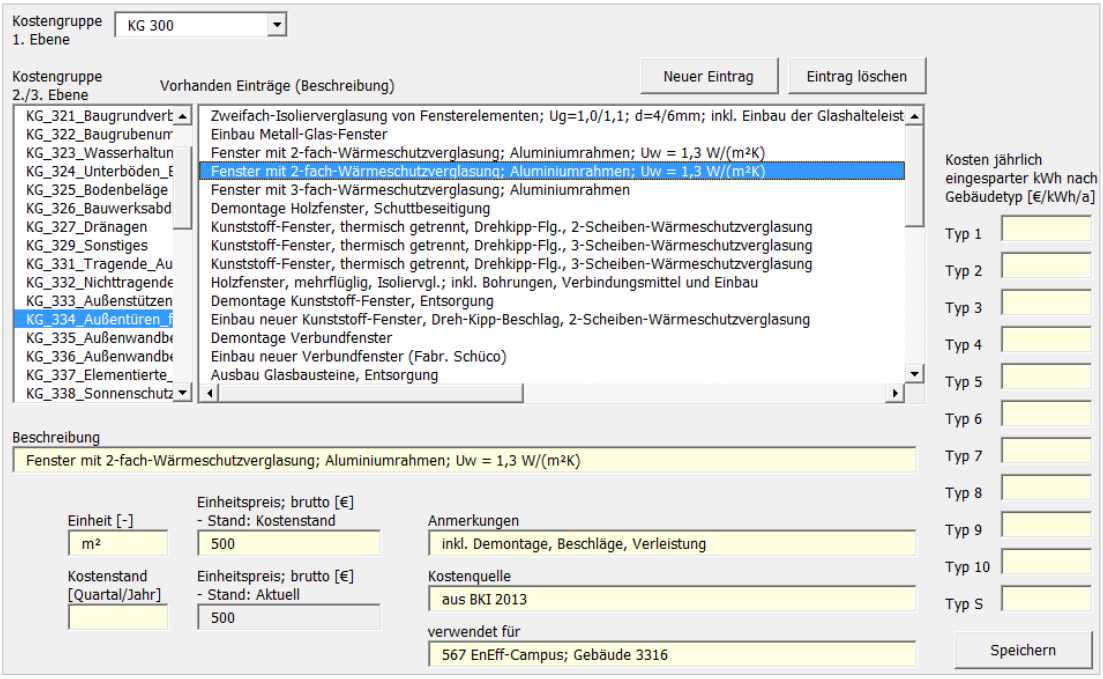


Abbildung 49 Eingabefenster Kostendatenbank [IGS]

7.2 Energieversorgung (elenia in Kooperation mit BS I Energy)

7.2.1 Teilstrategie Energieerzeugung und –speicherung

Um den Primärenergieverbrauch nachhaltig massiv zu senken und bis 2050 eine rein regenerative Energieversorgung zu gestalten, ist der Einsatz dezentraler Energieanlagen erforderlich. Der deutliche Fokus liegt hierbei auf dem Einsatz von PV-Anlagen (PV) sowie Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (Blockheizkraftwerke, BHKW), die mit Biomethan befeuert werden. Biomethan wird als CO2-neutral angenommen und besitzt laut AGFW einen Primärenergiefaktor von 0,5.

Innerhalb der Campus I Phase wurde ein Simulationsmodell für die Einbindung von BHKW in das Fernwärmenetz der TU Braunschweig entwickelt. Unter Berücksichtigung der aktuell gültigen Fernwärmeverträge* mit dem städtischen Versorger BS|Energy erwies sich ein BHKW mit 525 kW thermischer Leistung und ein kleineres Aggregat mit 150 kWth als wirtschaftlich vorteilhaft für die Grundlastversorgung des Ost- bzw. Nord-Campus. Die Umsetzung der genannten BHKW-Aggregate wird derzeit zusammen mit BS|Energy überprüft. In diesem Zusammenhang wurden auch unterschiedliche hydraulische Einbindungskonzepte unter Berücksichtigung der spezifisch für den jeweiligen Standort erforderlichen Hydraulik und der Leistungsfähigkeit der Netze diskutiert.

Für eine genauere Betrachtung der Vor- und Rücklauftemperaturen wurden die Wärmemengenzähler an den Fernwärmeübergabestationen der geplanten Standorte am Ost- und Nordcampus ausgelesen. Die maximale Vorlauftemperatur am Campus Ost betrug ca. 116°C innerhalb der letzten zwei Jahre, sodass hierfür ein BHKW mit einem Temperaturniveau von 110°C im Vorlauf favorisiert wird.

Da das BHKW am Campus Nord in das TU eigene Nahwärmenetz mit einer Temperaturspreizung von 90/70°C eingebunden wird, kann hier auf ein Standard-BHKW zurückgegriffen werden.

Aufgrund der seit Abschluss von Campus I durchgeführten, energetischen Sanierungen einiger Gebäude sowie der Neueröffnung einzelner Gebäude unterscheidet sich der aktuelle Strom- und Wärmebedarf von den ehemals berücksichtigen Werten. Es wurde daher eine Evaluation der bisherigen Dimensionierungsempfehlungen durchgeführt. Die Simulation, ausgehend von den Verbrauchsdaten des Jahres 2015, hat ergeben, dass für den Campus Ost nun ein Aggregat mit 837 kW thermischer Leistung (Spitzenlast Campus Ost 7500 kW thermisch) und den Campus Nord mit 95 kW thermischer Leistung (Spitzenlast Campus Nord 850 kW thermisch) benötigt werden. Die genannten Größen gelten für eine Laufzeitauslegung von 6000 Volllaststunden pro Jahr.

Um die Auslastung des BHKWs am Campus Nord zu steigern, wurde die Erweiterung der herkömmlichen KWK-Kopplung auf eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) untersucht. Die produzierte Kälte kann zur Kühlung von nahegelegenen IT-Räumen genutzt werden. Mittels Simulation konnte gezeigt werden, dass die thermische Leistung des BHKWs für diesen Einsatzzweck auf 115 kW erhöht werden muss. Die errechnete (sehr hohe) Volllaststundenzahl von 7235 h/a kann jedoch die nötigen hohen Investitionskosten (Anschaffungskosten der Absorptionskältemaschine mit zugehörigem Rückkühlwerk sowie Einbindung der Aggregate in die vorhandene Infrastruktur) nicht ausgleichen und wird daher als nicht wirtschaftlich eingestuft.

Weiterhin unterstützt der GB 3 der TU Braunschweig bei der aktuellen Planung und der späteren Umsetzung der Blockheizkraftwerke. Es fanden Vor-Ort-Begehungen der potenziellen BHKW-Standorte (s. Abbildung 50) mit den Elektro- und Hydraulikabteilungen der TU zur Klärung der noch offenen Einbindungsfragen statt.

Abbildung 50 Potentieller Standort für das BHKW am Campus Ost [elenia, GB3]

Die Vor-Ort-Begehungen haben neben der genaueren Aufschlüsselung der Einbindungskosten insbesondere die Thematik einer vorherigen Akustikprüfung zutage gebracht. Der Standort Campus Nord befindet sich im allgemeinen Wohngebiet. Die Entfernung zu den benachbarten Wohnhäusern beträgt ca. 39 m (s. Abbildung 51). In dieser Entfernung dürfen die Geräuschimmissionswerte maximal 55 dB(A) tagsüber und 40 dB(A) nachts betragen. Da das BHKW innerhalb eines bestehendes Gebäudes der TU Braunschweig errichtet werden soll, sind die Geräuschimmissionswerte von 35 dB(A) tagsüber in den betriebsfremden, schutzbedürftigen Räumen einzuhalten. Für Lehr- und Arbeitsräume, die am Campus Nord betroffen sind, gilt des Weiteren die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).

Abbildung 51 Standort für das BHKW am Campus Nord mit akustikrelevanten Abmaßen [elenia]

Diese besagt in Abschnitt 3.7 des Anhangs, dass der Schalldruckpegel in Arbeitsstätten so niedrig zu halten ist, wie es nach Art des Betriebs möglich ist. Der Schalldruckpegel ist in Abhängigkeit von der Nutzung und den zu verrichtenden Tätigkeiten so weit zu reduzieren, dass keine Beeinträchtigungen der Gesundheit der Beschäftigten entstehen. Darüber hinaus ist, nach der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (BildscharbV, Anhang Nr.17), der Lärm soweit zu mindern, dass die Sprachverständigung und Konzentration nicht gestört werden. Gegebenenfalls müssen Schutzmaßnahmen durchgeführt werden.

Beim Campus Ost soll das BHKW frei auf einer Grünfläche der TU Braunschweig im allgemeinen Wohngebiet errichtet werden. Die Entfernung zum nächsten Universitätsgebäude ist ca. 37 m und zum alleinstehenden Wohnhaus ca. 17 m. Auch hier dürfen die von der TA Lärm vorgeschriebenen Immissionsrichtwerte von maximal 55 dB(A) tagsüber und 40 dB(A) nachts nicht überschritten werden.

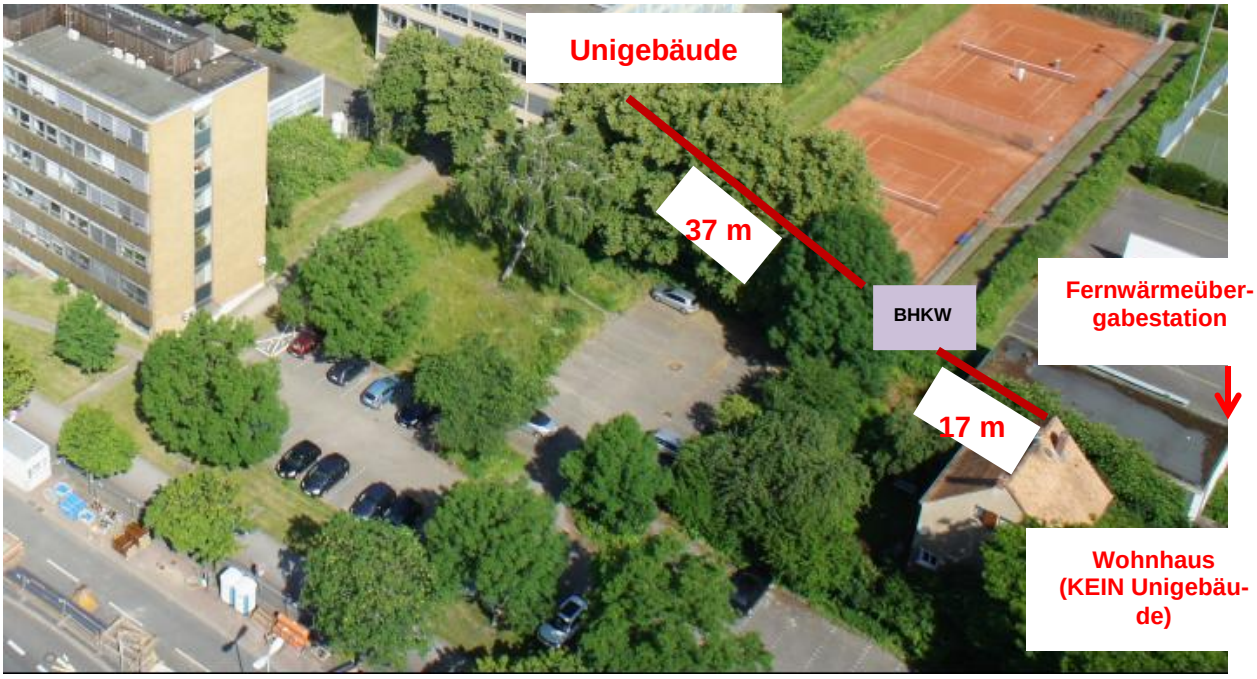


Abbildung 52 Standort für das BHKW am Campus Ost mit akustikrelevanten Abmaßen [elenia]

In weiteren Schritten war zunächst angedacht, mithilfe eines in Auftrag gegebenen Akustikgutachtens zu prüfen, wie hoch die aktuellen Vorbelastungen durch Lärm an den jeweiligen Standorten tagsüber und nachts sind. Zusammen mit den Herstellerangaben der BHKW-Module ließe sich dann die Gesamtbelastung ermitteln.

Aufgrund der unklaren Wärme- und Strombeschaffungspreise der Universität wurde die Akustikprüfung erst einmal zurückgestellt, um die für eine Umsetzung nötige Wirtschaftlichkeit zunächst abschließend zu evaluieren.

Bevor konkret mit der Umsetzung begonnen werden kann, müssen zudem einige Fragen rechtlicher Natur geklärt werden. Da die TU Braunschweig zu den landeseigenen öffentlichen Liegenschaften Niedersachsens gehört, muss sie sich nicht nur bei der Versorgung mit Fernwärme, sondern auch bei der mit Strom und Gas nach den entsprechenden Ausschreibungsmodalitäten der Oberfinanzdirektion (OFD) richten. Demnach wählt die OFD eines Bundeslandes den jeweils wirtschaftlichsten Strom- und Gasanbieter in Form einer Pool-Ausschreibung aus. Für den Betrieb von eigenen Erzeugungsanlagen sind zwar keine gesonderten Genehmigungen durch das Land erforderlich, aber nach den aktuellen Regeln fallen höherpreisige Ökostrom- bzw. Biomethantarife bei den öffentlichen Ausschreibungsverfahren heraus. Um die Umstellung auf ein nachhaltiges System durch eine BHKW-Versorgung mit Biomethan gewährleisten zu können, finden daher zurzeit gemeinsame Gespräche zwischen dem Gebäudemanagement und der OFD statt.

Zudem sind mit der OFD verschiedene Contracting-Modelle im Gespräch, nach dem BS|Energy beispielsweise für die Planung, die Finanzierung, die Errichtung und den Betrieb der BHKW zuständig ist und der TU Braunschweig als Liegenschaftsnutzer Wärme und Strom verkaufen würde.

Bei der Auswahl eines Selbstbetriebs würde die Universität die Planung, Finanzierung, Errichtung sowie den Betrieb und die Wartung der BHKWs selber übernehmen oder sie ganz oder teilweise an verschiedene spezialisierte Unternehmen unter Zuhilfenahme einer vertraglichen Regelung abgeben. Vorteile beim Selbstbetrieb der BHKWs sind die Unabhängigkeit von den Wärme- und Strompreisen der Versorger. Des Weiteren ist die Inanspruchnahme der Förderung aus dem europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE-Förderung) möglich.

Ein Nachteil beim Selbstbetrieb ist allerdings die hohe Anfangsinvestition, die dann nicht an anderer Stelle eingesetzt werden kann. Außerdem ist der Abschluss von einer Vielzahl an Verträgen mit unterschiedlichen Unternehmen nötig, da das Know-How im eigenen Haus für Teilbereiche fehlt. Diese übernehmen dann die Planung, den Bau, den Betrieb und die Wartung der Anlagen. Weiterhin müsste Personal für den technischen und kaufmännischen Betrieb eingestellt werden. Darüber hinaus liegen das gesamte wirtschaftliche Risiko und das Betriebsrisiko auf Seite der Universität. Die Vorteile, die sich durch den Einsatz eines Contracting-Modells gegenüber dem Contractingnehmer (der TU Braunschweig) generieren lassen, sind dabei sehr vielfältig. Sie reichen vom Vorhandensein begrenzter Finanzmittel oder von der Minimierung des eigenen Risikos bis hin zur maximierten Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Die Gespräche mit der OFD haben bisher ergeben, dass durch einen Contractor z.B. im Rahmen eines Energieliefer-Contracting-Projektes (ELC) sowohl eine reine Wärme-/Stromlieferung als auch eine Kombination aus beiden separat zu den bestehenden landesweiten Gas- und Stromlieferverträgen erfolgen kann. Es würde dann eine Anpassung bzw. auch Herausnahme der jeweiligen Abnahmestelle (Liegenschaft) aus den zentralen Lieferverträgen erfolgen. Vor einer möglichen Ausschreibung eines ELC's gemäß §7 der LHO muss aber durch den Nutzer eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung bezüglich verschiedener Varianten der Energieversorgung durch ein unabhängiges Unternehmen durchgeführt werden (Contracting und Eigenbau). Diese externe Wirtschaftlichkeitsprüfung wird aktuell im Namen des Gebäudemanagements bei verschiedenen Ingenieurbüros angefragt.

Da weiterhin die aktuellen Marktpreise und die voraussichtliche Preisentwicklung für Biomethan im nicht regulierten Markt (d.h. keine Inanspruchnahme von EEG-Vergütung oder Anrechnung an die Biokraftstoffquote) über die Wirtschaftlichkeit der Biomethan-BHKWs entscheiden, wurde hierfür ein Forschungsinstitut mit einer entsprechenden Studie im Auftrag des Gebäudemanagements beauftragt. Dabei werden auch Möglichkeiten des Bezugs von Biomethan bzw. dessen Zertifikate aus anderen europäischen Ländern berücksichtigt.

Die Auswertung der Biomethanstudie hat gezeigt, dass der Betrieb von Biomethan-BHKWs im Rahmen des EEG 2017 wirtschaftlich schwer darstellbar ist. Der Bezug von „grünem" Biomethan aus dem Ausland (UK und DK) ist trotz günstiger Kosten kritisch zu betrachten, da eine langfristige Planung (aufgrund der ungewissen Entwicklung der Zertifikatspreise) nicht möglich ist. Dies stellte einen weiteren Unsicherheitsfaktor bei der Wirtschaftlichkeitsprüfung der Aggregate dar. Eine realistische Preissteigerung für Biomethan liegt laut Studie bei 0,6 %.

Für die Planung, Ausschreibung, Ausführung und Inbetriebnahme einer KWK-Anlage der beabsichtigten Größe und in Anbetracht der baulichen erforderlichen Voraussetzungen an den Aufstellungsort wird nach den Erfahrungswerten von BS|Energy und dem Gebäudemanagement ein Zeitraum von zwei Jahren veranschlagt.

Aus Rücksicht auf den begrenzten Handlungsspielraum im Rahmen der bestehenden Fernwärmeverträge* wird am Zentralcampus die Integration eines BHKW-Moduls mit einer thermischen Leistung von 43 kW und einer elektrischen Leistung von 20 kW geplant (siehe Abbildung 4), das in das TU-eigene Nahwärmenetz eingebunden werden soll. Zunächst wird das BHKW aus wirtschaftlichen Gründen mit Erdgas befeuert. Eine Umstellung auf Biomethan ist aber zukünftig geplant.

Abbildung 53 **BHKW-Modul ASV 20/43 [elenia]**

Die Planung erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen dem elenia und dem GB 3, welches zukünftig für den Betrieb und die Wartung zuständig ist. Das BHKW wird Eigentum der TU Braunschweig. Darüber hinaus hat das Institut elenia jederzeit Zugriff auf das Blockheizkraftwerk für Forschungszwecke, um beispielsweise stromorientierte Betriebsweisen zu testen. Die meiste Zeit des Jahres wird das BHKW aber wärmegeführt betrieben. Aufgrund der zusätzlichen Forschungsmöglichkeit und der hiermit erforderlichen Nähe zum elenia hat sich als optimaler Standort ein benachbarter Raum des Heizungskellers vom Institutsgebäude ergeben.

Zur weiteren Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der BHKWs wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (s. Abbildung 54 und Abbildung 55). Hierbei wurde neben den laufenden Kosten und resultierenden Einsparungen auch eine vorgesehene Revision der Aggregate im 10. Jahr berücksichtigt.

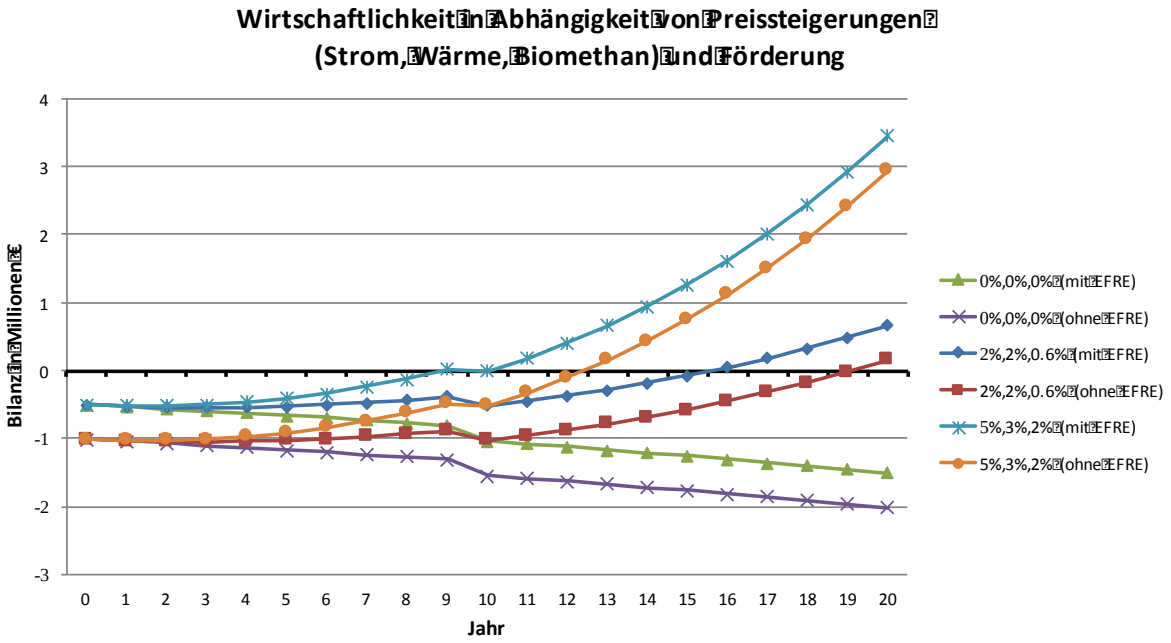


Abbildung 54 Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von Preissteigerungen (Strom, Wärme, Biomethan) und Förderungen am Campus Ost [elenia]

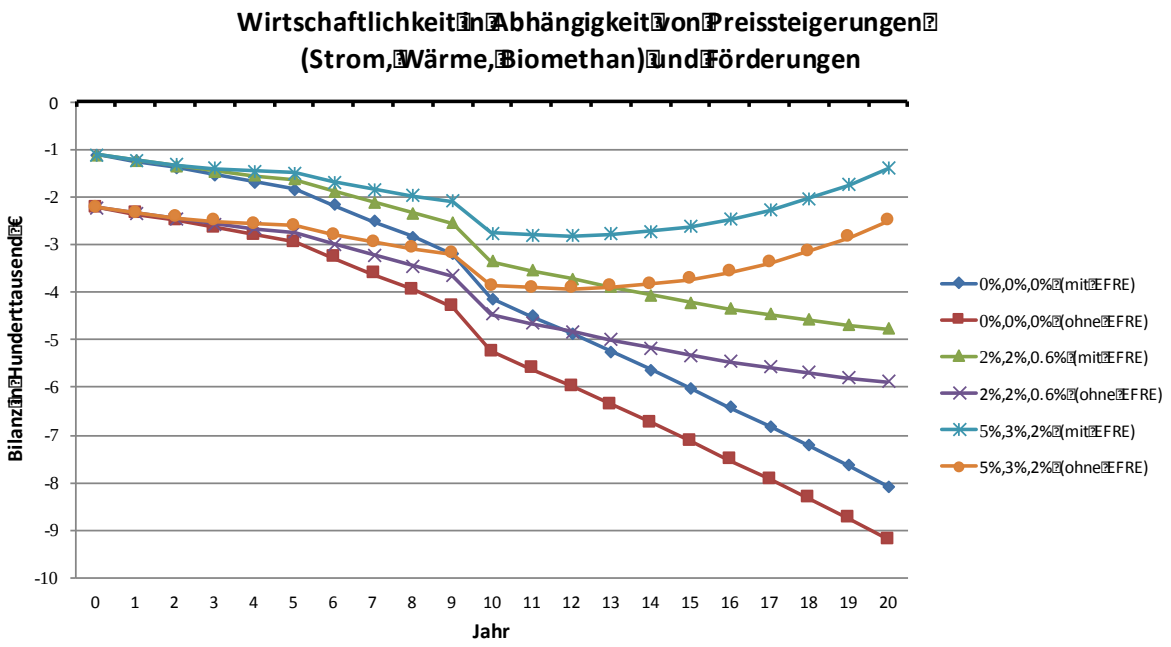


Abbildung 55 Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von Preissteigerungen (Strom, Wärme, Biomethan) und Förderungen am Campus Nord [elenia]

Bei Betrachtung der Ergebnisse ist festzustellen, dass selbst für ein optimistisches Szenario (Preissteigerungen der Strom-, Wärme- und Biomethanpreise von 0% und Einbeziehung der 50% EFRE-Förderung) keine Amortisationszeit der Aggregate unterhalb von 10 Jahren zu erzielen ist. Das realistische Szenario lässt auf eine Amortisationszeit von 15 Jahren mit EFRE- und von 19 Jahren ohne EFRE-Förderung schließen. Dies wäre zudem nur bei dem BHKW mit Standort am Campus Ost erreichbar. Für den Standort Campus Nord ist in keiner der untersuchten Fälle eine Amortisation abbildbar. Unter Berücksichtigung der von der Universitätsleitung geforderten Amortisationszeiten für Investitionen von 8 Jahren, ist die Wirtschaftlichkeit somit nicht gegeben.

Eine Reflektion des Simulationsergebnisses hat außerdem gezeigt, dass in der bisherigen Datengrundlage nicht nach Arbeits- und Gesamtmischpreis differenziert wurde. Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten ist lediglich der Arbeitspreis anzusetzen, da eine Gleichzeitigkeit von Spitzenlast und parallellaufendem BHKW nicht zwingend gewährleistet ist. Eine Berücksichtigung dieses Umstandes lässt die Wirtschaftlichkeit des Vorhabens zusehends negativ erscheinen. Abseits der ökonomisch motivierten Betrachtung, wurde der Einfluss der BHKWs auf die CO2-Emissionen und den Primärenergieverbrauch betrachtet. Für diese Art der Betrachtungen spielt die Anerkennung des Brennstoffes entweder als Erdgas oder als „echtes“ Biomethan eine wesentliche Rolle, da je nach Brennstoffart unterschiedliche Größen als CO2-Äquivalent bzw. Primärenergieinhalt anzusetzen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Anrechnung als Biomethan die Kosten für die Primärenergiereduzierung vergleichbar mit anderen effizienten Maßnahmen (TGA, Beleuchtung, technische Ausstattung) sind. Eine Anrechnung als Erdgas, bedeutet einen zusätzlichen Primärenergieaufwand.

Bezüglich der CO2-Emmissionen zählt das Ostcampus-BHKW zu den kostengünstigsten Maßnahmen (im Vergleich mit dem übrigen im Projekt betrachteten Maßnahmen).

Die folgende Tabelle fasst die errechnete Reduzierung hinsichtlich Primärenergie und CO2-Emmissionen abschließend zusammen.

Tabelle 14 Zusammenfassung Reduzierung PE und CO2-Emissionen [elenia]

BHKW-Standort	Energie-träger	EFRE-Förderung	Reduzierung			
			Endenergie	Primärenergie	CO2-Emissionen	Energiekosten
			[€/kWh]	[€/kWh]	[€/kgCO2]	[€/€$_{Energie}$]
Campus Ost	Biomethan	nein	Mehrbedarf: -0,061	0,027	60	0,882
	Erdgas	nein	Mehrbedarf: -0,061	Mehrbedarf: -0,102	154	0,882
	Biomethan	ja	Mehrbedarf: -0,048	0,022	47	0,697
	Erdgas	ja	Mehrbedarf: -0,048	Mehrbedarf: -0,081	122	0,697
Campus Nord	Biomethan	nein	Mehrbedarf: -0,162	0,078	163	3,115
	Erdgas	nein	Mehrbedarf: -0,162	Mehrbedarf: -0,168	497	3,115
	Biomethan	ja	Mehrbedarf: -0,143	0,069	144	2,748
	Erdgas	ja	Mehrbedarf: -0,143	Mehrbedarf: -0,148	439	2,748

Aufgrund der sich während der Projektierungsphase ändernden Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Wärme- bzw. Stromgestehungskosten, ergab sich, dass eine Umsetzung der geplanten BHKWs an keinem der angestrebten Standorte wirtschaftlich tragbar ist. Die Anschaffung und Umsetzung der BHKWs erfolgt daher nicht.

Aufgrund der nicht erfolgten Umsetzungsphase der BHKWs wurde durch einen intensiven Austausch unter den Beteiligten Projektpartnern evaluiert, in welchen Bereichen das elenia unterstützend tätig sein kann. Ein erster Ansatz schien die Unterstützung des Gebäudemanagements beim Modernisieren der Kälteanlagen im Chemiegebäude Hagenring der Universität. Hier erfolgte zunächst eine Analyse des derzeitigen Konzeptes zur Kälteproduktion im eben genannten Gebäude. Historisch gewachsen sind hier für die Bereitstellung benötigter Prozesskälte eine Vielzahl dezentraler, herkömmlicher Klimasplitgeräte im Einsatz, welche in keinerlei Verbindung zueinanderstehen und somit auch keiner zentralen Steuerung unterliegen. Durch eine mögliche zentralisierte Produktion der Prozesskälte können oftmals mittels zentraler Optimierungsstrategien eine Minimierung von Verlusten erreicht werden. Des Weiteren bietet eine Bereitstellung der Prozesskälte mittels Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung Potential zur Verringerung von CO2-Emissionen. Die Kosten zur Realisierung der nötigen Umbaumaßnahmen (Verrohrungen zur Verteilung der Prozesskälte usw.) wurde durch einen Mitarbeiter der zuständigen Wartungsfirma der aktuellen Klimasplitgeräte abgeschätzt. Dieser kam zum Ergebnis, dass die Umsetzung einer zentralen Produktion der Prozesskälte (u.a. aufgrund der weitgefassten Eingriffe in die Gebäudeinfrastruktur) aus ökonomischer Sicht in keinster Weise sinnvoll wäre. Die Umsetzung des Konzeptes wurde daher nicht weiterverfolgt.

Darüber hinaus hat das elenia die Planung, Ausführung und Inbetriebnahme einer 14 kWp-Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) auf einem benachbarten Institutsdach übernommen. Die Erzeugungsanlage wurde am 07.12.2015 in Betrieb genommen. Da die PV-Anlage nicht nur zur Deckung des TU-Eigenbedarfs, sondern auch für institutseigene Forschungszwecke genutzt wird, ist die Anlage auch mit verschiedenen Laboren des elenia gekoppelt (s. Abbildung 56).

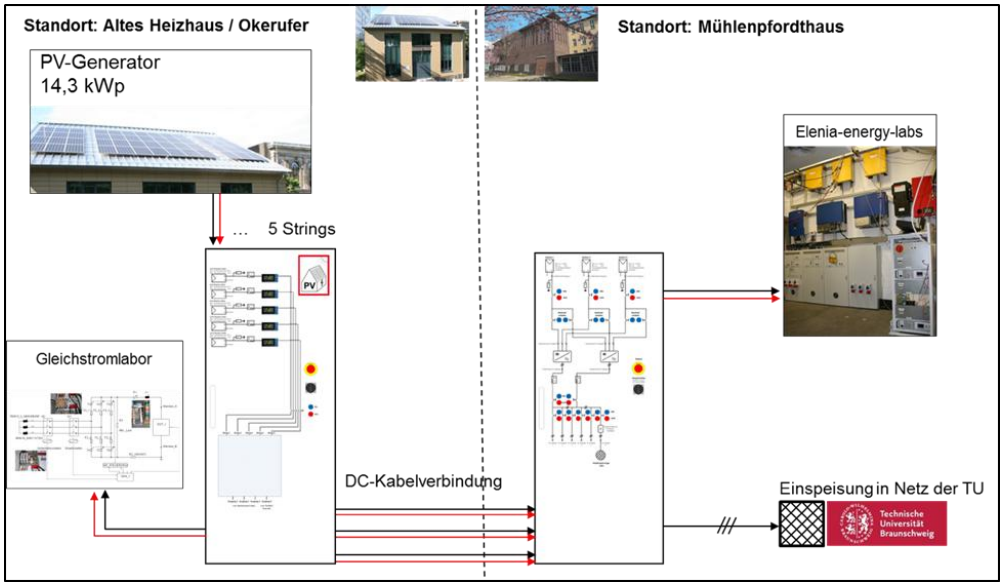


Abbildung 56 Schematischer Aufbau der PV-Anlage [elenia]

Die PV-Anlage wurde am 20.09.2016 mit tatkräftiger Unterstützung durch das Präsidium, die BS|Netz GmbH und das Gebäudemanagement offiziell eingeweiht (s. Abbildung 57).

Abbildung 57 Offizielle Einweihung der PV-Anlage [elenia]

Bei der Planung weiterer PV-Anlagen auf dem Campus kann das elenia unterstützen, da mithilfe des in der Teilstrategie „Energieverteilung und Netzstabilität“ vorgestellten Campus Netzsimulationstools die Auswirkungen weiterer PV-Anlagen auf das TU-Netz analysiert und geeignete Standorte und/oder Netzeinbindungen empfohlen werden können.

Aufgrund des energietechnischen Hintergrunds des elenias wurde überlegt, in wie fern die Konzeptionierung zusätzliche Photovoltaik-Anlagen als weiteres Maßnahmenpaket im Rahmen von EnEff Campus möglich wäre. In Kooperation mit dem Gebäudemanagement und dem durch das IGS angefertigte Dachkataster ergab sich jedoch, dass eine Integration weiterer PV-Anlagen auf Gebäuden der Universität nicht ohne aufwendige Dachsanierungen (bzgl. Statik) möglich ist. Derartige Umbaumaßnahmen bedürfen einer ausgedehnten Planphase, für die die verbliebende Projektlaufzeit nicht mehr ausreichend war. Da die Einspeiseleistung aller derzeit installierten Photovoltaik-Anlagen zu sehr großen Teilen von der Grundlast des Campus aufgenommen wird, stellt dies jedoch einen vielsprechenden Ansatz für ein mögliches Nachfolgeprojekt dar.

* Die derzeitig bestehenden Fernwärmeverträge wurden von der Oberfinanzdirektion (OFD) mit BS|Energy für den Zeitraum von 2009 bis 2019 verhandelt. In den Klauseln wurde vereinbart, dass keine eigenen Wärmeerzeugungsanlagen mit einer Heizleistung über 50 kW pro einer der vier Übergabestationen installiert werden dürfen. Die Wärmeversorgung des Campus Nord ist von dieser Regelung nicht betroffen. Ferner sind die 50 kW-Grenzen nicht für Anlagen mit regenerativen Energiequellen gültig. Allerdings müssen weiterhin die vertraglich geregelten Abnahmemengen in Bezug auf den Pooleinkauf der OFD eingehalten werden.

7.2.2 Teilstrategie Energieverteilung und Netzstabilität

Im Zuge der Energiewende ist das bestehende Energieversorgungsnetz neuer Infrastrukturherausforderungen ausgesetzt, die künftig einen gravierenden Einfluss auf die Sicherstellung der Netzstabilität haben werden. Das Gesamtsystem der Energieversorgung wird durch die Einbindung von dezentralen Erzeugungsanlagen und der Zunahme von leistungsintensiven Stromverbrauchern durch die Elektromobilität auf der Verteilnetzebene zunehmend komplexer. Von diesem Wandel sind bereits aktuell und künftig immer stärker auch die Nieder- und Mittelspannungsnetze der TU Braunschweig betroffen.

Die Energieversorgung der Zukunft stellt die bestehenden Campusnetze somit vor großen Herausforderungen, die bereits aus heutiger Sicht eine strategische und damit langfristig ausgerichtete Netzplanung erforderlich macht. Um die Integration von Gebäudeneubauten und elektrischen Energiesystemen in die bestehenden Campus-Verteilnetze systematisch einplanen zu können und damit potenzielle Schwachstellen im Vorfeld zu identifizieren, ist als Grundlage eine lückenlose Bestandsaufnahme der Mittel- und Niederspannungsnetze erforderlich. Zu Projektbeginn existiert keine ganzheitliche Übersicht der elektrischen Energieversorgungsnetze. In enger Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig wird im Rahmen der Teilstrategie Energieverteilung und Netzstabilität eine derartige Übersicht erstellt. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen einer Simulationsumgebung, um bereits im Vorfeld die Auswirkungen von geplanten Umsetzungsmaßnahmen zu prognostizieren und zudem einen besseren Einblick in das Gesamtsystem zu bekommen.

Durch den Einsatz von dynamischen Lastflussberechnungen können potenzielle Netzengpässe im Vorfeld identifiziert werden. Auf der elektrischen Nachfrageseite werden zusätzlich zu den Gebäudelasten die Elektromobilität als Hochleistungsverbraucher die Verteilnetze erheblich belasten. Somit ist künftig eine zielgerichtete Planung von geeigneten Ladebereichsstandorten erforderlich. Anschlussmöglichkeiten zur Integration von erneuerbaren Energiesystemen können ermittelt werden, um die langfristigen energiepolitischen Ziele sowie die Ziele im Rahmen des Forschungsprojektes zu erreichen. Bei identifizierten Netzengpässen der Betriebsmittelkapazitäten von Transformatoren und Leitungen können Netzoptimierungs-, Netzverstärkungs- oder Netzausbaumaßnahmen eingeleitet werden. Neben einer Bilanzierung des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs und der -erzeugung können die resultierenden thermischen Übertragungsverluste in den Verteilnetzen ermittelt werden.

In Form von statischen Untersuchungsverfahren können mittels Kurschluss- und Erdungsberechnungen minimale und maximale Fehlerströme in den jeweiligen Netzsegmenten ermittelt werden. Diese Werte dienen als Grundlage für die Auslegung von Schalt- und Schutzsystemen für die Integration von Energiesystemen. Die Spannungshaltung im Verteilnetz ist eine weitere zentrale Herausforderung, die aufgrund der dezentralen Energieanlagen und den damit einhergehenden bidirektionalen Energieflüssen zunehmend komplexer wird. Auch die Elektromobilität hat einen erheblichen Einfluss auf die Spannungshaltung. Bei einem hohen Gleichzeitigkeitsfaktor der Ladevorgänge und einer Unterdimensionierung der Betriebsmittel im Verteilnetz können Spannungsbandverletzungen auftreten. Das Simulationsmodell bietet Berechnungsmethoden, um die Dimensionierung der Betriebsmittel zu optimieren.

7.2.2.1 Modellierung der Simulationsumgebung Campus-Netz

Das Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia arbeitet im Rahmen der Teilstrategie an einer Digitalisierung der elektrischen Energieversorgungspläne am Campus. Angesichts der dezentralen Verteilung der Campusareale innerhalb der Stadt Braunschweig und der separaten Netzanschlusspunkte werden die Versorgungsnetze Zentralcampus, Ostcampus und Nordcampus einzeln voneinander betrachtet. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen der Netzberechnungssoftware PowerFactory des Softwareunternehmens DIgSILENT.

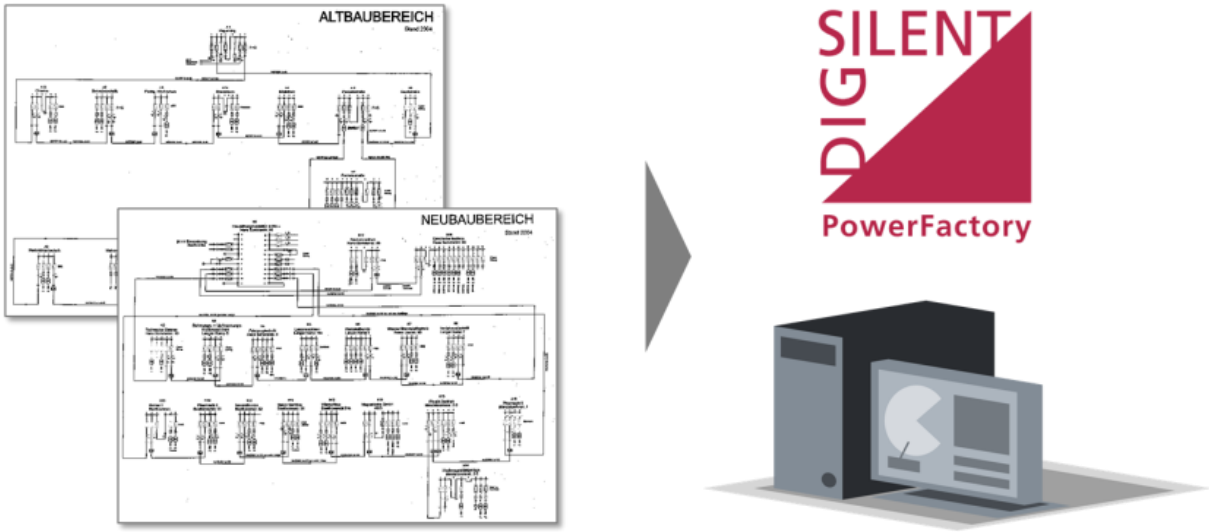


Abbildung 58 Digitalisierung der elektrischen Versorgungsnetze der TU Braunschweig [elenia]

Im ersten Modellierungsschritt erfolgt eine qualitative Nachbildung der Leitungspläne vom Ist-Zustand der Campus Verteilnetze. Hierfür werden die vorhandenen Netzpläne in Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig in PowerFactory eingepflegt.

Im zweiten Schritt werden quantitativ Gebäudelast- und Erzeugungsprofile für individuelle Betrachtungszeiträume sowie Leitungs- und Transformatordaten hinterlegt. Die Kenndaten der im Netz befindlichen Transformatoren liegen dem Gebäudemanagement vollständig vor. Die elektrischen Leitungen werden im wesentlich anhand des jeweiligen Leitungstyps und durch die Leitungslänge charakterisiert. Während der Projektlaufzeit von EnEff Campus II wurden vom Gebäudemanagement die leitungsspezifischen Daten im Rahmen einer umfangreichen Bestandsaufnahme der elektrischen Versorgungsnetze messtechnisch für die Mittelspannungsebene ermittelt. Im Bereich der Niederspannungsebene werden mithilfe von Satellitenbildern die Leitungslängen geschätzt und in das Simulationsmodell eingepflegt. Da im Niederspannungsbereich auch die Leitungstypen unbekannt sind, werden typische Leitungsdaten für diese Spannungsebene angenommen.

Die Gebäudelast- und Erzeugungsprofile werden von dem Energie-Informationssystem der TU Braunschweig ENerGO®+ bereitgestellt und für den respektiven Betrachtungszeitraum in PowerFactory importiert. Lastprofile von Neubauten, wie beispielsweise das Braunschweiger Zentrum für Systembiologie – BRICS, können im Vorfeld mittels Interpolation angenähert werden.

Exemplarisch für das jeweilige Campusareal wird in Abbildung 59 der Netzplan für das Mittelspannungsnetz des Zentralcampus dargestellt. Die Netzpläne der anderen Campusareale können dem Anhang entnommen werden.

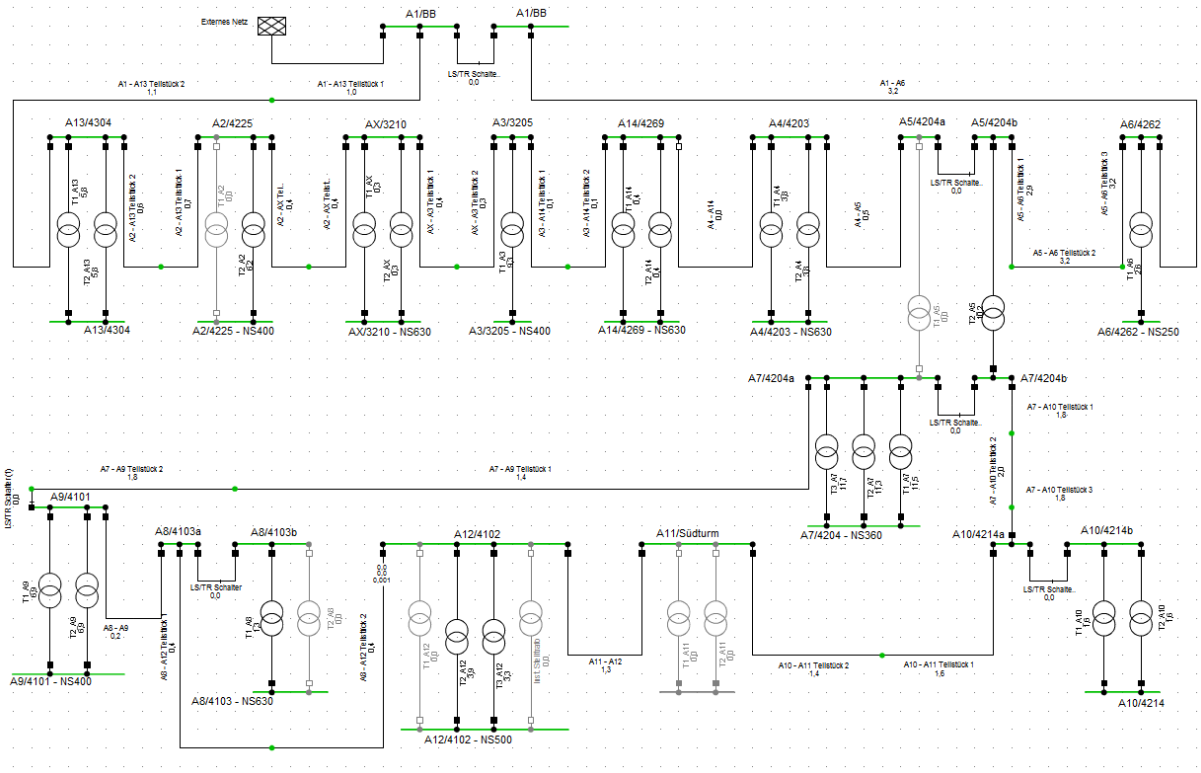


Abbildung 59 Leitungsplan Mittelspannungsbereich Zentralcampus in PowerFactory [elenia]

Nicht alle im Verteilnetz des Campus befindlichen Transformatoren sind zum aktuellen Zeitpunkt im Betrieb. Bei Bedarf können die Reservetransformatoren für das Verteilnetz weitere Transportkapazitäten zur Verfügung stellen. In Abbildung 59 werden die Reservetransformatoren in einem hellen Grauton dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in PowerFactory die Niederspannungsnetze vom Zentral- und Ostcampus separat abgebildet. Für den repräsentativ betrachteten Zentralcampus werden die Niederspannungssammelschienen aus Abbildung 59 weitergeführt in Abbildung 60 dargestellt. Im Niederspannungsnetz sind die elektrischen Lasten und Erzeuger angeschlossen.

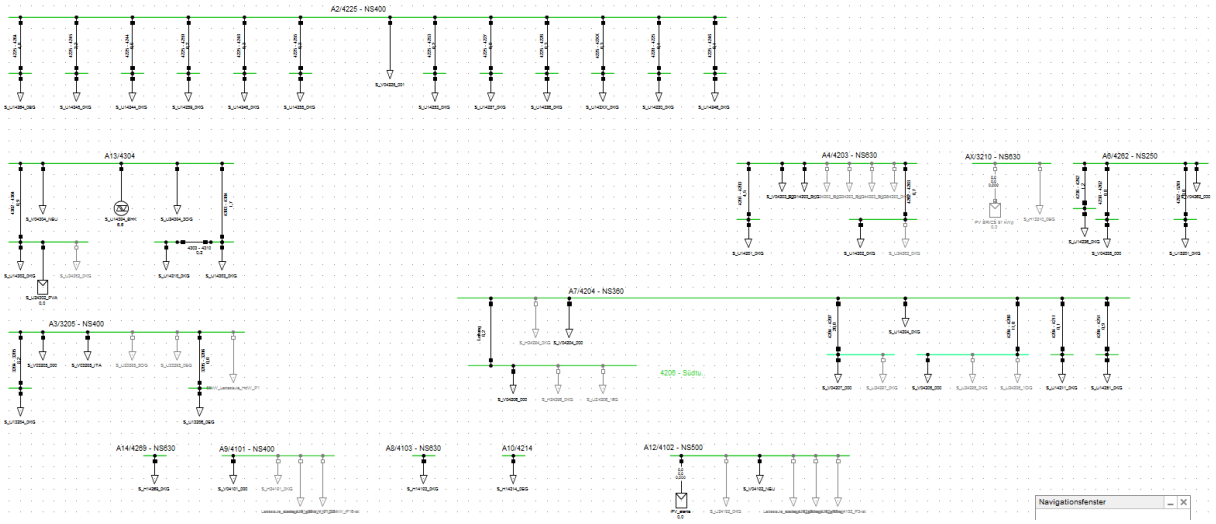


Abbildung 60 Leitungsplan Niederspannungssammelschienen Zentralcampus in PowerFactory [elenia]

7.2.2.2 Verifizierung der Simulationsumgebung Campus-Netz

Die Implementierung der elektrischen Versorgungsnetze des Campus in das Simulationsmodell bietet die Grundlage für diverse Netzberechnungen. Um im Vorfeld eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Simulationsumgebung treffen zu können, wird mittels Lastflussberechnungen das Basisjahr 2011 von EnEff Campus näher betrachtet. An den Netzanschlusspunkten zum übergeordneten Versorgungsnetz sind elektrische Messzähler installiert, die den gesamten elektrischen Verbrauch des jeweiligen Campusareals messen. Die Messdaten werden über ENerGO®+ bereitgestellt und als Vergleichswert zur Validierung der Simulationsumgebung verwendet. Der Vorteil des Simulationsmodells gegenüber einer direkten Bilanzierung der Last- und Erzeugungsprofile liegt darin, dass die Übertragungsverluste berücksichtigt werden können. Diese resultieren aus den Betriebs- und Leerlaufverlusten der Transformatoren sowie aus den Übertragungsverlusten der Leitungen beim Energietransport.

Für den ausgewählten Betrachtungszeitraum 2011 werden die Last- und Erzeugungsprofile aus ENerGO®+ exportiert und in die Simulationsumgebung eingepflegt. Da für 2011 einige Messstellen noch nicht installiert waren und somit vereinzelte Lastprofile nicht vorliegen, werden unter der Annahme eines ähnlichen Verbrauchs Lastprofile aus dem Folgejahr 2012 verwendet. In Abbildung 61 werden für die einzelnen Campusareale die gemessenen elektrischen Verbräuche mit den Simulationsergebnissen verglichen.

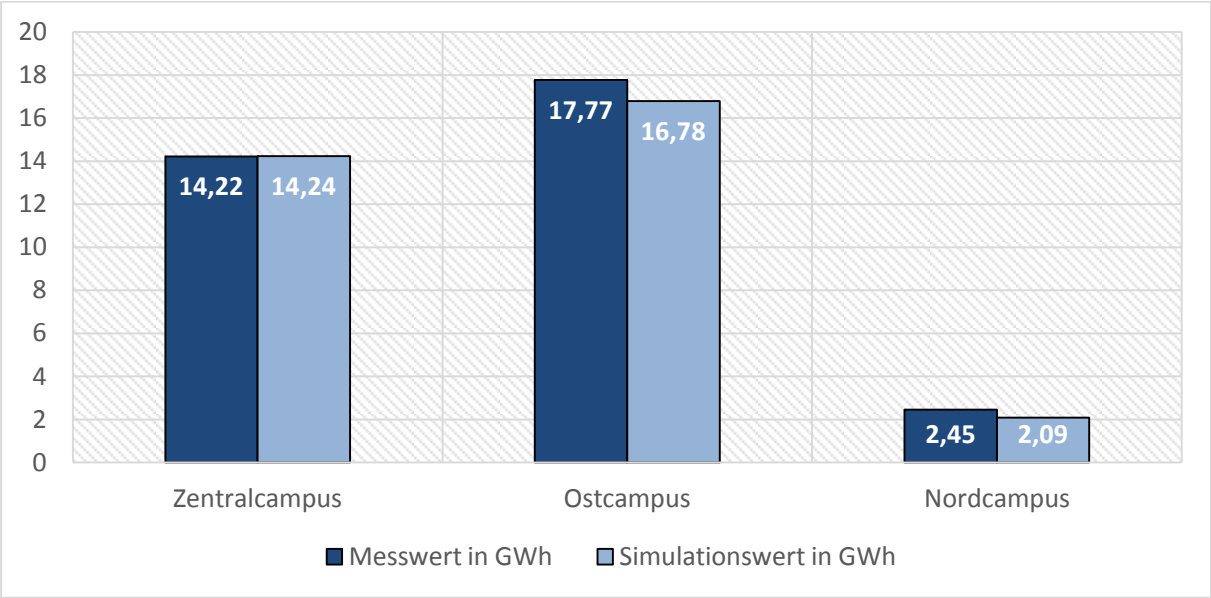


Abbildung 61 Gegenüberstellung gemessener Stromverbrauch und Simulationsergebnisse für das Jahr 2011 nach Campusareal [elenia]

Auf das gesamte Jahr betrachtet sind geringfügige Differenzen zwischen den gemessenen und den im Rahmen der Lastflussberechnungen ermittelten elektrischen Energieverbräuchen erkennbar. Prozentual beträgt die Differenz am Zentralcampus +0,16 %, am Ostcampus -5,53 % sowie am Zentralcampus -14,91 %. In Summe resultiert für den gesamten Campus eine Differenz von -3,85 %. Als Begründung für die vorliegenden Abweichungen kann angenommen werden, dass 2011 einige elektrische Lasten nicht messtechnisch erfasst wurden. Diese Annahme wurde vom Gebäudemanagement bestätigt. Dies trifft insbesondere für den Nordcampus zu, wo prozentual betrachtet die größte Abweichung festgestellt werden konnte.

Folglich stimmen die Ergebnisse aus den Lastflussberechnungen für 2011 annähernd mit den gemessenen Energieverbräuchen überein. Somit kann angenommen werden, dass die Simulationsumgebung Campus-Netz valide Ergebnisse liefert. Dieses Ergebnis kann in Anbetracht der durchgeführten Lastflussberechnungen für die Jahre 2016 und 2017 bestätigt werden. Die Simulationsergebnisse näheren sich zunehmend den gemessenen Verbräuchen an. Für das Jahr 2017 liegt die Differenz bei nur noch 3 %.

Berechneter Einfluss der umgesetzten Energieeinsparmaßnahmen unter Verwendung der Simulationsumgebung Campus-Netz

Nachdem die Simulationsumgebung verifiziert werden konnte, werden im nächsten Schritt die Auswirkungen auf das elektrische Energieversorgungsnetz durch die im Forschungsprojekt umgesetzten Maßnahmen untersucht. Hierfür wird als Betrachtungszeitraum das Jahr 2017 ausgewählt und die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Basisjahr 2011 verglichen. Zusätzlich zu den umgesetzten Energieeinsparmaßnahmen sind während des Betrachtungszeitraums bereits erste PV-Anlagen am Campus integriert worden. Exogene Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch wie beispielsweise die Entwicklung der Studierendenzahlen oder das Wetter werden bei diesen Betrachtungen vernachlässigt.

Durch den direkten Vergleich der gemessenen Lastprofile der einzelnen Messstellen von 2011 und 2017 aus dem ENerGO®+ System kann bereits eine positive Tendenz hinsichtlich der Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs abgeleitet werden. Die Simulationsergebnisse bestätigen die positive Entwicklung an allen drei Campusarealen. In Tabelle 15,

Tabelle 16 und Tabelle 17 werden die Energiebilanzen der Campusareale auf Grundlage der Lastflussberechnungen zusammengefasst.

Tabelle 15 Energiebilanz Zentralcampus in GWh [elenia]

	2011	2017
Energieverbrauch	14,20	10,59
Netzverluste	0,34	0,34
Erzeugung	0,30	0,41
Endenergieverbrauch	14,24	10,52

Tabelle 16 Energiebilanz Ostcampus in GWh [elenia]

	2011	2017
Energieverbrauch	16,25	14,47
Netzverluste	0,53	0,53
Erzeugung	0	0,05
Endenergieverbrauch	16,78	14,95

Tabelle 17 Energiebilanz Nordcampus in GWh [elenia]

	2011	2017
Energieverbrauch	1,97	1,74
Netzverluste	0,11	0,07
Erzeugung	0	0
Endenergieverbrauch	2,08	1,81

Innerhalb des Betrachtungszeitraums von sieben Jahren kann entsprechend der Lastflussberechnungen der Endenergieverbrauch am Zentralcampus um 26,1 %, am Ostcampus um 10,91 % sowie am Nordcampus um 12,98 % gesenkt werden. Im Wesentlichen sind diese Ergebnisse auf die umgesetzten Energieeinsparmaßnahmen zurückzuführen, da im Betrachtungszeitraum noch wenig Maßnahmen zur Integration von erneuerbaren Energieanlagen umgesetzt werden konnten. Der tatsächliche Erfolg der Energieeinsparmaßnahmen fällt in Anbetracht zusätzlich installierter Lasten, wie beispielsweise Ladestationen für Elektrofahrzeuge, noch größer aus. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde das BRICS als Gebäudeneubau für 2017 nicht berücksichtigt. Inwieweit die Netzverluste reduzieren werden konnten, lässt sich ebenfalls anhand der Ergebnisse ermitteln. Weiterhin ist aus den Ergebnissen die Notwendigkeit eines weiteren Ausbaus von erneuerbaren Energieanlagen deutlich erkennbar, um langfristig die gesetzten strategischen Projektziele zu erreichen und den Campus zukünftig ausschließlich mit regenerativen Energien zu versorgen.

7.2.2.3 Untersuchung der Betriebsmittel

Transformatoren und Leitungen sind typspezifisch für bestimmte Leistungsgrenzen ausgelegt. Temporär auftretende Überlastungen können sich negativ auf die Lebensdauer der Betriebsmittel auswirken. Ferner besteht bei höheren Leistungsspitzen oder dauerhaften Überlastungen Brandgefahr. Insbesondere aufgrund des Ausbaus der regenerativen Energiequellen, aber auch durch die Integration der Elektromobilität in das elektrische Energieversorgungsnetz steigt die Komplexität auf der Verteilnetzebene. Die Simulationsumgebung Cam-

pus-Netz kann potenzielle Schwachstellen im Vorfeld identifizieren und einen Netzausbaubedarf für Teilbereiche lokalisieren. Gleichzeitig kann die Auslastung der Transformatoren untersucht und damit Effizienzbetrachtungen durchgeführt werden. Die Gesamtverlustleistung resultiert aus der Summe der lastunabhängigen Leerlaufverluste und der Lastverluste. Die Lastverluste werden minimiert, wenn die Transformatoren nahe am Arbeitspunkt betrieben werden.

Für die jeweiligen Betrachtungszeiträume kann anhand der hinterlegten Last- und Erzeugungsprofile untersucht werden, ob und über welchen Zeitraum Betriebsmittelgrenzen überschritten werden. Nach dem Abschluss einer Lastflussberechnung werden in der Simulationsumgebung farblich potenzielle Leistungsengpässe hervorgehoben. Die Untersuchung der Verteilnetze des Campus hat ergeben, dass zum aktuellen Zeitpunkt keine potenziellen Netzengpässe der Betriebsmittel vorliegen. Zur Veranschaulichung der Darstellungsweise wurden für Abbildung 62 die Last- und Erzeugungsprofile am Nordcampus modifiziert, um Netzengpässe in der Simulationsumgebung zu erzwingen.

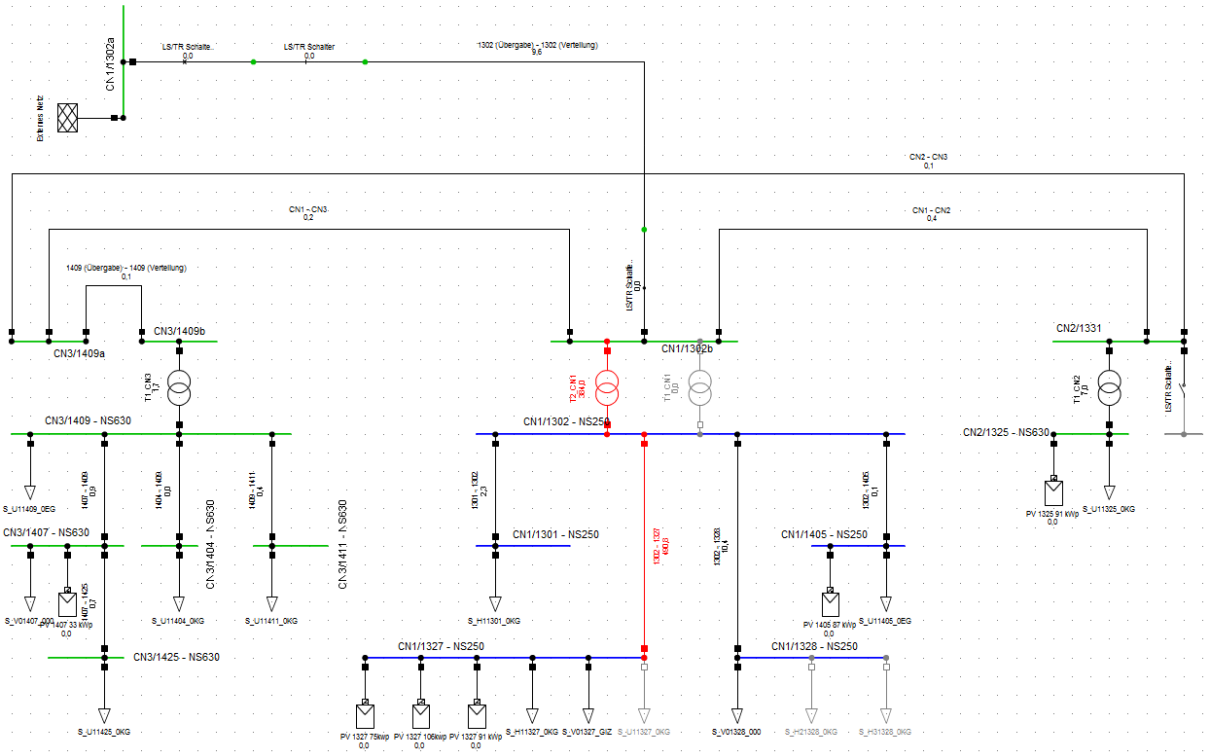


Abbildung 62 Künstlich erzeugte Netzengpässe am Energieversorgungsnetz des Nordcampus [elenia]

Werden die spezifischen Betriebsmittelgrenzen der Leitungen und Transformatoren eingehalten, werden diese farblich nicht gesondert hervorgehoben. Sofern Betriebsmittel nahe der ausgelegten Leistungsgrenze arbeiten, werden diese blau bzw. bei einer Überschreitung der Leistungsgrenzen rot gekennzeichnet. In Abbildung 62 wird für diesen künstlich erzeugten Fall am Energieversorgungsnetz des Nordcampus die Grenzüberschreitung eines Transformators sowie die einer Leitung dargestellt. Darüber hinaus können in der Simulationsumgebung detailliert die Auslastungen der Betriebsmittel im Einzelnen betrachtet und ausgewertet werden. Als Beispiel wird in Abbildung 63 die Transformatorauslastung am Rechenzentrum (Geb. 3404) für das Jahr 2017 dargestellt.

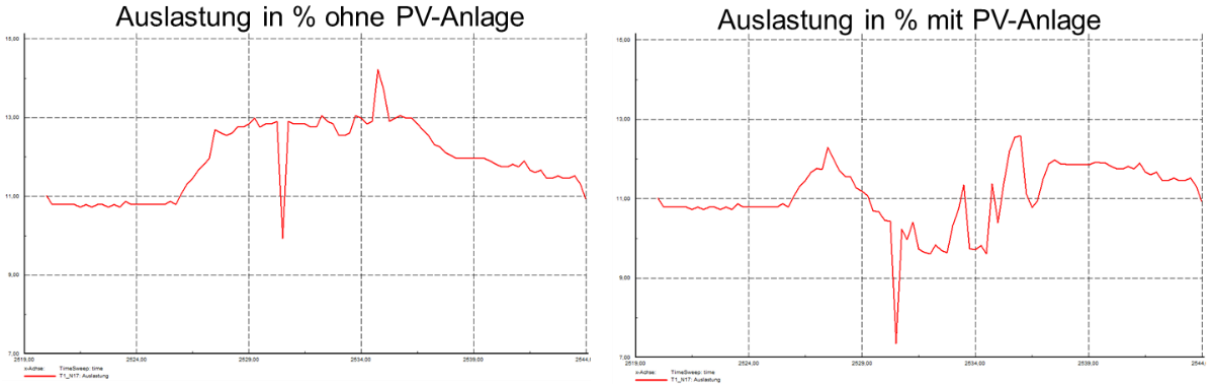


Abbildung 63 Simulierte Transformatorauslastung am Rechenzentrum (Geb. 3404) für das Jahr 2017 [elenia]

Neben der Darstellung einer Betriebsmittelauslastung können anhand des Simulationsmodells Auswirkungen von geplanten Umsetzungsmaßnahmen prognostiziert werden. Im linken Diagramm der Abbildung 63 wird die prozentuale Transformatorauslastung vom Rechenzentrum für das Jahr 2017 dargestellt. Im darauffolgenden Jahr wurde auf dem Dach des Rechenzentrums eine PV-Anlage mit einer Leistung von 43 kW Peak installiert. Die Energieeinspeisung der PV-Anlage hat einen direkten Einfluss auf die Transformatorauslastung. Unter der Annahme eines gleichbleibenden Lastverlaufs vom Rechenzentrum und mithilfe des vom IGS berechneten prognostizierten Erzeugungsprofils der PV-Anlage kann mithilfe des Simulationsmodells die neue Transformatorauslastung im Vorfeld ermittelt werden. Im rechten Diagramm in Abbildung 63 wird der berechnete Jahresverlauf der Transformatorauslastung am Rechenzentrum mit PV-Anlage dargestellt. Im direkten Vergleich ist insbesondere in den Sommermonaten eine Reduzierung sowohl der maximalen als auch der durchschnittlichen Transformatorauslastung erkennbar.

7.2.2.4 Szenarien Analyse zur Integration erneuerbarer Energieanlagen

Zur strategischen Planung von erneuerbaren Energieanlagen kann die Simulationsumgebung Campus-Netz eingesetzt werden, um für ausgewählte Installationsstandorte die resultierenden Auswirkungen auf das Verteilnetz im Vorfeld zu bewerten. Unter Berücksichtigung festgelegter Annahmen zur Entwicklung des elektrischen Energiebedarfs der TU Braunschweig kann gleichzeitig ein Trend zur Erreichung des langfristig gesetzten Projektziels aufgezeigt werden. Bis zum Jahr 2050 möchte die TU Braunschweig sich ausschließlich mit regenerativen Energiequellen versorgen. In Anbetracht der lokalen Gegebenheiten und der vorliegenden Technologien eignen sich für den Stromsektor ausschließlich PV-Anlagen und biomethanbetriebene Blockheizkraftwerke als mögliche Energieerzeuger. Bei der vorliegenden Szenarien Analyse wurden die Jahre 2020, 2030 sowie 2050 als Betrachtungszeiträume festgelegt.

Um das Integrationspotential von Photovoltaikanalgen auf Gebäudeebene zu identifizieren, wurde bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes EnEff Campus: blueMAP durch das IGS eine Analyse aller Dachflächen unter Berücksichtigung der statischen Belastung der Dächer sowie des Denkmalschutzes der Gebäude durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Grundlage zur Planung von Installationsstandorten für das Simulationsmodell. Für das Jahr 2020 werden die bereits über den Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) Fördermittel beantragten Photovoltaikanalgen mit den jeweils berechneten voraussichtlichen Erzeugungsprofilen in das Simulationsmodell implementiert. In Absprache mit dem IGS wurde eine Abschätzung vorgenommen, welcher Anteil der PV-Anlagen bis zum Jahr 2030 für das jeweilige Campusareal realisiert werden kann. Für den Zentralcampus wird aufgrund des geringen Integrationspotentials eine vollständige Nutzung der verfügbaren Dachflächen bis 2030 angenommen. Sowohl am Ost- als auch am Nordcampus werden in den Simulationsmodellen die übrigen Dachflächen bis zum Jahr 2050 vollständig mit PV-Anlagen ausgerüstet. Für die Jahre 2030 und 2050 vorgesehenen PV-Anlagen stehen keine berechneten Erzeugungsprofile zur Verfügung. Mithilfe linearer Skalierungen der vorhandenen Erzeugungsprofile werden entsprechend der vorgesehenen Peak Leistungen der PV-Anlagen die Erzeugungsprofile geschätzt. In Tabelle 18 werden die im Simulationsmodell implementieren Kilowatt-Peak Leistungen der PV-Anlagen, entsprechend der Betrachtungszeiträume und Campusbereiche, zusammengefasst.

Tabelle 18 Hinterlegte Kilowatt Peak Leistungen der PV-Anlagen im Simulationsmodell [elenia]

	2017	2020	2030	2050
Zentralcampus	30	30	237	237
Ostcampus	48	333	916,6	1375
Nordcampus	0	0	321,5	483,5
Gesamt	78	363	1475,1	2095,5

Neben PV-Anlagen eignen sich biomethanbetriebene BHKWs zur Einspeisung von regenerativem Strom an der TU Braunschweig. Im Jahr 2017 ist bereits am Zentralcampus ein BHKW

im Chemiezentrum im Betrieb. Dieses verfügt über eine elektrische Leistung von 63 kW Peak. Wie bereits in der Teilstrategie Energieerzeugung ausführlich eingegangen wurde, können aus ökonomischer Sicht zum heutigen Zeitpunkt keine biomethanbetriebenen BHKWs eingesetzt werden. Unter Vernachlässigung der Preisentwicklung von Biomethan wurden für das Simulationsmodell die bereits geplanten Anlagen für das Betrachtungsjahr 2050 berücksichtigt, da zukünftig ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein könnte. Unter Berücksichtigung des Wärmebedarfs wird am Ostcampus ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 420 kW Peak sowie am Nordcampus mit einer elektrischen Leistung von 93 kW Peak angenommen. Die Dimensionierung der BHKWs basiert auf Grundlage des aktuellen Wärmebedarfs und vernachlässigt somit unter anderem das Einsparpotentials an Wärme durch die Umsetzung weiterer Sanierungsmaßnahmen an den Gebäudehüllen. Als weitere erneuerbare Energieanlage ist bereits eine Kleinwindkraftanlage am Ostcampus mit einer Leistung von 0,4 kW Peak im Betrieb. Trotz des lediglich geringfügigen Beitrags an der Energieerzeugung, wird diese dennoch im Simulationsmodell berücksichtigt.

Basierend auf der erwarteten Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor werden für die Simulationen die Gebäudelastprofile durch einen entsprechenden Skalierungsfaktor angepasst. Als Referenz für die Jahre 2020 und 2050 werden die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung herangezogen. Demnach soll der Stromverbrauch im Gebäudesektor bis 2020 um 10 % sowie bis 2050 um 25 % gegenüber 2008 reduziert werden [8]. Unter der Annahme einer konstanten Senkung des Energieverbrauchs kann mithilfe einer linearen Regression der Skalierungsfaktor für das Jahr 2030 vereinfacht angenommen werden.

Anhand der getroffenen Annahmen in Bezug auf die Entwicklung der erneuerbaren Energieanlagen an der TU Braunschweig sowie der Steigerung im Bereich der Energieeffizienz im Gebäudesektor kann anhand der Simulationsumgebung die zukünftige Situation in den Campus Verteilnetzen untersucht werden. Aufgrund der vereinfachten Annahmen können die Ergebnisse lediglich als Richtwert betrachtet werden. Sie liefern daher ausschließlich einen Anhaltspunkt beispielsweise für die Energiebilanz oder hinsichtlich der Betriebsmittelauslastungen. Zusätzlich werden Einflussfaktoren wie beispielsweise die Entwicklung der Studierendenanzahl, die Klimaerwärmung oder auch Technologieverbesserungen im Bereich der erneuerbaren Energieanlagen werden vernachlässigt. In Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 werden für in den definierten Betrachtungszeiträumen die Energiebilanzen der Campusareale dargestellt. In Tabelle 22 folgt eine Zusammenfassung der Energiebilanz für den gesamten Campusbereich.

Tabelle 19 Energiebilanz Zentralcampus in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia]

	2020	2030	2050
Energieverbrauch	12,20	10,51	10,36
Netzverluste	0,35	0,34	0,33
Erzeugung	0,57	0,69	0,69
Endenergieverbrauch	12,20	10,16	9,99

Tabelle 20 ***Energiebilanz Ostcampus in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia]***

	2020	2030	2050
Energieverbrauch	14,34	13,54	11,95
Netzverluste	0,52	0,51	0,53
Erzeugung	0,33	0,88	3,83
Endenergieverbrauch	14,53	13,18	8,65

Tabelle 21 ***Energiebilanz Nordcampus in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia]***

	2020	2030	2050
Energieverbrauch	1,77	1,67	1,48
Netzverluste	0,10	0,08	0,07
Erzeugung	0	0,31	1,03
Endenergieverbrauch	1,87	1,44	0,52

Tabelle 22 ***Energiebilanz Campus gesamt in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia]***

	2020	2030	2050
Energieverbrauch	28,61	25,74	23,79
Netzverluste	0,98	0,93	0,93
Erzeugung	0,90	1,88	5,55
Endenergieverbrauch	28,61	24,79	19,17

Die Ergebnisse der Szenarien Analysen verdeutlichen den erforderlichen Umsetzungsbedarf von weiteren Maßnahmen zur Integration von erneuerbaren Energieanlagen. Während unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen der Nordcampus bis zum Jahr 2050 bereits zu 69 % seinen elektrischen Energiebedarf durch erneuerbare Energieanlagen decken kann, sind es am Ostcampus nur 32 % bzw. am Zentralcampus lediglich 7 %. In der Gesamtbetrachtung erreicht die TU Braunschweig eine Eigenverbrauchsquote von 23 %. Bei Vernachlässigung der biomethanbetriebenen BHKW Anlagen am Nord- und Ostcampus sinkt der Wert auf 10 %.

Als weiteres Ergebnis der Simulationen kann festgestellt werden, dass unter Vernachlässigung der geplanten BHKWs zu keinem Zeitpunkt in einem der Versorgungsnetze mehr elekt-

rische Energie erzeugt als verbraucht wird. Auch an einem sonnigen Wochenendtag übersteigen die Gebäudegrundlasten die erzeugte Energie. Mit dem Ziel der Eigenverbrauchsoptimierung ist somit der Einsatz von Energiespeichern im Verteilnetz unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen bis zum Jahr 2050 nicht erforderlich. Da zur Erreichung der langfristig gesetzten Ziele ein weiterer Ausbau von erneuerbaren Energieanalgen notwendig sein wird, kann unter anderen Gegebenheiten der Einsatz von Energiespeichern zur Erhöhung des Autarkiegrades vorteilhaft sein. Unter Berücksichtigung der geplanten BHKWs wird am Nordcampus zeitweise mehr elektrische Energie erzeugt als verbraucht. Im nachfolgenden Szenario soll für diesen speziellen Fall der Einsatz von Energiespeichern im Verteilnetz näher untersucht werden.

Ausgehend von den aktuell im Einsatz befindlichen Betriebsmitteln können als weiteres Ergebnis der Simulationen keine Schwachstellen in den Versorgungsnetzen identifiziert werden. Aufgrund der angenommenen Energieeffizienzsteigerungen im Gebäudesektor sinken tendenziell die Betriebsmittelauslastungen in den Netzsegmenten. Die Übertragungsverluste betragen im Jahr 2050 5 % des Gesamtenergieverbrauchs. Ein wesentlicher und bei den untersuchten Szenarien vernachlässigter Einflussfaktor auf die Energieversorgungsnetze stellt die Elektromobilität dar. In einem weiteren Szenario wird nachfolgenden der Einfluss der Elektromobilität auf die Campus Energieversorgungsnetze untersucht.

7.2.2.5 Szenarien Analyse zur Integration von Energiespeichern im Verteilnetz

Energiespeicher nehmen bei der Umsetzung der Energiewende eine wichtige Rolle ein. Aufgrund der fluktuierenden Einspeisung der erneuerbaren Energieanlagen werden Energiespeicher in den Verteilnetzen zur Zwischenspeicherung benötigt. Im Stromnetz muss stets ein Gleichgewicht zwischen der Energieerzeugung und der Energienachfrage vorliegen. Während kleinere Abweichungen bereits zu einer Änderung der Netzfrequenz führen, sind Stromausfälle die Folge bei größeren Abweichungen. Energiespeicher sind neben Last- und Einspeisemanagement eine weitere Möglichkeit zur Gewährleistung des Gleichgewichts.

Da die Verteilnetze der TU Braunschweig jeweils über eine Netzanschlussstelle verfügen, wird durch das übergeordnete Verteilnetz stets ein Ausgleich der elektrischen Energie gewährleistet. Die Integration von Energiespeichern innerhalb der Verteilnetze kann dennoch vorteilhaft sein: So können einerseits durch die gezielte Integration Betriebsmittel in stark beanspruchten Netzsegmenten entlastet werden, andererseits kann bei temporär höherer Energieerzeugung eine Rückspeisung über die Netzanschlussstelle vermieden und damit der Autarkiegrad der TU Braunschweig erhöht werden.

In der vorherigen Szenarien Analyse hat sich unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen für das Jahr 2050 am Nordcampus eine temporär höhere Energieeinspeisung ergeben. Im Wesentlichen ist das Ergebnis der Simulation auf die Stromerzeugung durch das wärmegeführte BHKW zurückzuführen. In dem betrachteten Szenario kann der Einsatz eines Energiespeichers den überschüssigen Strom zu einem späteren Zeitraum im eigenen Versorgungsnetz nutzen. Um die Änderung der Energiebilanz zu verdeutlichen, wird das Simulationsmodell durch einen 130 kWh Batteriespeicher ergänzt. Aktuell sind elektrische Energiespeicher in dieser Größenordnung bereits am Markt erhältlich. Nach einer erneuten Lastflussberechnung für das Jahr 2050 kann der Effekt des Energiespeichers untersucht werden.

In Abbildung 64 wird exemplarisch für einen Tag der Verlauf des Batterieladezustands (obere Diagramm), die gesamte Wirkleistung im Versorgungsnetz (mittleres Diagramm) sowie die Last und Erzeugung im Versorgungsnetz dargestellt. Äquivalent dazu wird in Abbildung 65 der Jahresverlauf wiedergegeben.

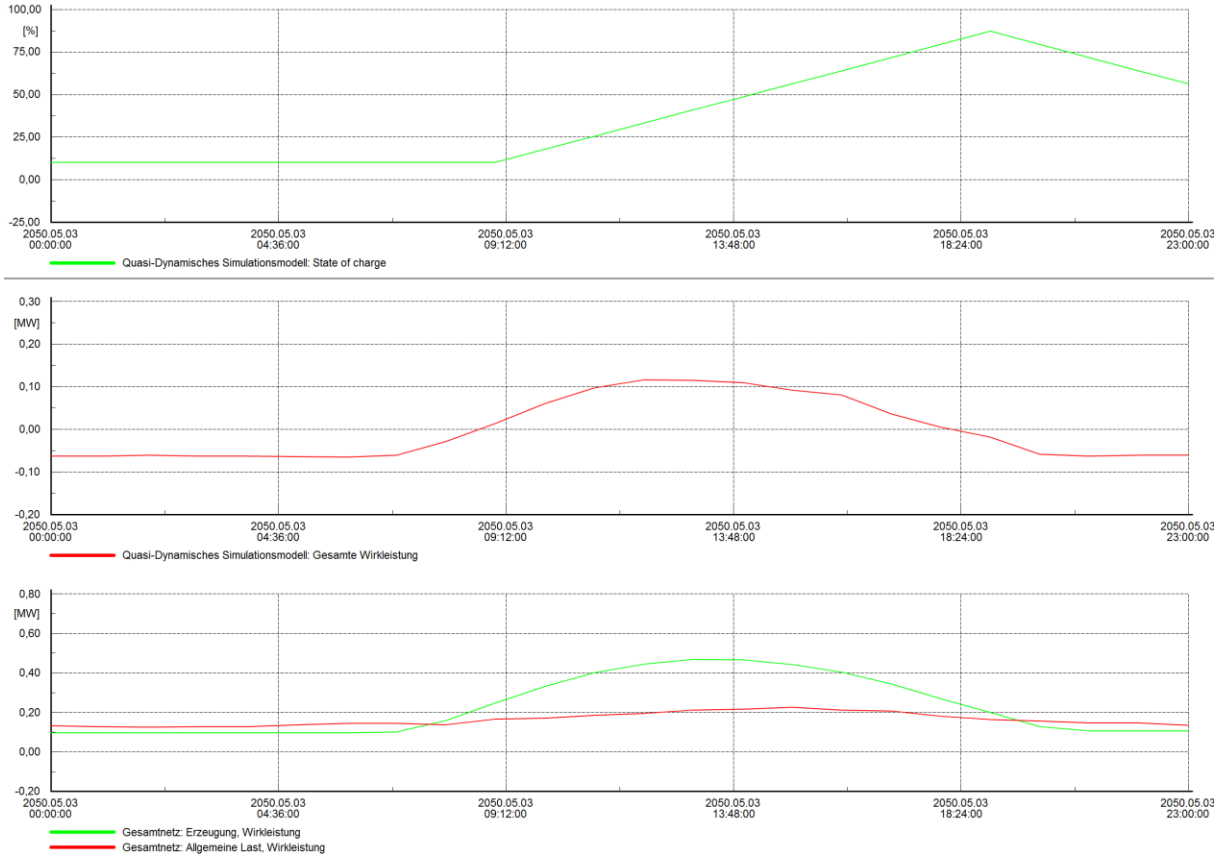


Abbildung 64 Lastflussberechnung mit Energiespeicher im Tagesverlauf (Szenario Energiespeicher) [elenia]

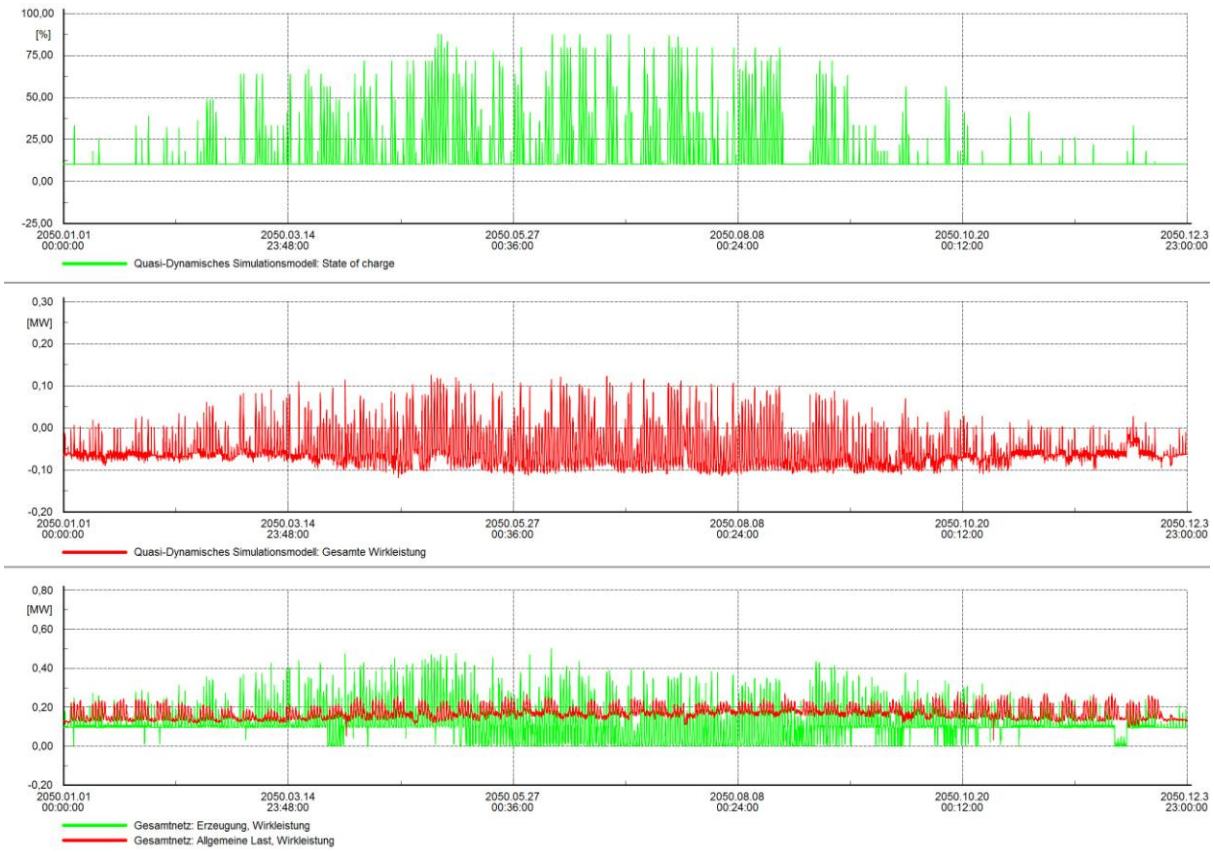


Abbildung 65 Lastflussberechnung mit Energiespeicher im Jahresverlauf (Szenario Energiespeicher) [elenia]

Der Vergleich der durchgeführten Lastflussberechnungen hat ergeben, dass durch die Integration des Energiespeichers am Nordcampus zusätzliche 2,66 MWh im eigenen Versorgungsnetz zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verbraucht werden können. Bei einer Speichergröße von 130 kWh wird der maximale Batterieladezustand zu keinem Zeitpunkt erreicht. Wirtschaftlich betrachtet wäre der Einsatz eines etwas kleiner dimensionierten Batteriespeichers gegebenfalls von Vorteil.

Zur Erreichung der langfristigen Projektziele von EnEff Campus sind wie bereits aufgezeigt weitere Maßnahmen zur Integration von erneuerbaren Energieanlagen erforderlich. Demzufolge kann der Einsatz von weiteren Energiespeichern auch in den anderen beiden Campusarealen eine Möglichkeit zur Steigerung des Autarkiegrades darstellen.

7.2.2.6 Szenarien Analyse zur Integration von Elektromobilität

In Abhängigkeit der Marktentwicklung im Mobilitätssektor können Elektrofahrzeuge in Zukunft einen erheblichen Einfluss auf die Spannungsstabilität der TU Braunschweig Energieversorgungsnetze haben. Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit der Erstellung von Markthochlaufszenarien. Faktoren wie die technologische Entwicklung, der Ölpreis, politische Rahmenbedingungen und viele mehr tragen dazu bei, dass aus heutiger Sicht keine handfesten Vorhersagen getroffen werden können. In Anbetracht der Ergebnisse der vom Öko-Institut veröffentlichen Metastudie eMobil 2050 – Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz [9] wird der elektrifizierte Verkehr im

Jahr 2030 lediglich moderate Auswirkungen auf den elektrischen Energiebedarf haben. Bis zum Jahr 2050 wird eine Steigerung des Marktanteils von Elektrofahrzeugen auf über 90 % erwartet.

Um die Versorgungsnetze der TU Braunschweig auf den bevorstehenden Wandel im Mobilitätssektor hin zur Elektromobilität vorzubereiten und Netzengpässe frühzeitig zu erkennen, kann die Simulationsumgebung Campus-Netz eingesetzt werden. In diesem Sinne wird die Metastudie Mobil 2050 als Referenz für den Ladebedarf der Elektrofahrzeuge herangezogen und die Verteilnetze einer Belastungsprobe unterzogen.

Da entsprechend der Studie eMobil 2050 die Elektromobilität im Jahr 2030 voraussichtlich noch keinen großen Einfluss auf den Energieverbrauch in Deutschland haben wird, wird in dem betrachteten Szenario ausschließlich das Jahr 2050 als Untersuchungszeitpunkt ausgewählt. Als Referenz für den Ladebedarf werden die Ergebnisse der Metastudie mit der Parkplatzsituation an den Campusarealen abgeglichen. Anhand dieser beiden Faktoren wird der Ladebedarfs für das Jahr 2050 abgeschätzt. In Tabelle 23 werden verschiedene Durchdringungsgrade der Elektrofahrzeuge anhand der Parkplatzsituation am jeweiligen Campusareal dargestellt.

Tabelle 23 Durchdringung am Campus nach Parkplätzen (Szenario Elektromobilität) [elenia]

Campus	Ω	25 %	50 %	75 %	90 %
Zentral	817	204	409	613	735
Ost	987	247	494	740	888
Nord	408	102	204	306	367
Gesamt	2212	553	1107	1659	1990

Die Gesamtzahl an verfügbaren Parkplätzen wird in Spalte Ω angegeben. Neben den heute verfügbaren Parkplätzen werden auch bereits geplante neue Parkplätze berücksichtigt. Ausgehend von der Gesamtzahl an Parkplätzen werden die Durchdringungsgrade 25 %, 50 %, 75 % sowie 90 % definiert und daraus die Anzahl an Ladepunkte am jeweiligen Campus bestimmt. Dementsprechend wird bei der Simulation für den Zentralcampus von einer maximalen Anzahl von 735 Ladepunkten ausgegangen.

Darüber hinaus wird die Anzahl der integrierbaren Ladestationen in Abhängigkeit der Netzbetriebsmittelgrenzen ermittelt. Zur zielgerichteten Planung geeigneter Ladebereichsstandorte ist eine Übersicht der verfügbaren Transportkapazitäten, insbesondere die der Transformatoren, erforderlich. Im Abschlussbericht EnEff Campus: blueMAP wurde im Abschnitt 6.3.5 bereits ausführlich auf diese Thematik eingegangen. Als Berechnungsgrundlage werden die Transformatorauslastungen im Jahr 2017 betrachtet. Die Simulationen zur Ermittlung der Betriebsmittelauslastungen werden zum einen mit den aktuell im Einsatz befindlichen Transformatoren und zum anderen inklusive der Reservetransformatoren durchgeführt. Wie bei der Verteilnetzplanung üblich werden als Betriebsmittelgrenzen für Transformatoren eine

Maximalauslastung von 130 % sowie einer Durchschnittsauslastung von 65 % definiert. Der geringere der beiden Werte wird als Grenzwert festgelegt. In Tabelle 24 werden die Berechnungsergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 24 Durchdringung am Campus nach Betriebsmittelgrenzen (Szenario Elektromobilität) [elenia]

Campus	mit Reserve		ohne Reserve	
	max 130 %	ø 65 %	max 130 %	ø 65 %
Zentral	527	272	356	187
Ost	1137	615	831	431
Nord	86	43	67	34
Gesamt	1750	930	1254	652

Aus Tabelle 24 wird ersichtlich, dass jeweils die Durchschnittsauslastung als limitierender Faktor die Anzahl an integrierbaren Ladepunkten festlegt. Am gesamten Campus kann entsprechend der Betriebsmittelgrenzen das Energieversorgungsnetz mit eingeschalteten Reservetransformatoren 930 sowie ohne Reservetransformatoren 652 Ladepunkte aufnehmen. Durch die Inbetriebnahme der Reservetransformatoren steigen die Übertragungsverluste im Verteilnetz.

Die Ergebnisse in Tabelle 9 repräsentieren die Anzahl an integrierbaren Fahrzeugen bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1. Dementsprechend können alle Ladepunkte zur gleichen Zeit die maximale Ladeleistung von 22 kW zur Verfügung stellen (Worst-Case-Szenario). Eine ausführliche Übersicht zu den Berechnungen für Ladeleistungen von 3,7 kW bis 44 kW kann dem Anhang entnommen werden.

Aufgrund der hohen Transportkapazitäten des Verteilnetzes am Ostcampus können dort bereits ohne Netzausbaumaßnahmen eine hohe Anzahl an Ladepunkte bereitgestellt werden, ohne dass eine Überlastung der Betriebsmittel zu erwarten ist. Unter Betrachtung der Tabelle 23 und Tabelle 24 können bereits mehr als 50 % der verfügbaren Parkplätze als Lademöglichkeit eingerichtet werden. Im Gegensatz dazu ist die Integration von 22 kW Lademöglichkeiten am Nordcampus stark limitiert.

Der Energiebedarf der Elektromobilität ist bei der Verteilnetzplanung schwieriger abzuschätzen als es bei Gebäudelasten der Fall ist. Neben der Ladetechnologie und der Batteriekapazität des Fahrzeuges ist das Ladeverhalten der Nutzer ein wesentlicher Einflussfaktor, um die Auswirkungen auf die Energieversorgungsnetze abzuschätzen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle in Tabelle 24 aufgeführten und nach den Betriebsmittelgrenzen berechneten Ladepunkte gleichzeitig die volle Ladeleistung bereitstellen müssen. Somit kann das Verteilnetz grundsätzlich mehr Ladepunkte aufnehmen, ohne das mit einer Überlastung der Betriebsmittel zu rechnen ist.

Um eine genauere Aussage über die Anzahl an integrierbaren Ladepunkte treffen zu können, werden Lastprofile erstellt und in die Simulationsumgebung eingepflegt. Als Ladetechnologie

wird ebenfalls das 3-phasige Wechselstromladen mit 22 kW ausgewählt. Aufgrund der in der Regel mehrstündigen Standzeiten der Fahrzeuge besteht im universitären Bereich kein dringlicher Bedarf an Schnellladestationen mit Ladeleistungen von 50 kW und mehr. Um den Gleichzeitigkeitsfaktor nachzubilden, werden für das Simulationsmodell 16 gemessene Ladeprofile verwendet und daraus Lastprofile für die Ladepunkte generiert. Die Ladedaten werden aus der Datenbank des Ladesystems elias entnommen, welches der in der Teilstrategie Elektromobilität näher vorgestellt wird.

Insgesamt werden drei Unterscheidungsfälle betrachtet, um eine Aussage hinsichtlich der Anzahl an integrierbaren Ladepunkte zu treffen: Ohne Reservetransformatoren, mit Reservetransformatoren und mit Energiespeichern. Entsprechend der genannten Reihenfolge können aufsteigend zunehmend mehr Ladepunkte integriert werden. Die Simulationen werden mit den unterschiedlichen Durchdringungsgraden in Tabelle 23 sowie den berechneten Werten in Tabelle 24 durchgeführt und die Ergebnisse in Abbildung 66 zusammengefasst.

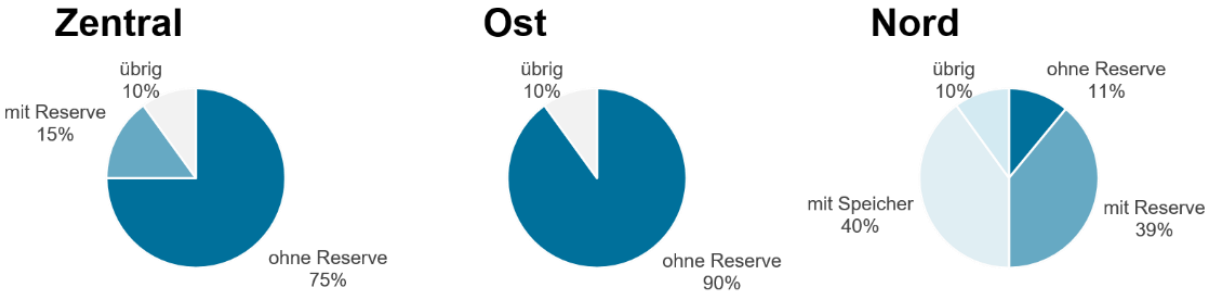


Abbildung 66 Prozentualer Anteil an integrierbarer Ladepunkte in Bezug auf die Parkplatzverfügbarkeit (Szenario Elektromobilität) [elenia]

Im Zentralcampus können bereits durch die Inbetriebnahme der Reservetransformatoren 90 % der Parkplätze als Lademöglichkeit für Elektrofahrzeuge bereitgestellt werden. Im Ostcampus ist keine Aktivierung der Reservetransformatoren erforderlich. In Anbetracht der berechneten Werte in Tabelle 24 ist dieses Ergebnis nachvollziehbar. Im Nordcampus können bei Aktivierung der Reservetransformatoren 50 % der Parkplätze als Ladepunkt umgerüstet werden. Erst durch den Einsatz von Netzausbau- oder Netzverstärkungsmaßnahmen können die restlichen Parkplätze mit Lademöglichkeiten ausgerüstet werden. Alternativ kann mithilfe eines Lademanagements für Ladebereiche das bestehende Verteilnetz optimiert werden.

7.2.2.7 Untersuchung des Energieeinsparpotentials durch den Einsatz von DC Microgrids

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im Rahmen der Teilstrategie Energieverteilung und Netzstabilität ist die Untersuchung des Energieeinsparpotentials durch den Einsatz von effizienten gleichstrombasierten Inselnetzen. Die sogenannten DC Microgrids können in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, um elektrische Umwandlungsverluste zu reduzieren oder vollständig zu vermeiden.

Leistungselektronik hat die Aufgabe, elektrische Energie in die jeweils benötigte Form umzuwandeln. Dabei entstehen Umwandlungsverluste. Durch eine Reduzierung der Umwand-

lungsschritte einhergehend mit dem der Einsatz von effizienten Gleichrichtern kann die Energieeffizienz der Energieübertragung verbessert werden.

Angesichts der Technologieentwicklung ist aus heutiger Sicht der Einsatz von gleichstrombasierten Inselnetzen in diversen Anwendungsbereichen vorteilhaft. Erneuerbare Energieanlagen wie PV-Anlagen erzeugen Gleichstrom. Dieser wird in der Regel durch einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und in das Wechselstromnetz eingespeist. Gleichzeitig verwenden moderne Technologien intern Gleichstrom. Dies trifft insbesondere auf elektrische Verbraucher im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) zu. Mithilfe eines Netzteils wird der Strom aus der Steckdose wieder in Gleichstrom umgewandelt. Auch elektrische Energiespeicher wie Lithium-Ionen-Akkumulatoren speichern die elektrische Energie in Form von Gleichstrom.

Bereits in EnEff Campus: blueMAP wurde das Thema effiziente Gleichstromnetze vorgestellt und anhand von zwei Fallstudien die Vorteile gegenüber konventionell betriebenen Wechselstromnetzen erläutert. In den genannten Fallstudien wurde zum einen das universitätseigene Rechenzentrum und zum anderen das Bürogebäude 3324 näher untersucht. Im Rahmen von theoriebasierten Energieeffizienzbewertungen konnte für das Rechenzentrum eine Verbesserung um 11 % sowie für das Bürogebäude um 47 % identifiziert werden. Aufgrund der hohen Investitionskosten wurde für das Konzept 2020 keine flächendeckende Umstellung auf Gleichspannung für den Campus der TU Braunschweig empfohlen. Nichtsdestotrotz soll das Thema in weiterführenden Untersuchungen näher betrachtet und eine praktische Umsetzbarkeit geprüft werden.

Vielversprechende Einsatzgebiete für Universitäten sind unter anderem im Gebäudebereich bei Beleuchtungssystemen, Büros und Computer-Pools für Studierende zu finden. Darüber hinaus sind zukünftig auch Ladeinfrastrukturbereiche für Elektrofahrzeuge als potentielles Einsatzgebiet hervorzuheben. Anhand von Simulationsergebnissen wird im Folgenden das Einsparpotential von Energie- und Investitionskosten im Bereich Beleuchtung bewertet. In einer weiteren Fallstudie wird der Einsatz von Gleichstromnetzen für Rechnerarbeitsplätze anhand eines umsetzbaren Konzepts vorgestellt und bewertet. Durch den Aufbau eines Gleichstrombüros wird die praktische Umsetzbarkeit demonstriert. Für den Bereich Ladeinfrastruktur erfolgt eine theoriebasierte Effizienzbewertung.

7.2.2.8 Fallstudie: Beleuchtungssystem

Um eine Aussage über die Vorteilhaftigkeit von gleichstrombasierten Inselnetzen für Beleuchtungssysteme treffen zu können, wird als Musterbeispiel die Flurbeleuchtung am elenia in der Schleinitzstraße untersucht. Im 2. OG des Gebäudes 4102 befinden sich 14 Leuchtstofflampen mit einer Nennleistung von jeweils 58 W. Der Flur ist fensterlos, sodass die Leuchtmittel an Arbeitstagen wenige Stunden am Tag außer Betrieb sind.

Abbildung 67 Beleuchtungssystem im Flur des elenia [elenia]

Die Betriebsmittel eines Beleuchtungssystems sind im Wesentlichen Leuchtmittel inklusive Vorschaltgerät, Leitungen zur Energieübertragung (im betrachteten Anwendungsfall mit einer Gesamtlänge von 40 m), das Relais, welches den Hauptstromkreis steuert sowie Lichtschalter, mit denen über weitere Leitungen das Relais angesteuert wird. Da die Leistungsaufnahme des Relais nur wenige Watt beträgt, wurden die Verluste in den Lichtschaltern sowie in den Steuerleitungen vernachlässigt. Die Leitungsverluste werden mit der Simulationssoftware LTSpice ermittelt. Im Vergleich zu einer theoriebasierten Energieeffizienzbewertung liefert eine simulationsbasierte Untersuchung genauere Ergebnisse. Das Simulationsmodell wird in Abbildung 68 dargestellt.

Abbildung 68 Simulation der Leitungsverluste in LTSpice für die Flurbeleuchtung am elenia [elenia]

Bei einer aufgenommenen Leistung von 812 W der Leuchtstofflampen, 182 W der Vorschaltgeräte, 37 W der Zuleitung und 4 W durch das Steuerrelais, resultiert im aktuellen wechsel-

strombetriebenen Zustand eine Gesamtleistungsaufnahme von 1035 W. Hinsichtlich der Leistungsbilanz werden die folgenden Umsetzungsalternativen näher untersucht:

1) Betrieb mit 380 V DC und LED-Röhren
2) Betrieb mit 24 V DC (Leiterquerschnitt 1,5 mm²) und LED-Röhren
3) Betrieb mit 24 V DC (Leiterquerschnitt 4 mm²) und LED-Röhren
4) Austausch bestehender Leuchtstoffröhren durch LED-Röhren

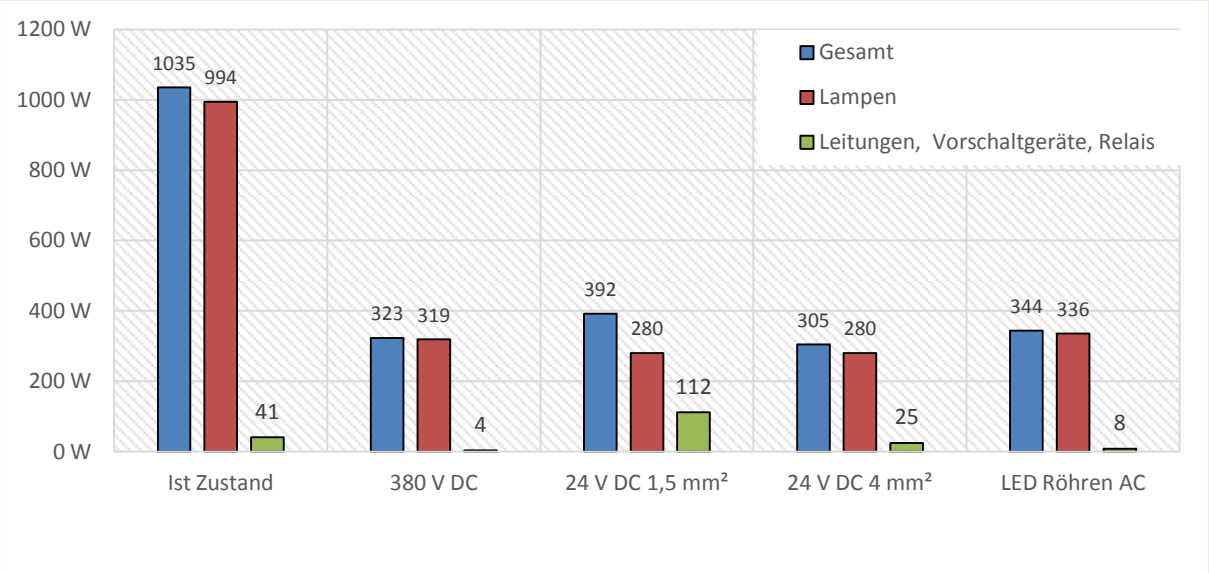


Abbildung 69 Leistungsaufnahme der Komponenten für die Flurbeleuchtung am elenia [elenia]

In Abbildung 69 werden die Simulationsergebnisse mit LTSpice für die drei vorgestellten Lösungsansätze zusammenfasst. Bei allen betrachteten Alternativen lassen sich im Vergleich zu den Leuchtstoffröhren deutliche Energieeinsparungen erzielen. Durch eine Umrüstung auf eine Betriebsspannung von 380 V DC lassen sich die geringsten Gesamtverluste erzielen. Demgegenüber stehen diverse Umsetzungsprobleme hinsichtlich der Verfügbarkeit der erforderlichen Betriebsmittel, unklare Sicherheitsanforderungen und einem zusätzlichen Investitionsaufwand für den Austausch der Betriebsmittel.

Bei der Verwendung einer Betriebsspannung von 24 V DC können größtenteils die Betriebsmittel weiterhin verwendet werden. Aus Sicht von Personenschutz und Brandschutzrecht ist die 24 V Spannungsebene unproblematisch. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen jedoch bei Verwendung der bestehenden Leitungen mit einem Querschnitt von 1,5 mm² einen Zuwachs hinsichtlich der resultierenden Übertragungsverluste. Der Austausch durch Leitungen mit 4 mm² Querschnitt reduziert zwar die Übertragungsverluste, jedoch sind damit wieder höheren Investitionskosten erforderlich.

Der Austausch der bestehenden Leuchtstofflampen durch LED-Röhren ist hinsichtlich der Umsetzung die einfachste und gleichzeitig unter Betrachtung der Energieeffizienz die vorgeschlagene Lösung.

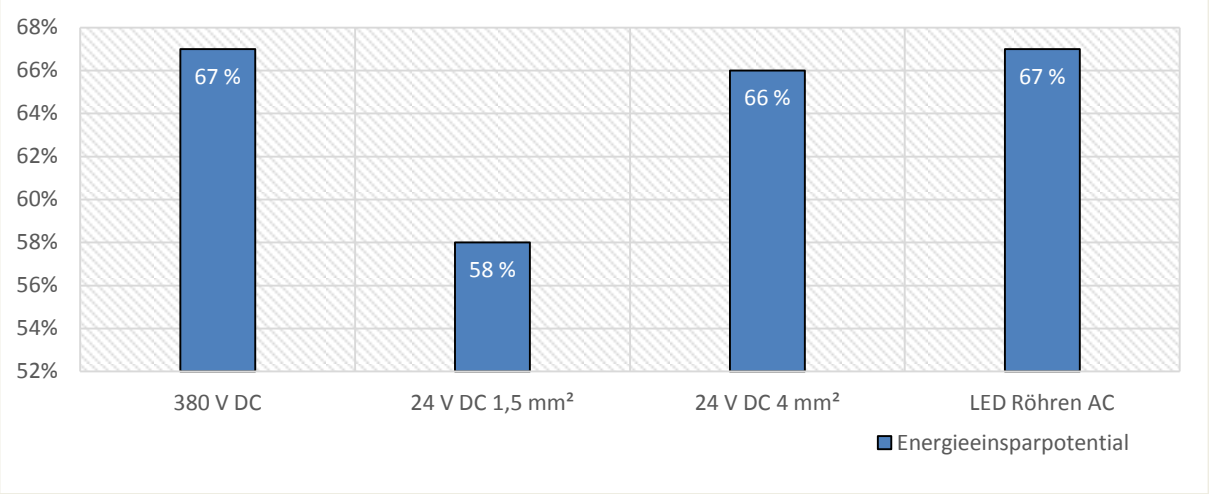


Abbildung 70 Energieeinsparpotential für die Flurbeleuchtung am elenia [elenia]

Abbildung 70 zeigt das Energieeinsparpotential der unterschiedlichen Lösungsansätze unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades möglicher Netzteile. Allgemein lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass bei niedrigeren Spannungsebenen der Leiterquerschnitt einen signifikanten Einfluss auf das Energieeinsparpotential im Bereich einer Flurbeleuchtung hat. Aufgrund des Wirkungsgrades des Netzteils liegen die Einsparpotentiale von 380 V DC und dem Austausch der Beleuchtung durch LED-Röhren nahezu gleichauf. Als Fazit der Fallstudie wird ein Austausch der bestehenden Leuchtmittel durch LED-Röhren empfohlen, die keine weiteren Eingriffe in die Gebäudeinstallation erforderlich macht.

7.2.2.9 Fallstudie: Rechnerarbeitsplätze

Einen wesentlichen Beitrag an den Energieverbrauch von Universitäten haben elektrische Verbraucher aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik. Studierende und Mitarbeiter der TU Braunschweig benötigen unter anderem zur Weiterbildung, zur Forschung oder für die Bearbeitung von Verwaltungsaufgaben eine Vielzahl an Rechnerarbeitsplätzen.

IKT Verbraucher werden in der Regel intern mit Gleichstrom betrieben und verfügen daher über ein Netzteil, um den Wechselstrom aus der Steckdose in Gleichstrom umzuwandeln. Im Rahmen von EnEff Campus: blueMAP wurden bereits das universitätseigene Rechenzentrum und das Bürogebäude 3324 als Anwendungsgebiete von effizienten Gleichstromnetzen evaluiert. Im Rahmen der Fallstudie wird zunächst ein umsetzbares Konzept eines gleichstromversorgten Rechnerraums für Studierende vorgestellt und die Effizienzsteigerung anhand von Berechnungen dargelegt. Zur Bewertung der Energieeffizienzsteigerung für gleichstrombetriebene Rechnerräume wird der institutseigene Rechnerraum in der Schleinitzstraße 23 als Anwendungsfall untersucht. Die Ergebnisse können repräsentativ auch auf andere Rechnerarbeitsplätze übertragen werden. Der Rechnerraum wird für Studierende bereitgestellt, die im Rahmen von Abschlussarbeiten, Rechnerübungen oder als Studentische Hilfskraft zur Unterstützung in der Forschung am Institut tätig sind.

Der 70 m² große Raum R 244 setzt sich aus 20 Rechnerarbeitsplätzen zusammen. Diese bestehen aus Rechnereinheiten und Bildschirmen von verschiedenen Herstellern und mit un-

terschiedlichen, jedoch vergleichbaren technischen Spezifikationen und Energieverbräuchen. Die Arbeitsplätze werden sowohl für Office-Anwendungen als auch für Simulationen eingesetzt. Die Geräte sind größtenteils bereits älter als 10 Jahre. Um den heutigen Anwendungsanforderungen gerecht zu werden, wurden die Rechnereinheiten zwischenzeitig technisch nachgerüstet. Der Energieverbrauch der Rechnereinheiten liegt bei 240 W sowie die der Monitore bei 40 W Nennleistung.

Anstelle der herkömmlichen 230 V Wechselstromversorgung und den für die einzelnen Komponenten erforderlichen Netzteile können effizientere zentrale Gleichrichter für die Versorgung der Verbraucher eingesetzt werden. In Abbildung 71 werden die unterschiedlichen Versorgungsstrukturen schematisch vorgestellt.

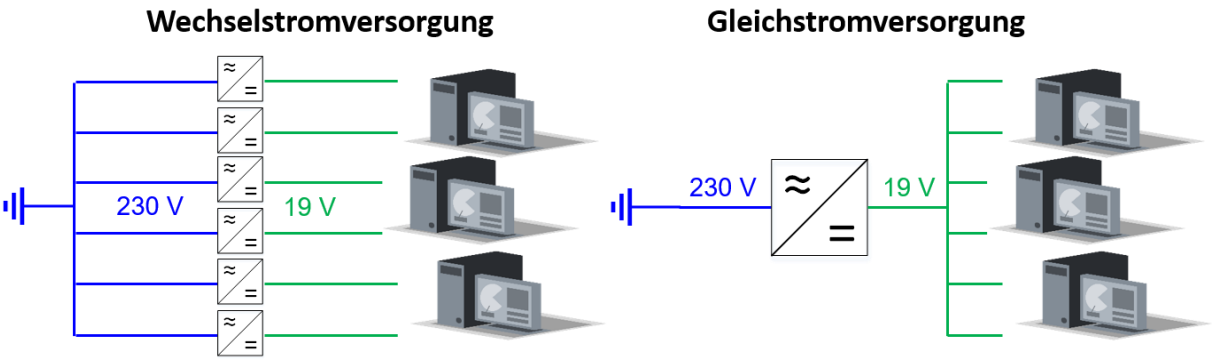


Abbildung 71 Vergleich Wechselstromversorgung und Gleichstromversorgung für Rechnerarbeitsplätze [elenia]

Standardnetzteile von Rechnereinheiten erreichen meist Wirkungsgrade bis 80 %. Besonders effiziente Geräte werden mit verschiedenen 80 Plus® Etiketten beworben [10]. In Abhängigkeit des tatsächlichen Verbrauchs ist hierfür bei 20 %, 50 % und 100 % der Nennleistung jeweils ein Wirkungsgrad von mindestens 80 % erforderlich. Die Wirkungsgradvorgaben zum Erhalt eines derartigen Zertifikats werden in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25 Wirkungsgrade in Prozent nach 80 Plus® Standard [elenia]

80 Plus® Label	Standard	Bronze	Silver	Gold	Platinum
20 % Last	80	82	85	87	90
50 % Last	80	85	88	90	92
100 % Last	80	82	85	87	89

Die im Rechnerraum im Einsatz befindlichen Rechnereinheiten verfügen größtenteils über Netzteile mit einem 80 Plus® Bronze Etikett. Somit weisen diese einen lastabhängigen Wirkungsgrad von 82 % bis 85 % auf. Bei den Bildschirmnetzteilen wird ein Wirkungsgrad von 85 % angenommen.

Im Rahmen einer Marktrecherche wurden für die Umsetzung einer Gleichstromversorgung ein Gleichrichter ermittelt, der den gegebenen Leistungsanforderungen entspricht. Zur Versorgung der Rechnerarbeitsplätze können Schaltnetzteile der Firma Phoenix Contact eingesetzt werden. In Abbildung 72 werden das Schaltnetzteil QUINT-PS/1AC/24DC/40 [11] sowie dessen Spezifikationen abgebildet.

- Variable Ausgangsspannung (18 V - 29,5 V)
- Maximaler Strom: 40 A
- Ausgangsnennleistung: 960 W
- AC Input (100 V - 240 V)
- DC Input (90 V - 300 V)
- Wirkungsgrad: 92 % - 98 %

Abbildung 72 Gleichrichter der Firma Phoenix Contact zur Stromversorgung der Rechnerarbeitsplätze [Phoenix Contact: Datenblatt QUINT-PS/ 1AC/24DC/40. Blomberg 04/2010]

Bei einer Ausgangsnennleistung von 960 W belaufen sich die Verlustleistungen zwischen 80 W bei Nennlast sowie 14 W im Leerlauf. Dies entspricht umgerechnet einen Wirkungsgrad von 92 % bis 98 %. Damit wird entsprechend der Tabelle 25 der höchste 80 Plus® Standard Platinum für Rechnernetzteile übertroffen. In Anbetracht der Fallstudie resultiert daraus für die Gleichstromversorgung eine Energieeffizienzsteigerung zwischen 10 % und 13 % gegenüber der konventionellen Versorgung mit Wechselstrom.

Je Rechnerarbeitsplatz wird eine Nennleistung von 280 W benötigt. Bei einer Ausgangsnennleistung des Gleichrichters von 960 W können somit jeweils drei Rechnerarbeitsplätze mit Strom versorgt werden. Ein zentraler Gleichrichter ersetzt somit drei Bildschirm- sowie drei Rechnernetzteile. Da die Geräte über integrierte Gleichrichter betrieben werden, sind für die Versorgung mit Gleichstrom Umbaumaßnahmen an den Rechnereinheiten und Monitoren erforderlich. Intern werden die Geräte mit einer Eingangsspannung von 12 V bis 19 V DC versorgt. Die variable Ausgangsspannung des Gleichrichters von 18 V bis 29,5 V gewährleistet zudem eine Kompatibilität für Bildschirme und Rechnereinheiten anderer Hersteller sowie weiterer elektrischer Verbraucher (beispielsweise Beamer oder Router).

Um auch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit eine Aussage treffen zu können, wird der jährliche Energiebedarf des Rechnerraums geschätzt. Bei 250 Arbeitstagen sowie einer durchschnittlichen Tagesnutzung von 8 Stunden resultiert eine Betriebszeit von 2.000 Stunden pro Jahr und Rechnerarbeitsplatz. Ein Rechnerarbeitsplatz hat bei einer Nennleistung von 280 W somit einen geschätzten Jahresverbrauch von 56 kWh. Durch die gleichstrombasierte Versorgung kann, unter Berücksichtigung einer Steigerung der Energieeffizienz um 10 %, im Jahr 5,6 kWh eingespart werden. Für den Rechnerraum mit 20 Rechnerarbeitsplätzen sind das pro Jahr 112 kWh. Bei einem Preis von 0,30 € pro kWh kann eine Kostenersparnis von 33,60 € im Jahr erreicht werden. Die Kostenersparnis steht in keinem Verhältnis zu den erforderlichen Investitionskosten. Ohne Berücksichtigung der erforderlichen Arbeitsstunden

für die Umbaumaßnahmen an den Geräten belaufen diese sich auf ca. 2.500 € bei 20 Rechnerarbeitsplätzen.

Der Energieverbraucher der 20 Rechnerarbeitsplätze ist verhältnismäßig zu gering, um den Aufbau eines effizienteren Gleichstromnetzes zu rechtfertig. Erst im Kontext einer größeren und ggf. gebäudeübergreifenden Gleichstromversorgung könnte sich das Vorhaben auch wirtschaftlich rentieren. Insbesondere in Kombination mit gleichstrombasierten Erzeugern wie Photovoltaikanalgen sowie elektrischen Energiespeichern ergeben sich weitere Einsparpotentiale.

Eine technische Umsetzbarkeit von gleichstrombasierten Rechnerarbeitsplätzen ist möglich. Zur Demonstration wurde am Institut das Büro R226 auf eine gleichstrombasierte Versorgung umgebaut. Das DC Büro befindet sich im Gebäude 4102 im 2. OG in der Schleinitzstraße 23 und wird von drei Institutsmitarbeitern als Arbeitsplatz genutzt. Ein zentraler Gleichrichter versorgt sechs elektronische Endgeräte mit einer Gleichspannung von 19,5 V. Dadurch entfallen die Netzgeräte der insgesamt drei Notebooks sowie drei Bildschirmen. Des Weiteren wird ein LAN-Switch mit 5 V DC über einen separaten Gleichrichter betrieben. In Abbildung 73 ist der Schaltschrank für die DC Versorgung dargestellt.

Abbildung 73 Schaltschrank und Schaltplan zur Gleichstromversorgung von Rechnerarbeitsplätzen [elenia]

Neben den Gleichrichtern beinhaltet der Schaltschrank noch diverse Schutzschalter, um bei einer Überschreitung der zulässigen Strom- oder Spannungswerte automatisiert abzuschalten und somit die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Die Gleichrichter werden mit Wechselstrom aus einer handelsüblichen Steckdose versorgt. Der Gleichstrom wird aus dem Schaltschrank über eine Versorgungsleitung zu den Arbeitsplätzen der Mitarbeiter geführt.

Jeder Schreibtisch ist mit zwei Gleichstromanschlüssen zur Versorgung jeweils eines Laptops sowie eines Bildschirmes versehen. Zusätzlich befinden sich zwei USB- sowie ein LAN-Netzwerk-Anschluss an jedem der Arbeitsplätze. Angebracht sind die Anschlüsse an einer Metallplatte (s. Abbildung 74).

Abbildung 74 Anschlüsse zur Gleichstromversorgung von Rechnerarbeitsplätzen [elenia]

Anders als bei den betrachteten Rechnereinheiten und Bildschirmen im Rechnerraum sind bei den Geräten im DC Büro keine Umbaumaßnahen erforderlich. Laptops werden in der Regel über externen Netzteilen versorgt. Neuere Bildschirme und auch einige Rechnereinheiten wie Mini-PCs werden ebenfalls mit externen Netzgeräten betrieben. Ohne Verwendung der Standardnetzteile können diese Geräte somit direkt über den Gleichstrom aus dem Schaltschrank versorgt werden. Die Übertragungsleitungen sind mit den benötigten Steckverbindern eigens angefertigt wurden.

Im Betrieb hat sich schließlich ein technisches Problem herausgestellt. Die verwendeten Dienstlaptops der Firma Dell verfügen über einen Schutzmechanismus, der erkennt, ob es sich um ein herstellereigenes Netzteil handelt. Ist das nicht der Fall, wird das Laptop nicht mit Strom versorgt. Somit sind die Dienstlaptops nicht mit dem gleichstrombasierten Inselnetz des DC Büros kompatibel. Keine Schwierigkeiten hingegen konnten bei der Versorgung der Bildschirme sowie eines privaten Laptops festgestellt werden.

Als Ergebnis der Fallstudie lässt sich zusammenfassen, dass mithilfe von gleichstrombasierten Inselnetzen eine Energieeffizienzsteigerung von 10 % möglich ist. Die technische Umsetzung wäre bei der Anschaffung von kompatiblen Bildschirmen und Rechnereinheiten oder Laptops möglich. Wirtschaftlich betrachtet rentiert sich im betrachteten Fall das Gleichstrominselnetz nicht aufgrund der hohen Investitionskosten für die Gleichrichter sowie des verhältnismäßig geringen Energieeinsparpotentials resultierend aus dem geringen Energieverbrauch.

7.2.2.10 Fallstudie: Ladeinfrastruktur

Ladebereiche für Elektrofahrzeuge sind ein weiteres potenzielles Einsatzgebiet für gleichstrombasierte Inselnetze. Durch eine Verknüpfung mit der Energieerzeugung in Form von PV-Anlagen sowie durch den Einsatz von elektrischen Energiespeichern können Elektrofahrzeuge an Ladebereichen umweltschonend geladen werden. Als Inselnetz betrieben kann gleichzeitig eine Entlastung der Betriebsmittel im Verteilnetze erreicht werden. Die Versorgung innerhalb von Ladebereichen erfolgt konventionell mit Wechselstrom. Im Hinblick auf das Thema Energieeffizienz wird eine alternative Umsetzung mittels Gleichstromversorgung bewertet. Als Referenz der Untersuchung dient das in der Teilstrategie Elektromobilität vorgestellte Konzept eines solarbetriebenen Carports.

Im Rahmen der Untersuchung werden die Elektrofahrzeuge am Ladebereich alternativ an einem 22 kW AC bzw. 50 kW DC Ladepunkt geladen. Beide Ladetechnologien befinden sich gegenwärtig im Einsatz. Aus heutiger Sicht kann keine Aussage getroffen werden, ob und wenn welche der Technologien sich zukünftig am Markt durchsetzen wird. Darüber hinaus verfügt der untersuchte Ladebereich über eine PV-Anlage mit einer Leistung von 8,1 kW Peak sowie einem stationären Lithium-Ionen Energiespeicher. Ein bidirektionaler Anschluss an das 6 kV Mittelspannungsnetz, wie es am Zentralcampus vorliegt (siehe Abbildung 59), ermöglicht eine zusätzliche Versorgung des Inselnetzes und bietet die Möglichkeit der Energierückspeisung. Der Netzanschluss befindet sich in unmittelbarer Nähe zu den anderen Komponenten. Im AC Microgrid wird eine Versorgungsspannung von 400 V und im DC Microgrid von 1000 V angenommen.

Die durch die PV-Anlage eingespeiste Energie soll vorrangig zum Laden der Elektrofahrzeuge verwendet werden. Wenn kein Fahrzeug angeschlossen ist und durch die PV-Anlage Energie eingespeist wird, dient der Energiespeicher als Zwischenspeicher. Erst wenn dieser seinen maximalen Ladezustand erreicht hat, wird die Energie zurück ins Mittelspannungsnetz gespeist. Wird während eines Ladevorgangs eine geringere Energiemenge erzeugt als benötigt, wird die Differenz vorrangig vom Energiespeicher bereitgestellt.

Der Fokus der Untersuchung liegt auf die Energieeffizienz bei der Energieverteilung im Ladebereich. Somit sind die Wirkungsgrade der Leistungselektronik zwischen den Energiesystemen entscheidend. Der Wirkungsgrad beschreibt den Quotienten aus Eingangsleistung durch Ausgangsleistung eines Bauelementes und schwankt in Abhängigkeit der Höhe der Leistung. Die Festlegung der Werte kann aus dem Anhang entnommen werden. Leitungsverluste beeinflussen ebenfalls die Effizienz. Bei Betrachtung der kurzen Distanzen zwischen den Netzkomponenten sind die Leitungsverluste in vorliegenden Anwendungsbereich sehr gering (<1 %) und werden daher vernachlässigt.

Zunächst wird der schematische Aufbau eines wechselstrombasierten Inselnetzes vorgestellt. Abbildung 75 bildet die Netzstruktur inklusive der erforderlichen Leistungselektronik im Falle des wechselstrombasierten Ladens ab, während Abbildung 76 den Aufbau beim gleichstrombasierten Laden dargestellt.

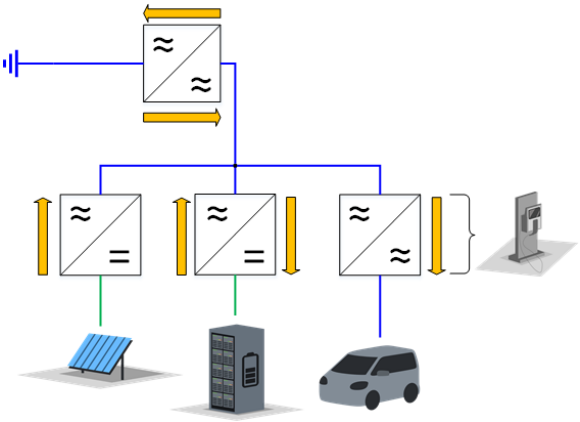


Abbildung 75 AC Microgrid mit AC Ladepunkt [elenia]

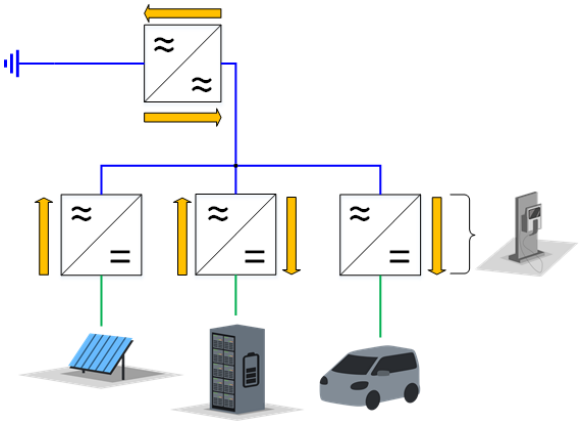


Abbildung 76 AC Microgrid mit DC Ladepunkt [elenia]

In beiden Fällen wird der bidirektionale Netzanschluss über einen Transformator realisiert, der die 6 kV Spannung des Mittelspannungsnetzes bei einem Wirkungsgrad von 97 % auf die erforderlichen 400 V herabsetzt. Der Photovoltaik Wechselrichter besteht aus einem Hochsetzsteller für das Maximum-Power-Point-Tracking und einem DC/AC-Wandler und verfügt über einen Wirkungsgrad von 97 %. Der stationäre Energiespeicher ist über einen bidirektionalen Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von 95 % angeschlossen. Die Fahrzeugbatterie benötigt Gleichstrom. Im Falle der AC Ladens befindet sich die Leistungselektronik zur Umwandlung des Wechselstroms im Fahrzeug. Die Umwandlungsverluste belaufen sich nach institutseigenen Messungen auf 9,6 % [12]. Wird mit Gleichstrom geladen, enthält der DC Ladepunkt die Leistungselektronik zur Umwandlung der Wechsel- in Gleichspannung. Bei diesem Umwandlungsprozess betragen die Energieverluste 5 %.

Analog zur bisherigen Betrachtung wird nachfolgenden die Umsetzung einer Ladeinfrastruktur auf Basis von gleichstrombasierten Inselnetzen vorgestellt. In Abbildung 77 wird das Laden von Elektrofahrzeugen mit Wechselstrom und in Abbildung 78 das Laden mit Gleichstrom dargestellt.

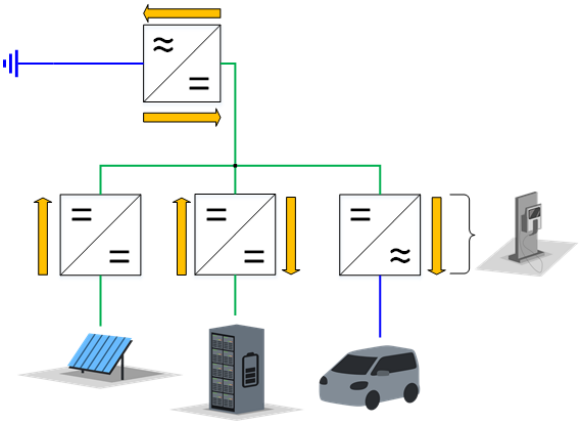


Abbildung 77 DC Microgrid mit AC Ladepunkt [elenia]

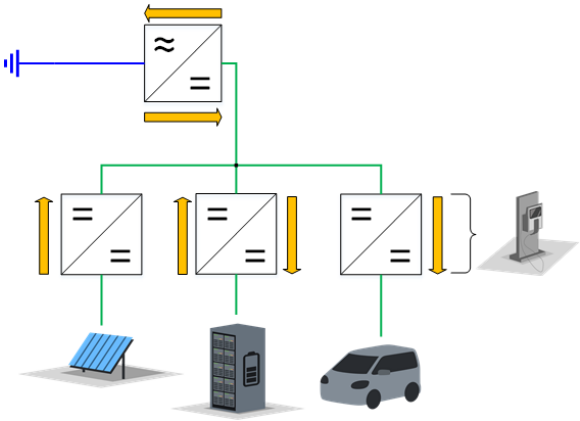


Abbildung 78 DC Microgrid mit DC Ladepunkt [elenia]

Der Anschluss an das 6 kV Mittelspannungsnetz wird über einen bidirektionalen Wechselrichter realisiert. Ein Zusammenschalten mit einem Transformator oder DC/DC-Wandler

notwendig, um die Spannung auf 1 kV zu senken. Der Wirkungsgrad der kombinierten Schaltung beträgt 95 %. Die PV-Anlage wird über einen Hochsetzsteller mit einem Wirkungsgrad von 98 % an das DC Versorgungsnetz angeschlossen. Der Anschluss des Energiespeichers erfolgt über einen bidirektionalen DC/DC-Wandler mit einem Wirkungsgrad von 97 %. Beim Laden mit Wechselstrom dient ein DC/AC-Wandler mit einem Wirkungsgrad von 97 % als Schnittstelle, sodass inklusive der Verluste im Fahrzeug ein Wirkungsgrad von 87,69 % resultiert. Im Falle des Ladens mit Gleichstrom wird ein Tiefsetzsteller benötigt, der bei einem Wirkungsgrad von 97 % die 1000 V DC Versorgungsspannung auf die Batteriespannung des Elektrofahrzeuges herabsetzt.

In Tabelle 26 werden die Wirkungsgrade für die zum Anschluss der Energiesysteme erforderlichen Leistungselektronik beider Versorgungsalternativen zusammengefasst.

Tabelle 26 Übersicht Wirkungsgrade der Leistungselektronik in AC und DC Ladebereichen [elenia]

Komponente	AC Microgrid	DC Microgrid
Netzanschluss	97 %	95 %
Photovoltaik Anlage	97 %	98 %
Energiespeicher	95 %	97 %
AC Ladepunkt	90,4 %	97 % * 90,4 % = 87,69 %
DC Ladepunkt	95 %	97 %

Zur Beurteilung der Gesamteffizienz sind verschiedene Szenarien zu unterscheiden. Diese beziehen sich auf die resultierenden Energieflüsse zur Ladung der Fahrzeugbatterie. Die prognostizierte Jahreserzeugung der betrachteten PV-Anlage beträgt 13.000 kWh pro Jahr. An einem sonnenreichen Tag können in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps, des Ladezeitpunkts und des Batterieladestands mehrere Elektrofahrzeuge vollständig geladen werden. Insgesamt werden im Rahmen der Untersuchungen vier Szenarien unterschieden:

Szenario 1: Die Aufladung der Elektrofahrzeuge erfolgt vollständig durch die PV-Anlage.

Szenario 2: Die von der PV-Anlage erzeugte Energie wird zunächst in den Energiespeicher eingespeist. Die Aufladung der Elektrofahrzeuge erfolgt vollständig aus dem Energiespeicher.

Szenario 3: Die Aufladung der Elektrofahrzeuge erfolgt anteilig zur Hälfte direkt aus der PV-Anlage und zur anderen Hälfte aus dem Energiespeicher.

Szenario 4: Die von der PV-Anlage erzeugte Energie wird vollständig aus dem Mittelspannungsnetz gespeist. Zu einem späteren Zeitpunkt wird das Elektrofahrzeug vollständig aus dem Energieversorgungsnetz aufgeladen.

Basierend auf den vier Szenarien wird für beide Ladebereichvarianten der Gesamtwirkungsgrad aufgestellt und in Tabelle 27 aufgelistet. Als Beispiel beträgt der Gesamtwirkungsgrads μ für Szenario 3 bei einer Gleichstromladung von Elektrofahrzeugen in einem wechselstrombasierten Ladebereich:

$$\mu = 0{,}97 * (0{,}5 + 0{,}5 * 0{,}95^2) * 0{,}95 = 87{,}66\ \%$$

Tabelle 27 ***Szenarien abhängige Gesamtwirkungsgrade in AC und DC Ladebereichen [elenia]***

Microgrid	Ladever-fahren	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
AC	AC	87,69 %	79,14 %	83,41 %	82,51 %
	DC	92,15 %	83,17 %	87,66 %	85,79 %
DC	AC	85,93 %	80,86 %	83,39 %	77,56 %
	DC	95,06 %	89,44 %	92,25 %	86,70 %

Aus den berechneten Gesamtwirkungsgraden lassen sich die folgenden Ergebnisse ableiten:

1. Szenarien unabhängig kann ein höherer Gesamtwirkungsgrad beim Gleichstromladen gegenüber dem Wechselstromladen festgestellt werden. Dies ist auf die höhere Effizienz der Leistungselektronik beim Laden mit Gleichstrom zurückzuführen.
2. Beim Wechselstromladen treten bei der direkten Versorgung der Elektrofahrzeuge durch die Energie aus der Photovoltaikanlag bei einem AC Ladebereich weniger Verluste auf als in einem DC Ladebereich (Szenario 1). Bei der Versorgung aus dem Mittelspannungsnetz ist der AC Ladebereich ebenfalls effizienter (Szenario 4).
3. Beim Wechselstromladen treten bei einer überwiegenden Versorgung der Elektrofahrzeuge durch den Energiespeicher weniger Verluste auf als in einem AC Ladebereich (Szenario 2).

Darüber hinaus ist im AC Ladebereich ein höherer Gesamtwirkungsgrad erkennbar, wenn die Elektrofahrzeuge aus dem Energieversorgungsnetz anstatt aus dem Energiespeicher gespeist werden. Dies wird im direkten Vergleich zwischen Szenario 2 und Szenario 4 ersichtlich. Hierbei werden jedoch die Übertragungsverluste im übergeordneten Versorgungsnetz nicht berücksichtigt. Im Allgemeinen ist ein erzeugungsnaher Verbrauch der Energie vorteilhaft.

Werden zukünftig Elektrofahrzeuge an der TU Braunschweig überwiegende mit Gleichstrom geladen, wäre der Einsatz von gleichstrombasierten Ladebereichen hinsichtlich des Aspektes der Energieeffizienz empfehlenswert. Im Durchschnitt kann unter der Betrachtung der vier Szenarien ein Effizienzvorteil von knapp 4 % erreicht werden. Werden Elektrofahrzeuge künftig überwiegende mit Wechselstrom geladen, kann hinsichtlich der Effizienz keine eindeutige Aussage getroffen werden. Je mehr die Elektrofahrzeuge aus dem Energiespeicher gespeist werden, desto effizienter sind gleichstrombasierte Ladebereiche. Bei einer ausgegli-

chenen Energiebereitstellung durch das Energieversorgungsnetz sowie aus dem Energiespeicher weisen beide Ladebereichsvarianten einen nahezu gleichen Gesamtwirkungsgrad auf.

7.2.3 Teilstrategie Netzinfrastruktur und Netzintegration bei einem Ausbau leistungsintensiver Stromverbraucher (Elektromobilität)

Der Paradigmenwechsel in der automobilen Antriebstechnologie erfordert für die Versorgung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen ein neues Konzept der Energiebereitstellung. Als Vorreiterrolle für eine CO2-freundlichere Mobilität im Straßenverkehr und auch zum Zwecke der Forschung erhält die Elektromobilität bereits heute Einzug am Campus der TU Braunschweig. Für die Zukunft ist angesichts der politischen Zielvorgaben, 1 Millionen Elektrofahrzeuge bis 2020 und 6 Millionen Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2030 [13], eine Fortsetzung des Trends zu erwarten. In einer Szenarien Analyse zur Integration von Elektrofahrzeugen am Campus wurden in der Teilstrategie Energieverteilung und Netzstabilität bereits die Auswirkungen auf die Versorgungsnetze der TU Braunschweig untersucht und bewertet.

Neben einer flächendeckenden Bereitstellung von Ladebereichen sind weitere Maßnahmen erforderlich, um eine hinsichtlich der Nutzung von erneuerbaren Energien effiziente und zugleich netzdienliche Integration der Elektrofahrzeuge als leistungsintensive Verbraucher zu ermöglichen. Für die Erfassung der ladespezifischen Daten und zur gezielten Steuerung der Energieflüsse der beteiligten Energiesysteme wird ein informations- und kommunikationstechnisches Lademanagementsystem benötigt. Um zukünftig den zusätzlichen elektrischen Energiebedarf anteilig zu kompensieren, könnten als Möglichkeit solarbasierte Carports eingesetzt werden. Diesbezüglich wurde von Studierenden der TU Braunschweig ein Umsetzbares Konzept entwickelt.

Im weiteren Verlauf werden dahingehend die folgenden Themen behandelt:

- Aufbau des Ladebereichs am Mühlenpfordthaus
- Übersicht der Ladestationen am TU Braunschweig Campus
- Vorstellung des Lademanagementsystems elias
- Statische Steuerung von Ladevorgängen unter Berücksichtigung der Netzrestriktionen
- Dynamische Steuerung von Ladevorgängen zur Integration von Erneuerbaren Energieanlagen
- Datenerfassung und Auslastung von Ladebereichen
- Konzeptvorstellung eines Solar Carports

7.2.3.1 Aufbau des Ladebereichs am Mühlenpfordthaus

Ende 2016 wurden für den Ladebereich am Mühlenpfordthaus (Gebäude 4102) die Planung, der Aufbau und die Inbetriebnahme von vier Ladepunkten umgesetzt. Der neue Ladebereich umfasst zwei AC Wallboxen, die das wechselstrombasierte Laden mit bis zu 22 kW ermöglichen. Des Weiteren wurde ein sogenannter Multicharger errichtet, der zusätzlich zu dem

22 kW AC Laden auch das gleichstrombasierte Laden mit 22 kW DC bereitstellt. Somit können am Ladebereich Mühlenpfordthaus bis zu vier Elektrofahrzeuge zeitgleich geladen werden. Der schrittweise Aufbau des neuen Ladebereiches ist in Abbildung 79 dokumentiert.

Abbildung 79 Aufbau des Ladebereichs Mühlenpfordthaus [elenia]

7.2.3.2 Übersicht der Ladestationen am TU Braunschweig Campus

In der Anfangsphase von EnEff Campus 2020 sind insgesamt 26 Ladepunkte im Bereich der TU Braunschweig vorhanden. Neben dem neuerrichteten Standort am Mühlenpfordthaus ist die TU Braunschweig Eigentümer von Ladesäulen in der Schleinitzstraße, am Langer Kamp sowie in der Hermann-Blenk-Straße am NFF. Weitere Ladebereiche der Stadt Braunschweig befinden sich am Haus der Wissenschaft sowie am Langer Kamp und sind öffentlich zugänglich. Privat betriebene Ladebereiche an der Katharinenstraße (Mensa 1) sowie in der Wilhelmsstraße werden im Rahmen des Schaufensters Elektromobilität von der Dienstleistungs-Agentur iTUBS für elektrifizierte Carsharing Fahrzeuge eingesetzt. Von BS|Energy werden weitere Ladebereiche betrieben und für deren Kunden zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht der Ladebereiche wird in Abbildung 80 dargestellt.

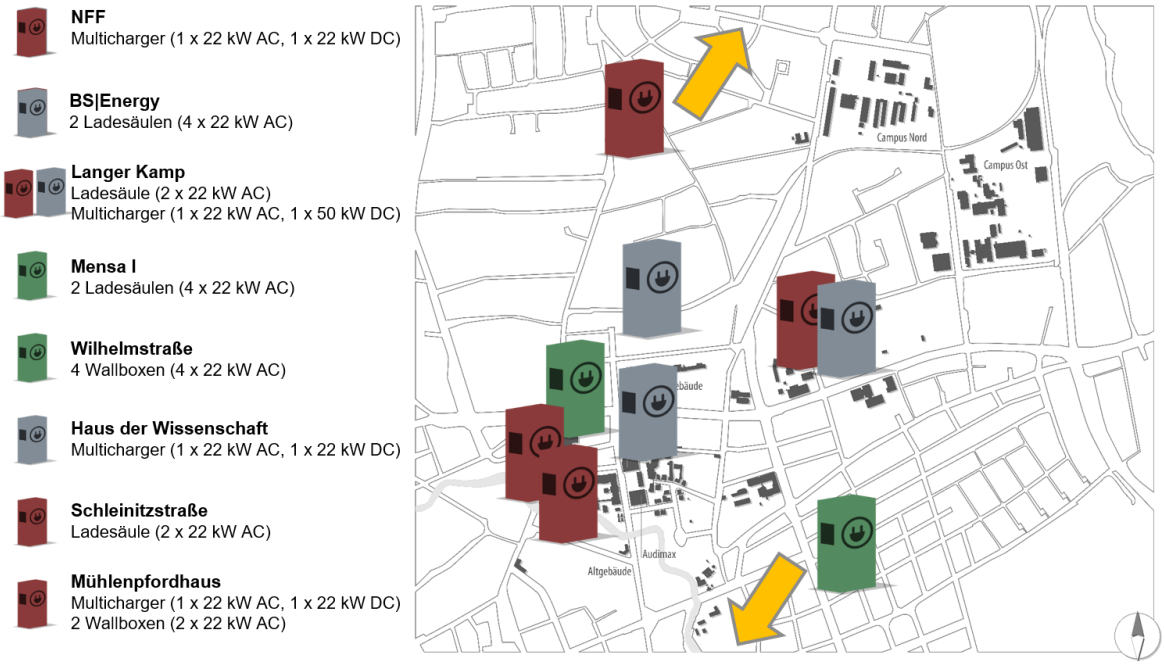


Abbildung 80 Übersicht der Ladebereiche der TU Braunschweig und Umgebung [elenia]

Je nach Zugänglichkeit der aufgestellten Ladeinfrastruktur wird nach der Ladesäulenverordnung (LSV) zwischen öffentlich und nicht öffentlich zugänglichen Ladepunkten unterschieden. Nicht öffentlich zugängliche Ladepunkte sind auf bestimmte Personengruppen beschränkt. In Bezug auf dem Universitätscampus könnte die Nutzung der Ladepunkte auf Dienst-, Mitarbeiter und/oder Studierendenfahrzeuge eingeschränkt werden. Aktuell werden die von der TU Braunschweig verwalteten Ladepunkte zu forschungstechnischen Zwecken eingesetzt und sind daher auf kleine Personengruppen beschränkt. Sowohl Dienst- als auch Mitarbeiterfahrzeuge werden an den eigenen Standorten geladen. Die Autorisierung an den Ladebereichen erfolgt anhand fahrzeugbezogener RFID-Karten, die durch das elenia zur Verfügung gestellt werden.

Zu Projektbeginn sind keine konkreten Vorhaben zur Errichtung weiterer Ladebereiche geplant gewesen. Im Rahmen der Teilstrategie Elektromobilität war unter anderem eine forschungsbegleitende Unterstützung aus Sicht der Netzplanung vorgesehen, sofern der Bedarf an weiteren Lademöglichkeiten bestehen sollte.

Einhergehend mit den geplanten Zielen der Bundesregierung war eine zunehmende Durchdringung des elektrifizierten Fahrzeugverkehrs zu erwarten. Anders als es von der Bundesregierung vorgesehen, hat sich die Verkehrswende in Deutschland in der Anfangsphase nur langsam entwickelt. Das festgelegte Ziel bis zum Jahr 2020 kann aus heutiger Sicht nicht mehr erreicht werden. In Abbildung 81 werden laut Angaben des Kraftfahrbundesamts die Hochlaufzahlen der Elektromobilität seit dem Jahr 2006 dargestellt. Die Werte beinhalten sowohl reine batteriebetriebene Elektrofahrzeuge als auch Plug-in Hybride.

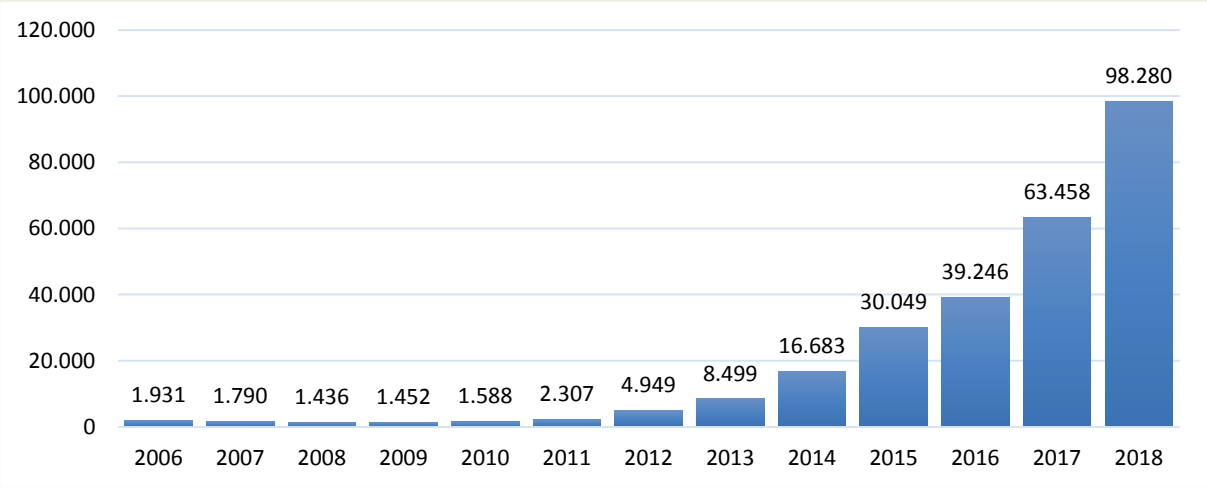


Abbildung 81 Anzahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland von 2006 bis 2018 nach Kraftfahrtbundesamt (KBA)

Die langsame Hochlaufphase der Elektromobilität spiegelt sich auch auf dem Campus der TU Braunschweig Campus wider. Während der Projektzeit von EnEff Campus hat sich kein weiterer Ausbaubedarf an zusätzlichen Lademöglichkeiten ergeben. Die von der iTUBS betrieben Carsharing Fahrzeuge konnten nach Projektende nicht gehalten werden. Elektrifizierte Dienstfahrzeuge, die im Rahmen des vom BMU geförderten Forschungsprojektes Fleets-Go-Green (Förderkennzeichen 16EM1041) zum Schaufenster Elektromobilität angeschafft wur-

den, konnten ebenfalls nach Projektablauf im Jahr 2016 nicht weiterbetrieben werden. Während der Projektlaufzeit haben die Dienstfahrzeuge überwiegend die Ladebereiche an der Schleinitzstraße sowie am Langer Kamp verwendet. Nach Projektende wurde der Ladebereich Schleinitzstraße an BS|Energy abgetreten. Der Ladebereich am Langer Kamp wird mittlerweile überwiegend für Forschungsgäste bereitgestellt. Das gleiche gilt für den Ladebereich am NFF. Eine tägliche und hochfrequentierte Nutzung kann ausschließlich am Ladebereich Mühlenpfordthaus beobachtet werden. Dieser wird zur Ladung sowohl von Dienst- als auch von Mitarbeiterfahrzeugen verwendet.

Als positiv zu bewerten ist die Erweiterung des Fuhrparks der TU Braunschweig um drei Elektrofahrzeuge im Jahr 2017. Die Dienstfahrzeuge wurden der Bibliothek, der Poststelle sowie dem Zentrallager für Chemikalien zur Verfügung gestellt und sind für die täglich anstehenden Kurzstrecken im Einsatz. Geladen werden die drei elektrischen Transporter über Nacht in einer Tiefgarage an einer regulären 230 V Schuko-Steckdose.

7.2.3.3 Vorstellung des Lademanagementsystems elias

Das elenia hat im Rahmen des Forschungsprojektes Fleets-Go-Green unter anderem das Lademanagementsystem elias hervorgebracht. In EnEff Campus 2020 wird das Lademanagementsystem an die Anforderungen für den Einsatz am Campus angepasst und durch neue Funktionen, wie beispielsweise die Steuerung über externe Energiemanagementsysteme, erweitert. Dadurch kann in Zukunft eine direkte Nutzung von Photovoltaikstrom aus eigenen Anlagen auf dem Campus gewährleistet werden. Durch die lokale Verknüpfung von Stromerzeugung und -verbrauch werden die Verteilnetze entlastet und gleichzeitig kann bei einer hohen Durchdringung an erneuerbaren Energieanlagen die Autarkiequote erhöht werden.

Bei ungesteuerten Ladebereichen werden Elektrofahrzeuge direkt nach Anschluss an einer Ladesäule oder einer Wallbox geladen. Der Betreiber des Ladebereichs kann entsprechend der technischen Restriktionen des Ladepunkts den maximal bereitgestellten Ladestrom festlegen. Das Batteriemanagementsystem im Fahrzeug entscheidet letztendlich über den Verlauf des Ladevorgangs, wobei der vorgegebene maximale Ladestrom zu keinem Zeitpunkt überschritten werden kann.

Mithilfe eines Lademanagementsystems kann der bereitgestellte Ladestrom situationsbedingt angepasst werden. Neben den vorliegenden Verteilnetzrestriktionen aufgrund der eingesetzten Betriebsmittel kann die durch erneuerbare Energieanlagen lokal erzeugte Stromeinspeisung sowie im Optimalfall auch die Mobilitätsanforderungen der Fahrer berücksichtigt werden. Letztendlich können im Vergleich zum ungesteuerten Laden mehr Elektrofahrzeuge in kürzerer Zeit geladen werden, ohne das eine Überlastung des Energieversorgungsnetzes befürchtet werden muss. Dadurch kann auf lokaler Ebene der Netzausbau vermieden oder zumindest die Anzahl an Umsetzungsmaßnahmen reduziert werden. Für den Aufbau eines Lademanagementsystems ist eine Kommunikation und damit der Informationsaustausch zwischen mehreren Teilsystemen erforderlich. In Abbildung 82 wird das schematisch veranschaulicht.

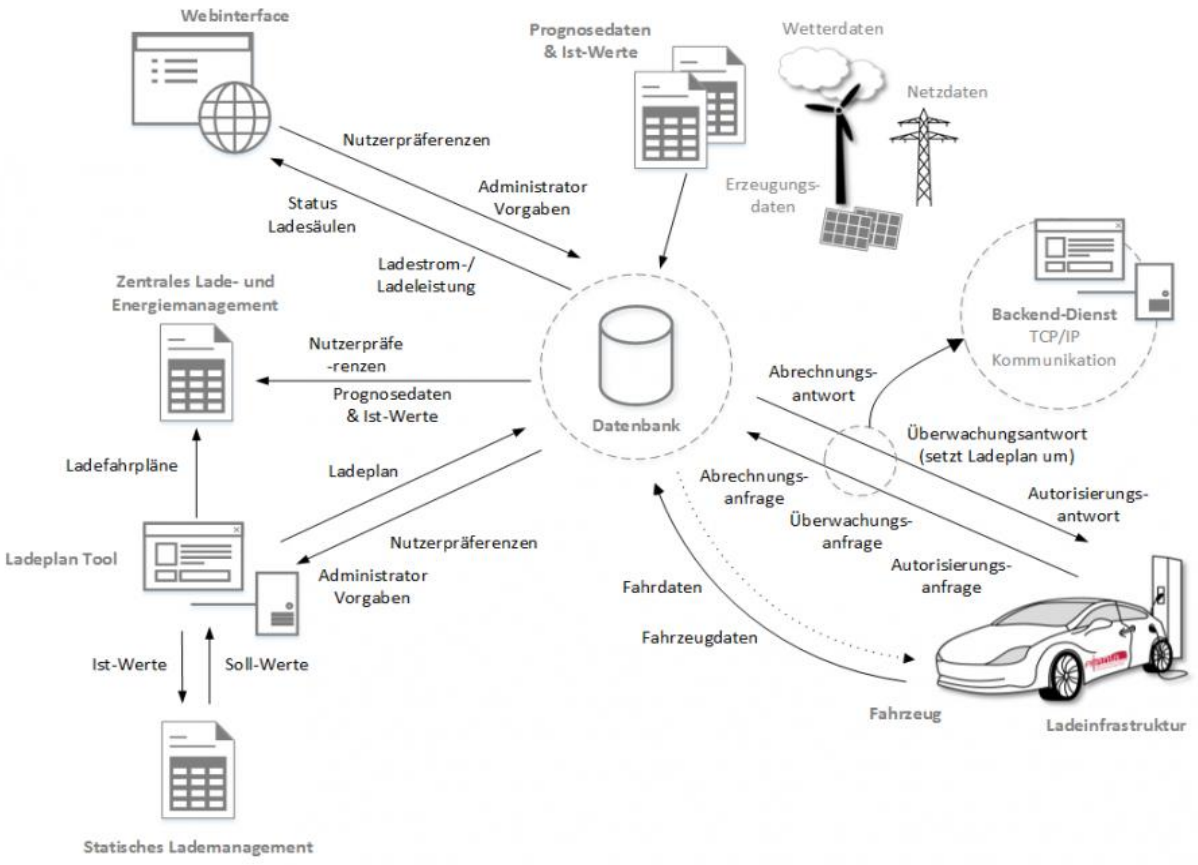


Abbildung 82 Schematischer Aufbau des Lademanagementsystems elias [elenia]

Grundlegend wird für das Lademanagementsystem eine serverbetriebene Datenbank aufgebaut, in dem Stammdaten (Kunden- oder Standortdaten), Daten zu den einzelnen Ladevorgängen sowie weitere Informationen, wie beispielsweise Ladebereichseinstellungen, erfasst und verwaltet werden können. Abgeschlossene Ladevorgänge liefern Informationen hinsichtlich des Ladestart- sowie Ladeendzeitpunkts, der Lademenge, des Ladestandorts und welches Fahrzeug geladen wurde. Diese Daten werden aus Sicht der Forschung für die Erstellung von Statistiken benötigt und können künftig als Informationsgrundlage für ein Abrechnungssystem am Campus genutzt werden. Beispielsweise können im Rahmen der Energiebudgetierung der Energieverbrauch der elektrisch betriebenen Dienstfahrzeuge dem jeweiligen Institut zugeordnet werden. Institutseigene Ladepunkte sind dadurch aus abrechnungstechnischer Sicht nicht erforderlich. Ein Ladevorgang kann erst nach vorheriger Autorisierung am Ladebereich initialisiert werden. Die Autorisierung erfolgt bei elias über RFID-Karten, sodass künftig auch die Studierendenausweise zur Autorisierung eingesetzt werden könnten. Zur Verarbeitung der Daten werden auf dem Server mehrere Backend-Dienste betrieben.

Für die Kommunikation von Ladebereichen mit einem zentralen Lademanagementsystem ist kein einheitlicher Kommunikationsstandard definiert. Für die informations- und kommunikationstechnische Anbindung der am TU Campus neu integrierten Multicharger an das Datenbankensystem von elias ist die Implementierung eines weiteren Kommunikationsprotokolls erforderlich. Statt des bisher eingesetzten proprietären Protokolls wird zu diesem Zweck das Ladesäulenherstellerübergreifende Open Charge Point Protocol (OCPP) eingesetzt. OCPP ist als inoffizieller Standard für den Datenaustausch zwischen Ladebereichen und einem zentra-

len Lademanagementsystem anerkannt und wird von den meisten Ladesäulenherstellern unterstützt. Ohne Anpassung an das Lademanagementsystem vornehmen zu müssen, können dadurch in Zukunft Ladesäulen und Wallboxen von weiteren Herstellern in das System integriert werden.

Durch ein Lademanagementsystem kann das Laden der Elektrofahrzeuge hinsichtlich unterschiedlicher Zielvorgaben gesteuert werden. In diesem Sinne sind unter anderem prognostizierte Wetterdaten oder aktuelle Einspeisedaten erforderlich. Neben der Datenerfassung ist für die Steuerung der Ladevorgänge die Implementierung von Ladealgorithmen entscheidend. Im Allgemeinen kann eine Differenzierung zwischen statischen und dynamischen Lademanagement getroffen werden. Beim statischen Lademanagement wird die bereitgestellte Ladeleistung der einzelnen Ladepunkte innerhalb eines Ladebereichs ohne externe Informationen wie Strompreise, Einspeisung durch erneuerbare Energien oder situationsabhängige Netzauslastungen verteilt. Beim dynamischen Lademanagement werden diese Informationen bei der Verteilung der bereitgestellten Ladeleistung berücksichtigt. Für den Einsatz am TU Campus werden beide Ansätze untersucht.

7.2.3.4 Statisches Lademanagement

Ein Lademanagement hat die Aufgabe, die verfügbare Ladeleistung am Ladebereich optimiert über die einzelnen Ladepunkte im zeitlichen Verlauf zu verteilen. Bei der zeitgleichen Ladung mehrerer Elektrofahrzeuge sind die lokalen Versorgungsnetzgegebenheiten zu berücksichtigen. Um eine Überlastung der Betriebsmittel im Versorgungsnetz bei mehreren parallellaufenden Ladevorgängen zu vermeiden, wird die Ladeleistung der Elektrofahrzeuge reduziert. Zu diesem Zweck wird dem Ladebereich ein statischer Wert als verfügbarer Ladestrom zugewiesen. Die Verteilung des Ladestroms auf die einzelnen Ladepunkte kann entsprechend der Zielvorgaben des Ladebereichsbetreibers auf unterschiedliche Weise erfolgen. So können Elektrofahrzeuge beispielsweise auch entsprechend einer festgelegten Reihenfolge nacheinander geladen werden. Zur Realisierung ist die Entwicklung von Ladealgorithmen erforderlich. Im Ladesystem elias sind die folgenden Ladealgorithmen implementiert:

- Equal: Der Ladestrom wird zunächst gleichmäßig auf die angeschlossenen Fahrzeuge verteilt. Durch eine Berücksichtigung des vom Fahrzeug tatsächlich bezogenen Ladestroms erfolgt eine Umverteilung.
- First Come, First Served (FCFS): Die Verteilung des Ladestroms erfolgt priorisiert in Abhängigkeit der zeitlichen Reihenfolge des Ladestartzeitpunkts, wobei ein früher angeschlossenes Fahrzeug bevorzugt wird. Durch eine Berücksichtigung des vom Fahrzeug bezogenen Ladestroms erfolgt eine Umverteilung des Reststroms.
- Last Come, First Served (LCFS): Die Verteilung des Ladestroms erfolgt priorisiert in Abhängigkeit der zeitlichen Reihenfolge des Ladestartzeitpunkts, wobei ein später angeschlossenes Fahrzeug bevorzugt wird. Durch eine Berücksichtigung des vom Fahrzeug bezogenen Ladestroms erfolgt eine Umverteilung des Reststroms [14].

Für die Umsetzung am Campus wurden die Algorithmen am Ladebereich Schleinitzstraße getestet und ihre Funktionalität in der Praxis bestätigt. Das entwickelte statische Lademanagement kann somit in Zukunft am Campus eingesetzt werden, um ohne den Einsatz von Investitionskosten die vorhandenen Verteilnetzkapazitäten optimal zu nutzen. Beispielhaft werden in Abbildung 83 die gemessenen Ladeverläufe von zwei Elektrofahrzeugen unter Einsatz des Algorithmus Equal dargestellt.

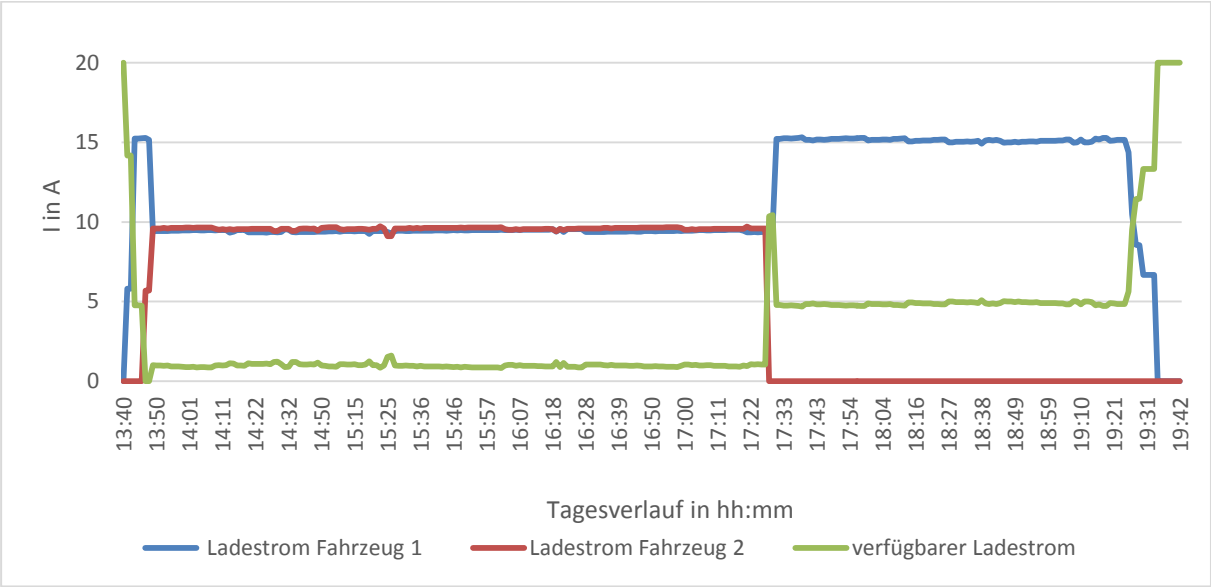


Abbildung 83 Ladestromverteilung nach dem Ladealgorithmus Equal [elenia]

Der verfügbare Ladestrom wird auf 20 A begrenzt. Um 17:10 Uhr wird das erste Fahrzeug angeschlossen und bezieht 15 A Strom. 10 Minuten später wird das zweite Fahrzeug angeschlossen. Zu diesem Zeitpunkt wird der Ladestrom vom ersten Fahrzeug auf 10 A reduziert. Auch dem zweiten Fahrzeug werden 10 A zur Verfügung gestellt. Nach 20 Minuten ist das zweite Fahrzeug vollständig geladen, sodass dem ersten Fahrzeug wieder ein höherer Ladestrom angeboten werden kann.

7.2.3.5 Dynamisches Lademanagement

Mit dem Ziel, zukünftig den am TU Braunschweig Campus durch erneuerbare Energieanlagen erzeugten Strom selbst lokal zu verwenden, wird das Ladesystem elias an das Energiemanagementsystem des elenia energy labs angebunden. Durch die Steuerung von Batteriespeichersystemen in Verbindung mit der Erzeugung durch PV-Anlagen können Elektrofahrzeuge als steuerbare Verbraucher mit hohem Leistungsbedarf bevorzugt in Zeiträumen geladen werden, wo ausreichend Energie zur Verfügung steht. Im Rahmen einer Testumgebung wurde dieser Ansatz technisch umgesetzt und anhand von realitätsnahen Untersuchungen validiert. In Abbildung 84 wird der Aufbau der Testumgebung schematisch dargestellt.

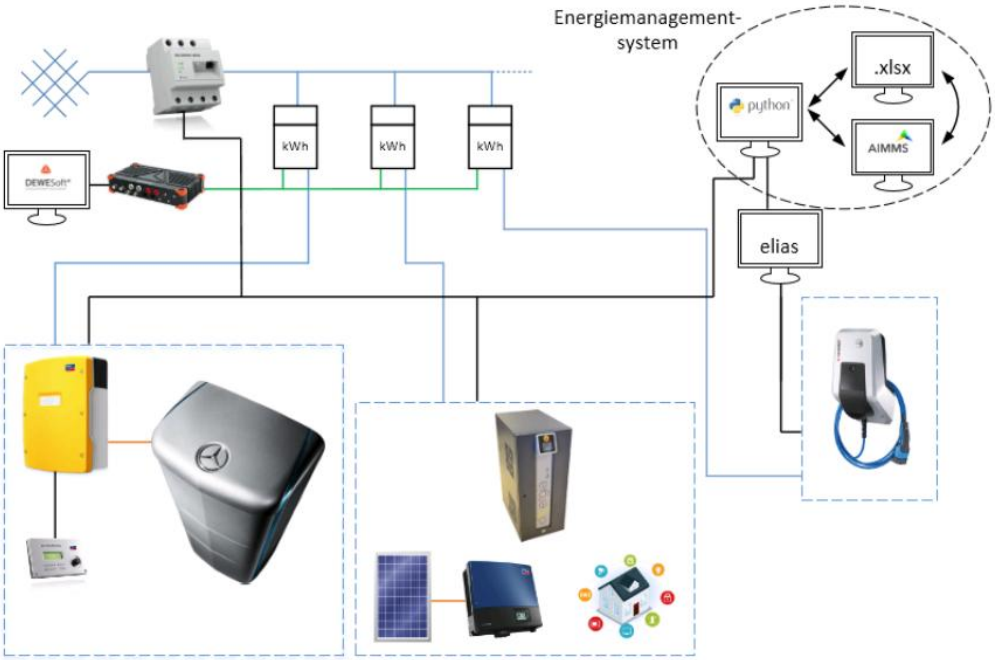


Abbildung 84 Aufbau der Testumgebung zum dynamischen Lademanagement [elenia]

Die Testumgebung setzt sich aus einer Wechselstromlast zur Nachbildung von Gebäudelasten, einer Wechselstromquelle zur Nachbildung einer PV-Anlage in Verbindung mit einem Wechselrichter, einem Batteriespeicher sowie einem Ladepunkt zusammen. Zur Messung der an den jeweiligen Komponenten anliegenden Spannungen und Ströme ist die Testumgebung mit elektrischen Messinstrumenten ausgestattet. Anhand eines entwickelten Energiemanagementsystems wird durch den Einsatz der Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software (AIMMS) zur Lösung von Optimierungsproblemen sowie von programmierten Python Skripten die Eigenverbrauchsoptimierung realisiert. Mithilfe des Optimierungsmodells können unter Berücksichtigung der gemessenen Werte der PV-Anlage und unter Berücksichtigung der aktuellen Last eigenverbrauchsoptimierte Ladeprofile für Elektrofahrzeug erstellt werden. Nach Erstellung eines Ladeprofils wird dieser an das Lademanagementsystem elias übertragen.

Zur Veranschaulichung des kombinierten Energiemanagement- und Lademanagementsystems wird als konkreter Anwendungsfall ein sonnenreicher Tag ausgewählt, um den Effekt der Eigenverbrauchsoptimierung zu verdeutlichen. Als Elektrofahrzeug wird ein Volkswagen e-Golf (Modell 2014) eingesetzt, der über eine maximale Ladeleistung von 3,6 kW verfügt. In Abbildung 85 werden zwei unterschiedliche Ladeverläufe abgebildet. Die rote Kurve stellt einen konventionellen, ungesteuerten Ladevorgang dar, der anhand des Lademanagementsystems elias erfasst wurde. Zum Vergleich wird auf Basis des Ladevorgangs durch das Optimierungsmodell des Energiemanagementsystems ein eigenverbrauchsoptimiertes Ladeprofil erstellt (blaue Kurve).

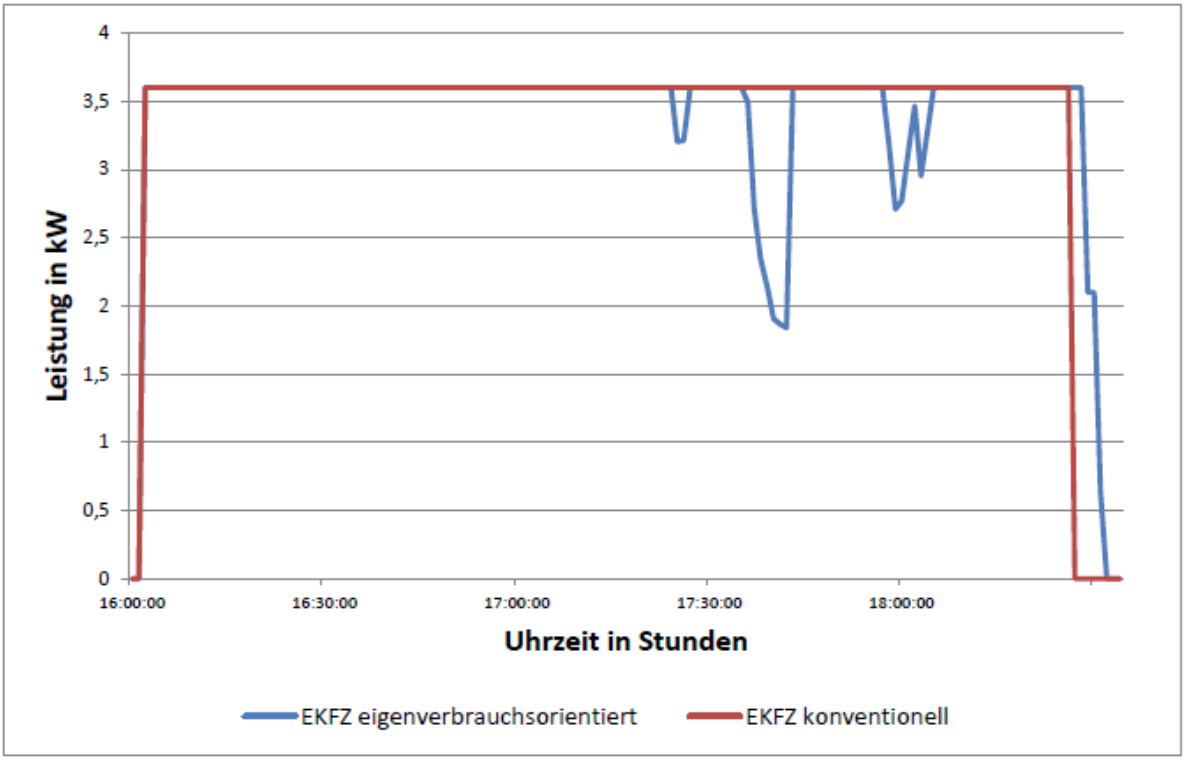


Abbildung 85 Vergleich ungesteuerter und eigenverbrauchsoptimierter Ladevorgang des Elektrofahrzeugs im Anwendungsfall [elenia]

Der Ladevorgang startet unabhängig vom Ladeprofil um 16 Uhr mit der maximalen Ladeleistung von 3,6 kW. Sollte die Energie des Batteriespeichers zum Laden des Elektrofahrzeugs nicht ausreichen, wird die Differenz aus dem Verteilnetz bezogen. Die eigenverbrauchsoptimierte Ladung verfolgt das Ziel, die Einspeisung auf dem Verteilnetz weitestgehend zu reduzieren, ohne dass der Fahrzeughalter hinsichtlich seines Mobilitätsbedarfs eingeschränkt wird.

Wie beim statischen Lademanagement wird situationsabhängig die bereitgestellte Ladeleistung im zeitlichen Verlauf angepasst. Beim dynamischen Lademanagement erfolgt diese Anpassung in Abhängigkeit der aktuellen Energieeinspeisung der PV-Anlage. Im vorliegenden Anwendungsfall wird zu den Zeitpunkten 17:22 Uhr, 17:33 Uhr sowie 17:55 Uhr die bereitgestellte Ladeleistung angepasst. Die eingespeiste Energie der PV-Anlage und die limitierte Entladeleistung des Batteriespeichers reichen in den genannten Zeitpunkten nicht aus, um die Gebäudelast zu versorgen und gleichzeitig das Elektrofahrzeug mit der maximalen Ladeleistung von 3,6 kW zu laden. Sobald wieder ausreichend Energie zur Verfügung steht, wird der Ladevorgang mit 3,6 kW fortgesetzt. Aufgrund der zeitweilen Reduzierung der Ladeleistung dauert der eigenverbrauchsoptimierte Ladevorgang länger im Vergleich zum ungesteuerten Ladevorgang. Nichtsdestotrotz wird am Ende die gleiche Energiemenge geladen. Im vorliegenden Anwendungsfall hat der Ladevorgang in etwa 5 Minuten länger gedauert. In Abbildung 86 wird veranschaulicht, wie über den Tag verteilt die eingespeiste Energie der PV-Anlage eingesetzt wurde.

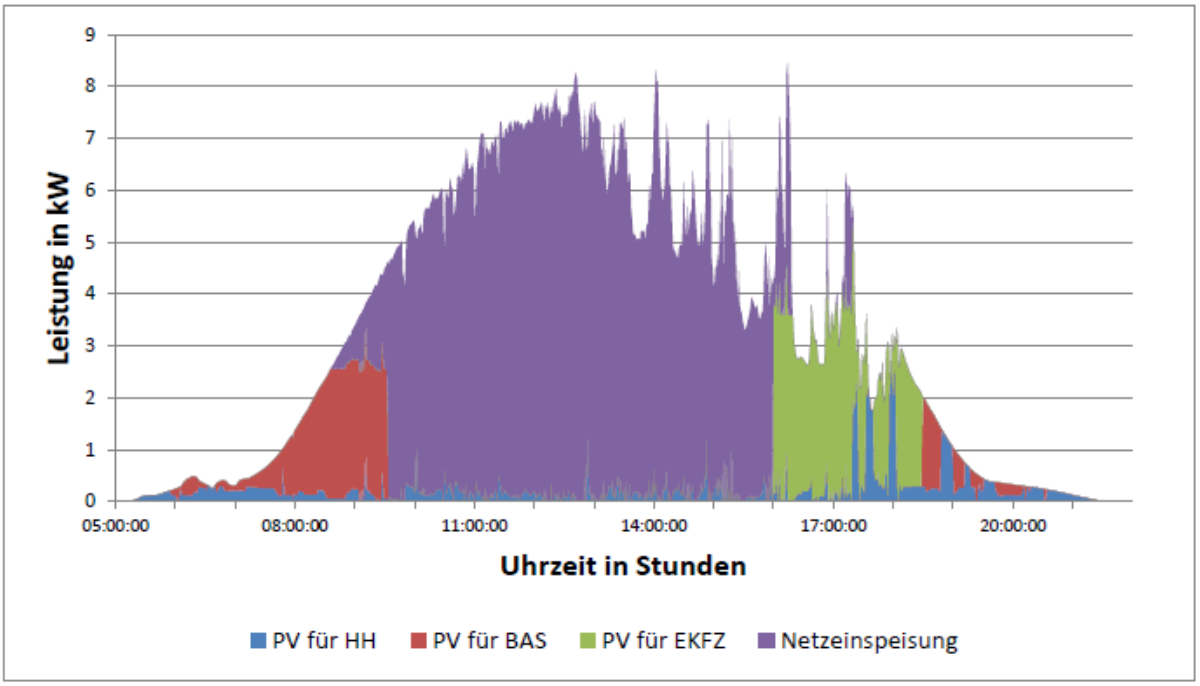


Abbildung 86 Verwendung der eingespeisten Photovoltaikleistung im Anwendungsfall [elenia]

Vorrangig wird die lokal erzeugte Energie dazu verwendet, um den Verbrauch des Gebäudes (blaue Kurve) und des Elektrofahrzeugs (grüne Kurve) zu decken. Die überschüssige Energie wird im Batteriespeicher (rote Kurve) zwischengespeichert, bis dieser seinen maximalen Ladezustand erreicht hat. Der übrige Strom wird ins Niederspannungsnetz (violette Kurve) zurückgespeist. Im betrachteten Anwendungsfall nutzt das Gebäude insgesamt 7,7 % der erzeugten Leistung. Weitere 8,9 % werden zur Ladung des Batteriespeichers benötigt. Das Elektrofahrzeug nutzt 11,4 % der erzeugten Leistung. Insgesamt liegt der Eigenverbrauch bei 28 %.

Unter der Annahme einer in Zukunft hohen Durchdringung von Elektrofahrzeugen kann durch das entwickelte Lademanagement- und Energiemanagementsystem ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung des Eigenverbrauchs realisiert werden. In diesem Zusammenhang kann das Optimierungsmodell in Zukunft noch durch weitere Systeme wie beispielsweise BHKWs erweitert werden.

7.2.3.6 Auslastung der Ladebereiche am Campus

Zur Ermittlung einer geeigneten Ladeinfrastruktur für den Campus der TU Braunschweig werden die bestehenden Ladebereiche datentechnisch erfasst und die Entwicklung der Auslastung der Ladepunkte zum Projektstart von EnEff Campus II sowie in der Endphase miteinander verglichen.

Bereits vor Projektbeginn befanden sich vier AC Ladepunkte mit einer maximalen Ladeleistung von 22 kW für 18 Monate im Feldtest und wurden durch das Lademanagementsystem elias datentechnisch erfasst. Die Ladebereiche sind auf zwei Standorte verteilt. Der erste Standort am Langer Kamp wurde während des Betrachtungszeitraums ausschließlich von

zwei elektrifizierten Carsharing Fahrzeugen genutzt. Die Fahrzeuge wurden im Rahmen eines Projektes im Schaufenster Elektromobilität angeschafft und den angrenzenden Instituten als Dienstfahrzeuge zur Verfügung gestellt. Am zweiten Standort an der Schleinitzstraße standen im betrachteten Zeitraum zwei Ladepunkte als halböffentlicher Ladebereich sowohl für zwei Carsharing Fahrzeuge als auch für private Ladevorgänge zur Verfügung. Zur Autorisierung an den Ladepunkten ist im Vorfeld die Beantragung einer RFID-Karte erforderlich gewesen.

Unterteilt nach Wochentagen werden in Abbildung 87 die gemittelten Werte der Standzeiten am Ladebereich Schleinitzstaße innerhalb des Betrachtungszeitraums dargestellt. Die Standzeit wird im Folgenden als Zeitraum definiert, wo ein Ladeplatz durch ein Fahrzeug belegt ist. Die Parkplätze sind als Ladebereiche gekennzeichnet stehen ausschließlich für Elektrofahrzeuge zur Verfügung.

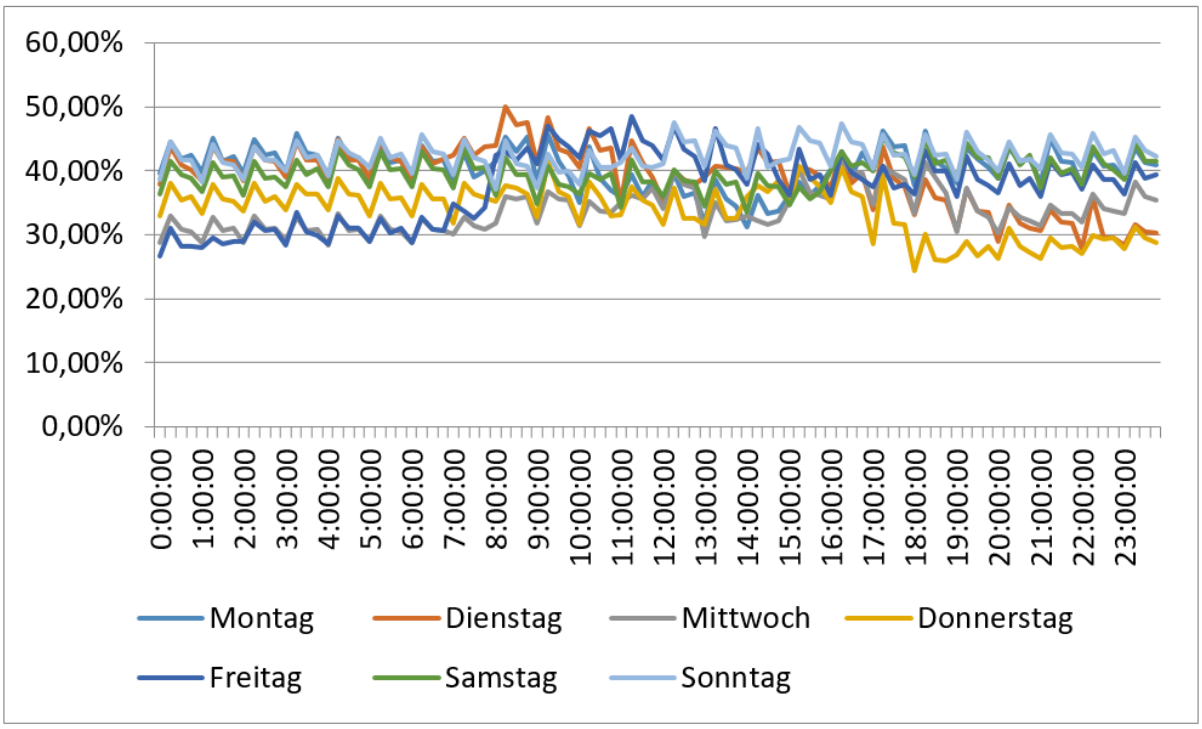


Abbildung 87 Standzeiten am Standort Schleinitzstraße zu Projektbeginn [elenia]

Wie anhand der Messdaten veranschaulicht werden kann, Verlaufen die Standzeitenprofile im direkten Vergleich der Wochentage gleichmäßig. Die zwei Ladepunkte am Ladebereich sind je nach Tageszeit und Wochentag in 25 % bis 50 % der Zeit belegt. Ein Ladepunkt wird datentechnisch als belegt registriert, sobald ein Fahrzeug am Ladepunkt angeschlossen wurde. Nachdem das Elektrofahrzeug von dem Ladepunkt getrennt wurde, wird der Ladepunkt wieder als frei registriert. Der tatsächliche Ladezeitraum ist somit in vielen Fällen kürzer als die Standzeit. Beispielsweise kann ein Elektrofahrzeug am Freitag angeschlossen und im Laufe des Tages vollgeladen werden, aber erst zu Beginn der darauffolgenden Woche den Ladepunkt wieder freigeben. In Abbildung 88 sind nach Wochentagen unterteilt die tatsächlichen Ladezeiten dargestellt.

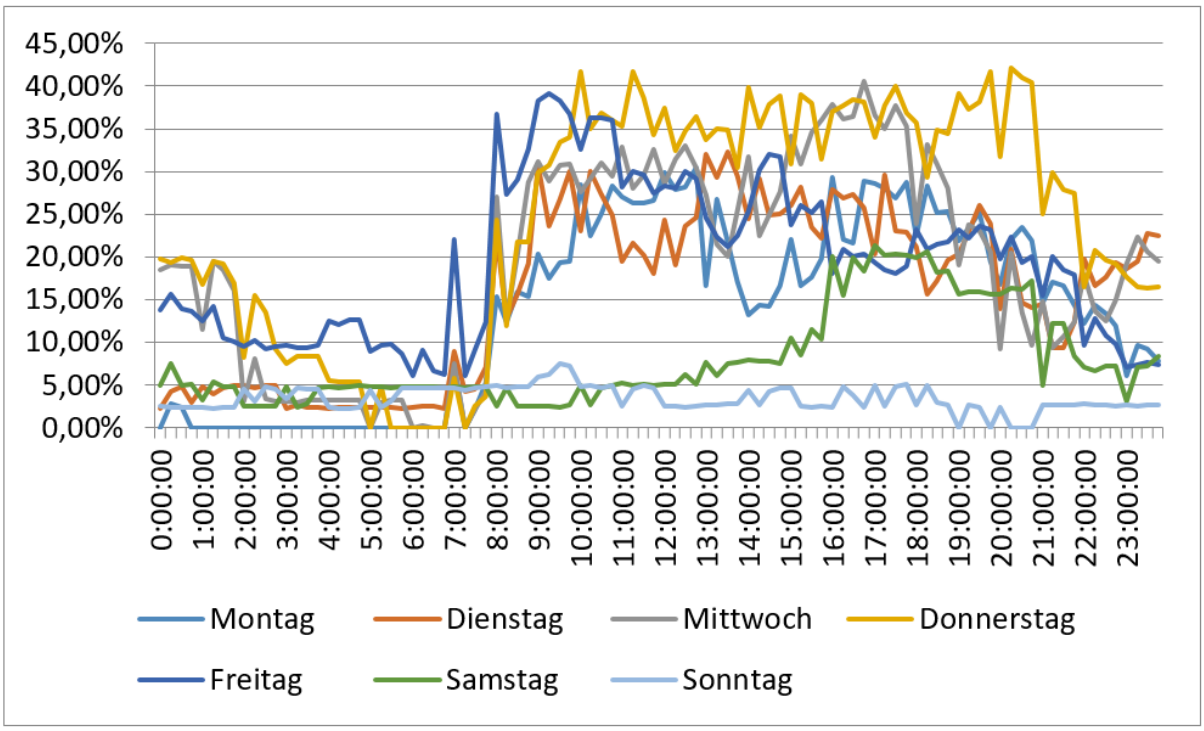


Abbildung 88 Ladezeiten am Standort Schleinitzstraße zu Projektbeginn [elenia]

Im betrachteten Zeitraum wird an einem Montag in 20 % bis 30 % der Fälle zwischen 09:00 Uhr und 13:00 Uhr ein Fahrzeug geladen. Der größte Ladebedarf kann werktags zwischen 10:00 Uhr und 18: 00 Uhr festgestellt werden. An den Werktagen ist tagsüber der Bedarf am größten, wo im Allgemeinen erwartungsgemäß auch die Gebäudelasten am größten sind. An Wochenendtagen kann grundsätzlich ein geringerer Ladebedarf identifiziert werden. Insbesondere an Sonntagen ist kein großer Ladebedarf erkennbar. Weiterhin kann aus Abbildung 88 entnommen werden, dass in den Nachtstunden der Ladebedarf ebenfalls sehr gering ausfällt. Mithilfe des bereits vorgestellten Lademanagementsystems können die Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge gesteuert und somit eine Entlastung der Energieversorgungsnetze erzielt werden. Ein Teil des Ladebedarfs könnte beispielsweise in die Nachtstunden verschoben werden. Dabei müssen jedoch die Mobilitätsanforderungen der Fahrzeugnutzer berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich für den Zeitraum zu Projektbeginn festhalten, dass der Ladebereich an der Schleinitzstraße trotz dienstlicher und privater Nutzung nicht stark ausgelastet wurde. Mit den beiden bereitgestellten Ladepunkten wird bereits der Bedarf an Lademöglichkeiten gedeckt. Insgesamt konnten im Jahr 2015 395 Ladevorgänge am Ladebereich Schleinitzstraße sowie 206 Ladevorgänge am Ladebereich Langer Kamp registriert werden. Bei einer zunehmenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen wird auch die Nachfrage an Lademöglichkeiten am Campus steigen.

Für die Endphase des Projekts wird die Ladezeiten am Ladebereich Mühlenpfordthaus ausgewertet. Der Ladebereich umfasst vier Lademöglichkeiten und wird sowohl von Dienst- als auch von privaten Mitarbeiterfahrzeugen beansprucht. Angesichts von technischen Ausfällen standen zeitweise einzelne Ladepunkte nicht zur Verfügung. Des Weiteren war über einen

längeren Zeitraum keine Datenerfassung durch das Ladesystem elias möglich. Ein defekter Lichtwellenleiter am Ladebereich hat für einen Ausfall der Datenübertragung gesorgt. Bei der Datenauswertung wurden die technischen Ausfälle entsprechend berücksichtigt. Aufgeteilt in die einzelnen Wochentage werden in Abbildung 89 die Ladezeiten am.

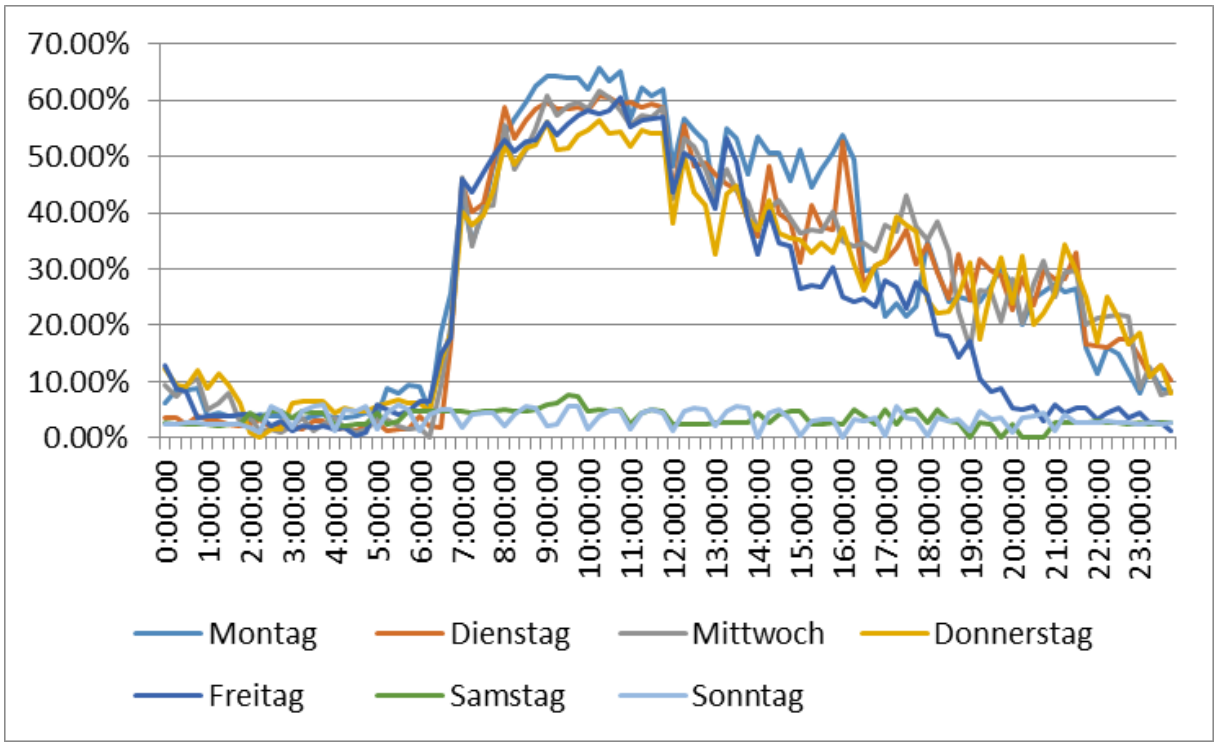


Abbildung 89 Ladezeiten am Standort Mühlenpfordthaus zu Projektende [elenia]

Im Vergleich zu dem vor Projektbeginn ausgewerteten Ladebereich an der Schleinitzstraße ist am Ladebereich Mühenpfordthaus eine höhere Auslastung erkennbar. Der im Rahmen des Forschungsprojektes errichtete Ladebereich erreicht Werktags eine Auslastung von über 60 %. Die Auslastung erreicht vormittags gegen 10:00 Uhr ihren höchsten Wert und fällt zum Nachmittag hin auf etwa 40 % ab. Des Weiteren ist anhand der Messdaten erkennbar, dass die Ladezeitkurven, unabhängig vom Werktag, ein ähnliches Verhalten aufweisen. An den Wochenenden wird der Ladebereich kaum verwendet.

7.2.3.7 Konzept eines Solarcarports

Um in Zukunft den Energiebedarf der Elektrofahrzeuge am Campus zum Teil kompensieren zu können, sind solarbetriebenen Carports eine Möglichkeit, um die Energieerzeugung aus regenerativen Energiequellen mit der Aufladung der Elektrofahrzeuge zu kombinieren. Im Rahmen einer Lehrveranstaltung haben Studierende der TU Braunschweig aus den Fachbereichen Elektrotechnik, Architektur und Management gemeinsam und durch Experten begleitet ein ganzheitliches Konzept entwickelt, um Elektrofahrzeuge, -roller oder auch -

fahrräder lokal mit Energie zu versorgen. Als Ergebnis der interdisziplinären Zusammenarbeit ist das „SolarHUB“ entstanden (s. Abbildung 90).

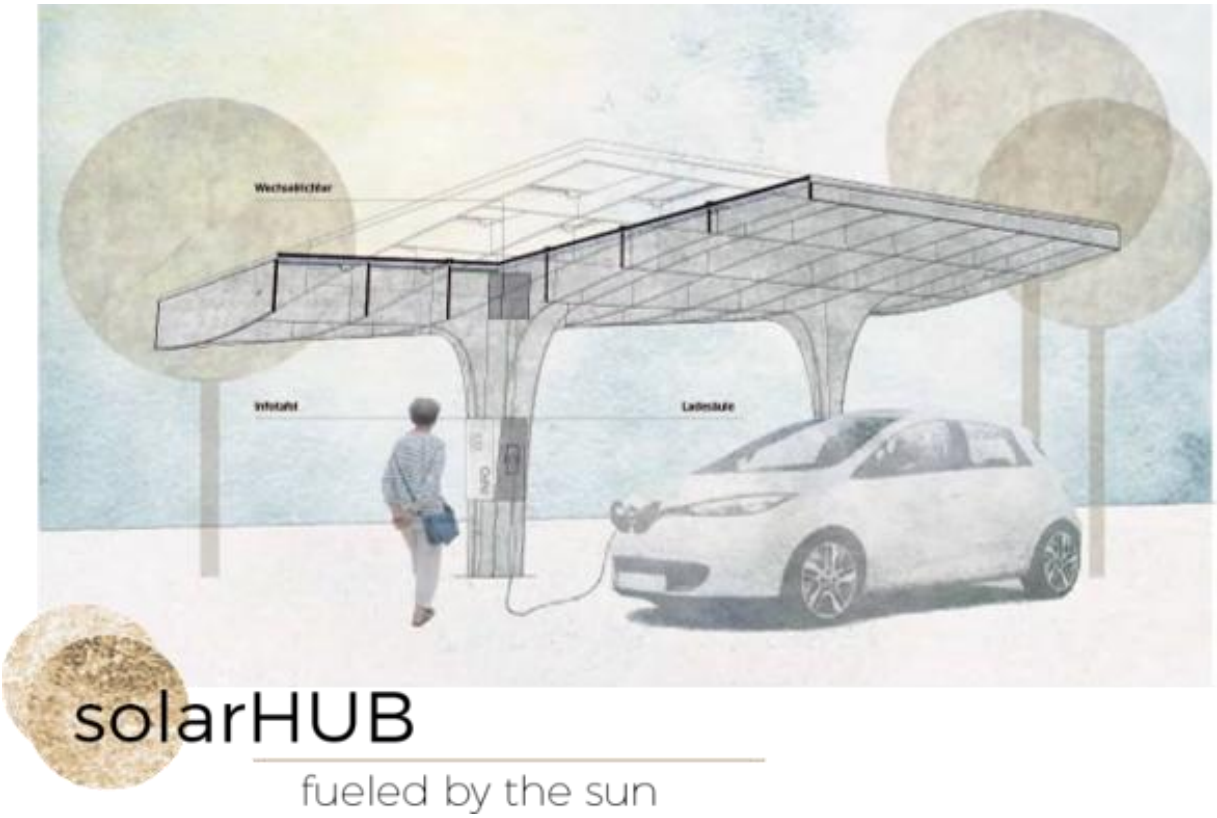


Abbildung 90 Konzept des Solarcaports SolarHUB [Hannah Hemsing]

Mit dem innovativen und bewusst auffallenden Design des Carports soll die Vision einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Elektromobilität nach außen getragen werden. Entsprechend des Konzepts werden anhand einer am Carport befindlichen Informationstafel visuell die aktuellen Energieflüsse veranschaulicht. Über einen Netzanschlusspunkt wird die Energiemenge bereitgestellt, die nicht durch Selbsterzeugung bereitgestellt werden kann. Die ausgearbeitete Architektur setzt sich aus einem modularen Struktursystem zusammen und integriert bereits die erforderlichen technischen Komponenten. Zusätzlich zu einer PV-Anlage mit einer Einspeiseleistung von 8,1 kW Peak, sind ein Wechselrichter zur Umwandlung des erzeugten Gleichstroms in Wechselstrom sowie zwei Ladepunkte mit jeweils 22 kW zur Aufladung der Elektrofahrzeuge mit Wechselstrom vorgesehen. Für den Ladebereich Mühlenpfordthaus wurde ein Jahresertrag der Photovoltaikanalage von 13.000 kWh berechnet (s. Abbildung 91). Damit könnte ein Elektrofahrzeug1 eine Strecke von 80.000 km zurücklegen.

[1] Referenzfahrzeug: VW e-up!

[2] https://www.tandfonline.com/doi/suppl/10.1080/14697017.2017.1299372?scroll=top

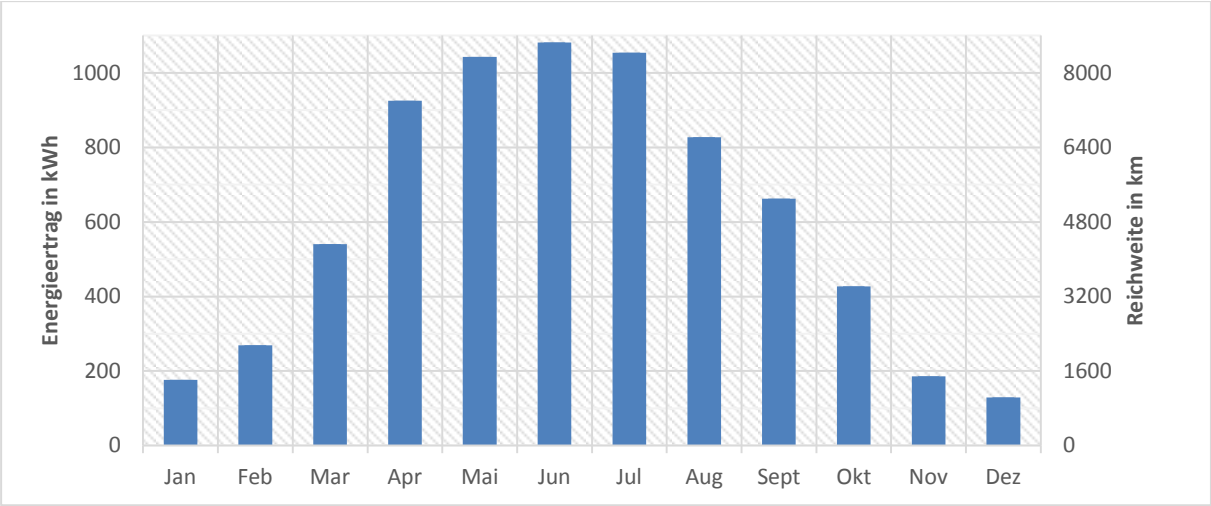


Abbildung 91 Berechneter Energieertrag des SolarHUB Carports und erzielbare Reichweite eines Elektrofahrzeugs [elenia]

Nach Abschluss der Lehrveranstaltung hat sich die aus Studierenden und Wissenschaftlichen Mitarbeitern bestehende Initiative „Sandkasten“ der Umsetzung des Konzepts verschrieben. Der Sandkasten wurde im Jahr 2014 vom Präsidium der TU Braunschweig ins Leben gerufenen und hat seither im Rahmen diverser Projekte eigeninitiativ an der Gestaltung des Campus beigetragen. Das ursprüngliche Konzept des Solarcarports wurde seitdem weiter konkretisiert. In Abstimmung mit dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig wird aktuell eine mögliche Umsetzung des SolarHUBs am Campus geprüft.

7.3 Interface „Mensch – Technologie (IfP)

Angesichts immer knapper werdender Ressourcen gewinnt das Thema Nachhaltigkeit für Organisationen zunehmend an Bedeutung. Doch trotz der Relevanz und Dringlichkeit ist die Frage, wie Menschen an ihrem Arbeitsplatz dazu motiviert werden können, energiebewusstes Verhalten zu zeigen, im Vergleich zum privaten Energieverhalten unzureichend untersucht [15] [16]. Bisherige Forschung zeigt, dass naheliegende Lösungen wie Wissensvermittlung und Informationskampagnen nicht dazu geeignet sind nachhaltige Änderungen im Energiesparverhalten von Mitarbeitenden zu erzielen [17] [18]. Dies liegt unter anderem daran, dass im organisationalen Kontext zahlreiche Barrieren existieren, die dem Energiesparverhalten entgegenstehen, wie z.B. den Umstand, dass monetäre Einsparungen nicht den Nutzer/innen zugutekommen [19].

Statt Mitarbeitende als passive Rezipienten zu verstehen, die es zu überzeugen gilt, sollten sie aktiv in den Prozess miteinbezogen werden, Energiesparmaßnahmen auszuarbeiten, damit ihre Bindung an das Ziel „Energiesparen“ steigt [20]. Denn bei Veränderungszielen, die nicht von Beschäftigten entwickelt wurden, ist mit weniger Eigenmotivation zu rechnen [21]. Ein Grund hierfür liegt darin, dass Menschen ein Bedürfnis nach Autonomie haben und danach streben selbstbestimmt zu handeln [22]. Erst wenn diese Faktoren berücksichtigt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Mitarbeitenden die Werte und Bedeutung des Energiesparens verinnerlichen [23]. Die Bedeutung, dass Mitarbeitende intrinsisch motiviert sind, wird auch dadurch deutlich, dass ihr Energiesparverhalten in der Regel nicht kontrolliert werden kann und Kontrollen auch zu aufwendig wären, sollten sie überhaupt mit Datenschutzrichtlinien vereinbar sein.
Ein Gesprächsstil, der das Bedürfnis nach Autonomie als wesentlichen Bestandteil integriert, ist die Motivierende Gesprächsführung (engl. Motivational Interviewing, MI; [24]). MI geht davon aus, dass es nicht so sehr Druck und Überzeugungsarbeit sind, die zu den gewünschten Resultaten führen, sondern es vielmehr einen kollaborativer Ansatz braucht, der zu einer gewünschten Verhaltensänderung, d.h. zu mehr Energieeinsparungen führt. Anstatt Mitarbeitende belehren und überzeugen zu wollen, warum Energiesparmaßnahmen wichtig sind, bestand der Fokus in der vorliegenden Strategie darin, die intrinsische Motivation der Nutzer/innen für das Energiesparen zu stärken. Dies ist schon allein insofern notwendig, als dass sich die einzelnen Einrichtungen (z.B. Büro vs. Labor) unterscheiden und Einheitslösungen, wie am besten und effizientesten eingespart werden kann, nicht implementierbar sind [25]. Von daher sollten die Nutzer/innen in den Entscheidungsprozess partizipativ eingebunden werden. Die Erkenntnis, dass partizipative Maßnahmen, eher als Informationsveranstaltungen, dazu geeignet sind die Motivation für Energieeinsparungen an der Universität zu erhöhen, konnte im Rahmen der Teilstrategie empirisch belegt werden [26] [27].

Aufbauend auf den Vorarbeiten der Konzeptionsphase (EnEff Campus:*blue*MAP), war es Ziel der Strategie Interface „Mensch – Technologie“ die entwickelten Konzepte und positiven Ergebnisse bezüglich des Einsatzes von MI zur Energiesparmotivation umzusetzen und weiter auszubauen. Hierfür bestand der Fokus in den zwei Arbeitspaketen 1) Kommunikationstrainings für Energienutzungskoordinator/innen und 2) die Durchführung von Nutzerworkshops (s Abbildung 92). Während es bei den Trainings darum geht, die Energienutzungskoordinator/innen darin zu schulen, im Arbeitsalltag motivierend auf die Mitarbeitenden einzu-

wirken, war es Ziel der Nutzerworkshops, dass MI Expert/innen kollaborativ mit Mitarbeitenden einer gesamten Einrichtung Energiesparmaßnahmen erarbeiten, die sich in den Arbeitsalltag integrieren lassen. Darüber hinaus sollte die begleitende Forschung dazu beitragen, die Faktoren besser zu verstehen, welche die Wirksamkeit der Intervention fördern.

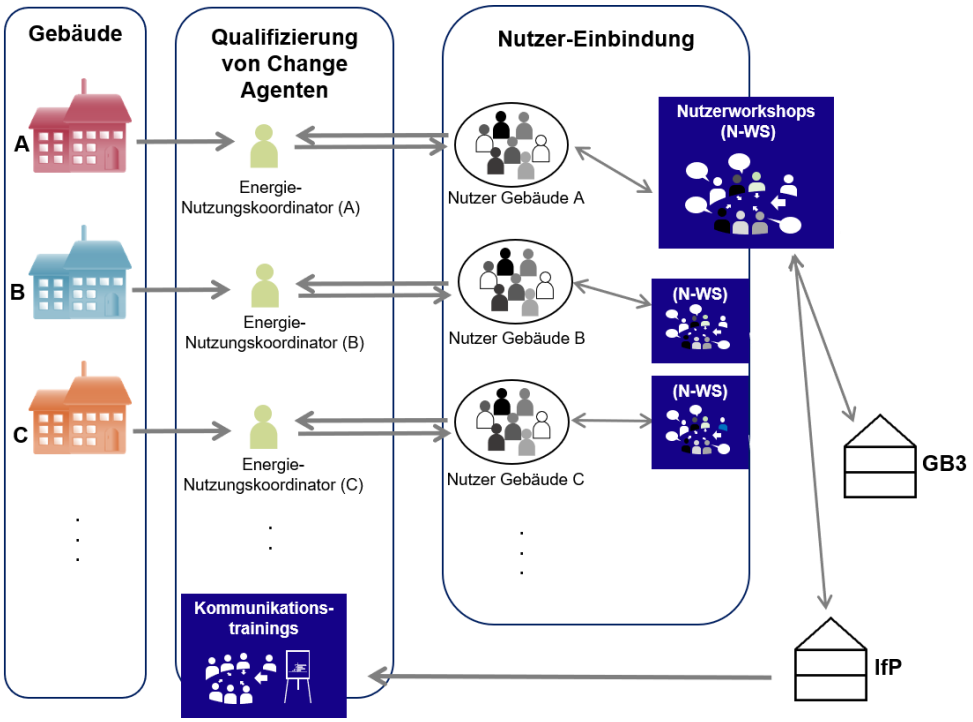


Abbildung 92 Teilstrategien Kommunikationstraining und Nutzerworkshops zur Nutzereinbindung [IfP]

Darüber hinaus ging es in der Strategie darum, eine soziale Norm des Energiesparens innerhalb der TU Braunschweig zu etablieren. Hierfür wurden die Maßnahmen kontinuierlich evaluiert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neues Arbeitspaket entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen „Wettkampf“, bei dem die Gebäude der TU gegeneinander antreten, mit dem Ziel am meisten Energie zu sparen. Um dies für die Mitarbeitenden anschaulicher zu gestalten, wurden die Einsparungen in CO_2-Äquivalente umgerechnet, daher der Name des Arbeitspaketes: *CO_2 Challenge*. Die Erfahrungen und Ergebnisse dieses Arbeitspaketes werden in Kapitel 7.3.3 zusammengefasst. Im letzten Abschnitt der Strategie Interface „Mensch – Technologie“ wird ein Evaluationsprojekt beschrieben, in welchem untersucht wird, ob eher die Investitionen in energieeffiziente Geräte oder ein Fokus auf das Nutzerverhalten zu einer Reduktion des Energieverbrauchs führt.

7.3.1 Ausbildung der Energienutzungskoordinator/innen

Um den steigenden Energiekosten entgegenzuwirken, hat die TU Braunschweig Anfang des Jahres 2014 die Energiekostenbudgetierung (s. Kap. 6.3) eingeführt. Im Rahmen dieser Maßnahme wurde pro Institut mindestens ein/e Energienutzungskoordinator/in benannt. Zu Beginn des Projektes nahmen ca. 240 Energienutzungskoordinator/innen die Rolle wahr. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts waren 192 Energienutzungskoordinator/innen

über Mailinglisten zu identifizieren. Aufgabe der Energienutzungskoordinator/innen ist es die Einsparungen im Rahmen des jeweiligen Instituts zu koordinieren. Hierzu zählt u.a., dass Kollegen und Mitarbeiter zu einem nachhaltigen und bewussten Umgang mit Energie (Strom- und Wärmequellen) motiviert werden. In diesem Sinne kommt den Energienutzungskoordinator/innen die Rolle der Change Agenten im Rahmen der Energiekostenbudgetierung an der TU Braunschweig zu. Dabei zeigen jedoch Studien, aus EnEff Campus: *blue*MAP [19] [28] sowie Beobachtungen im aktuellen Projekt [29], dass ungeschulte Energiemanager/innen dazu neigen, nicht zielführend zu kommunizieren, sondern eher Druck und Überredung nutzen, um Energieeinsparungen zu erzielen. Dass dieses Verhalten dem Ziel der Energieeinsparung zuwider läuft, zeigt sich daran, dass Menschen, versucht man ihnen Vorschriften zu machen sich umweltbewusster zu verhalten, aufgrund ihres inhärenten Autonomiebedürfnisses, eher mit dem entgegengesetzten Verhalten reagieren [30] [31].
Um zu verhindern, dass die Energienutzungskoordinator/innen durch ihre Kommunikation den Widerstand der Mitarbeitenden gegenüber Energieeinsparungen verstärken, zielte das Arbeitspaket darauf ab, die Energienutzungskoordinator/innen in MI zu schulen. Somit sollte ihnen ein psychologisches Handwerkzeug bereitgestellt werden, um Nutzer/innen der spezifischen Gebäude dabei zu unterstützen, energiesparende Maßnahmen umzusetzen. Die Qualifikation in MI für Energienutzungskoordinator/innen bietet einen Lösungsansatz dysfunktionales Kommunikationsverhalten und Widerstand bei Nutzer/innen zu vermeiden.
Um den Energienutzungskoordinator/innen die MI Techniken effektiv zu vermitteln, wurde ein Trainingskonzept entwickelt, mit deren Hilfe Mitarbeitende und Studierendende für energiesparendes Verhalten sensibilisiert und nachhaltig motiviert werden können. Das Training schult darin, wie man mit Nutzer/innen eigenmotivierte Maßnahmen zu Energieeinsparungen erarbeiten kann und wie man Nutzer/innen in ihren Absichten stärken kann, diese Maßnahmen auch umzusetzen. Ein weiterer wichtiger Baustein ist es zu erkennen, wie veränderungsbereit die Mitarbeitenden bereits sind. Unmotivierte Mitarbeitende brauchen eine andere Kommunikation, als diejenigen die bereits motiviert sind und planen wollen, wie sie ihre Motivation in den Arbeitsalltag integrieren können [32].
Um mit dem Trainingskonzept in MI den Erwartungen der Energienutzungskoordinator/innen bestmöglich gerecht zu werden, fanden im Sommersemester 2016 zunächst zwei Termine für die Kommunikationstrainings statt, die die erste Pilotierungsrunde darstellten. Aufbauend auf den Rückmeldungen der Teilnehmenden an bei den Trainingsterminen wurde das Trainingskonzept an ein paar wenigen Stellen final angepasst. Das finale Trainingskonzept sieht eine Unterteilung in zwei Modulen à 3,5 Stunden vor (siehe Abbildung 93).

Abbildung 93 Übersicht über Module des MI Trainings für Energienutzungskoordinator/innen [IfP]

Der inhaltliche Schwerpunkt in Modul I (Lernfeld) liegt bei der Vermittlung des Grundverständnisses sowie der grundlegenden Techniken von MI. Die Grundmethoden von MI werden oft unter dem Akronym OARS zusammengefasst [24]: Open-ended questions, affirmations, reflective listening, and summaries (dt.: Offene Fragen, Würdigung, aktives Zuhören und Zusammenfassungen). Diese Grundmethoden bilden die Grundlage für Trainings zum Erwerb von MI Fertigkeiten. Das Akronym OARS (dt.: Ruder) hat zugleich eine metaphorische Ebene und vermittelt die Idee, dass die motivierende Gesprächsführungstechniken als verbale Fähigkeiten wie die Ruder eines Ruderbootes zu verstehen sind, welche Change Agenten/innen zum Manövrieren einer Interaktion nutzen können. Um mit Widerstand umzugehen, müssen Change Agent/innen die richtigen Fragen stellen und aufmerksam zuhören. Offene Fragen können selbstmotivierende Aussagen des Nutzers/der Nutzerin evozieren, Reflexionen und Zusammenfassungen helfen, diese Motivationen in einer empathischen Weise zu verstehen, und Würdigungen dienen dazu, eine gute Beziehung mit dem Nutzer/der Nutzerin aufzubauen. Neben diesen personenzentrierten Techniken müssen die Change Agent/innen auch einen konfrontierenden Gesprächsstil durch mehr autonomie-unterstützende Verhaltensweisen (z. B. Würdigung, Unterstützung) ersetzen [33]. Die Trainingsteilnehmenden wurden schrittweise an die beschriebenen Techniken herangeführt. Dies gelang über Kurzinput seitens der Trainerin, die Durchführung schriftlicher Übungen, die Evaluation beispielhafter Gesprächssequenzen, sowie die Durchführung praktischer Übungen in Kleingruppen. Bei allen methodischen Zugängen wurde darauf geachtet, dass die Teilnehmenden aus dem Gesagten unmittelbar praktische Implikationen für den eigenen Berufsalltag ableiten konnten.
Das Modul II (Transferfeld) fand zwei Wochen im Anschluss an den Termin von Modul I statt. Der zeitliche Abstand sollte gewährleisten, dass die Teilnehmenden in der Zwischenzeit Gelegenheit hatten das Gelernte anzuwenden und in ihren Alltag zu transferieren. So konnten Stolpersteine, die bei der Umsetzung der gelernten Techniken in den Alltag auftraten, identifiziert und Lösungen erarbeitet werden. In diesem Sinne wurden die Teilnehmenden während des Trainings dazu angeregt, in den gegenseitigen Austausch zu gehen und Best-

Practice-Beispiele einzubringen. Im Rahmen dessen lag der Schwerpunkt von Modul II beim Umgang mit Widerstand, d.h., es wurde die Frage beantwortet, wie man speziell solche Nutzer/innen, die noch eine sehr geringe Bereitschaft für energiesparendes Handeln zeigen, für eine positive Veränderung ihres Verhaltens motivieren kann.
Das Trainingskonzept mit detaillierten Hinweisen zu den Inhalten und dem Prozessablauf wurde in einer wissenschaftlichen Publikation [34] festgehalten, um die Erkenntnisse anderen Einrichtungen zugänglich zu machen. Im Rahmen der Konzeptionierungsphase wurden auch didaktische Lernmaterialien für jedes Modul sowie paper-pencil-basiertes Evaluationsmaterialien entwickelt.
Um die Energienutzungskoordinator/innen und andere Angehörige der TU Braunschweig auf das Angebot der Kommunikationstrainings aufmerksam zu machen, wurden die Trainings über die Personalentwicklung der Universität angeboten. Die Trainings erschienen, zusammen mit einer inhaltlichen Beschreibung, im Weiterbildungsprogramm der TU Braunschweig. Damit sollte unterstrichen werden, dass das Training in MI eine Zusatzqualifikation nicht nur für Change Agent/innen im Sinne von offiziell benannten Energienutzungskoordinator/innen ist, sondern auch für Energieberater/innen, Laborleiter/innen etc., die sich mit dem Thema Nutzermotivation beschäftigen, geeignet ist.
Neben der Informationsverbreitung über die Abteilung für Personalentwicklung wurde die persönliche Ansprache der Energienutzungskoordinator/innen über E-Mail genutzt, um diese auf das Trainingsangebot aufmerksam zu machen. Darüber hinaus wurden Informationsveranstaltungen für Energienutzungskoordinator/innen genutzt, um auf das Trainingsangebot hinzuweisen und Fragen dazu zu beantworten. In Absprache mit der Abteilung für Personalentwicklung wurde das Training zweimal pro Semester angeboten. Aufgrund einer zu geringen Anzahl an Anmeldungen musste das Training an zwei Terminen ausfallen. Stattdessen wurde den angemeldeten Personen ein individuelles Coaching sowie die Zusendung von Trainingsmaterialien angeboten.
Im Rahmen der Evaluation des Kommunikationstrainings hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit ein Veränderungsgespräch zum Thema Energiesparen mit einer Person ihrer Wahl zu führen, dieses auf Tonband aufzunehmen und individuelles Feedback zu ihren Kommunikationskompetenzen zu erhalten. Im Sinne einer Transferübung führten die Teilnehmenden am Ende von Modul II erneut ein solches Gespräch, das aufgezeichnet werden sollte und so einen Vorher-Nachher-Vergleich aufzeigen sollte. Durch die Erhebung von Audiodaten zu zwei Messzeitpunkten kann der Erfolg der Intervention nicht nur über veränderte Verhaltensweisen der Change Agent/innen, sondern auch über veränderte Verhaltensweisen der Gesprächspartner/innen (verstärkte Maßnahmenplanung und selbstmotivierende Äußerungen) überprüft werden. Diese Strategie wurde im Rahmen der ersten Projektphase von EnEff Campus zusammen mit Mitarbeitenden des IGS bereits pilotiert, indem ein Nutzerworkshop zu energetischen Einsparungen mit Mitarbeitenden der TU Braunschweig aufgezeichnet und ausgewertet worden ist. Das Verhalten der Nutzer/innen und deren Einstellungen zu Energieeinsparungen können mit Hilfe der Audioanalyse festgehalten und evaluiert werden. Dieser ‚action research'-basierte Ansatz erlaubt es konkret an Problemen in der praktischen Umsetzung von Interventionen anzusetzen. Die Aufnahme des Gesprächs war den Teilnehmenden selbstverständlich freigestellt und so wurde das Angebot nur vereinzelt von den Teilnehmenden genutzt. Die Anzahl der aufgenommenen Gespräche lässt aus die-

sem Grund keine quantitativen, statistisch validen Rückschlüsse auf die Effektivität des Trainings zu. Die qualitative Auswertung der Gespräche vor dem Training deutet darauf hin, dass Change Agent/innen eine Tendenz zu geschlossenen Fragen und autonomie-restriktiver Kommunikation (Ratschlag ohne Erlaubnis, konfrontieren, kritisieren, ermahnen) haben. Diese Art der Kommunikation schränkt das menschliche Bedürfnis nach Wahlfreiheit ein. Der Schlüssel zum Erfolg scheint also nicht in der Restriktion der Entscheidung für oder gegen energiesparendes Verhalten zu liegen, sondern in der Betonung der Wahlfreiheit der Beteiligten. Die qualitative Auswertung der Gespräche am Ende des Kommunikationstrainings liefert Hinweise, dass Change Agent/innen die Häufigkeit von autonomie-restriktiven Aussagen deutlich reduziert haben. Diese Ergebnisse bestätigen und erweitern bisherige Forschungsergebnisse, die zeigen, dass Trainings mit einem geringen Stundenumfang ausreichen, um die Basiskompetenzen von MI zu vermitteln [33].
Um den Kommunikationsansatz von MI einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde anlässlich der Veranstaltung „EnEff Campus 2020: Umsetzung des integralen Masterplans“, im November 2016, ein 75-minütiger Workshop zum Thema Nutzermotivation für Energiemanager/innen von Universitäten aus ganz Deutschland entwickelt und durchgeführt. Ziel war es, eine Einführungsveranstaltung zu konzeptionieren, die der Zielgruppe einen ersten Eindruck zu MI vermittelt und den Austausch über die Umsetzung von MI im Berufsalltag anregt.

7.3.2 Arbeitspaket Nutzerworkshops

Ziel des Workshops war es zu evaluieren, ob sich der MI Gesprächsansatz auch als Kommunikationsmethode für die Arbeit mit Gruppen nutzen lässt. Im Projekt EnEff Campus:*blue*MAP konnte gezeigt werden, dass sich MI in dyadischen Settings, d.h. wenn Veränderungsagent/in und Veränderungsrezipient/in im direkten Gespräch interagieren, erfolgreich einsetzen lässt [35] [36]. Darüber hinaus existiert Forschung [37] [38], die zeigt, dass sich MI in der Arbeit mit klinischen Gruppen anwenden lässt. Doch bisher bestehen keine Erkenntnisse, ob sich MI auch für die Arbeit mit Gruppen in Organisationen bewährt.
Dabei scheint der Einsatz von MI für die Arbeit mit Gruppen prädestiniert: Neben den spezifischen Kommunikationsmethoden, die beim MI zum Einsatz kommen (siehe vorheriges Arbeitspaket), hilft die Grundhaltung auch dabei, eine Atmosphäre zu kreieren, in der die Mitarbeitenden selbstbestimmt erarbeiten können, welche Energieeinsparungen an ihrem Arbeitsplatz möglich sind. Diese eigenständige Auseinandersetzung führt dazu, dass sich die Mitarbeitenden tiefergehend mit der Thematik auseinandersetzen und die Energiesparnormen und -werte stärker verinnerlichen [23] [39]. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass MI auch für die Anwendenden selbst positive Effekte mit sich bringt: So fördert eine Schulung in MI die Resilienz der Teilnehmenden und reduziert, wenn die Möglichkeit bestand MI im Arbeitsalltag anzuwenden, auch Facetten von Burnout [42].
Basierend auf dem Feedback von interessierten Einrichtungen wurde die Dauer des Konzeptes von einem halben Tag auf zwei Stunden gekürzt. Somit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Abteilungen selten die Zeit haben alle Mitarbeitenden für einen halben Tag von ihren „regulären“ Aufgaben zu befreien. Trotz dieser Kürzung, konnten bisherige Ergebnisse [40], die zeigen konnten, dass Workshops mit Universitätsmitarbeitenden zu einer Reduktion des Energieverbrauchs führen repliziert werden [41]. Um Werkzeuge und Me-

thoden bereitzustellen, wurde das Workshopkonzept online zur Verfügung gestellt.[2] Neben einem detaillierten Ablaufplan werden hier auch die didaktische Vorgehensweise und theoretische Fundierung des Workshops beschrieben.
Der Workshop Konzept besteht im Wesentlichen aus vier Phasen (siehe Abbildung 94), von denen die Kraftfeldanalyse [45] den Kern eines Workshops ausmacht.

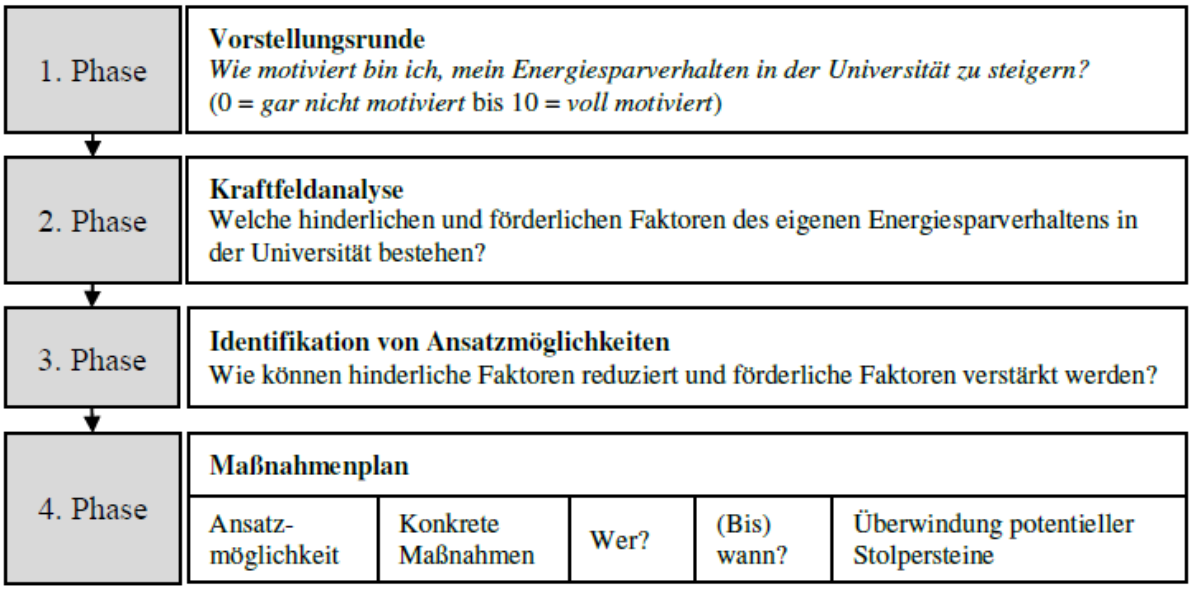


Abbildung 94 Schematische Darstellung des Vorgehens eines Workshops (aus [46], S. 37)

Ziel der Kraftfeldanalyse ist es die die Faktoren zu identifizieren, die die Mitarbeitenden zu mehr Energieeinsparungen motivieren würden, und welche Barrieren aus ihrer Sicht dem Zielverhalten entgegenstehen. Um beispielhaft zu illustrieren, wie solche ein Vorgehen konkret aussieht, sind die Ergebnisse eines Workshops in Abbildung 95 zusammengefasst. Dafür werden in einem ersten Schritt mit Hilfe eines gemeinsamen Brainstormings Energiesparmöglichkeiten gesammelt. Daran anschließend wurden die Teilnehmenden dazu angeregt, hinderliche und förderliche Faktoren des eigenen Energiesparverhaltens zu identifizieren. Es wurde dabei betont, dass dies als Brainstorming erfolgen sollte und es keine richtigen oder falschen Antworten gibt. Die genannten Faktoren wurden von zwei Teilnehmenden aufgeschrieben und an sichtbarer Stelle gesammelt. In der dritten Phase wurden Ansatzmöglichkeiten für Veränderungen identifiziert. Zu Beginn der dritten Phase stimmten die Teilnehmenden per Punktevergabe darüber ab, welche drei der identifizierten hinderlichen und förderlichen Faktoren für sie am relevantesten seien und weiterbearbeitet werden sollten. Für ausgewählte förderliche Faktoren wurde darüber reflektiert, wie diese verstärkt werden könnten und für ausgewählte hinderliche Faktoren, wie diese reduziert werden könnten. Zu Beginn der vierten Phase wählten die Teilnehmenden aus den gewonnenen Ansatzmöglichkeiten erneut per Punktevergabe die drei aus, die für sie am relevantesten waren. Diese Ansatzmöglichkeiten wurden dann in konkrete Maßnahmen übersetzt und es wurde in einem

[2] https://www.tandfonline.com/doi/suppl/10.1080/14697017.2017.1299372?scroll=top

Maßnahmenplan festgehalten, wer für die Umsetzung zuständig sei, (bis) wann die Umsetzung erfolgen solle und wie mögliche Stolpersteine überwunden werden könnten. Es wurde dabei betont, dass es die autonome Entscheidung der Teilnehmenden sei, ob sie den Maßnahmenplan tatsächlich umsetzen.

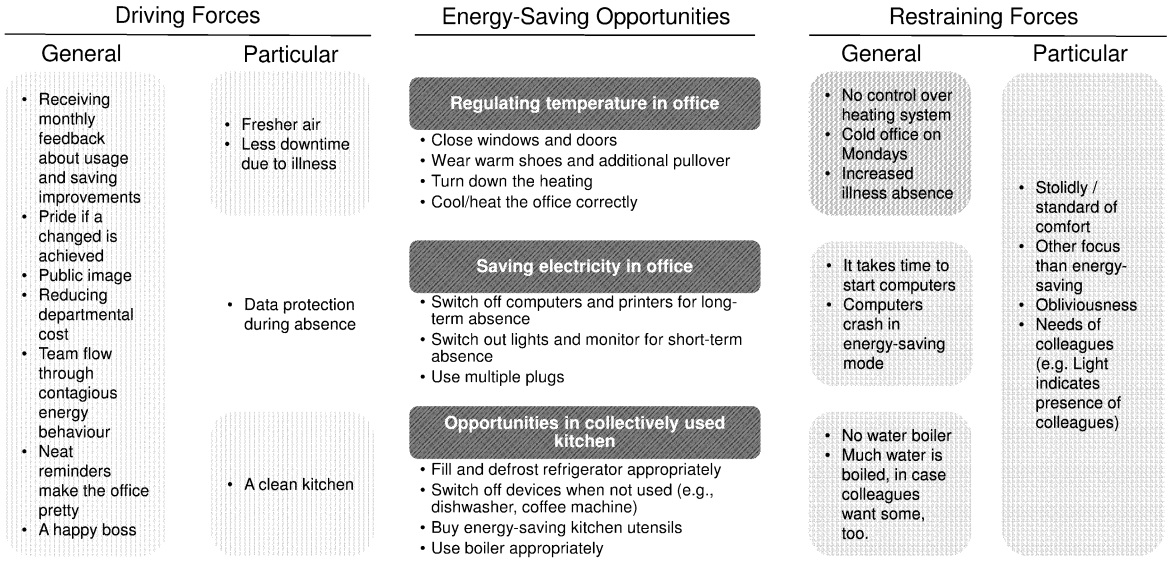


Abbildung 95 Ergebnisse einer Kraftfeldanalyse ([41], p. 110 © Routledge Taylor & Francis Group)

Insgesamt wurden acht Workshops mit 88 Mitarbeitenden der TU durchgeführt. Darüber hinaus wurde mit 37 Studierenden (sechs Workshops) getestet, ob sich das Konzept auch auf eine Stunde reduzieren lässt. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmenden im Vergleich zu 33 Studierenden, die an vier einstündigen Informationsveranstaltungen teilnahmen, einen Monat nach der Intervention mehr Energiesparverhalten in der Universität berichten [27]. Darüber hinaus wurde das Thema in die Lehre integriert. Hierfür wurden im Rahmen des handlungsbezogen Kompetenztrainings „Moderation“ zwölf Workshops angeboten, an denen 142 Studierende an einem dreistündigen Workshop zum Thema Energiesparen teilnahmen. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe (N=77), die einen einstündigen Vortrag zum Thema Energiesparen erhielten und den Film „eine unbequeme Wahrheit“ von Al Gore anschauten, berichten die Teilnehmenden in den Workshops, dass sie das Thema „Energiesparen in der Universität“ stärker verinnerlicht hatten [26].
Weitere Forschung im Zuge des Arbeitspaketes zeigt zudem, dass die Workshops möglichst von gut geschulten Anwender/innen durchgeführt werden sollten [43]. So zeigen interaktionsanalytische Daten, basierend auf Videoaufnahmen von vier Workshops mit TU Mitarbeitenden, dass eine lösungsfokussierte Kommunikation der Durchführenden zu einer erhöhten Motivation für mehr Energieeinsparungen am Arbeitsplatz führen, als wenn versucht wird mit Druck zu überzeugen und/oder ein Fokus auf bestehende Probleme gelegt wird. Dass hier Schulungen nötig sind, zeigen die Reaktionen von Energiemanager/innen, die eher dazu neigen, autonomie-einschränkend zu agieren, als sich für die Belange der Nutzer/innen zu interessieren [29]. Ergebnisse aus dem Projekt EnEff Campus:*blue*MAP zeigen, dass sich die

entsprechenden Kommunikationskompetenzen bereits nach zwei Tagen vermitteln lassen [33].
Ein weiteres Argument, welches für den Einsatz von Workshops spricht, besteht darin, dass die Nutzer/innen hier Ideen und Methoden entwickeln, die über die konkrete Intervention hinaus gehen. So wurde in einem Workshop mit Studierenden [27] bspw. das Projekt „Sprücheklopfer“ entwickelt. Eine Teilnehmerin nahm hierfür als Maßnahme mit, dass sie in Kooperation mit dem Sandkasten, einer universitären Einreichung, die Studierenden dabei hilft ihre Projekte umzusetzen, eine Kampagne entwickelt, mit deren Hilfe Studierende für das Thema Energiesparen campusweit sensibilisiert werden sollen (siehe Abbildung 96).

Abbildung 96 Die Sprücheklopferinitative als Folgeprojektes eines Workshops [IfP]

Um dieses Potenzial zu nutzen, das entstehen, wenn sich Studierende selbstbestimmt mit dem Thema Nachhaltigkeit auseinandersetzen, wurde das Thema Energiesparen auch in das handlungsbezogenen Kompetenztraining „Design Thinking“ integriert. Design Thinking beschreibt ein iteratives Vorgehen, anhand dessen ein Team kontinuierlich neue Informationen über die Organisation sammelt und dabei die Perspektiven relevanter Stakeholder in den Lösungsprozess einbezieht. Die Studierenden setzen sich somit ausführlich mit Barrieren und den Möglichkeiten auseinander, wie Produkte und Prozesse geschaffen werden können, die

TU Angehörigen noch mehr in das Ziel Energieeinsparungen einzubeziehen [44]. Insgesamt wurde die Herausforderung „Wie können wir dazu beitragen den Energieverbrauch der TU Braunschweig zu reduzieren“ in neunzehn Desig Thinking Trainings behandelt.
Als Fazit zu diesem Arbeitspaket lässt sich festhalten, dass die Nutzerworkshops zu den gewünschten Einsparmaßnahmen führen [41] und besser als Informationskampagnen geeignet sind, die Motivation der Teilnehmenden zu erhöhen [26]. Dennoch war die Nachfrage nach diesem Angebot im Laufe des Projektes gering, was unter anderem daran liegt, dass es einen massiven Einschnitt in den Arbeitsalltag einer Einrichtung darstellt, wenn alle Mitarbeitenden für zwei Stunden an einem Workshop teilnehmen müssen. Um den Zustand zu adressieren und mit gering invasiven Interventionen innerhalb der TU eine soziale Norm für das Energiesparen zu etablieren, wurde im Laufe des Projektes ein zusätzliches Arbeitspaket durchgeführt, welches im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

7.3.3 CO_2 Challenge

Sowohl die Kommunikationstrainings, als auch die Nutzerworkshops fanden nicht die erwartete Nachfrage. Daraus ergab sich die Überlegung, dass eine soziale Norm für das Energiesparen niedrigschwelliger etabliert werden musste. Dazu kam die Beobachtung, dass im Zuge von Vorläuferprojekten bereits viele Stellschrauben zur Optimierung des Energieverbrauchs an der TU identifiziert werden konnten. Verbrauchsdaten zeigen jedoch, dass die Motivation der Nutzer/innen für Energiesparen zurückgeht („Reboundeffekt“ [53]). Somit wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Gebäude- und Solartechnik und dem Gebäudemanagement die CO_2 Challenge ins Leben gerufen: https://www.tu-braunschweig.de/co2challenge

Die Gestaltung der CO_2 Challenge wurde ausgerichtet in Anlehnung an wissenschaftliche Ergebnisse [47] [48], die zeigen konnten, dass komparatives Feedback dazu beitragen kann, den Energieverbrauch zu reduzieren. Beim komparativen (=vergleichenden) Feedback wird das Verhalten der eigenen Gruppe mit dem Verhalten einer anderen Gruppe verglichen [49]. Nach der Theorie der sozialen Identität kann der Vergleich dazu führen, dass die Existenz der eigenen Gruppe verstärkt wahrgenommen wird. Die verstärkte Gruppenidentität führt zu kooperativem Verhalten [50], indem die Gruppenmitglieder auf das gemeinsame Ziel hinarbeiten besser als die Vergleichsgruppe abzuschneiden. Dazu kommt: Ein Feedback über den Energieverbrauch als solches allein ist bereits eine nützliche Intervention, um Nutzer/innen für ihr Energiesparverhalten zu sensibilisieren. Indem dies durch die Komponenten Vergleich und Wettkampf ergänzt wird, kann dieser Effekt aber noch verstärkt werden.

Beim komparativem Feedback im Rahmen der CO_2 Challenge handelt es sich demnach um einen Wettbewerb, in dem Organisationseinheiten gegeneinander antreten, um das Gebäude zu bestimmen, welches in einem festgelegten Zeitraum am meisten Energie einsparen konnte. Ziel der internen TU-Kampagne ist es, dass durch die Motivation und das Engagement der einzelnen Institute die CO_2-Emissionen innerhalb eines Jahres auf dem Campus der TU Braunschweig reduziert werden. Als Teilnehmerkreis wurde die gesamte TU identifiziert. Um die Rolle der Energienutzungskoordinator/innen zu stärken, wurden diese als zentrale Ansprechpersonen identifiziert (s. Abbildung 97).

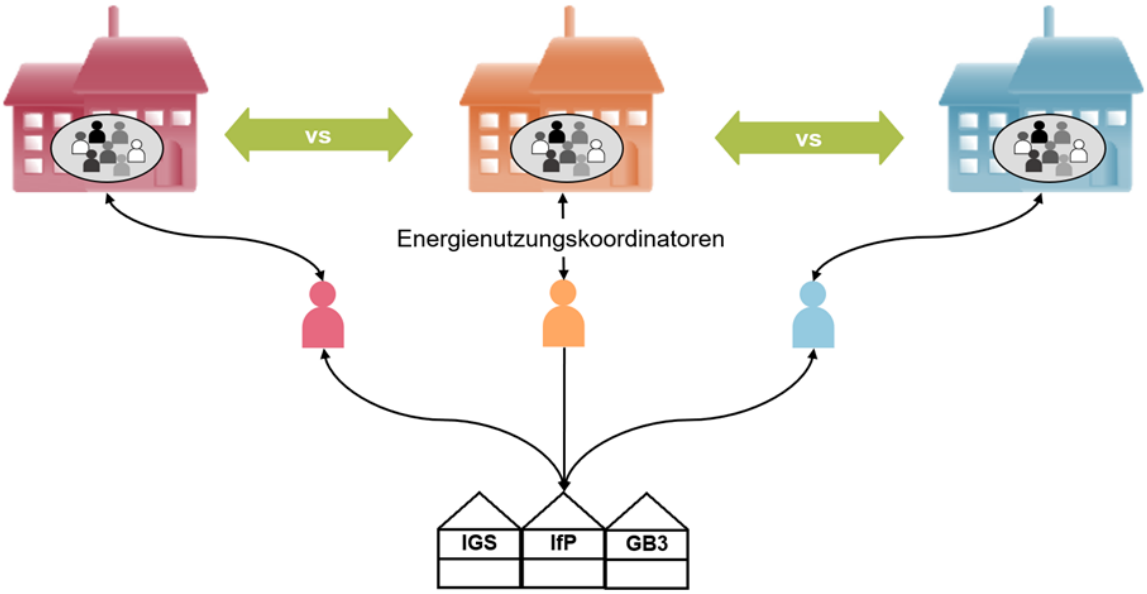


Abbildung 97 Kommunikationsstruktur der CO_2 Challenge [IfP]

Der Feedbackprozess sieht vor, dass Energienutzungskoordinator/innen der jeweiligen Einrichtungen im Rhythmus von zwei Monaten per Mail einen Steckbrief erhalten, der Informationen zu den CO_2-Emission des jeweiligen Gebäudes in den beiden vorangegangenen Monaten mit Vergleich zum Vorjahr enthält. Dazu wurde eine Postervorlage erstellt, die an das „schwarze Brett“ einer Einrichtung gehängt werden kann und auf der alle zwei Monate der aktuelle Steckbrief angebracht werden soll.

Im Sinne eines Rankings enthält der Steckbrief außerdem Informationen dazu, wie das eigene Gebäude, verglichen mit den CO_2-Emissionen anderer TU-Gebäude, dasteht. Zudem werden im Steckbrief die entsprechenden Ergebnisse und darin enthaltenen Informationen auf verständliche Art und Weise mit alltäglichen Beispielen zu äquivalenten CO_2-Emissionen ergänzt, um so die Menge an CO_2-Ausstoß besser zu veranschaulichen (siehe Abbildung 98). Datengrundlage für die Auswertung ist der Strom- und Wärmeverbrauch aus dem Energiemanagement-System der TU, der vom Institut für Gebäude- und Solartechnik sowie durch das Gebäudemanagement aufbereitet wird.

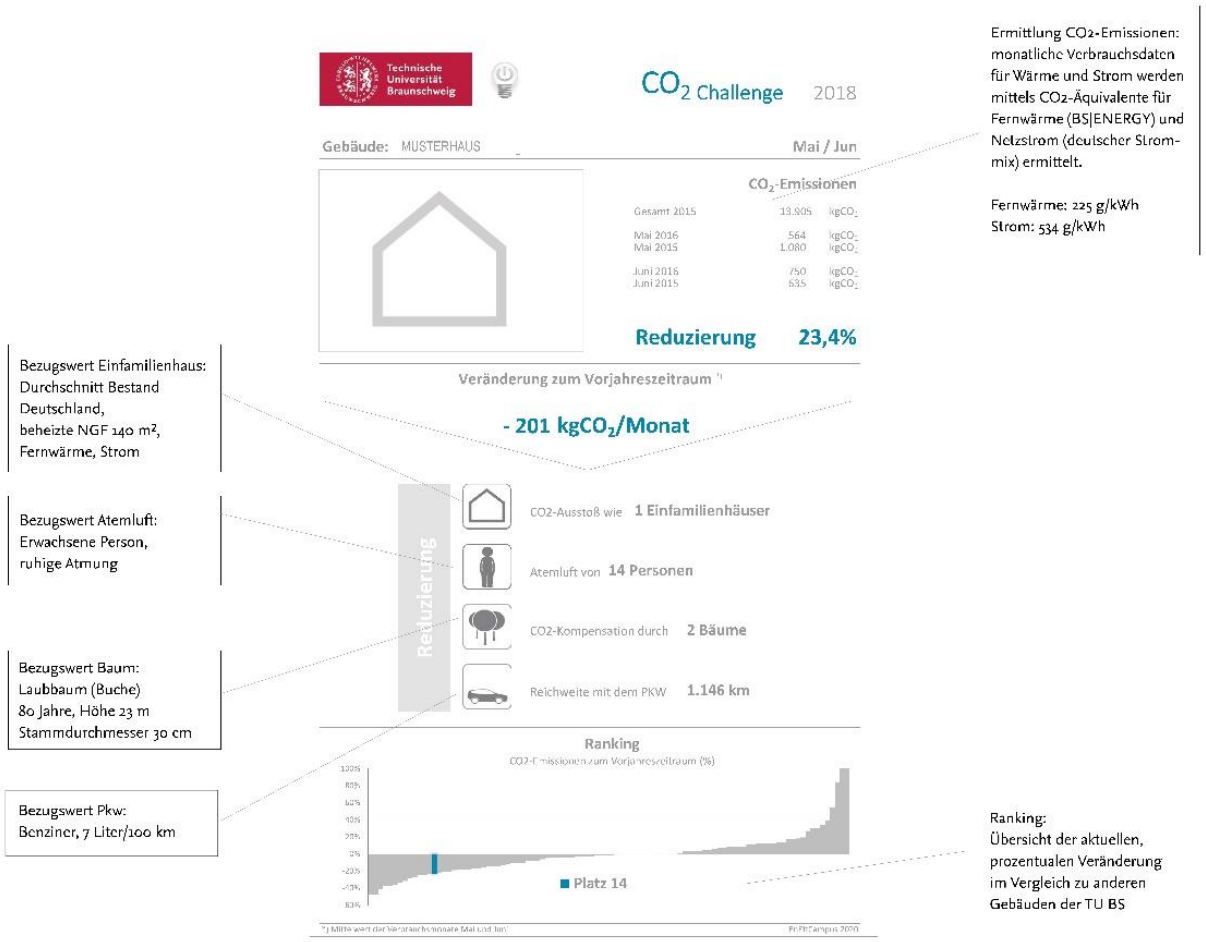


Abbildung 98 Beispielsteckbrief [IGS]

Im Rhythmus von zwei Monaten erhält das Gebäude mit der prozentual höchsten CO_2-Einsparung eine Prämie von 2.000 €, die von der TU Braunschweig zur Verfügung gestellt wird. Über die Verwendung der Prämie können die Mitarbeitenden des Gebäudes Vorschläge sammeln und sich mittels einer Ansprechperson an das Gebäudemanagement der TU Braunschweig richten. Die Prämie kann entweder zur Umsetzung geringinvestiver Baumaßnahmen oder für Anschaffungen auf Institutsebene (bspw. effiziente Geräte oder Mobiliar).

Ergänzend zum Wettbewerb der Gebäude untereinander werden Kreativ-Preise im Rahmen von Sachmitteln unter allen Beteiligten verlost. Angehörige der TU haben die Möglichkeit, Ideen zur Energieeinsparung an ihrem Institut oder in ihrem Gebäude zu entwickeln und mit dem Projektteam zu teilen. Für die Gewinne des Kreativ-Wettbewerbs (u.a. Thermo-Kaffeebecher, Kinogutscheine) konnten namhafte Sponsoren aus der Region gewonnen werden.

Um den Wettbewerbscharakter der CO_2 Challenge noch weiter zu schärfen und allen Instituten einen Anreiz zur engagierten Teilnahme zu verschaffen, werden zum Ende des Wettbewerbs die TU-Einrichtungen prämiert, die eine besonders innovative Energieeinsparmaßnahme vorgeschlagen haben. Als Anreiz für die Institute sich mit dem Energiesparen weiter zu beschäftigen, stehen 5.000 € zur Verfügung, von denen der 1.Sieger 2.500 €, der 2. Sieger 1.500 € und der 3. Sieger 1.000 € erhält. Vielfältige Verwendungsmöglichkeiten zur Steigerung des Arbeitsplatzkomforts oder zur Anschaffung von elektrischen Geräten sind möglich (s. Abbildung 99).

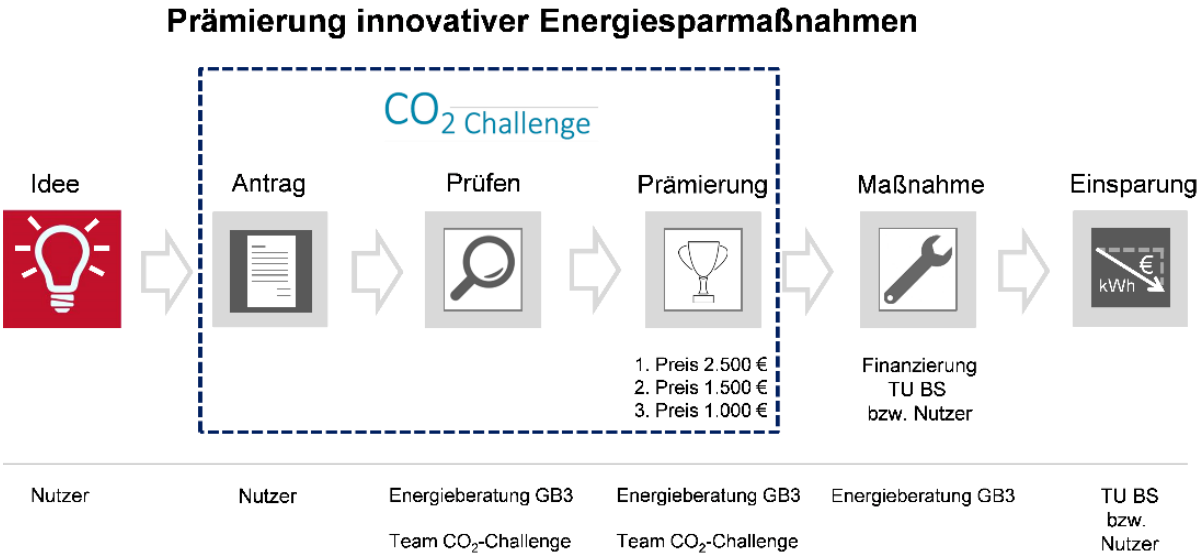


Abbildung 99 Prozess Prämierung innovativer Energiesparmaßnahmen [GB3]

Um die Wirksamkeit der Intervention zu evaluieren, hat das IfP einen Fragebogen entwickelt, mit dem die selbstberichtete Motivation der Mitarbeitenden über den Verlauf der CO_2 Challenge erhoben wird. Der Fragebogen wurde vor Beginn des Wettbewerbs versendet und wird nun in regelmäßigen Abständen erneut an die Mitarbeitenden verschickt.

Um alle teilnehmenden Institute an der TU umfassen über die CO_2 Challenge zu informieren, wurde im Sinne einer zentralen Organisations- und Kommunikationsplattform eigens eine Homepage für die CO_2 Challenge entwickelt. Die Homepage liefert in übersichtlicher Form Informationen zum Ablauf der Challenge und informiert über die einzelnen Wettbewerbe (z.B. Kreativ-Wettbewerb). Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Inhalte anschaulich aufbereitet sind: *„Wussten Sie, dass der CO_2-Ausstoß der TU Braunschweig in einem Monat in etwa dem Ausstoß von 3.200 Einfamilienhäusern entspricht? Oder, dass etwa 24.200 Bäume gepflanzt werden müssten, um diese CO_2-Emissionen zu binden?“*

Darüber hinaus wurde das Projekt über die internen Newsletter der TU beworben[3] und es erfolgt alle zwei Monate eine Vorstellung der Gewinnergebäude[4][5]. Des Weiteren wurde die CO_2 Challenge durch Mensastände in Kooperation mit dem Projekt „Sprücheklopfer“ (siehe Arbeitspaket „Nutzerworkshops“) beworben (s. Abbildung 100).

Abbildung 100 Werbung in der Mensa für die CO2 Challenge [IfP]

[3] https://magazin.tu-braunschweig.de/m-post/co2-challenge-startet-wer-spart-gewinnt/

[4] https://magazin.tu-braunschweig.de/m-post/co%e2%82%82-challenge-erstes-siegergebaeude-steht-fest/

[5] https://magazin.tu-braunschweig.de/m-post/mit-optimierter-nutzung-der-klimakammer-zum-sieg/

7.3.3.1 Siegergebäude der CO2-Challenge

Im Rahmen der CO_2 Challenge wetteiferten Institute und zentrale Einrichtungen der TU Braunschweig um eine möglichst geringe CO_2-Emission ihrer Gebäude, welches mit einer Gebäudeprämie ausgezeichnet wurde. Insgesamt wurden 6 x 2.000 € im 2-Monats-Rhythmus an die Gewinnergebäude ausgeschüttet. Das heißt, dass im Verlauf der 12-monatigen CO_2 Challenge insgesamt 6 Siegergebäude gekürt wurden.

In der ersten Runde (Monate November-Dezember 2017) hat sich Gebäude des Instituts für Geschichtswissenschaft mit den Abteilungen Alte und Mittelalterliche Geschichte, Neuere Geschichte und Wissenschafts- und Technikgeschichte als Siegergebäude durchgesetzt. Den Mitarbeiterinnen, Mitarbeitern und Studierenden des Instituts für Geschichtswissenschaft ist es gelungen, ihre CO_2-Emissionen in dem Betrachtungszeitraum um 16,8 % zu reduzieren. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gaben als Grund für die Einsparungen ein gutes Bewusstsein für die kleinen Handgriffe, mit denen man CO_2-Emissionen senken kann, an. Dazu zählten unter anderem Stoßlüften, die Nutzung von Steckerleisten mit Kippschalter und das Herunterdrehen der Thermostatventile der Heizung in der Zeit der Abwesenheit. Gleichzeitig wurden in dem Gebäude die meisten Räume mit energieeffizienter Beleuchtung ausgestattet.

Tabelle 28 CO2-Challenge - Siegergebäude 01

Sieger 01		
	Gebäude	**4247**
	Nutzung	Geschichtswissenschaften
	Baujahr	1890
	Fläche (NGF)	647 m²
	Auswertungszeitraum	Nov – Dez 2017
	Reduzierung CO2-Emissionen	**17%**

Zum zweiten Siegergebäude gehörte die Abteilung Organische Baustoffe und Holzwerkstoffe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) mit den dazugehörigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Um mehr als 30 Prozent konnten sie ihre CO_2-Emissionen für die Monate Januar und Februar 2018 im Vergleich zum Vorjahr senken. Die beachtliche CO_2-Reduktion konnte vor allem durch einen bedarfsgerechteren Betrieb einer Klimakammer erzielt werden.

Tabelle 29 CO2-Challenge - Siegergebäude 02

Sieger 02		
	Gebäude	**9911/12**
	Nutzung	Instituts- und Laborgebäude
	Baujahr	1960
	Fläche (NGF)	605 bzw. 190 m²
	Auswertungszeitraum	Jan – Feb 2018
	Reduzierung CO2-Emissionen	**33%**

In der dritten von insgesamt sechs Wettbewerbsrunden hat sich die Versuchshalle des Niedersächsischen Forschungszentrums für Luftfahrt (NFL) am Forschungsflughafen durchgesetzt. Das Herzstück der Halle ist ein Versuchsfeld mit einer Fläche von 800 m², auf dem große Strukturversuche durchgeführt und ganze Flugzeuge zu Forschungs- und Zulassungszwecken getestet werden. Zu der Halle gehören außerdem Flugsimulatoren sowie die zentrale Werkstatt der hier angesiedelten Institute. Die Versuchshalle und die Werkstatt werden von den Instituten für Flugführung, für Flugzeugbau und Leichtbau, Werkstoffe, Flugantriebe und Strömungsmaschinen und Strömungsmechanik genutzt. In den Monaten März und April 2018 konnten diese ihre CO_2-Emissionen um 20 % im Vergleich zum Vorjahr senken. Dieses Ergebnis lässt sich vor allem durch einen veränderten Einsatz der Hydraulikaggregate erklären.

Tabelle 30 CO2-Challenge - Siegergebäude 03

Sieger 03		
	Gebäude	**9983**
	Nutzung	Werkstatt, Forschungslabor
	Baujahr	2001
	Fläche (NGF)	2.621 m²
	Auswertungszeitraum	März – Apr 2018
	Reduzierung CO2-Emissionen	**20%**

Dass man auch mit kleinen Veränderungen etwas bewirken kann, haben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Technologietransferstelle, der Personalentwicklung, der Arbeitssicherheit sowie des betriebsärztlichen Dienstes bewiesen: Um 43 Prozent konnten sie die CO_2-Emissionen in ihrem Gebäude im Vergleich zum Vorjahr senken. Damit hat sich das Gebäude in der vierten Runde der CO_2 Challenge durchgesetzt. Die Einsparungen wurden u.a.

über technische Geräte und deren Einstellungen (z.B. Schlafmodus von Druckergeräten) erzielt. In den Büros kommen außerdem energieeffiziente Stehlampen zum Einsatz, die über einen Präsenzmelder verfügen.

Tabelle 31 CO2-Challenge - Siegergebäude 04

Sieger 04

Gebäude	**4310**
Nutzung	Verwaltung
Baujahr	1925
Fläche (NGF)	732 m²
Auswertungszeitraum	Mai – Jun 2018
Reduzierung CO2-Emissionen	**43%**

Als fünftes Gewinnergebäude der CO_2-Challenge wurde das Gebäude der dort ansässigen Institute für Straßenwesen und für Grundbau und Bodenmechanik gekürt. Ihr Gebäude war in den Vormonaten bereits auf dem zweiten Platz und konnte sich dann im Juli und August als Sieger im Wettstreit um den niedrigsten Energieverbrauch durchsetzen. Mittelpunkt des Gebäudes ist das Versuchslabor. Hier laufen regelmäßig größere Testreihen ab, unter Einsatz energieintensiver Maschinen. Auf der Suche nach Stellschrauben zum Einsparen von Energie wurde die energetische Optimierung der Lüftungsanlage identifiziert. Jetzt kann in dem Labor die Lüftung bedarfsgerecht gesteuert werden. Die Wärmeschränke laufen nicht mehr durchgängig über Nacht und sparen so Energie. Den Sieg in der CO_2-Challenge nehmen die Mitarbeitenden nach eigenen Aussagen zum Anlass weiterhin auf ihren Verbrauch zu achten.

Tabelle 32 CO2-Challenge - Siegergebäude 05

Sieger 05

Gebäude	**2509**
Nutzung	Geotechnik - Straßenwesen
Baujahr	1990
Fläche (NGF)	2.513 m²
Auswertungszeitraum	Jul – Aug 2018
Reduzierung CO2-Emissionen	**48%**

Zum sechsten und damit letzten Siegergebäude wurde ein Gebäude, das gleich mehrere zentrale Einrichtungen der Universität beherbergt, gekürt. Hier sind die Zentrale Studienberatung, die Technologietransferstelle, die Stabsstelle Chancengleichheit, der Career Service und die Suchtberatung untergebracht. Die Mitarbeitenden der Einrichtungen reduzierten ihren Energieverbrauch um 27 Prozent und haben damit die CO_2 Challenge für den Zeitraum September und Oktober 2018 gewonnen. Die Leiterin der Zentralen Studienberatung nennt als einen der Gründe für die Energieeinsparungen den bewussteren Umgang mit Energie unter den Mitarbeitenden. Dazu zählt auch, dass man sich gegenseitig darauf hinweist, sich energiesparend zu verhalten. So wird das Thema immer wieder in Erinnerung gerufen. Darüber hinaus bot aus Sicht der Mitarbeitenden des Siegergebäudes die CO_2 Challenge einen Ansporn, mit dem eingesparten Geld etwas für die Abteilung anschaffen zu können.

Tabelle 33 CO2-Challenge - Siegergebäude 06

Sieger 06		
	Gebäude	**4301**
	Nutzung	Verwaltung
	Baujahr	1885
	Fläche (NGF)	864 m²
	Auswertungszeitraum	Sept – Okt 2018
	Reduzierung CO2-Emissionen	**27%**

7.3.3.2 Kreativpreise

Neben der Gebäudeprämie wurden kreative Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für ihre innovativen Ideen zur Energieeinsparung prämiert. Zu gewinnen gab es verschiedene Sachpreise, wie beispielsweise Thermobecher, Kinogutscheine und solarbetriebene Ladestationen. Eine der ersten Ideen kam von der Geschäftsstelle des BRICS: Getreu dem Motto „Blicke sagen mehr als viele Worte“, wählten die Mitarbeitenden vier Tiermotive für Postkarten aus, die auf den richtigen Umgang mit Energie hinweisen. Die Energiebeauftragten der BRICS-Institute machten die Postkartenaktion in ihren Gruppen bekannt und legten die Karten zum Beispiel im Sekretariat zum Mitnehmen aus.

Einen weiteren Vorschlag reichte ein Mitarbeiter vom Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik ein. Seine Idee: Durch das Anbringen von Bewegungsmeldern in Teilen des Hauses der Elektrotechnik könnte viel Energie eingespart werden.

Die zwei Mitarbeiter vom Institut für Wirtschaftsinformatik und vom Institut für Erziehungswissenschaft haben gleich zwei Ideen eingebracht: Zum einen schlagen sie die Einrichtung einer Webseite vor, über die alle Angehörigen der TU Braunschweig strukturelle und technische Probleme wie zum Beispiel undichte Fenster, die dem Energiesparen im Weg stehen, melden können. Ihre zweite Idee ist es, WLAN-Signale zu nutzen, um festzustellen, ob sich am Abend oder am Wochenende Personen in Gebäuden befinden. Den Ergebnissen entspre-

chend könnten das Licht und die Heizung bedarfsgerecht geregelt werden. Die Idee ließe sich auch gut in bisherige Strukturen integrieren, da WLAN-Signale bereits für die Lernplätze-App genutzt.

Auch Studierende nutzten die Gelegenheit und reichten ihre Ideen ein: Der Maschinenbau-Student Fabian Bauers sieht Stromsparpotential im Audimax: Durch einen Sonnenlichtsensor könnte ab einer bestimmten Grenzwertüberschreitung der Lichtintensität ein Signal auf den Kontrollscreen gesendet werden, das die Dozierenden auf das Stromeinsparpotential hinweist, sobald das Licht im Audimax ausgeschaltet wird.

Im Rahmen eines überfachlichen Moderationstrainings haben Studierende den Vorschlag gemacht, das Thema gleich zu Beginn des Studiums präsent hervorheben, damit die Studienanfängerinnen und -anfänger ein Bewusstsein dafür bekommen, dass sie selbst Einfluss auf den Energieverbrauch an der TU Braunschweig haben. Beispielsweise könnten bei ersten Informationsveranstaltungen oder bei der Erstsemesterbegrüßung eine entsprechende Präsentation rund um das Thema Nachhaltigkeit auf dem Campus gehalten werden. Besonders wichtig sei es, dabei konkrete Energiespartipps an die Hand zu geben.

Alle eingereichten Ideen sollen in Abstimmung mit der Energieberatung umgesetzt werden.

7.3.3.3 Preis für innovative Energiesparmaßnahmen

Neben dem Kreativwettbewerb gab auch einen Preis für innovative Energiesparmaßnahmen. Das Team der CO2 Challenge hat die Gewinner zusammen mit der Energieberatung des Gebäudemanagements ausgewählt. Den Preis erhielten das Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund in Kooperation mit dem vom Gauß-IT-Zentrum. Ihre Idee ist die Umsetzung eines „Energy Efficient Ethernet“ (EEE). Dadurch könnte das System bei geringer Auslastung automatisch die Geschwindigkeit und damit den Energieverbrauch drosseln. Werden eine höhere Geschwindigkeit und mehr Datenraten benötigt, fährt das System bis auf die maximal mögliche Leistung hoch. Gerade bei wenig oder nur sporadischem Datenverkehr, wie er in Büroumgebungen üblich ist, könnte so eine größere Menge an Energie eingespart werden. Der symbolische Scheck zur finanziellen Unterstützung der Idee im Wert von 2.500 € wurde im Rahmen einer Informationsveranstaltung für Energienutzungskoordinatoren überreicht.

7.3.4 Der Königsweg zur Energieeffizienz: Investitionen oder Verhalten?

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, wie Energieeinsparungen in Organisationen erreicht werden können. Entweder setzt man bei den Mitarbeitenden an und versucht diese für kontinuierliches Energiesparverhalten, wie z.B. das Schließen von beheizten Räumen, zu motivieren. Dieses Verhalten wird Curtailment Behavior genannt. Ein zweiter Weg wäre es durch einmalige Investitionen in energieeffizientere Geräte den Energieverbrauch zu senken. Solch eine Strategie wird in Forschung als Efficiency Behavior bezeichnet. Curtailment Behaviors müssen regelmäßig gezeigt werden, wobei jede einzelne Aktion selbst in der Regel nur einen geringen Beitrag zur Energiereduktion hat [51]. Dennoch sind diese Verhaltensweisen besonders für die psychologische Forschung interessant, da sich intraindividuelle Faktoren, wie z.B. Einstellungen gegenüber Energiesparverhalten oder die wahrgenommen Kontrolle für mehr Energieeinsparungen mit den Zielverhalten in Verbindung setzen lassen.

Beim Efficiency Behavior kommt es hingegen vermehrt auf externe Faktoren (z.B. Budget) an, sodass dieses Themenfeld von Sozialwissenschaftler/innen vernachlässigt wird. Daher wird zwar seit fast vier Jahrzehnten [52] postuliert, dass Efficiency Behavior dem Curtailment Behavior überlegen ist Energieeinsparungen zu erzielen, die empirische Grundlage trotz der relevanten Forschungsfrage jedoch immer noch recht dünn ist [53].
Um diese Lücke zu schließen, wurde in Kooperation mit dem Institut für Gebäude und Solartechnik / dem Steinbeis Innovationszentrum energie+ (SIZ e+) ein Pilotprojekt initiiert, welches untersuchen soll, ob eher das Curtailment oder Efficiency Behavior zu einem erkennbaren Effekt in dem Energieverbrauch einer Einrichtung führt. Zwei weitere Fragestellungen waren a) zu bestimmen, ob die Einführung der Energiekostenbudgetierung zu einer Änderung des Energiesparverhaltens führte und b) zu evaluieren, ob sich Maßnahmen, die in Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement durchgeführt wurden, im Energieverbrauch einer Einrichtung ablesen lassen.
Die Daten wurden erhoben, indem alle 192 Energienutzungskoordinatoren zu einer Onlineumfrage eingeladen wurden, 33 nahmen teil. Der Fragebogen erhob u.a. wie sehr in einer Einrichtung Curtailment Behavior (z.B. „In unserem Institut / unserer Abteilung werden Thermostatventile runtergedreht, wenn ein Büro über einen längeren Zeitraum nicht genutzt wird.“) und Efficiency Behavior (z.B. „In unserem Institut / unserer Abteilung werden Geräte mit hohem Energieverbrauch durch effizientere Geräte ausgetauscht.) wahrnehmen. Des Weiteren wurde nach der Einschätzung gefragt, ob die Energiekostenbudgetierung zu einer Verhaltensänderung der Mitarbeiter/innen geführt hat und in den letzten zwei Jahren (in Kooperation mit dem Gebäudemanagement) bauliche Maßnahmen mit dem Ziel zur Energieeinsparung umgesetzt wurden.
Erste, vorläufige Ergebnisse zeigen, dass diejenigen Energienutzungskoordinatoren, die einschätzen, dass die Einführung der Energiekostenbudgetierung einen Effekt gehabt hatte, auch mehr Curtailment (r = .43, p = .02) und Efficiency (r = .51, p = .01) Behavior in ihren Einrichtungen wahrnehmen. Ein signifikanter Effekt des Curtailment oder Efficiency Verhaltens auf den Verbrauch der Gebäude (im Vergleich zum Vorjahr), in denen sich die Einrichtungen befinden, konnte jedoch nicht gefunden werden. Ebenso haben weder die Einführung der Energiekostenbudgetierung, noch eine Kooperation mit dem Gebäudemanagement einen messbaren Effekt auf den Energieverbrauch der Gebäude. Das Ausbleiben von Effekten kann zum Teil durch die kleine Stichprobe (N = 33) erklärt werden. Daher ist weitere, umfangreichere Forschung nötig, damit fundierte Aussagen getroffen werden können, ob der Fokus eher daraufgelegt werden sollte, energieeffiziente Geräte anzuschaffen oder die Mitarbeitenden für energiesparendes Verhalten zu motivieren.

7.4 Städtebauliche Entwicklung (ISE)

Die Arbeitspakete des Institutes für Städtebau und Entwurfsmethodik umfassen im Wesentlichen die fortlaufende Kommunikation mit Beteiligten der Universität, die Entwicklung, Erprobung und Anwendung eines Kriterienkatalogs zur Beschreibung eines Campus-Benchmarks für unterschiedliche (Bau-) Maßnahmen, die Weiterentwicklung der untersuchten Gebäude in Szenarien und abschließend die Übertragung dieser Erkenntnisse in einen überarbeiteten Masterplan zur Campusentwicklung der TU Braunschweig.
Als Ausgangspunkt dient dabei in vielerlei Hinsicht das Forschungsprojekt „EnEff Campus blueMap: TU Braunschweig“ (EnEff I). Hier wurden in den Arbeitspaketen des ISE die stadträumlichen Grundlagen für die im weiteren vorgeschlagenen Szenarien ermittelt. Die daraus gefolgerten Erkenntnisse, wie z.B. der adaptive Masterplan oder die Potential- und Defizitanalyse der einzelnen Campus, werden jetzt wieder aufgegriffen.

Der Abstimmungsprozess innerhalb der TU Braunschweig konnte durch die Bandbreite der formulierten Szenarien sofort und auch kontrovers begonnen werden. Auch wenn in den Zeitplänen eine bestimmte Laufzeit für dieses Teil-Arbeitspaket angegeben ist; so ist der Austausch mit den vielfältigen Beteiligten und Interessenvertretern an der TU Braunschweig doch ein fortwährender Prozess, welcher sich über die ganze Projektlaufzeit streckte. Es ist unabdingbar die unterschiedlichen, teils unvorhersehbaren, Ereignisse und Planungen laufend in die Konzeption des Masterplans zu übernehmen.
Bei der Entwicklung des Kriterienkatalogs zur Bewertung städtebaulicher Synergien im Quartier, bzw. auf den Campus konnten wir auf die Arbeit des FP EnEff I aufbauen. Ziel ist es, den Entwicklungsspielraum einer jeden zukünftigen Campus-Planung so weit wie möglich zu fassen und trotzdem den urbanen Prioritäten eines jeden Campus (und Quartiers) gerecht zu werden. Mit dem Kriterienkatalog und der dazugehörigen – beispielhaften – Projektsammlung bieten wir ein entsprechendes Werkzeug an. Darüber hinaus wollen wir auch einen Beitrag zur dringend benötigten Diskussion zur grundlegende Bewertung und Einordnung von Architektur (hier in urbanem Kontext) leisten. Alle bisherigen Verfahren (siehe 7.4.2) sind aus unterschiedlichen Gründen unzureichend oder gehen von einem anderen Bewertungsmaßstab aus. Vor dem Hintergrund einer einerseits fortschreitenden Verstädterung und der Erkenntnis, dass Lebensqualität ein zunehmender Standortfaktor wird [79], sollte es uns ein gesellschaftliches Anliegen sein, Gelegenheiten, für eine qualifizierte Diskussion über den Beitrag von einzelnen Gebäuden als Stadtbaustein zur urbanen Lebensqualität, zu bieten.

7.4.1 Abstimmung mit TU Braunschweig

Das Forschungsvorhaben und die damit verbundenen Planungen wurden uniintern aber auch innerhalb der Stadt Braunschweig über unterschiedliche Medien vorgestellt und präsentiert. Dazu zählen Artikel in der Braunschweiger Zeitung, verschiedene Projektvorträge z.B. in der Baukommission der TU, der Raumkommission der FK3, aber auch Beiträge im Rahmen der „DENK DEINE STADT“ Veranstaltungen. Auch ein Beitrag im Newsletter der TU Braunschweig sorgt für eine möglichst breite Artikulation des Forschungsprojektes und im Besonderen für die Herausforderung der baulichen Formulierung der Hochschulentwicklung.

So konnte, durch die intensive Kommunikationsarbeit Richtung Stadt und Universität Braunschweig inzwischen eine verbindliche Kooperation zwischen der Stadt Braunschweig (Stadtplanungsamt) und dem der TU Braunschweig (Präsidium) zur gemeinsamen Entwicklung des Campus Nord vermittelt werden. Hier bietet sich, ganz im Sinne der Vorhabenbeschreibung, die Chance eine städtebauliche Umsetzung schon von Beginn an als Forschungsprojekt zu gestalten, entsprechend zu begleiten und zu monitorisieren (siehe Campus Nord 0). In regelmäßigen Arbeitstreffen widmet sich diese Projektgruppe seit 2017 der Umsetzung eines Reallabors zur Untersuchung urbaner Transformationsprozesse auf dem Campus Nord. Das Projekt konnte erfolgreich im ISEK der Stadt Braunschweig verankert werden.

Für neue Planungen an der TU Braunschweig wird der – vom ISE im Rahmen des EnEff I Projektes erarbeitete – Masterplan immer wieder zu Rate gezogen. Dies lässt sich unter anderem an dem vorgesehenen Standort des Ersatzneubaus des Pharmaziezentrums erkennen. Für andere Projekte kann das ISE das Gebäudemanagement durch konkrete Empfehlungen unterstützen. Dies war unter anderem in der Diskussion zwischen der TU und der Stadt um die Positionierung des geplanten KiTa-Neubaus auf dem Campus Nord der Fall. In wieder anderen Fällen kann das ISE, bzw. Mitarbeiter des Institutes, z.B. als stimmberechtigtes Mitglied der Raumkommission der Fakultät 3, auf vorliegende Überlegungen verweisen und so einen synergetischen und unterstützenden Beitrag zur Entwicklung der Fakultät leisten (siehe Campus Beethovenstraße).

7.4.1.1 Campus Beethovenstraße (BAUM)

Das Department Bauen und Umwelt der Fakultät 3 umfasst - neben anderen - die Studiengänge Bauingenieurwesen und Umweltingenieurwesen. Die entsprechenden Institute, Labore, Seminar- und Hörsäle sind sowohl auf dem Zentralcampus, als auch auf dem Campus Beethovenstraße zu finden (vgl. BREDERLAU et al. 2015 S.56-57) [69]. Auf letzterem befinden sich insbesondere die Forschungsflächen und -hallen. Es ist der erklärte Wunsch des Departments Bauen und Umwelt eine räumliche Zusammenlegung der unterschiedlichen Einrichtungen zu erreichen. Einerseits um einen spürbaren Identifikationsort auf dem Campus und in der Stadt zu artikulieren, aber eben auch, um unnötige Wege und Energieverbräuche zu minimieren.
Ausgehend von Entwicklungsüberlegungen des Forschungsprojektes „EnEff Campus blueMap: TU Braunschweig“ konnte das Team des Institutes für Städtebau und Entwurfsmethodik (ISE) diesen Prozess seit 2016 unterstützen und begleiten. Hierfür wurden verschiedene Einwirkungsmöglichkeiten aufgezeigt (siehe Abbildung 101) und nach Rücksprache mit Beteiligten des Departments laufend überarbeitet. Zusammen mit einer am Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb (IBB) entstandenen Masterarbeit (Zech, Robert, 2018) bilden die Szenarien und Planungen des ISE die Grundlagen für den im Januar 2019 dem Präsidium der TU Braunschweig vorgestellten Masterplan „Zentrum für Bauen und Umwelt“ (BAUM).
Ziel ist es, bei der Entwicklung des BAUM-Campus auf die Defizitanalyse aus „EnEff Campus blueMap: TU Braunschweig“ aufzubauen und die Kriterien des Campus-Benchmarks (siehe 7.4.2) schon frühzeitig in die Konzeptions- und Planungsphase einzubeziehen. So kann, trotz der vielfältigen Herausforderungen des Campus Beethovenstraße, eine urbane Campusatmosphäre sichergestellt werden.

Abbildung 101 Entwicklung der Masterplanungen Campus Beethovenstraße 2014/16/18 [ISE]

7.4.1.2 Campus Nord (CLC)

Die Stadt Braunschweig und die Technische Universität Braunschweig haben eine gemeinsame Vision formuliert: ein offener Wissenschaftsstandort, der Forschung und Bildung zugänglich macht, nachhaltigen und experimentellen Wohnraum bietet und eine neue Denkkultur unterstützt. Der jetzige Campus Nord soll in Kooperation zwischen der Stadt und der Universität zu einem Reallabor mit Modellcharakter entwickelt werden. Der neue CoLiving Campus soll Wohnen und Arbeiten, Bildung und Forschung, Kultur und Versorgung in einem gemischten urbanen Quartier vereinen und Studierende sowie andere Bürger*innen zum Mitwirken einladen. Dabei soll erprobt werden, wie eine Verzahnung von Stadt und dem CoLiving Campus funktionieren kann.

Abbildung 102 Campus Nord als Reallabor [ISE]

Das Projekt CoLiving Campus ist als ganzheitlicher und nachhaltiger Prozess der Weiterentwicklung des Wissenschaftsstandortes Braunschweig zu verstehen, der die städtebauliche Entwicklung der TU-Standorte mit dem städtischen partizipativen Format „Denk Deine Stadt“ verzahnt. Die Kooperation der Stadt Braunschweig und der TU Braunschweig verbindet auf diesem Wege aktuelle Ansätze der Forschungsinstitute mit den Zukunftsfragen der Stadt.

Die Zusammenarbeit von Stadt und TU soll einen kreativen Prozess initiieren, der auf der Grundlage der Neukonzeption des Quartiers den Campus Nord als ein zielgerichtetes Experimentierfeld behandelt. Mittels der Methode des Reallabors soll ein lebenswertes Quartier mit der Stadt, der TU, den lokalen Akteuren und den zukünftigen Bewohner*innen entwickelt werden. Gemeinsam sollen innovative Ansätze zur Entwicklung eines urbanen Quartiers eruiert und wissenschaftlich begleitet, reflektiert und ausgewertet werden. Das begehbare Wissenschaftsquartier soll lokale Energien nutzen, städtische Projekte weiterdenken und diese mit aktuellen Fragen der Wissenschaft an der TU Braunschweig sowie der in der Stadt Braunschweig ansässigen Forschungsinstitutionen und ihren Schwerpunkten verbinden.

Die Zusammenarbeit der Stadt und der TU im Rahmen des Projektes CoLiving Campus soll praktische Ziele der Stadtentwicklung mit aktuellen Forschungsfragen der TU mit dem Schwerpunkt “Stadt der Zukunft” verbinden. Dadurch wird ein experimenteller, kreativer Prozess ermöglicht, um innovative Lösungen für ein urbanes Quartier zum Wohnen und Arbeiten, Forschen und Lernen für Studierende und andere vielfältige Bevölkerungsgruppen in der Umsetzung zu erproben.

7.4.1.2.1 Projektbeteiligte

Ein Projektgremium mit Teilnehmern der Stadt Braunschweig und der TU Braunschweig wurde gegründet, um die Projektentwicklung sowie die Umsetzung zu begleiten und zu steuern.

Ein vergleichbarer Ansatz für eine Zusammenarbeit der Stadt mit Wohnungsunternehmen und anderen Akteuren in Braunschweig wurde bereits im Rahmen der Aktivierung des Stadtteils Weststadt erprobt. Der gemeinnützige Verein Stadtteilentwicklung Weststadt e.V. wurde 2008 von Vertreter*innen der Stadt Braunschweig, der Baugenossenschaft “Wiederaufbau” eG und der Nibelungen-Wohnbau-GmbH gegründet. Der Verein betreibt Nachbarschaftstreffpunkte und vernetzt sich mit lokalen Akteuren, wobei die Kosten und der Aufwand von allen drei Partnerorganisationen getragen werden.

Das Projektgremium für CoLiving Campus besteht derzeit aus:

Vertreter*innen der Stadt Braunschweig:
- Dezernat für Kultur und Wissenschaft, Stadt Braunschweig
- Bau- und Umweltschutzdezernat, Stadt Braunschweig

Vertreter*innen der TU Braunschweig:

- Präsidium TU Braunschweig
- Geschäftsbereich 3 - Gebäudemanagement, TU Braunschweig
- Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik, TU Braunschweig

7.4.1.2.2 Flächen und Entwicklungspotenzial

Der heute sogenannte Campus Nord ist räumlich durch den Bienroder Weg im Westen, die Ottenroder Straße im Norden und die Beethovenstraße im Süden und im Osten definiert. Die ursprüngliche Anlage wurde 1935 als Siegfried-Kaserne I errichtet und weist noch heute die dafür typischen räumlichen Merkmale auf. Knapp vier Kilometer vom Hauptbahnhof und drei Kilometer vom Stadtzentrum entfernt, befindet sich der Campus in attraktiver Lage: an das derzeit zu entwickelnde Naherholungsgebiet Ringgleis angrenzend, in Nachbarschaft diverser Forschungseinrichtungen. Der Campus Nord bringt somit die besten Voraussetzungen für die Weiterentwicklung zu einem Mischquartier mit. Nach verschiedenen militärischen und polizeilichen Nutzungen wurde der Campus im Jahr 2000 an die Universität übergeben und beherbergt nach umfangreichen Sanierungen und punktuellen Neubauten heute hauptsächlich die Fakultät 6 der Geistes- und Erziehungswissenschaften. Das derzeitige Erscheinungsbild ist geprägt von den Baumaßnahmen im Jahr 2000.

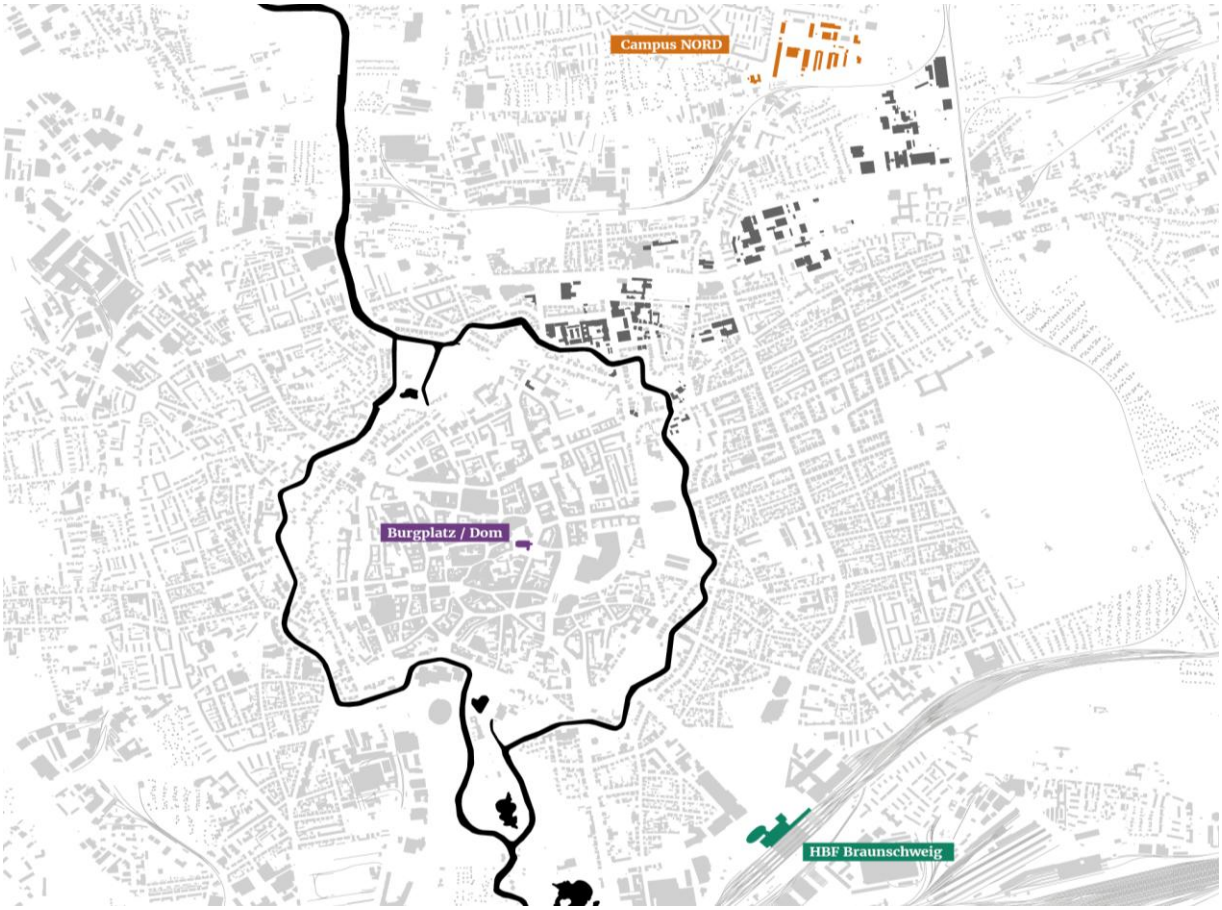


Abbildung 103 Lage Campus Nord [ISE]

Im Süden des Campus Nord befinden sich Grundstücke in universitärem oder privatem Besitz, die zum Teil einer temporären Nutzung zugeführt sind. Die Stadt Braunschweig ist bestrebt, diese Grundstücke mit Hilfe von planungsrechtlichen Werkzeugen, zum Beispiel dem Vorkaufsrecht, zu arrondieren. Das städtebauliche Potenzial soll hier durch die Stadt Braunschweig und die TU Braunschweig gemeinsam mit weiteren Akteuren aus lokalen Initiativen und Verbänden weiterentwickelt werden. Daran anschließend befinden sich die Gleisanlagen des ehemaligen Braunschweiger Ringgleises, welches in absehbarer Zeit als sekundäres Erschließungssystem der Stadt weiter ausgebaut werden soll. Östlich des Campus Nord und nördlich des Campus Beethovenstraße schließt eine Sportanlage mit der ehemaligen BGS-Sporthalle an, die sich im Besitz der Stadt befindet. Diese wird von kleinteiligen Grundstücken mit unterschiedlichen Nutzungen und Eigentümer*innen begrenzt, die sich außerdem im Besitz der TU bzw. in Privatbesitz befinden. Auch hier wird eine Zusammenfassung der Grundstücke angestrebt. In dem größeren Betrachtungsgebiet von insgesamt circa 23 ha (inkl. Hauptentwicklungsgebiet) besteht Entwicklungspotenzial für einzelne Flächen durch eine mögliche Zusammenführung einzelner Grundstücke zum Beispiel durch Zukauf oder Tausch. Das Kernentwicklungsgebiet bestehend aus zwei zusammenhängenden Flächen im universitären und städtischen Besitz beläuft sich auf circa 4 ha.

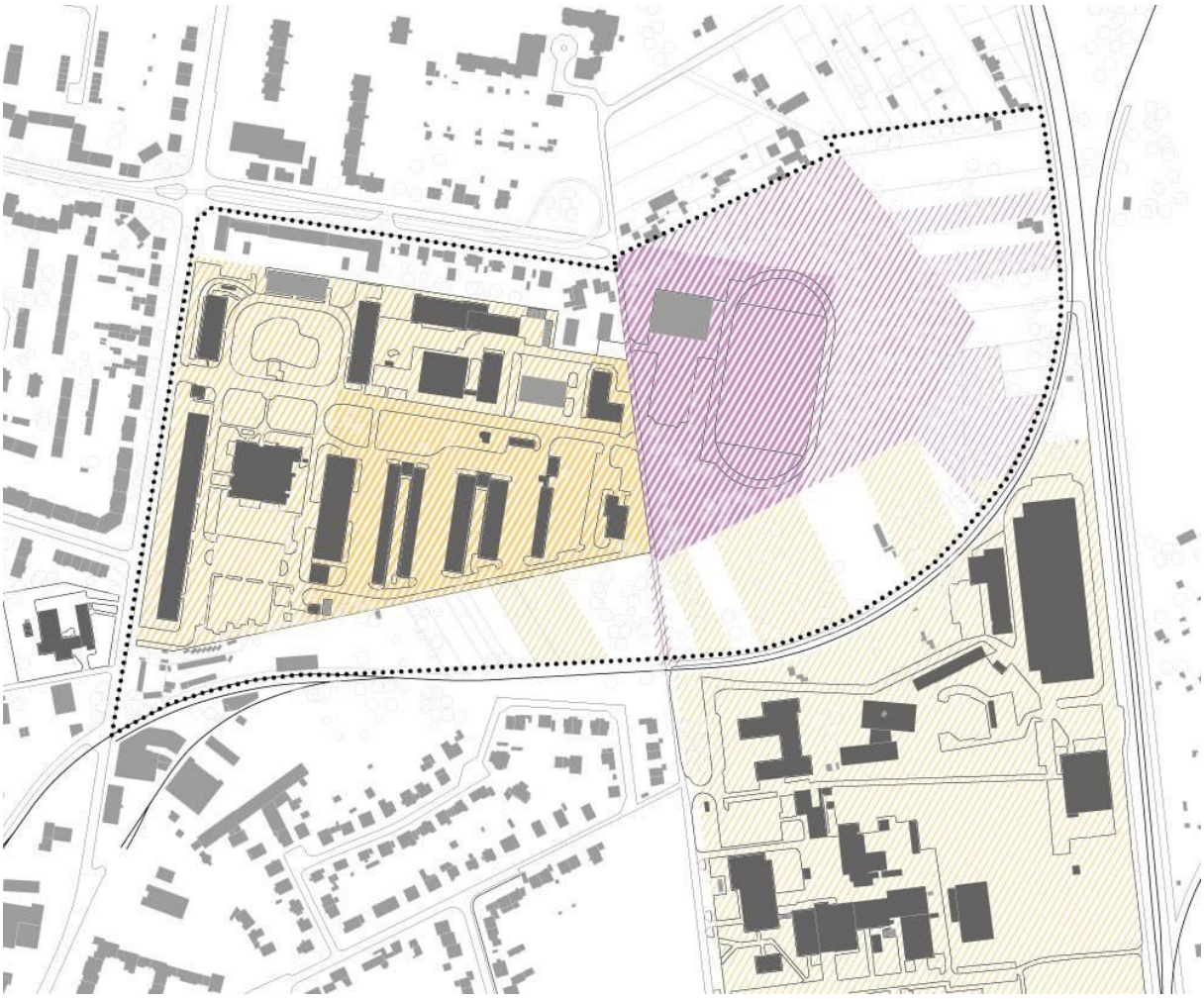


Abbildung 104 Liegenschaftsverteilung um den Campus Nord (gelb=TU / lila=Stadt BS) [ISE]

Vergleichbare Modellprojekte mit Schwerpunkt auf Mischnutzungen sowie innovative Arbeits- und Wohnformen sind zum Beispiel in Berlin der Holzmarkt mit circa 1,8 ha, das Dragoner Areal mit circa 4,7 ha oder das VOLLGUT mit 17 ha Gesamtfläche (siehe Abbildung 105). Der CoLiving Campus soll als Braunschweiger Pilotprojekt Ansätze für eine kollaborative, nachhaltige und experimentelle Stadtentwicklung auf Quartiersebene erproben und in einem universitären Kontext praktisch umgesetzt sowie wissenschaftlich begleitet werden.

Abbildung 105 Vollgut-Areal [Hütten & Paläste Architekten]

7.4.1.2.3 Ziele und Entwicklungsprinzipien

Braunschweigs Fokus als Stadt der Wissenschaft liegt auf der Forschung und Entwicklung.
Durch die kooperative Quartiersentwicklung mit Modellcharakter wird der Zusammenhalt von Stadt, Universität und anderer lokaler Akteure weiter gestärkt. Mit dem Reallabor Campus Nord wird dieses Vorhaben mit spezifischen Fragestellungen auf Quartiersebene im Stadtraum erlebbar.

Ein zielgerichteter experimenteller Entwicklungsprozess soll Interessen der Stadt, der TU und weiterer Akteure berücksichtigen. Steigender Bedarf an zukunftsfähigen Wohnen im gesamtstädtischen Kontext sowie wachsende Nachfrage an zugänglichem Wohn- und Arbeitsraum für Studierende sowie an universitätsnahen Einrichtungen am Campus der TU stehen im Vordergrund. Hohe Lebensqualität, Flexibilität und Anpassung der Architektur an vielfäl-

tige Lebensentwürfe, Mischnutzungen und effiziente Mobilitätskonzepte sind außerdem wichtige Themen der neuen Quartiersentwicklung CoLiving Campus.

In diesem Sinne haben die Stadt Braunschweig und die TU Braunschweig folgende gemeinsame Ziele ausgearbeitet:

- Kooperative Entwicklung mit lokalen Akteuren und Initiativen für Synergieeffekte vor Ort
- Langfristiger Transformationsprozess im Rahmen eines adaptiven Masterplans
- Wissenschaftliche Begleitung sowie Möglichkeiten für eine kritische Reflektion und Anpassung
- Offenes Quartier hinsichtlich der Zugänglichkeit und Sichtbarkeit
- 24-Stunden Campus für eine attraktive und effiziente Nutzung eines urbanen Quartiers
- Vielfältige Bau- und Wohnformen für eine heterogene Nutzer*innenmischung
- Nährboden für Innovation durch Möglichkeitsräume für Start-Ups und Studierendeninitiativen
- Zeitgemäßer Einsatz von Ressourcen beim Bauen
- Kultur - Leben - Infrastruktur

Zur Erreichung dieser Ziele und, um den Innovationscharakter des Modellvorhabens zu konkretisieren und Qualitäten messbar zu machen, wurden folgende Entwicklungsprinzipien formuliert:

- Mischung von Bildung, Forschung, Arbeit, Wohnen, Versorgung, Produktion und Kultur in einem urbanen Quartier
- Kollaboration verschiedener interdisziplinärer Akteure bei der Konzeptentwicklung, Realisierung und in der weiteren Entwicklung
- Prozessorientierung für eine Anpassungsfähigkeit, die eine frühzeitige und dauerhafte Mitwirkung der Nutzer*innen zulässt
- Nachhaltigkeit im Sinne einer sozialen, ökologischen und ökonomischen Verträglichkeit und Resilienz
- Gemeinwohlorientierung für kurzfristige sowie langfristige Bezahlbarkeit und bedarfsorientierte Planung
- Inklusion verschiedener Bevölkerungsgruppen durch Möglichkeiten für Teilhabe und Begegnung

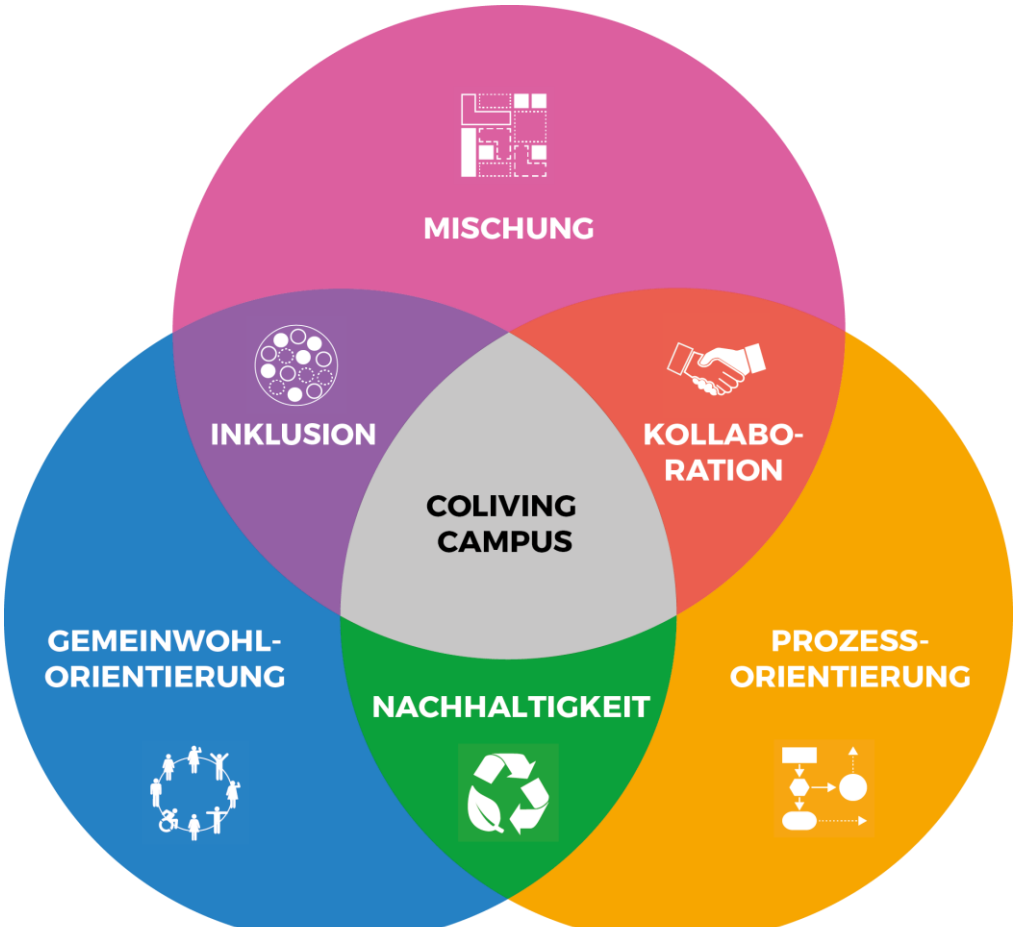


Abbildung 106 Entwicklungsprinzipien für den CoLiving Campus [ISE]

7.4.1.2.4 Methode und wissenschaftliche Begleitung

REALLABOR

Beispielgebend für den CoLiving Campus sind die Reallabore aus Baden-Württemberg, wo das Wissenschaftsministerium seit 2015 ein neues Modell für die Kooperation von Wissenschaft und Gesellschaft fördert. In sogenannten Reallaboren werden Wissenschaftler*innen in reale Veränderungsprozesse mit einbezogen und Praktiker*innen aus Kommunen, Sozial- und Umweltverbänden oder Unternehmen wirken bei den Forschungsprozessen mit. In einem ersten Förderprogramm wurden sieben Reallabore durch eine unabhängige Kommission für eine Förderung ausgewählt, zum Beispiel das “Reallabor - Space Sharing. Nutzungsintensivierung des Gebäudebestands durch Mehrfachnutzung” der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (ABK Stuttgart).[55]

Unter Reallaboren lassen sich angelegte Kontexte fassen, die dazu dienen, das Wissen über nachhaltigkeitsorientierte Transformationsprozesse zu verbessern und solche konkret anzustoßen. Ein Reallabor bezeichnet einen gesellschaftlichen Kontext, in dem Forscherinnen und Forscher ‚Realexperimente' durchführen, um soziale Dynamiken zu beobachten und Konsequenzen für weitere Prozesse zu ziehen. Der naturwissenschaftliche Labor-Begriff wird in die Analyse gesellschaftlicher und politischer Prozesse übertragen und steht in enger Verbindung zu Konzepten der Feld- und Aktionsforschung.[56] Als Methode der Quartiersentwicklung wird das Konzept des Reallabors für den CoLiving Campus angewendet. Die Entwicklung wird wissenschaftlich begleitet, ausgewertet und nachjustiert.

TRANSFORMATIONSPROZESS

Für die Transformation des Campus-Areals wird ein Planungsverfahren, das sogenannte "CoLiving Campus Modell" (Arbeitstitel), entwickelt. Planung und Entwicklung kurz- und langfristiger Transformationen werden partizipativ ausgehandelt und wissenschaftlich begleitet. Partizipative Prozesse werden von einer externen Agentur frühzeitig angestoßen und dokumentiert. Wissenschaftliche Begleitung wird durch die TU Braunschweig durchgeführt. Langfristige Partizipation der Nutzer*innen soll durch dauerhafte Möglichkeiten für Teilhabe und Selbstorganisation unterstützt werden.

Der CoLiving Campus wird in mehreren Entwicklungsphasen gestaltet. Temporäre Nutzungen sollen in den ersten Entwicklungsphasen das Quartier aktivieren und verschiedene Ansätze praktisch testen. Dabei werden Anwohner, bestehende Initiativen wie der Nachbarschaftsgarten "urbane BOTNIK", die Bauwagensiedlung und studentische Projekte eingeladen, Impulse für die Entwicklung zu geben und das Quartier mitzugestalten. Die Entstehung weiterer Projekte und Initiativen vor Ort wird ausdrücklich erwünscht und beispielsweise durch räumliche Angebote unterstützt. In weiteren Entwicklungsphasen sollen bauliche und strukturelle Veränderungen im Quartier in einer dynamischen Mischung von temporären und dauerhaften Nutzungen erfolgen. In diesem Prozess sollen die ausformulierten Ziele und Entwicklungsprinzipien (Siehe Abbildung 106) als Leitlinie, und entstehende Impulse vor Ort als Motor dienen.

EIGENTUMSFORMEN

Für eine langfristige Gemeinwohlorientierung und nachhaltige Zugänglichkeit sowie Flexibilität sollen entsprechende Eigentumsformen eingesetzt werden. Beispielsweise sollen innovative Ansätze wie Gemeinschaftseigentum, Erbpachtverträge, Trennung von Boden und Immobilien in Betracht gezogen werden.

ADAPTIVER MASTERPLAN

Die räumliche Umsetzung des Projektes wird in einem adaptiven Masterplan konzipiert und in diesem Rahmen gesteuert. Der adaptive Masterplan soll temporäre, flexible Nutzungen stimulieren und zur Anpassungsfähigkeit an verschiedene Lebensphasen und -entwürfe für eine zukunftsfähige Gestaltung der Außen- und Innenräume beitragen. Das Ziel ist es, die nötige Struktur zu geben und gleichzeitig den Spielraum für flexible Adaptionen zu bieten. In

diesem Sinne sollen beispielsweise experimentelle Wohnformen, Mischnutzungen und Sharing-Konzepte explizit gefördert werden. Die Umsetzung soll schrittweise erfolgen, mehrere Entwicklungsphasen und -szenarien zulassen und Raum für Lerneffekte und Anpassungen geben.

Die Struktur des neuen urbanen Quartiers sowie räumliche und strukturelle Verhältnisse verschiedener Nutzungen wie Wohnen, Arbeiten, Gewerbe, Forschung und Bildung sowie Kultur wird definiert. Darüber hinaus sollen experimentelle Räume geplant werden, die für temporäre oder gemeinschaftliche Nutzungen zur Verfügung stehen.[6] Langfristige Anpassungsfähigkeit soll über geplante Flexibilität stimuliert und baulich umgesetzt werden. In diesem Kontext stellen sich folgende Fragen:

- Wie kann eine partizipative, kollaborative Transformation gemeinsam initiiert und stimuliert werden?
- Wie kann ein Reallabor, in dem Experimente gewagt und Fehler zugelassen werden, in einem Quartier verwirklicht werden? Wie können Fehler in einem Quartier ausgewertet werden und wie können diese zu einem Lernprozess beitragen?
- Wie können Nutzer*innen kurz- und langfristig in einem Entwicklungsprozess eines Quartiers involviert werden?
- Wie viel Flexibilität und wie viele temporäre Nutzungen sind für eine zukunftsfähige Planung möglich und notwendig? Wie kann dies über bauliche und andere Maßnahmen unterstützt werden? Wie kann dennoch der Anspruch der Bewohnerinnen und Bewohner auf Kontinuität berücksichtigt werden?
- Wie viel Mischung ist in einem urbanen Quartier möglich und notwendig?
- Wie viel Dichte fördert Urbanität, ohne die Lebensqualität zu beeinträchtigen? Wie können in diesem Kontext die aktuellen (Bau-)richtlinien hinterfragt werden?
- Wie können Selbstorganisation sowie Sharing und Tausch-Angebote auf der Quartiersebene zur Nachhaltigkeit, Gemeinschaftlichkeit und Komfort beitragen?
- Wie kann eine Auswertung der praktischen Umsetzung der Entwicklungsprinzipien gestaltet und durchgeführt werden?

7.4.1.2.5Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit

Der CoLiving Campus wird als Modellprojekt gestaltet und kommuniziert. Ein Austausch mit der Öffentlichkeit soll angeregt und gefördert werden, die Entwicklung und Umsetzung des Projektes wird dokumentiert und veröffentlicht. Ein flexibler, transparent gestalteter Entwicklungsprozess wird zur Diskussion gestellt, die erprobten Methoden und Erfahrungen werden in Publikationen und anderen Medien bekannt gegeben. Der angestoßene und begleitende Kommunikationsprozess soll auf eine fortwährende Nachjustierung des Status quo angelegt werden.

[6] Dieser Ansatz wird bereits in Modellprojekten erprobt, wie zum Beispiel auf der Projektebene von der Spreefeld Genossenschaft in Berlin (Optionsräume) oder auf der Nachbarschaftsebene von der Genossenschaft mehr als wohnen am Hunziker Areal in Zürich (Allmendräume) [61]

ISEK / DENK DEINE STADT

Aufbauend auf den Ergebnissen des Stadtdialogs „Denk Deine Stadt“ entstand das integrierte Stadtentwicklungskonzept (ISEK) Braunschweigs. Zu fünf unterschiedlichen Leitzielen wurden konkrete Projekte und Maßnahmenvorschläge erarbeitet. Im Arbeitsfeld: „Kultur, freie Szene und Wissenschaft“ wurde der CoLiving Campus als eines von insgesamt 26 Rahmenprojekten platziert. In einem zielgerichteten experimentellen Entwicklungsprozess sollen zukünftige Formen des Arbeitens und Wohnens unter Berücksichtigung von ökologischen, sozialen, gesundheitlichen, baulichen und technologischen Aspekten erprobt werden. Hohe Lebensqualität, Flexibilität und Anpassung der Architektur an vielfältige Lebensentwürfe, Mischnutzungen und effiziente Mobilitätskonzepte sind weitere wichtige Themen der neuen Quartiersentwicklung CoLiving Campus. Außerdem soll die kooperative Quartiersentwicklung mit Modellcharakter den Zusammenhalt von Stadt, Universität und anderen lokalen Akteuren stärken und Synergieeffekte hervorbringen. [59]

Abbildung 107 ISEK Braunschweig 2030 [Stadt Braunschweig/urbanista/ISE]

7.4.1.2.6JOHANNES-GÖDERITZ-PREIS 2018 (Einbindung in die Lehre)

Jedes Jahr vergibt die Johannes-Göderitz-Stiftung Preise zur Förderung studentischer Arbeiten im Bereich Städtebau. Im Jahr 2018 trägt der Wettbewerb um den Johannes-Göderitz-Preis den Titel „CoLiving Campus“. Neben Studierenden der Technischen Universität Braunschweig, nahmen außerdem Studierende der Leibniz Universität Hannover, der Technischen Universität Dresden, der HafenCity Universität Hamburg und der Technischen Universität Kaiserslautern an dem Wettbewerb teil. Das Projekt CoLiving Campus wurde im Rahmen des städtebaulichen Wettbewerbs als Wettbewerbsaufgabe für den Johannes-Göderitz-Preis ausgeschrieben und bearbeitet. Für die über 100 Studierenden bestand im Folgenden die Aufgabe eine zeitgemäße Antwort auf die Frage nach einem adaptiven Masterplan, der einerseits die notwendigen Strukturen und gleichzeitig Spielraum für Experimente und Lerneffekte anbietet, zu finden. Darüber hinaus ist eine möglichst hohe Beteiligung der Anrainer sicherzustellen, sowie eine Idee für den partizipatorischen Prozess zu formulieren.

Ein Symposium zum Auftakt des Wettbewerbs konnte dank hochkarätiger Experten (u.a. Reiner Nagel von der Bundesstiftung Baukultur) Beispiele, Möglichkeiten aber auch Risiken einer kooperativen Entwicklung eines Wissenschaftsquartiers erörtern.

Die Jury, besetzt mit Vertretern der Stadt, der TU Braunschweig, externen Wissenschaftlern / Gutachtern und Stiftungsmitgliedern, verlieh am 20.11.2018 drei erste, sowie einen zweiten und einen dritten Preis. Die anschließende Ausstellung auf dem Gelände des Campus Nord bot einer breiten Öffentlichkeit Gelegenheit, alle eingereichten Wettbewerbsbeiträge zu begutachten. Alle Entwürfe, flankierende Seminararbeiten und insbesondere die Symposiumsbeiträge wurden in einer Veröffentlichung zusammengefasst. Diese wurde von der Matthäi-Stiftung unterstützt und ist auch online verfügbar. [60]

7.4.2 Kriterienkatalog

Die Erarbeitung des „Kriterienkatalogs zur Bewertung des Synergiepotentials auf Quartiers- bzw. Campusebene“ knüpft direkt an den ersten Teil des Forschungsprojekts „EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig“ an. Nach einer Potential- und Defizitanalyse konnten Schwerpunktthemen, also Handlungsfelder von erhöhter Priorität, für jeden Campus definiert werden. In den drei angedachten Szenarien konnte ein übergreifender Maßnahmenkatalog identifiziert werden. So war es möglich, trotz der Bandbreite der Szenarien, eine Interoperabilität dieser sicherzustellen. Für die Ausarbeitung des Adaptiven Masterplans war und ist es nun möglich für jeden Campus ein anderes Szenario zu Grunde zu legen und so eine Vielzahl von feiner definierten Entwicklungsszenarien abzubilden. Erst so ist eine glaubhafte Anpassbarkeit des Masterplans an zukünftige Entwicklungen möglich.

Doch bei aller Resilienz des adaptiven Masterplans gegenüber Änderungen der universitären Ausrichtung und Entwicklung, hat dieser doch systemimmanente Grenzen. So ist die Anzahl der möglichen Detailszenarien auf $4^3 = 64$ (Anzahlt Campus ^ Anzahl der Basisszenarien) beschränkt; wobei auch hier schon nicht alle theoretisch möglichen Szenarien umsetzbar erscheinen.

Der Kriterienkatalog soll für die zukünftige Campusentwicklung der TU Braunschweig ein Planungswerkzeug zur Verfügung stellen, welches einerseits ein Höchstmaß baulicher Freiheit, zur adäquaten Reaktion auf sich zwangsläufig ändernde Rahmenbedingungen, aber andererseits ein Mindestmaß urbaner Campusqualitäten sicherstellt. Die Entwicklung des Kriterienkatalogs folgt den Grundüberlegungen des adaptiven Masterplans – die variable Reaktion auf vorhandene Potentiale und Defizite (EnEff I) – und führt diese konsequent fort um eine flexible und urbane Campusentwicklung sowohl bei Neuplanungen als auch bei Sanierungen – möglichst vor jedem Entwicklungshintergrund – zu gewährleisten.

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren steht bereits eine Reihe von Instrumenten zur Verfügung, z.B. BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen), DBNB (Deutsches Nachhaltigkeitszertifikat), NahWoh (Qualitätssiegel Nachhaltiger Wohnungsbau). Diese haben Eines gemeinsam: sie sind relativ aufwendig und sind mit erheblichen Kosten verbunden. So kostet eine DGNB Zertifizierung zwischen 0,50 und 2,00 Euro pro Quadratmeter BGF; mindestens jedoch 6.600,00 Euro (Neubau - Nichtwohngebäude) [61]. Insbesondere in Wettbewerbs- oder Planungsphasen sind diese Bewertungssysteme daher nicht tauglich, um eine vergleichende Aussage zu ermöglichen. Um, im Sinne einer zukunftsfähigen Campus- bzw. Quartiersentwicklung, eine Vergleichsmöglichkeit und Diskussionsgrundlage zu bieten, liegt der Fokus des Kriterienkataloges auf einer übersichtlichen, schnellen und vor allem kostenneutralen Handhabung.
Bestehende Bewertungssysteme sind überwiegend im Rahmen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele erstellt worden. Sie zielen überwiegend auf die Bewertung von Einzelgebäuden und deren Wirkung auf die (globale) Umwelt, wie z.B. Wärmeschutz und Energieeinsparung, ökologische Qualitäten, Materialien, Nutzerkomfort etc. So sind die oben erwähnten Bewertungssysteme überwiegend selbstreflexiv; d.h. sie bewerten überwiegend die Leistung (oder eben die Einsparungen) für die Nutzer, Entwickler oder Besitzer. Dabei werden sie weitestgehend losgelöst vom (urbanen) Kontext betrachtet, was insbesondere in verdichteten Räumen, z.B. einer Universitätsstadt, Fragen nach dem nicht ausgeschöpften bzw. verhinderten Synergiepotential auf Quartiersebene aufwirft. Gerade innerhalb eines Campus, wo die Anzahl der Akteure stark reduziert ist, liegt es nahe die Qualität eines Gebäudes oder einer Einzelmaßnahme nicht nur losgelöst, sondern im Kontext, also synergetisch zu betrachten. Eben dies ist der grundlegende Ansatz und das Unterscheidungsmerkmal des hier entwickelten Kriterienkatalogs; im Vordergrund steht die Wirksamkeit / die Auswirkung auf den städtischen Raum, das Quartier, die Nachbarschaft, den Campus, nicht die eigene Leistungsfähigkeit. So dient der Katalog zur Umsetzung übergeordneter Ziele und kann auf mehreren Ebenen und in verschiedenen Planungsphasen eingesetzt werden. Eine unterschiedliche Wichtung der einzelnen Kriterien macht eine Differenzierung für die unterschiedlichen Campus und Quartiere möglich (siehe Wichtung 7.4.2.7).

Aufgebaut ist der Katalog in sechs verschiedenen Kategorien mit jeweils drei bis fünf Bewertungskriterien. Jedes dieser Kriterien wird mit plus, minus oder null bewertet. Zusammen mit der quartiers- bzw. campusspezifischen Gewichtung der Einzelkriterien lässt sich ein Benchmark in Prozent ermitteln (siehe Anhang Kriterienkatalog). So können Planungen und Gebäude, die sich im räumlichen, sozialen, energetischen, programmatischen und nachhaltigen Sinne positiv auf den Stadtraum als Campus / Quartier auswirken, identifiziert und langfristig zu einer best practice Sammlung ausgebaut werden. Durch die Benchmarks und die gewählte grafische Übersetzung der Bewertungsergebnisse ist es leicht zu erkennen, mit welchen Merkmalen die Projekte einen Mehrwert für den jeweiligen Campus leisten. So deckt der Kriterienkatalog Defizite auf und macht einen eventuellen Handlungsbedarf sichtbar.
Für die Bewertung der einzelnen Kriterien wird auf zwei unterschiedliche Methoden zurückgegriffen. In den meisten Fällen ist eine Checkliste mit einer variablen Anzahl möglicher Punkte angegeben. Ein jeweils angepasster Schlüssel übersetzt die Anzahl der zutreffenden Merkmale. Andere Kriterien sind in einem „wenn-dann“ Abgleich zu beantworten. Dies kommt immer dann zum Tragen, wenn für das eigentliche zu bewertende Kriterium eine Eingangsvoraussetzung abgefragt werden muss.
Im „Kriterienkatalog zur Bewertung des Synergiepotentials auf Quartiers- bzw. Campusebene“ (Anhang) sind die Punkte auf jeweils einer Doppelseite übersichtlich dargestellt. So wird der Katalog auch für Dritte anwendbar und bedarf keiner weiteren Begleitliteratur.
Im Folgenden werden die einzelnen Kategorien Freiraum, Nutzung, Mobilität, Baulich / Räumlich, Energie und Sicherheit vorgestellt.

7.4.2.1 Freiraum

Eine hochwertige Freiraumentwicklung prägt die Lebensqualität in einem Quartier maßgeblich. Während private Grünräume in immer dichter bebauten Städten zunehmend zurückweichen (müssen), wird die Nutzungsintensität der öffentlichen Freiräume erhöht.
Neben umwelttechnischen Aspekten, wie der Verbesserung des Mikroklimas durch Grünräume und Biodiversität, bilden Freiräume auch einen Ort für soziale Interaktion / zwischenmenschliche Kontakte, die in einer zu Vereinzelung neigenden Gesellschaft unabdingbar sind.[63]

Abbildung 108 Freiraum – Aufenthaltsangebote (Kriterienkatalog) [ISE]

Aufenthaltsangebote sollen den Freiraum attraktivieren und zum Verweilen einladen. Dazu zählen unter anderem Sitzmöglichkeiten zum Pausieren, aber auch Angebote die dazu auffordern sich zu bewegen; Sport- und Spielangebote sind wichtiger Bestandteil von qualitätsvollen Aufenthaltsräumen im Freien (vgl. Gehl 2012, S.162) [64]. Um eine zeitlich unbegrenzte und kostenlose Nutzung zu gewährleisten, müssen die Aufenthaltsangebote frei erreichbar, also unabhängig sein.

Öffentliche Gewässer sollen allen Stadtbewohnern zugänglich sein, die Uferkante soll belebt und nutzbar werden. Der größte Teil des in Braunschweig an die Oker angrenzenden Freiraums liegt in privater Hand. Ziel ist, die öffentlich zugänglichen Bereiche qualitativ hochwertig und attraktiv zu gestalten und somit die wenigen wassernahen Freiräume zu aktivieren.

Die Anbindung an naturnahe, sekundäre Erschließungssystem wie das Braunschweiger Ringgleis hilft ein Gebäude oder Quartier autofrei zu erschließen und fördert den Fahrrad- und Fußverkehr. Die Neugestaltung des Braunschweiger Ringgleises bietet einen naturumgebenen, fahrradfreundlichen, sekundären Erschließungsweg. Verschiedene „Stationen“ mit qualitätsvollen Aufenthaltsangeboten attraktivieren die Nutzung des ehemaligen Ringgleises.

Angelegte Grünflächen in Städten verbessern das Makro- und Mikroklima. Schadstoffe in der Luft werden reduziert, Boden und Vegetation der Grünräume heizen sich weniger stark auf als bebaute Flächen und sorgen somit dafür, dass städtische Hitzeinseln gemindert werden. Eine hohe Biodiversität fördert den natürlichen Austausch von Flora und Fauna. Durch heimische Pflanzen kann zusätzlich der Pflegeaufwand gering gehalten werden.

Bei der Planung von neuen Maßnahmen soll darauf geachtet werden, den Versiegelungsgrad möglichst gering zu halten. Die zunehmende Verstädterung führt zu steigender Versiegelung der Oberflächen. Zum einen sorgen die befestigten Oberflächen dafür, dass das Stadtklima aufgeheizt wird, zum anderen ist das natürliche Reinigungssystem des Grundwassers durch die fehlenden Versickerungsmöglichkeiten nicht mehr gegeben. Zusätzlich wird das Speichern von Niederschlägen und Nährstoffen zur Versorgung der Pflanzenwelt nicht gesichert.

7.4.2.2 Nutzung

In der aktuellen Stadtentwicklung mit einer zunehmenden Knappheit an bebaubaren Flächen hat die Verzahnung von Campusgeländen mit ihren umgebenen Stadtquartieren im Gegensatz zum Konzept des Campus auf der freien Wiese aus den 70er und 80er Jahren stark an Bedeutung zugenommen. Eine Nutzungsmischung von universitären und städtischen Einrichtungen schafft dabei Schnittstellen zwischen den campusinternen Nutzern und den Bewohnern der Stadt.
Durch ein vielfältiges Nutzungs- und Programmangebot zu unterschiedlichen Tageszeiten, kann durch aktivierte und attraktive Erdgeschosszonen ein beständig hoher Publikumsverkehr für das Quartier generiert werden. Die Nutzungen und Programme der Stadt sollen dabei in den neuen Campus-Gebäuden integriert werden.

Abbildung 109 Nutzung – Kulturangebot (Kriterienkatalog) [ISE]

Um einen belebten und funktionierenden Campus zu gewährleisten soll ein vielfältiges Angebot an Versorgungsmöglichkeiten in fußläufiger Entfernung für die Campus-Internen und für die Bewohner der Stadt zur Verfügung gestellt werden. In die Bewertung fließt auch ein eventuell im Gebäude vorhandenes Angebot zur Versorgung ein. Versorgungseinrichtungen schaffen Treffpunkte und fördern eine soziale Durchmischung. Aufenthaltsmöglichkeiten in und vor solchen Treffpunkten erhöhen wiederum die städtische Qualität. Zur Grundversorgung gehören neben sozialen und medizinischen Einrichtungen auch ein Kultur- und Bildungsangebot, Sport- und Freizeiteinrichtungen sowie Gastronomie, Gewerbe (und Produktion.)

Ausreichend und flexibel nutzbare Arbeitsplätze auf dem Campusgelände sind vorzusehen, um den Austausch von Wissen und Ideen zu fördern. Dabei geht es um die Bereitstellung von zusätzlichen Arbeitsplätzen auch für externe Nutzer – beispielsweise in CoWorking Spaces.
Arbeitsplätze die nicht an einen Fachbereich gebunden sind, sorgen für eine heterogene Nutzung der Gebäude und dadurch für eine Aktivierung von Räumen zu unterschiedlichen Zeiten und mit unterschiedlichem Programm.

Ein vielfältiges öffentliches Kulturangebot auf dem Campusgelände soll den Publikumsverkehr begünstigen und einen belebten Ort schaffen. Dabei ermöglicht der kulturelle Austausch eine Integration des Campus mit dem Stadtraum.
Der Austausch kann dabei auf allen Ebenen geschehen – außen und innen, aber auch personell bis hin zu übergreifenden Projekten. Eine Aktivierung des Gebäudes oder dessen Außenbereichs, stärkt die Aufenthaltsqualität und schafft neue Treffpunkte auf dem Campus (Vgl. Jacobs 1976, S.70)[65].

Zusätzlich zu den Aufenthaltsräumen im Freiraum sollen auch die im Inneren des Gebäudes betrachtet werden. Werden Räume mit Ruhezonen angeboten? Sind diese lediglich für die Nutzer des Gebäudes / Institutes nutzbar, Campus-Intern oder stehen sie sogar für externe Nutzer zur Verfügung.

7.4.2.3 Mobilität

Das Thema der Mobilität im 21. Jahrhundert ist besonders durch einen wachsenden Bedarf gekennzeichnet. Dabei ist der Wunsch nach einem eigenen Auto weiterhin präsent, steht es doch noch immer für Unabhängigkeit, Freiheit, Individualität und Selbstbestimmung. Zusätzlich werden viele Menschen durch äußere Zwänge wie die Verdrängung aus den Städten und mangelnde ÖPNV-Anbindung in den motorisierten Individualverkehr gedrängt. Daraus wiederum folgt ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und eine starke Umweltbelastung. Um dem entgegenzuwirken, muss ein besserer Zugang zu einer Vielzahl von Mobilitätsformen gewährleistet sein sowie PKW-freie und sekundäre Erschließungssystem gestärkt werden.

Abbildung 110 Mobilität – Stellflächen PKW (Kriterienkatalog) [ISE]

Barrierefreiheit ist gerade in der heutigen Zeit des demographischen Wandels und für körperlich eingeschränkte Personen ein unverzichtbarer Aspekt in der Gebäude- und Freiraumplanung, dem im Baurecht Rechnung getragen wird. Zur Integration aller Nutzergruppen sind neben Rampen und Aufzügen vor allem direkte und intuitive Wegeverbindungen wichtiger Bestandteil einer barrierefreien (Stadt-) Planung. Zudem stellen Treppen, vor allem im Freiraum, eine größere psychische Barriere dar, sodass sie einer intuitiven Bewegung eher im Wege stehen (Vgl. Gehl 2012, S.145)[64].

Es wird untersucht, ob Neubauten oder bauliche Maßnahmen einen Beitrag zur Quartiers-Vernetzung leisten. Neue Erschließungsmöglichkeiten, eine optimierte Wegeführung oder das Herstellen von fußgängerfreundlichen Abkürzungen innerhalb des Quartiers und zum angrenzenden Stadtraum wirken durch ein erhöhtes Besucheraufkommen positiv auf das Quartier und machen anliegende Erdgeschosszonen attraktiv für Kultur und Gewerbe.

Um die Nutzung von Fahrrädern gegenüber PKW zu attraktivieren soll für eine ausreichende Anzahl von Stellplätzen gesorgt sein. Zusätzliche Angebote wie eine Fahrradreparaturstation, überdachte Stellplätze oder Duschmöglichkeiten können einen Umstieg begünstigen. PKW-Stellflächen sind bevorzugt für Elektroautos, unter anderem mit kostenlosen Ladeplätzen, und im Sinne der Barrierefreiheit vorzusehen.

Angebote wie Bike- und Car-Sharing können das gesamte Verkehrsaufkommen und insbesondere den Flächenverbrauch des ruhenden Verkehrs verringern, da sich auf Dauer weniger Autos in der Stadt bewegen. Shared Mobility erhöht die Zugänglichkeit zu verschiedenen Mobilitätsformen für alle Bewohner, da hohe Anschaffungs- und Reparaturkosten für ein eigenes Auto oder Fahrrad entfallen. PKW-Stellflächen sind bevorzugt für Elektroautos, unter anderem mit kostenlosen Ladeplätzen, und im Sinne der Barrierefreiheit vorzusehen.

7.4.2.4 Baulich / Räumlich

Baulich und räumlich soll sich das Campusgelände in der Erdgeschosszone in den vorhandenen Stadtraum integrieren bzw. sich mit dem umgebenden Stadtraum vernetzen und dabei eine angemessene Eigenständigkeit entwickeln.

Die Erdgeschosszone soll einen Bezug zum Außenraum herstellen und eine Lösung für den Übergang von privatem bzw. hochschulinternem zu öffentlichem Raum anbieten. Der Erdgeschossbereich soll dabei transparent gestaltet und für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Um eine Verzahnung mit dem Stadtquartier herzustellen sind öffentliche Funktionen zu integrieren und Eingangssituationen intuitiv erkennbar zu gestalten.

Durch gefasste Räume und eine abgestimmte räumliche Ausbildung und Stellung der Gebäude zueinander soll eine leichte Orientierbarkeit und z.B. klare Eingangssituationen auf dem Campusgelände sichergestellt werden. An exponierten Lagen wie Plätzen, Kreuzungsecken oder Torsituationen ist im Besonderen auf eine gute Orientierbarkeit zu achten; häufig, indem ein Gebäude an dieser Stelle eine größere Höhe bekommt.

Eine angemessene bauliche Dichte, festgelegt durch eine übergeordnete Zielvorstellung (für die Campus der TU Braunschweig), ist zu erreichen. Diese kann, wenn das betrachtete Gebiet sie nicht erfüllt, durch einzelne Baumaßnahmen über- oder unterschritten werden, um den Zielwert zu erreichen. Zu einer kompakten baulichen Dichte müssen gleichzeitig qualitätsvolle Außenräume ermöglicht werden. Ziel ist die Angleichung an den vorgegebenen GFZ-Wert mithilfe der neuen Maßnahme.

7.4.2.5 Energie

„Deutschland hat sich im Klimaschutz ambitionierte Ziele gesetzt.“ Es geht darum, die Emissionen um mindestens 40 % bis 2020 zu reduzieren und bis 2005 um 80 bis 90 %. Durch die Anwendung unterschiedlicher Maßnahmen und Instrumente, sollen die Fortschritte beim Klimaschutz, wie die Reduktion von Treibhausgasen, der Ausbau erneuerbarer Energien und die Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden. Mögliche Maßnahmen sind beispiels-

weise auf das Gebäude spezialisierte Energiekonzepte, Elektromobilität, die energetische Nutzung der Gebäudefassade, Optimierung der Anlagentechnik und die Sensibilisierung der Nutzer für Energiesparverhalten. Aber auch auf Quartiersebene kann ein Energiekonzept wesentlich zu einer höheren Nachhaltigkeit beitragen. Abgestimmte Gebäudenutzungen erlauben z.B. die Verwendung überschüssiger Wärmeenergie aus Kühlprozessen und eine zeitlich versetzte Energieverteilung.

Abbildung 111 Energie – Übergeordnetes Konzept (Kriterienkatalog) [ISE]

Gebäude mit einem integrativen Energiekonzept können Ressourcen sparen und tragen zu einer geringeren Umweltbelastung bei. Verschiedene Maßnahmen, wie z.B. Solarkollektoren, Photovoltaikanlagen oder interne Speichermöglichkeiten können nicht nur für das Gebäude selbst genutzt werden, sondern auch einen Teil seiner Umgebung energetisch versorgen.
Zu den integrativen Energiekonzepten gehören zum Beispiel die Nutzung von Fernwärme, Energiespeicher für das Quartier oder eine Nachbarschaft oder die gemeinschaftliche Nutzung von Photovoltaikanlagen.

Eine Begrünung der Fassade bzw. des Daches verbessert das Klima, mildert städtische Hitzeinseln und kann Regenwasser speichern. Durch diese Maßnahme kann der Kühlbedarf des Gebäudes im Sommer verringert werden.

Eine abgestimmte Bauhöhe verhindert die Verschattung benachbarter Gebäude und lässt somit eine ausreichende Tageslichtbelichtung zu.
Ebenfalls können so die Fassaden / Dächer des betrachteten Gebäudes sowie der Umgebungsbauten energetisch genutzt werden, beispielsweise mit Photovoltaik- oder Solarthermieanlagen. Darüber hinaus werden durch eine enge Bebauung mit gleicher Höhe Verwirbelungen vermieden, was wiederum eine Verbesserung des Mikroklimas innerhalb eines Quartiers mit sich bringt. So lässt sich die Aktivität im Außenraum positiv beeinflussen (Vgl. Gehl 2012, S. 176f.)[64].

7.4.2.6 Sicherheit

Die Sicherheit in der Öffentlichkeit zählt zu den menschlichen Grundbedürfnissen. Sie bietet Lebensqualität und ist zunehmend auch ein Standortfaktor.
Um die subjektive Sicherheit, also die „gefühlte Sicherheit“ in Stadtquartieren zu gewährleisten, müssen Angsträume vermieden werden. Angsträume sind öffentliche oder halböffentliche Orte, an denen das Gefühl von Angst entsteht, ein Opfer krimineller Handlungen zu werden. Diese Räume entstehen, wenn Menschen solche Orte zunehmend meiden, da sie sich nicht mehr wohl und sicher fühlen. Mit der Zeit verwahrlosen Angsträume, da Vandalismus und Vermüllung zunehmen. Die soziale Kontrolle fehlt durch die Abwesenheit anderer Menschen. „Eine gute Instandhaltung von Gebäuden und öffentlichen Räumen (…) [spielt] dabei also eine wesentliche Rolle“, denn wenn öffentliche Aufenthaltsräume gemieden werden, leidet die Attraktivität der Stadt.

Abbildung 112 Sicherheit – Zuordnung der Außenräume (Kriterienkatalog) [ISE]

Baulich können Gebäude im Quartier großen Einfluss auf das subjektive Sicherheitsgefühl nehmen und helfen, Angsträume zu vermeiden. Übersichtliche, einsehbare Räume und ausgebildete Raumkanten wirken sich positiv auf das Sicherheitsgefühl aus, während nicht einsehbare Bereiche wie z.B. zurückgesetzte Hauseingänge verwinkelte Ecken etc. ein Angstgefühl hervorrufen (Vgl. Hiller 2010, S.2f.)[66]. Eine klar definierte Baulinie hilft dabei, diese Vorgabe durchzusetzen.
Weiche Gebäudekanten, also offene, aktivierte Fassaden in der Erdgeschosszone, eine hohe Frequenz von Zugänglichkeiten (keine langen Fassaden ohne Türen) sowie eine ausreichende Beleuchtung des öffentlichen Raumes steuern ebenfalls zu einem erhöhten Sicherheitsempfinden bei (Vgl. Gehl 2016, S.118f.)[67].

„Monofunktionale Räume, die zu bestimmten Zeiten unbelebt sind" (HERMANNSDÖRFER, 2011, S. 14.)[68] wirken sich negativ auf das Sicherheitsempfinden aus. Zu unterschiedlichen Zeiten und Zwecken genutzte Orte führen zu lebendigen Stadtquartieren und stärken somit das subjektive Sicherheitsgefühl (Vgl. Hiller 2010, S.4.)[66]. Diesen Ansatz verfolgt auch schon das Szenario III des vorausgegangenen Forschungsprojektes „EnEff Camps – blueMap TU Braunschweig" (Vgl. Brederlau et al. 2015, S.264f.)[69].

Eine klare Nutzungszuweisung der Außenräume sowie die eindeutige Definition ihrer Zugehörigkeit sollen erkennen lassen, ob es sich um einen öffentlichen, halböffentlichen oder privaten Raum handelt. „Jeder unklare Status einer Raumeinheit führt zu Verhaltensunsicherheit, Konflikten oder gar zu Stigmatisierung jeglicher aktiven Nutzung.“ (Lauenstein, S.2)[70]. Durch die Verantwortlichkeit über die Außenräume wird Verwahrlosung und Verschmutzung vorgebeugt, was wiederum ein Sicherheitsgefühl in der Bevölkerung hervorruft.

7.4.2.7 Wichtung und Übertragbarkeit

Um eine realitätsnähere Aussage zum Beitrag eines Gebäudes, bzw. einer Maßnahme zum jeweiligen Campus bzw. zum Quartier zu erreichen ist es notwendig ortsspezifische Gegebenheiten in die Auswertung zu integrieren. In diesem Schritt wird der bereits beschriebene Kriterienkatalog um eine, aus dem Quartier abgeleitete, Wichtung ergänzt. Die im Katalog aufgelisteten Kriterien werden entsprechend den Besonderheiten des Quartiers sowie gemäß Entwicklungszielen und Strategien angepasst.

Abbildung 113 Wichtung Quartier (Projektsammlung) [ISE]

Die Grundlage für die Anpassung der Gewichtung von Bewertungskriterien können Empfehlungen der strategischen Planung und Ergebnisse aus Beteiligungsprozessen sein. Außerdem können bestehende Regularien und städtische Strategien bei der Anpassung des Tools berücksichtigt werden. Beispielsweise können die Vorgaben des Bebauungsplans oder eines Integrierten Stadtentwicklungskonzepts in die Gewichtung der Bewertungskriterien einfließen. Kriterien wie Mobilität und Nutzungsmischung können in einer strategisch wichtigen Lage in der Stadt bzw. am Campus eine höhere Gewichtung bekommen, während an besonders öffentlichen Standorten Kriterien wie Barrierefreiheit und Qualität der Außenanlagen an Bedeutung gewinnen würden.

Abbildung 114 Vorstellung Projekt/Gebäude (Projektsammlung) [ISE]

Der Faktor Kosten wurde im Katalog ausdrücklich nicht berücksichtigt und sollte in der Anwendung gesondert behandelt werden, wie zum Beispiel in einem Konzeptgebundenen Vergabeverfahren zum Festpreis oder im Rahmen der Umsetzung der Verpflichtung der wirtschaftlichen und sparsamen Verwendung öffentlicher Mittel.

Die Wichtung der Einzelkriterien kann als Werkzeug genutzt werden, um dem Selbstverständnis eines Quartiers Ausdruck zu verleihen. Die Möglichkeiten liegen hier zwischen dem Abbilden des aktuellen Zustands des Quartiers und einer hypothetischen Zielvorstellung. Auch eine fortschreitende Anpassung, also eine zeitliche Gewichtungsverschiebung ist denkbar, um einen Entwicklungskorridor für den Campus oder das Quartier darzustellen.

Abbildung 115 Lageplan (Projektsammlung) [ISE]

7.4.3 Projektsammlung und Einzelszenarien

Zur Entwicklung des Kriterienkatalogs hat das Team immer wieder verschiedene Gebäude testweise ausgewertet. Die nun vorliegende Projektsammlung beschränkt sich, mit einigen Ausnahmen, auf die jüngst errichteten Gebäude der TU Braunschweig. Ergänzt werden die Braunschweiger Gebäude um eine Reihe von Projekten aus dem europäischen Ausland, welche im Rahmen eines Seminars – *Advanced Urban Analysis* (AUA) – untersucht wurden. Darüber hinaus sind ebenfalls studentische Entwurfsarbeiten in die Projektsammlung aufgenommen worden.

Abbildung 116 Situationsplan (Projektsammlung) [ISE]

Alle Projekte sind ortsspezifisch untersucht und in entsprechende Gruppen zusammengefasst worden. Diese umfassen neben den vier Campus der TU Braunschweig (Zentralcampus, Campus Langer Kamp, Campus Beethovenstraße und Campus Nord) die Unterscheidung in: Innenstadtnahe Gebiete, Hafen- oder Gewerbegebiete, Wohnquartiere und Park- bzw. Naherholungsgebiete. Für jedes dieser Quartiere, bzw. dieser Campus wurde eine beispielhafte Wichtung vorgeschlagen. Diese kann und sollte, wie unter Gewichtung beschrieben (7.4.2.7), Gegenstand einer eigenen Untersuchung sein. Für unsere beispielhaften Untersuchungen ist ein erster Gewichtungsvorschlag aber ausreichend.

Abbildung 117 Auswertung aktuell (Projektsammlung) [ISE]

Jedes Projekt umfasste, neben allgemeinen und technischen Daten, eine ortsspezifische Auswertung des aktuellen Zustands. Hierzu sind neben einem Lageplan (1:1000) auch noch ein Situationsplan (1:5000) dargestellt. Letzterer konnte unter Zuhilfenahme von frei zugänglichem Kartenmaterial von „OpenStreetMap.org“ halbautomatisch erstellt werden und bietet bei entsprechender Qualität der Datengrundlage eine gute Möglichkeit entfernungsabhängige Kriterien zu bewerten. Die „creative commons Lizenz“ (CC BY-SA 2.0) ermöglicht einerseits die freie Nutzung – für nichtkommerzielle Zwecke – eröffnet aber auch die Möglichkeit fehlende OpenStreetMaps-Daten aktiv nachzutragen. Bei der wiederholten Arbeit an einem Quartier, wie den TU Campus, macht dies Sinn und wurde vom ISE entsprechend durchgeführt.

Abbildung 118 Auswertung Szenario (Projektsammlung) [ISE]

In Kombination mit der Wichtung des jeweiligen Campus/Quartiers sind für die untersuchten Projekte Szenarien erarbeitet worden. Deren Ausformulierung liegt zwischen konkreten Weiterentwicklungen des bereits bestehenden Gebäudes und Vorschlägen, welche schon in der Planungsphase zu berücksichtigen sind, bzw. gewesen wären. Diese szenarischen Maßnahmen werden in einer erneuten Auswertung der aktuellen Auswertung gegenübergestellt und zeigen das Quartiers- bzw. Campuspotential der analysierten Gebäude und Maßnahmen auf. Eine der vorgeschlagenen Weiterentwicklung vermittelt ein nachvollziehbares Bild der potentiellen Weiterentwicklung.

Bei Anwendung des Kriterienkatalogs auf mehrere Gebäude in einem Quartier werden Synergieeffekte zwischen einzelnen Projekten sichtbar. Unter der Prämisse, dass die Verbesserung der Bewertung im Sinne einer guten „Quartiersbilanz“ im Interesse mehrerer Projekte ist, können gemeinsame Lösungen entwickelt werden. Beispielsweise können mehrere benachbarte Gebäude von einem gut gestalteten öffentlichen Raum, einer guten Parkplatzsituation oder einer begrünten Außenfläche profitieren und ihre Bewertung verbessern. Somit fördern die auf das Quartier bezogenen Bewertungskriterien ein ganzheitliches Denken und Handeln auf Quartiersebene.

7.4.4 Masterplan (Überarbeitung und Adaption)

Bei der Ausarbeitung des vorgeschlagenen Masterplans für die kurz- bis mittelfristige stadträumliche Entwicklung der TU Braunschweig konnten wir, wie in anderen Bereichen auch, auf die Vorarbeit aus dem Forschungsprojekt EnfEff I zurückgreifen. Als Basis dient ferner die aktuelle Planung der Universität, bzw. des Geschäftsbereichs 3 (GB3), dem Gebäudemanagement der TU, sowie aktuelle Entwicklungen in den umliegenden Quartieren der Stadt Braunschweig.

Durch die Untersuchungen in der Projektsammlung (7.4.3) konnten für exemplarische Gebäude Aussagen über eine sinnvollen Weiterentwicklung dieser getroffen werden. Eben diese Überlegungen – und die daraus abgeleiteten Maßnahmen – werden jetzt in den Masterplan eingearbeitet und führen zu, oft campusweiten, räumlichen Konsequenzen. Im Gegensatz zu den Gesamtszenarien, wie sie noch in EnEff Campus I vorgeschlagen wurden, geht es bei diesem Masterplan um eine behutsame Weiterentwicklung des jetzigen Planungstandes.

Die unterschiedlichen Dringlichkeiten (mittel- bzw. langfristig) werden im Masterplan durch die Intensität der Gebäude und Raumkanten dargestellt. Dunkelblaue Eingriffe sind vordringlich umzusetzen, während hellblaue Flächen und Raumkanten als zukünftige Potentiale angesehen werden können. Für alle Vorschläge, ob innerhalb bestehender Strukturen, priorisierter Maßnahmen oder für in der Zukunft zu entwickelnden Flächen sind Schwerpunktkriterien (des Kriterienkatalogs) dargestellt. Diese basieren auf den beschriebenen Wichtungen des jeweiligen Campus (7.4.2.7) und orts-, grundstücks- oder gebäudespezifischen Gegebenheiten. Auch wenn sich die Wichtung in Zukunft ändern kann (und wird), so ist es doch möglich die Schwerpunktkriterien anhand des Kriterienkatalogs abzuleiten und so, bei aller notwendigen Freiheit der kommenden Entwicklungen, einen Beitrag jedes Neubaus zum Campus oder zum Quartier sicherzustellen.

7.4.4.1 Zentralcampus

Neben den vorgeschlagenen alternativen Szenarien und Weiterentwicklungen der untersuchten Projekte sind auf dem Zentralcampus noch umfangreiche Sanierungsmaßnahmen, z.B. am Forumsplatz, genauer am AudiMax und am Forumsgebäude zu erwähnen. Zwar schränkt die Berücksichtigung des geltenden Denkmahlschutzes den Gestaltungsspielraum ein, trotzdem kann auch hier beobachtet werden, wie einzelne Kriterien durch die Sanierung verbessert wurden. So wurde im Forumsgebäude die Anzahl der nutzbaren Arbeitsplätze bzw. der Aufenthaltsmöglichkeiten deutlich erhöht. Ganz im Sinne des Kriterienkatalogs steigert sich so, durch Eingriffe in die bestehenden Gebäudekörper die Synergetische Wechselwirkung zwischen Einzelgebäude und Campus. In priorisiert vorgeschlagenen Ergänzungsbauten werden leicht erschließbare Potentialflächen genutzt. Neben der gebotenen Erhöhung der Flächen- und Grundstücksauslastung durch das anstehende Studierendenhaus direkt an der Oker, ist es vordringlich die Nutzung des Flächenpotentials des jetzigen „Mensaparkplatz“ an der Ecke Mühlenpfordtstraße – Rebenring. Schon im Wintersemester 16/17 lobte der Kulturkreis der deutschen Wirtschaft im BDI e. V. in Kooperation mit der B&O Gruppe und mit Unterstützung der BMW AG durch den Wettbewerb „TRANSFORMATION 2017“ einen Preis für eine Innovative Nutzung dieses Hochpotentialraums aus [80].

Abbildung 119 Wettbewerbsmodell 1.Preis [Jana Thalmann + Carla Kern]

Auch wenn der Focus nicht zwingend auf (privatem) Wohnraum liegen muss, so wird schon in diesem Wettbewerb, und auch in der im Masterplan vorgeschlagenen Variante eine campusweite Wirksamkeit sichtbar. Auf die Dringlichkeit eines Mobilitätskonzepts ist schon im ersten Forschungsprojekt (EnEff Campus I) hingewiesen worden und ist insbesondere am Zentralcampus deutlich spürbar. Dies schlägt sich dann auch in der vorgeschlagenen Wichtung des Campus (siehe Anhang *Projektsammlung* oder Abbildung 113) nieder und macht campusweit wirksame Maßnahmen in der Kategorie Mobilität umso wichtiger. Eine flächeneffiziente Parkplatzlösung für den gesamten Zentralcampus, erweitert um Elektromobilitäts- und Sharing-Angebote ist in dem befürworteten Neubau vordringlich umzusetzen.

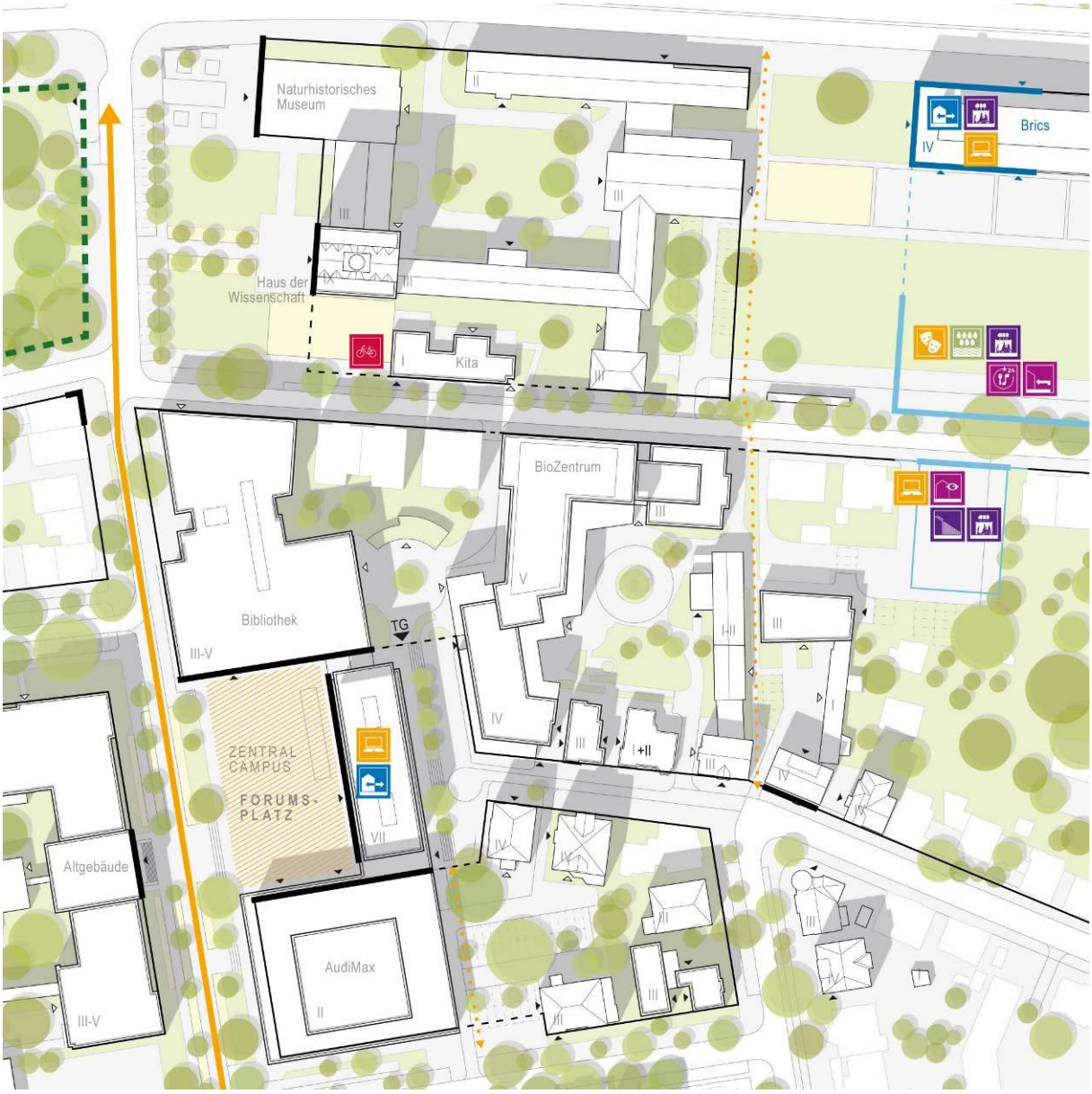


Abbildung 120 Ausschnitt Zentralcampus (Masterplan) [ISE]

7.4.4.2 Campus Langer Kamp

Auf dem Campus Langer Kamp (als Teil des Campus Ost) liegt der Focus auf einem erkennbaren Campusplatz, mit entsprechenden Qualitäten. So werden in den Szenarien für das Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik (PVZ - 3329), sowie den LENA-Um- und Neubau (Laboratory for Emerging Nanometrology - 3331) explizit Maßnahmen vorgeschlagen, welche sich in besonderer Weise mit der Erdgeschoss-Zone und der Wechselwirkung zwischen dem Innen- und Außenraum beschäftigen. Durch ein geeignetes Angebot auf dem zu definierenden Platz selber (z.B. Aufenthaltsangebote + Zuordnung dieses Außenraumes) lässt sich darüber hinaus auch die Qualität aller angrenzenden Gebäude steigern.

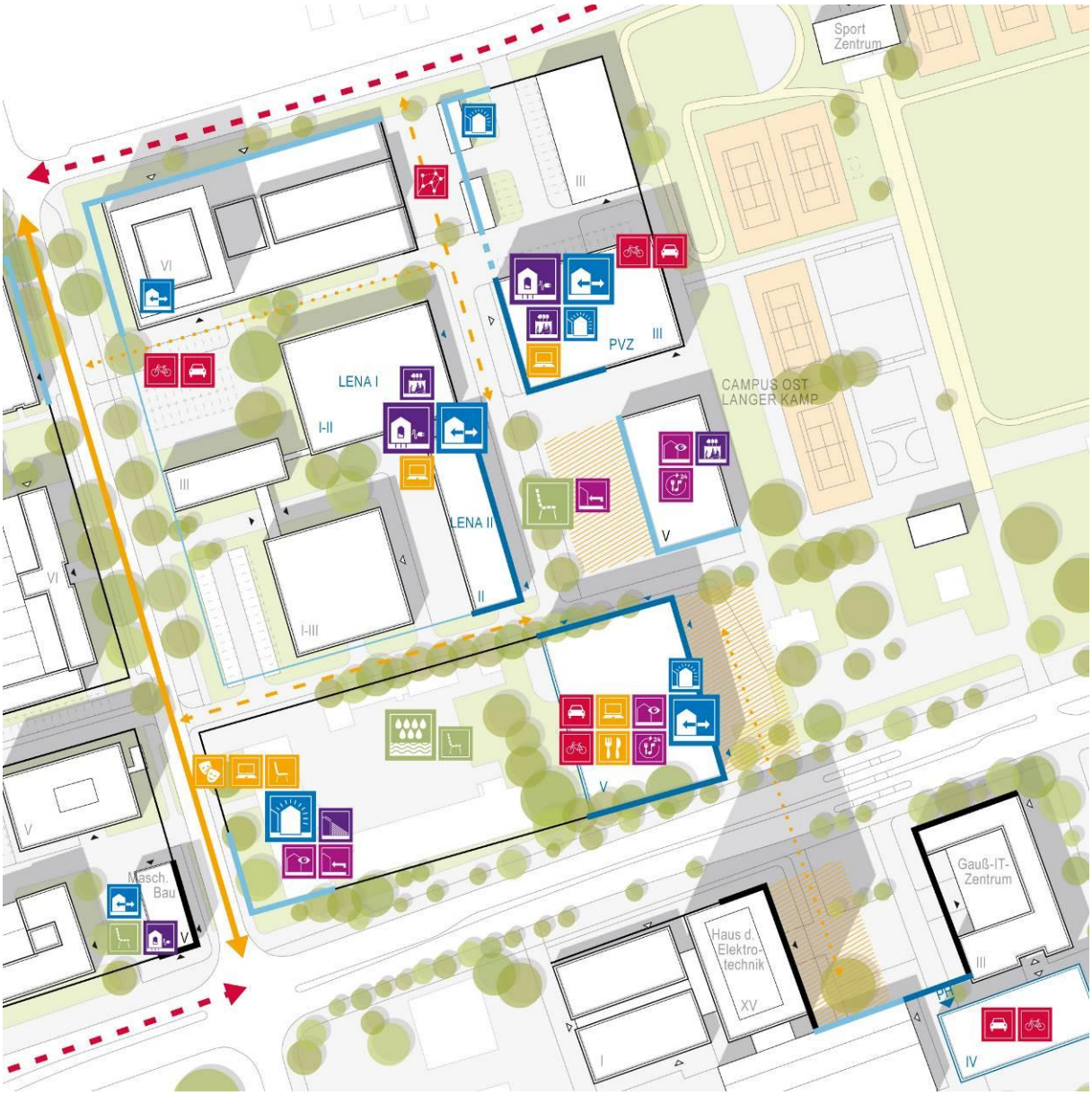


Abbildung 121 Ausschnitt Campus Langer Kamp (Masterplan) [ISE]

Als räumliche Abgrenzung zur Hans-Sommer-Straße wird ein Ersatzneubau für das seit November 2016 nicht mehr zur Nutzung zugelassene Chemiegebäude vorgeschlagen. Ähnlich wie bei der angestrebten Nutzung des „Mensaparkplatzes“ auf dem Zentralcampus liegt auch hier ein wichtiges Augenmerk auf der Bereitstellung von campusweit wirksamen Maßnahmen, in den Kategorien Mobilität, Nutzung sowie der baulich / räumlichen Qualitäten des Neubaus. Auf der gegenüberliegenden Seite der Hans-Sommer-Straße, in Ergänzung zum Haus der Elektrotechnik und dem Gauß-IT-Zentrum wird ein Erweiterungsbau als räumlicher Abschluss vorgesehen. Dieser schränkt, nur für den motorisierten Verkehr, den Durchgang zum Richard-Strauß-Weg ein und leistet, durch ein Angebot an flächeneffizientem Parken, einer hinreichenden Infrastruktur für Elektromobilität, sowie Sharing-Angebote von unterschiedlichen Modalitäten (PKW/Rad/...) ebenfalls einen übergreifenden Beitrag zur Campusqualität. Auch wird der Vorplatz zwischen dem Haus der Elektrotechnik und dem Gauß-IT-Zentrum als solcher greifbarer und könnte, mit der einem möglichen Ersatzneubau der Halle 3402, zu einem eigenständigen Platz werden.

7.4.4.3 Campus Beethovenstraße

Der Campus Beethovenstraße wird auch in Zukunft stark von Forschungsbauten dominiert sein. Umso wichtiger ist es mit den vorhandenen Ressourcen und allen bereits projektierten Entwicklungen ein Mindestmaß an Campusqualitäten sicherzustellen. Für den ganzen Campus gilt es, eine Zuordnung der Außenräume sicher zu stellen und durch eine entsprechende baulich / räumliche Gestaltung eine Orientierung – besonders entlang der Beethovenstraße – zu bieten. Denn die Nord-Süd-Richtung wird auch zur weiteren Anbindung des Campus Nord (siehe 7.4.1.2.2) dienen.
Im südlichen Teil des Campus, in direkter Nachbarschaft zu Mensa und zum Sportzentrum soll in Zukunft der Ersatzneubau des Pharmaziegebäudes errichtet werden. Diesem Gebäude fällt die Aufgabe zu, auf dem Campus Beethovenstraße weitreichend wirksame Maßnahmen (Mobilität und Nutzung) anzubieten. Die Erdgeschosszone ist entsprechend zu gestalten um auch hier einen Platz, bzw. eine Aufweitung des Straßenraums mit entsprechender Aufenthaltsqualität zu gewährleisten.
Der nördliche Bereich, mit dem Neubau des ZELUBA, wird stark von der kommenden Ringgleiserweiterung profitieren. Die Überlegungen zum BAUM-Campus der Bau- und Umweltingenieure (siehe 0) greifen die Chance auf und entwickeln hier einen eigenen Teilschwerpunkt des Campus Beethovenstraße. Dieser sieht im Wesentlichen den Bau eines Studierenden Hauses (BAUM.Haus) und eines (Forschungs-)Neubaus für einerseits Seminar- und Hörsäle, aber auch für die noch auf dem Zentralcampus verbliebenden Institute vor. Von der räumlichen Konzentration der Lehr- und Forschungstätigkeiten versprechen sich alle Beteiligte einen Mehrwert sowohl für Studierende, als auch für die Mitarbeiter des Departments. Die Ausgestaltung muss auf die entsprechenden Anforderungen ausgerichtete sein.
Das BAUM.Haus sollte beispielsweise nicht nur die Primärfunktion von (studentischen) Arbeitsplätzen erfüllen, sondern darüber hinaus auch Angebote in den Kategorien Sicherheit und baulich/räumlich machen. Ein möglichst biodiverser Park / eine Grünfläche mit Aufenthaltsqualitäten und direkter Anbindung an das Ringgleis sorgen für eine weitere Attraktivitätssteigerung dieses Areals. (siehe Anhang MASTERPLAN)

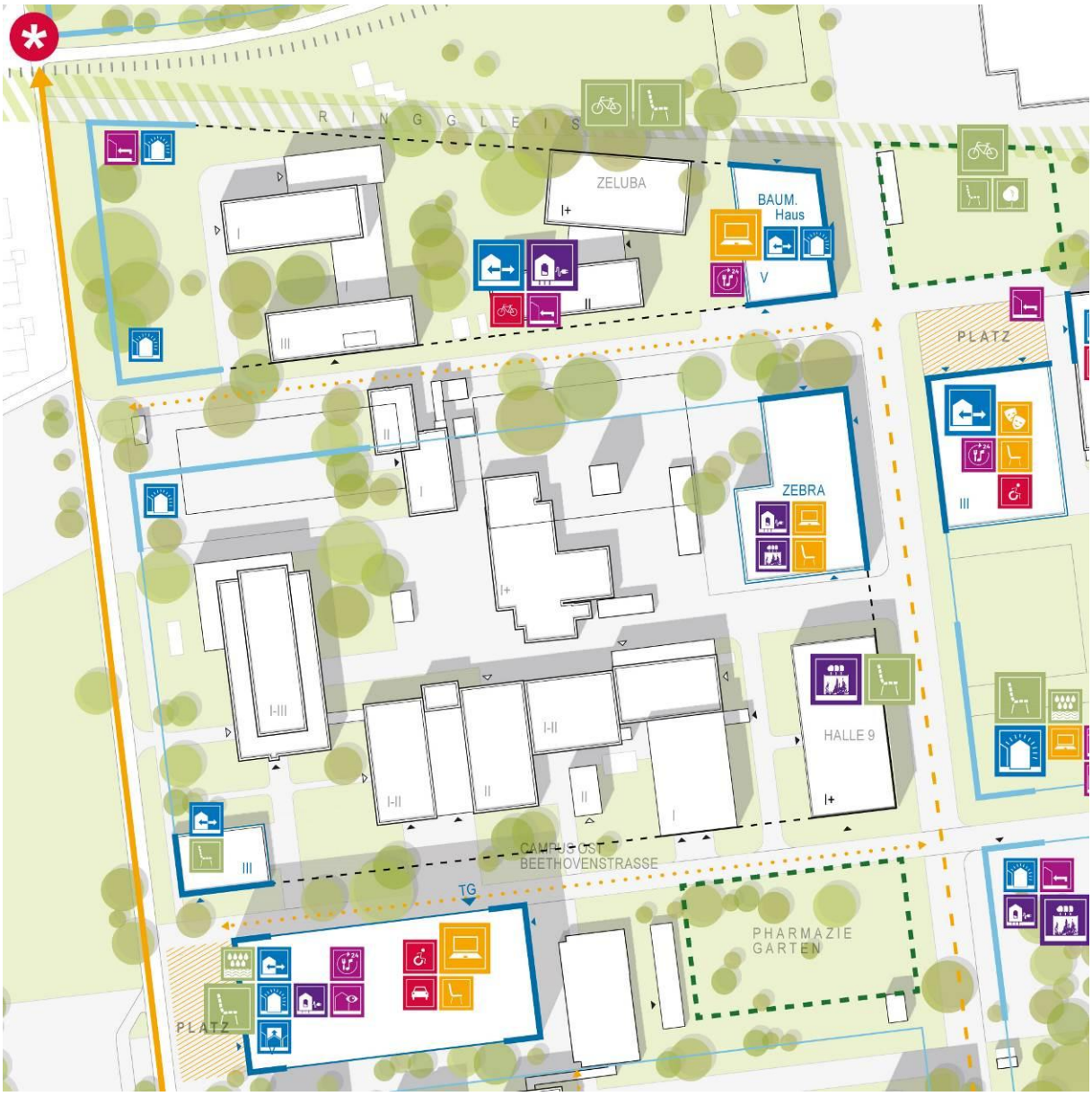


Abbildung 122 Ausschnitt Campus Beethovenstraße (Masterplan) [ISE]

7.4.4.4 Campus Nord

Die vorgeschlagenen Maßnahmen auf dem Campus Nord sind einerseits vereinfachte Vorschläge zur strukturellen Gliederung des Areals, andererseits sprechen Sie grundlegende, wichtige Empfehlungen für den Campus aus. So ist die generelle Bebauungsdichte zu erhöhen, die Nutzungsmischung zu intensivieren und im Freiraum der Grad der Versiegelung zu verringern. Konkrete, bauliche Vorschläge sollen an dieser Stelle nicht vorgebracht werden, da der Campus Nord, in Erweiterung mit angrenzenden Städtischen Flächen, zum CoLiving Campus entwickelt werden soll. Somit nimmt der Campus Nord eine gewisse Sonderstellung innerhalb der Campus der TU Braunschweig ein, soll er doch, wie unter 0 beschrieben, als Reallabor Raum für eine partizipative, experimentale Entwicklung bieten.

7.4.5 Fazit

Der Kriterienkatalog kann als ein eigenständiges Werkzeug oder als Grundlage für ein komplexeres Verfahren dienen. Der ganzheitliche, quartiersbezogene Ansatz in der Betrachtung und Bewertung einzelner Gebäude kann außerdem als ein Anstoß kooperativer Prozesse verstanden werden. Das Werkzeug behandelt einzelne Gebäude nicht als geschlossene Elemente, sondern vielmehr als Bausteine einer größeren Struktur und stärkt damit die Verbindung zwischen Architektur und Städtebau bzw. strategischen Stadt- und Quartiersentwicklungen.

7.5 Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalanalyse (IfN) / Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge (IBR)

Im Verlauf der Projektarbeiten wurde deutlich, dass eine Fusion der Teilstrategien „Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalverarbeitung“ des Instituts für Nachrichtentechnik (IfN) und „Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge“ des Instituts für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR) sinnvoll ist (siehe Abbildung 123). Bereits bei der Beantragung waren die Teilstrategien eng aufeinander abgestimmt. Durch die Fusion konnte an einem gemeinsamen System geforscht werden, welches die verschiedenen Techniken und Anwendungen nicht als Alternativen, sondern als kooperierende Komponenten nutzen kann und so eine tiefergehendes Verständnis sowohl der technischen Aspekte als auch der Nutzerinteraktion ermöglicht.

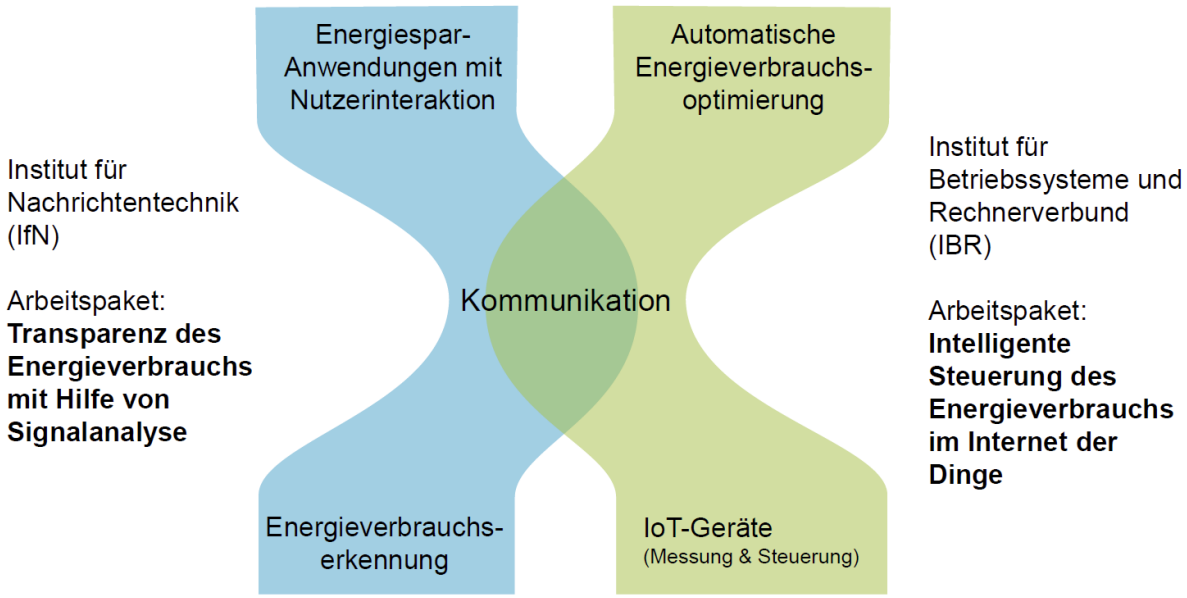


Abbildung 123 Kombination der Teilprojekte [IBR]

Ziel des Teilprojektes Teilstrategien „Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalverarbeitung“ des Instituts für Nachrichtentechnik (IfN) war es, Menschen technische Möglichkeiten zu bieten, mit denen sie ein Verständnis für ihren individuellen Energieverbrauch aufbauen können. Dadurch sollten sie in die Lage versetzt werden, geeignete Maßnahmen zum Einsparen von Energie identifizieren zu können.

Ziel des Teilprojektes „Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge“ des Instituts für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR) war es, Kleinverbraucher zu steuern und ihren Energieverbrauch nach diversen Kriterien zu optimieren. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die unterschiedlichen Kleinverbraucher und ggf. -Erzeuger in der Lage sind, Daten auszutauschen und auf Steuerbefehle zu reagieren. Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung waren zwar nur einige wenige Haushalsgeräte dazu in der Lage – es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Anzahl der kommunikationsfähigen Geräte rasant steigt und so das sogenannte „Internet of things“ (IoT) – das Internet der Dinge – bildet. Bis zu einer signifikanten Marktdurchdringung solcher Geräte wurde für dieses Projekt ein zweistufiger Ansatz verfolgt: Zum einen wurden vollständig integrierte Geräte, die in jederlei Hinsicht quantifiziert und gesteuert werden können, durch einen Umbau vorhandener Geräte geschaffen. Zum anderen wird auf einfache Zwischensteckdosen, die auch in der Strategie „Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalanalyse“ zum Einsatz kommen, zurückgegriffen. Diese Zwischensteckdosen können zumindest den aktuellen Energieverbrauch messen und die angeschlossenen Verbraucher „hart“ ein oder ausschalten. Innerhalb des Teilprojekts wurde auch evaluiert, ob eine vollständige Integration zu Erreichung der Ziele nötig ist, wobei – zumindest für eine Übergangsphase – auch eine einfache Lösung mit vorhandenen schaltbaren Messsteckdosen ausreichend ist.
Durch die Kombination der beiden Teilprojekte ergibt sich zusätzlich der in Abbildung 124 dargestellte Mehrwert: Beide Ansätze bauen zunächst auf einer Erfassung des Stromverbrauchs individueller Geräte (1) auf, wobei es unabhängig ist, ob dieser durch eine Signalanalyse innerhalb des Stromnetzes (IfN), durch Zwischenstecker (IfN & IBR) oder durch vollständig integrierte IoT-Geräte (IBR) erfasst wird.
Das Teilprojekt „Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge“ entwirft, implementiert und evaluiert dabei den Aufbau einer hierarchischen Kommunikationsinfrastruktur (2) (s. Abbildung 125), die in der Lage ist, Informationen (z.B. zu aktuellen Stromverbräuchen) zu akkumulieren und durch diese intern oder extern vorgegebene Zeile (bspw. eine Lastspitzenvermeidung) zu unterstützen, welche dann wiederum zu einer Steuerung der einzelnen Kleinverbraucher (3) führt.
Daten zum aktuellen Verbrauch, zu möglichen Maximal- und Minimalverbrauch und zu bestimmten weiteren Anforderungen werden jeweils an die höher gelegene Ebene kommuniziert und dort aggregiert. Am einfachsten lässt sich das am Beispiel eines Gefrierschranks erläutern: Dieser verbraucht im Minimum keine bzw. nur sehr geringe Energie und im Maximum – wenn der Kompressor läuft – bspw. 100 Watt. Außerdem hat er die Anforderung, dass innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls bzw. bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur, der Kompressor eingeschaltet wird, um wieder herunter zu kühlen. Diese Daten werden nun an den hierarchisch darüber liegenden Energy-Router kommuniziert und dort mit den Daten aller anderen Geräte einer Ebene kombiniert. Das aggregierte Ergebnis wird dann wiederum eine Ebene nach oben kommuniziert. Aus diesen Daten ist dann nicht mehr ersichtlich, welche einzelnen Geräte vorhanden sind und wie sie benutzt werden, sondern lediglich aktuelle Verbrauchsdaten mit möglichen Mini- und Maxima sowie daraus abgeleiteten Garantien bzw. Anforderungen.

Im Teilprojekt „Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalverarbeitung“ steht die Kommunikation mit dem Nutzer im Vordergrund, welcher so über die Auswirkungen (Kosten, CO2-Emission, etc.) seines Handelns informiert wird (4) und dadurch in die Lage versetzt wird, sein Verhalten (positiv) zu verändern (5).

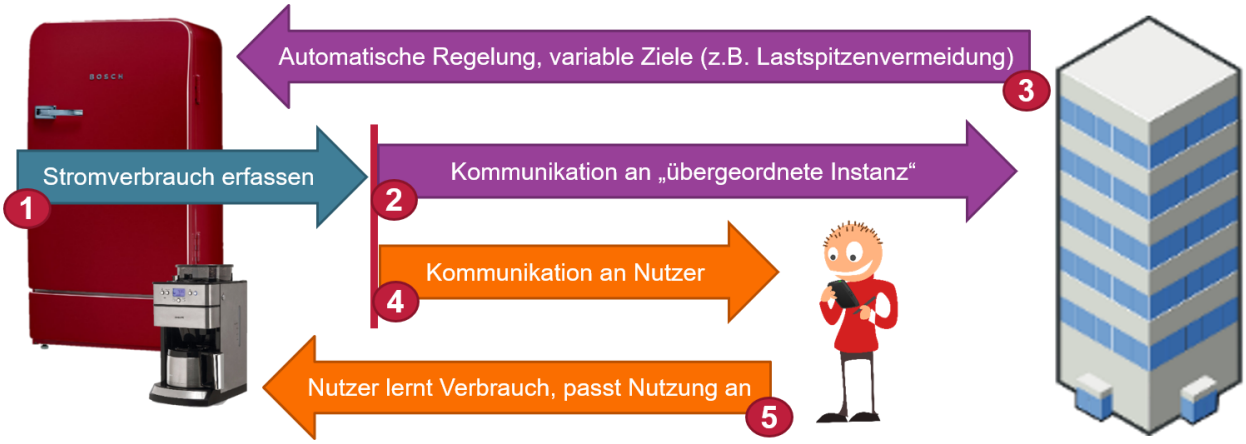


Abbildung 124 Zusammenspiel der Teilprojekte [IBR]

Das zusammengenommene Ziel, der fusionierten Strategien der Institute IBR und IfN ist folglich:

a) Menschen technische Möglichkeiten zu bieten, mit denen sie ein Verständnis für ihren individuellen Energieverbrauch aufbauen können (IfN) und
b) Kleinverbraucher so zu steuern und ihren Energieverbrauch nach diversen Kriterien automatisch zu optimieren. (IBR)

Die dazu notwendigen Einzelverbräuche bzw. Steuerungsfunktionalitäten wurden auf drei Arten ermittelt bzw. hergestellt:

a) Zum einen wurde davon ausgegangen, dass zukünftige Geräte durch den Einsatz des Internet der Dinge (IoT) in der Lage sein werden, Daten auszutauschen und auf Steuerbefehle zu reagieren. Zum Funktionsumfang eines solchen IoT-Gerätes könnte dann auch die Messung und Beeinflussung der eigenen Energieaufnahme zählen.
b) Des weiteren wurden herkömmliche Zwischenstecker, die in der Lage sind, Energieverbräuche zu erfassen und Lasten zu schalten, in das zu erforschende System integriert, um so auch mit wenig Aufwand viele Geräte erfassen (und ggf. Steuern) zu können.
c) Um zum anderen sicherzustellen, dass auch vorhandene Geräte in das IoT mit eingebunden werden können, wurde zudem an einer Geräteerkennung auf Basis der Signalverarbeitung und -erkennung gearbeitet. Diese kann beispielsweise das aktuelle Waschprogramm einer Waschmaschine aus dessen Energieverbrauch ermitteln.

Da die jeweiligen Daten der Geräte lokal verteilt in den jeweiligen Umgebungen (auf den Geräten) gespeichert bzw. gehalten werden, benötigt es Kommunikationslösungen, um Daten zwischen den Geräten, aber auch zum Anwender hin zu übermitteln. Viele der erfassten Daten könnten Rückschlüsse auf die Gewohnheiten der Nutzer ermöglichen. Um Dritten den Zugang zu den Daten verwehren zu können, wurde die Anforderung definiert, dass die Daten bevorzugt lokal in den jeweiligen Umgebungen verarbeitet werden sollen. Da vorhandene Lösungen diese Möglichkeit nicht bieten konnten, wurde eine eigene Kommunikationslösung basierend auf dem Internet der Dinge konzipiert, ausgearbeitet und erprobt.
Aus diesen Komponenten (Geräteeinbindung mittels IoT und mittels der Geräteerkennung sowie der Kommunikationslösung) wurde ein Systemkonzept für automatische und Nutzer-unterstützende Energiemanagementanwendungen abgeleitet. Dieses Systemkonzept wurde in mehreren Veröffentlichungen der Fachwelt (siehe Veröffentlichungsliste) präsentiert. Das Systemkonzept und seine Komponenten werden im Folgenden detailliert beschrieben.
Im Rahmen dieser Teilstrategie wurde zudem ein Demonstrator aufgebaut, der das Systemkonzept und seine Anwendungen veranschaulichen soll. Der Demonstrator wurde auf dem Campus der TU Braunschweig umgesetzt und später zur Evaluation der Komponenten verwendet.

Dieses Arbeitspaket der fusionierten Teilstrategie ist in drei Teile untergliedert:
In Teil 1 der „Kommunikationsstruktur“ werden zunächst die Konzepte zur Kommunikation erläutert und die Implementierung in Form einer Softwareplattform dargelegt. Anschließend wird die Anwendbarkeit dieser Kommunikationsstruktur anhand der Struktur des Demonstrators erläutert.
Die Konzepte und Techniken zur Einbindung vernetzter und nicht-vernetzter Geräte werden in Teil 2 „Einbindung von Geräten“ dargestellt. Darauf aufbauend werden die einzelnen Umgebungen des Demonstrators beschrieben und die Anwendung der Techniken zur Einbindung von Geräten erläutert und evaluiert.
Anwendungen zur automatischen sowie zur Nutzer-unterstützten Energieverbrauchsoptimierung werden in Teil 3 beschrieben.

Insgesamt sind zahlreiche studentische Arbeiten in die Teilergebnisse eingeflossen, auf die an den jeweils relevanten Stellen verwiesen wird.

7.5.1 Teil 1: Kommunikationsstruktur

Wie bereits in der Einleitung erläutert bedarf es Kommunikationslösungen, um dezentrale Daten unter der Einhaltung verschiedener Anforderungen, wie die Einhaltung von Privatsphäre, Sicherheit, aber auch Datenschutzrichtlinien, verarbeiten zu können. Dazu wurde eine Kommunikationsstruktur entworfen, die im Folgenden erläutert wird.

7.5.1.1 Kommunikationskonzept

Um den Herausforderungen der Privatsphäre zu begegnen aber trotzdem neuartigen Energiemanagement-Anwendungen zu ermöglichen, sollen Daten lokal verarbeitet werden können. Die Daten sollen dabei möglichst die lokalen Umgebungen, in denen die Daten zur Erfüllung einer Aufgabe benötigt werden, nicht verlassen. In Abbildung 125 sind vier Ebenen eingezeichnet – im Beispiel eine Raumebene, in der alle Geräte eines Raumes zusammengefasst sind; eine Stockwerksebene, die die raume eines Stockwerks vereint; sowie eine Gebäudeebene, die wiederum alle Stockwerke vereint, wobei das Konzept beliebig viele Ebenen zulässt.

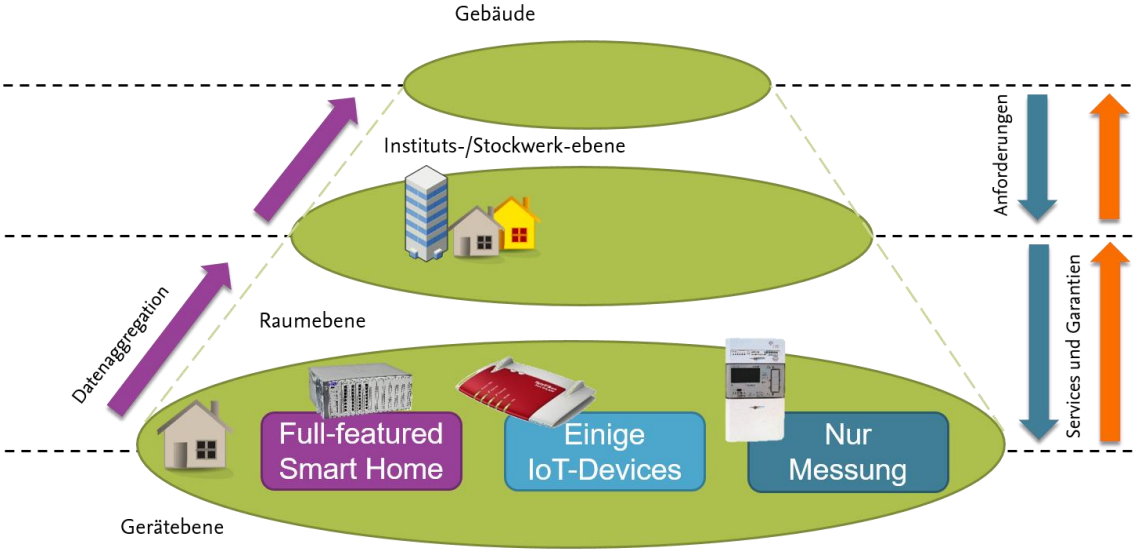


Abbildung 125 Systemübersicht aus Sicht der Datenübertragung und Vernetzung [IBR]

In Abbildung 126 ist die Struktur aus technischer Sicht dargestellt. Pro Umgebung wird ein sogenannter lokaler Koordinator benötigt. Dabei handelt es sich um ein Gerät, das direkt verbundene Gerät in der Nähe steuert bzw. von ihnen mit aktuellen Daten versorgt wird. Ein lokaler Koordinator (CN) gibt nur notwendige (bzw. vom Nutzer freigeschaltete) Daten an die höheren Ebenen weiter. Entsprechend kann jedes Gerät, dass einem lokalen Koordinator zugeordnet ist, auch selbst wieder ein lokaler Koordinator sein. Dieser bündelt dann ebenfalls eine vollständige Umgebung unter sich.

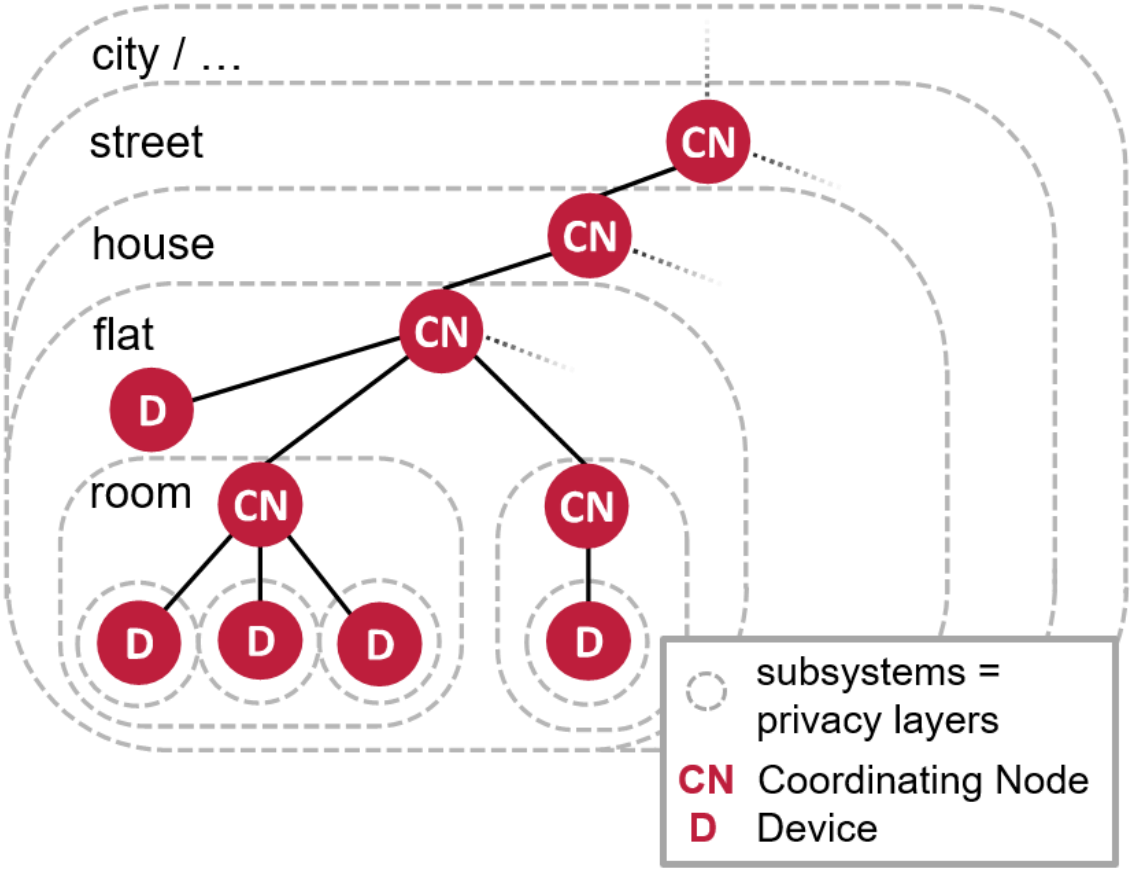


Abbildung 126 Hierarchische Kommunikationsstruktur - detailliert [IBR]

Wie Abbildung 126 zeigt, bildet sich durch die Einbringung lokaler Koordinatoren eine hierarchische Kommunikationsstruktur aus. Diese hat, im Vergleich zu zentralen Strukturen, Vorteile hinsichtlich der Skalierbarkeit aber auch hinsichtlich der Gesamtsystemausfallsicherheit.

7.5.1.2 Verteilte Anwendungen

Durch die Aufteilung der Kommunikationsaufgabe auf viele Einzelgeräte, ergeben sich zusätzliche Herausforderungen hinsichtlich der Implementierung von Anwendungen. Die Ausführung von Anwendungen an einer zentralen Stelle ist nicht mehr möglich, da die Daten nur lokal in einzelnen Umgebungen vorliegen. Entsprechend müssen Berechnungen, die diese Daten verwenden, nun ebenfalls lokal durchgeführt werden. Damit eine einzelne Anwendung Aufgaben über mehrere Umgebungen hinweg bewältigen kann, muss die Anwendung in mehrere Teile aufgeteilt werden und die einzelnen Anwendungsteile verteilt auf verschiedenen Geräten ausgeführt werden.

7.5.1.3 Softwareplattform

Damit die Anwendungsteile verteilt auf verschiedenen Geräten ausgeführt werden können, wurde eine Softwareplattform entwickelt, die als Basis für alle Geräte dient. Die Softwareplattform ermöglicht die verteile Anwendungsausführung und kümmert sich um den Daten-

austausch. Die Daten von eingebundenen Geräten genau wie die von den Anwendungsteilen werden als sogenannte Datenressourcen verwaltet. Dabei kann es sich um Datenreihen, wie einem fortlaufenden Energieverbrauch, aber auch jegliche andere Datenform handeln. Auch Steuerbefehle können an eine Datenressource gebunden werden. Eine Datenressource wird durch einen lokal eindeutigen Namen sowie durch zusätzliche Metadaten gekennzeichnet. Die Metadaten ermöglichen die Beschreibung der Daten und Funktionen der Datenressource. Dadurch können Anwendungsteile selbstständig relevante Datenressourcen identifizieren, ohne deren Namen zu kennen. Die Softwareplattform sorgt selbstständig dafür, dass einem lokal ausgeführten Anwendungsteil alle notwendigen entfernten Datenressourcen zur Verfügung stehen, ohne dass dieser Anwendungsteil die Datenressourcen explizit anfragen muss.
Für die Implementierung wurde die Skriptsprache JavaScript gewählt. In Verknüpfung mit HTML wird diese genutzt um dynamische Webseiten oder sogar Webanwendungen zu implementieren. Durch die Ausführungsumgebung Node.js ist es möglich JavaScript-Anwendungen auch als Server-Dämonen auszuführen. Solche Server-Dämonen auf der Basis von Node.js eignen sich gut für die Abarbeitung vieler gleichzeitiger Netzwerkanfragen.
Auf Basis dieser Softwareplattform wurden sowohl lokale Koordinatoren, einzelne IoT-Geräte, die Anbindungen verschiedener existierender Bussysteme, aber auch Smartphone-, Tablet- und Webanwendungen entwickelt. Für die letztere Anwendungsgruppe, also für Anwendungen zur Nutzerinteraktion, wurde zudem eine allgemeine Webanwendung auf Basis der Softwareplattform entwickelt. Diese erlaubt die automatische Verknüpfung von anzuzeigenden Datenressourcen (Model) und sogenannten Anzeigedefinitionen (View und View Model). Die Anzeigedefinitionen erlauben eine hoch angepasste Visualisierung der Datenressourcen für den Nutzer.

7.5.1.4 Datenschutz-konformer Austausch von Datenressourcen

Zum Austausch der Datenressourcen wurde ein Kommunikationsprotokoll basierend auf dem Websocket-Protokoll entwickelt. Zur Kommunikation werden JSON-codierte Objekte zum Aufruf von entfernten Funktionen (RPC) verwendet.
Damit ein Datenschutz-konformer Austausch von Datenressourcen ermöglicht werden kann, dürfen nicht automatisch alle Ressourcen weitergeleitet werden. Vor der Weiterleitung einer Datenressource zu einer entfernten Instanz wird deshalb zunächst überprüft, ob dieser Datenaustausch durch einen sogenannten Privatsphäreregelsatz explizit erlaubt wurde. Mit Privatsphäreregelsätzen kann definiert werden, welche Datenressourcen an welche Instanzen weitergeleitet werden dürfen. Dabei kann auch eine Vorverarbeitung zur Verschleierung durchgeführt werden. Diese Regelsätze können vom lokalen Nutzer (bzw. Administrator) sowie von den installierten Anwendungen vorgegeben werden. Die Regelsätze der Anwendungen müssen bei der Installation durch den Nutzer bestätigt werden.

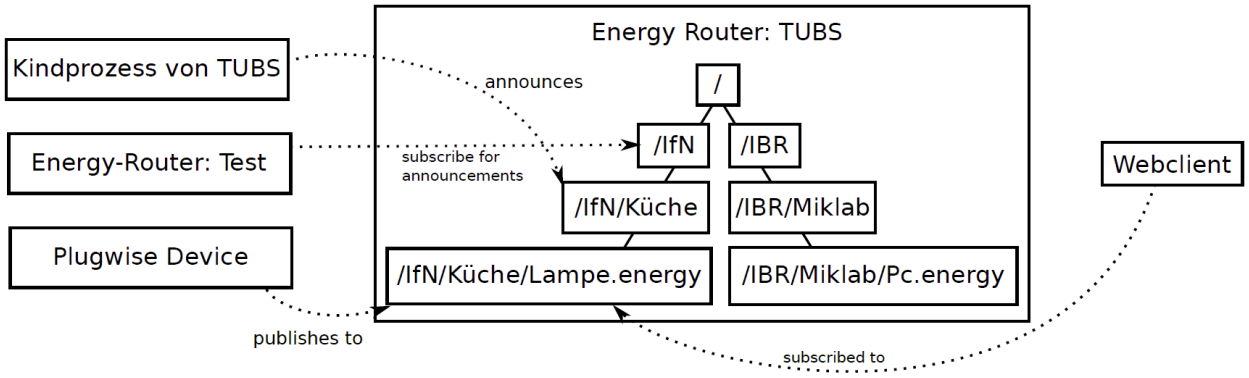


Abbildung 127 Konzeptuelle Darstellung der Funktionsweise von Nodes [IBR]

In der im Projekt entstandenen Masterarbeit “Datensicherheit in einer universitätsweiten Anwendung zur Erhöhung der Energieeffizienz“ von Saskia Bellekom wurde ein ebensolcher Privatsphäre-schützender Austausch implementiert und evaluiert. Die Verteilung von Daten wird dabei durch sogenannte Nodes (siehe Abbildung 127) geregelt. Beim Anlegen eines Nodes, wird dieser anhand seines Namens in die vorhandene Nodestruktur des Routers eingefügt. Zur Interaktion mit einem Node stehen vier Basismethoden zur Verfügung. Diese sind: "subscribe", "publish", "subscribe_announcement" und "announce". Durch die Methode "subscribe" kann sich ein Client oder interner Prozess für Daten des Nodes anmelden. Wird nach der Anmeldung "announce" auf dem jeweiligen Node aufgerufen, wird der ausgerufene Wert und der dazugehörige Zeitstempel an die registrierten Interessenten weitergeleitet. Registriert man sich mit einem "subscribe_announcement" bei einem Node, erhält man eine Information wenn der jeweilige Node oder einer seiner Kinderknoten "announced" wird.

Der in Abbildung 127 dargestellte Energy-Router namens TUBS verwaltet sieben Nodes. Verschiedene Clients nutzen die bereitgestellten Methoden um mit den Nodes zu interagieren. Ein Webclient hat sich durch ein "subscribe" für Daten des Nodes "IfN/Küche/Lampe.energy" angemeldet. Dadurch werden Daten des Plugwise-Devices, über den Node"IfN/Küche/Lampe.energy" zu dem Webclient weitergeleitet. Der verbundene Energy Router mit dem Namen Test wurde derweilen durch ein subscribe_announcement" für die Verkündigung des Nodes "IfN" inklusive Kinderknoten registriert. Aus diesem Grund wird der Ausruf des Nodes "/IfN/Küche" durch einen Kindprozesses von TUBS auch dem Router Test bekannt gegeben.

Außerdem wurde ein Policy-Management entwickelt, um sicherheitskritische Daten – wie Energiedaten, Temperaturdaten und Sensordaten – zu schützen. Die Grundidee besteht darin, die Weiterleitung dieser sensiblen Daten zu unterbinden beziehungsweise vor der Weiterleitung zu einem weniger kritischen Datensatz zu aggregieren. Die Idee basiert auf Technologien aus dem Smart-Meter-Bereich, bei denen zum Schutz der Privatsphäre oft ebenfalls eine Datenaggregierung stattfindet, bevor sie an eine dritte Partei weitergegeben werden. Dieses Vorgehen führt dazu, dass weniger sicherheitsrelevante Daten im Netzwerk unterwegs sind. Somit wird die Gefahr von unbefugtem Datenzugriff bereits per Design erschwert. Um zu bestimmen welche Daten weitergeleitet werden dürfen und welche nicht, überwacht das Policy-Management den ein- und ausgehenden Datenfluss. Anhand definierter Policies, wird dann bestimmt, ob die Weiterleitung bzw. Verarbeitung des jeweiligen Pakets zulässig ist (siehe Abbildung 128).

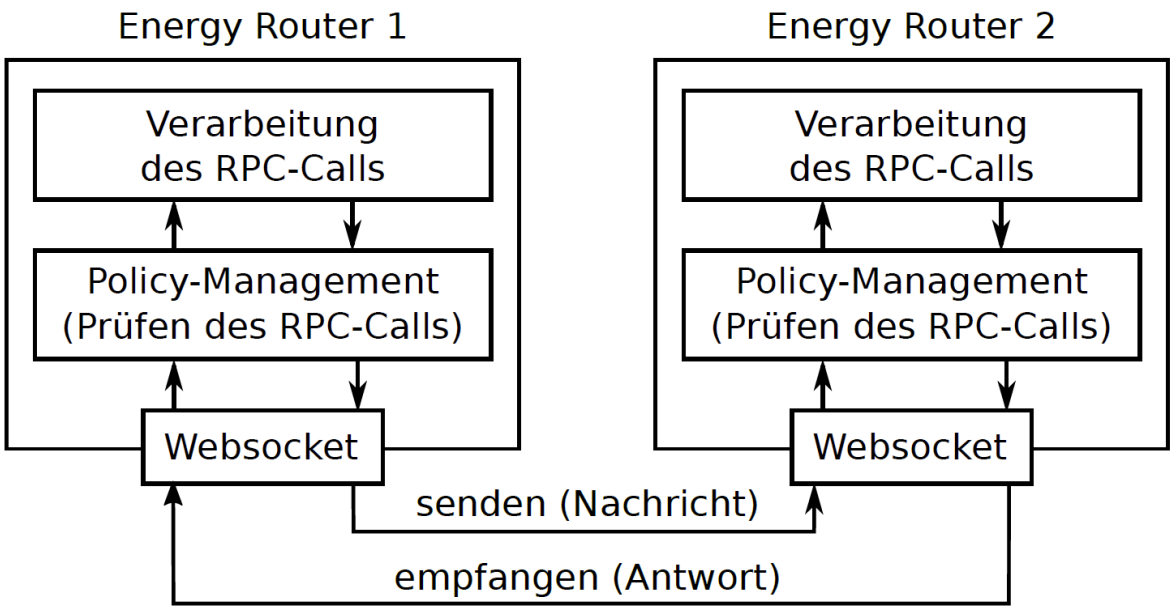


Abbildung 128 Position des Policy-Managements im Bezug auf den Datenfluss [IBR]

Das Policy-Manager-Objekt (siehe Abbildung 129) besitzt eine Liste mit ID's der zu überwachenden WebSocket-Verbindung, gespeicherten Policies und eine Liste von Groups, welche für das Gruppen-Management relevant sind. Geprüft werden eingehende und ausgehende Daten mit der Methode "check()".

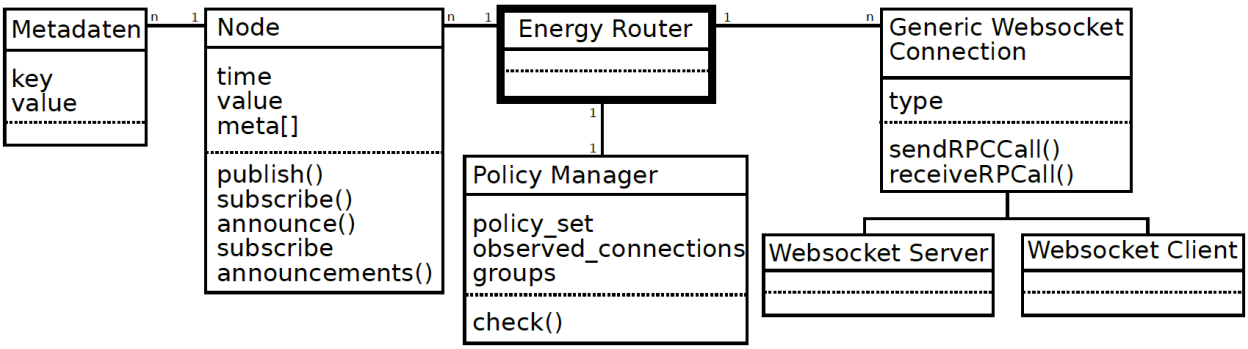


Abbildung 129 Durch das Policy-Management erweitertes Klassendiagramm eines Energy-Routers [IBR]

7.5.1.5 Demonstrator: „Real-Life-Lab Campus 2020“ – Die Struktur

Im Rahmen des Projektes wurde ein Gesamtdemonstrator aufgebaut, der die Funktionsfähigkeit aber auch den Funktionsumfang der einzelnen beschriebenen Konzepte und Techniken darstellen sollte. Neben der Erprobung und Darstellung der Konzepte sollte darüber hinaus auch eine Evaluation auf Basis des Demonstrators ermöglicht werden.
Als Demonstrationsumgebung wurde – wie bei den anderen Teilstrategien – der Campus der TU Braunschweig gewählt. Der Campus umfasst ein großes Spektrum unterschiedlichster Anwendungsbereiche: Von Büroarbeitsplätzen bis zu Werkstätten, von Laboren bis zu Veranstaltungsräumen, von Testständen bis zur industriellen Fertigung. Durch dieses große Spektrum ist die Demonstrationsumgebung repräsentativ für eine große Anzahl anderer Anwendungsbereiche.
Innerhalb der TU Braunschweig wurden deshalb einzelne ausgewählte Umgebungen mit Messgeräten ausgestattet und mit verschiedenen Energiemanagement-Anwendungen befähigt.
Da die Kooperation der einzelnen Umgebungen ein Kernelement darstellt, wurde eine Vernetzung der einzelnen Umgebungen auf Basis der vorgestellten Kommunikationsstruktur mit Hilfe der Softwareplattform realisiert. Dadurch ergibt sich die in Abbildung 130 dargestellte hierarchische Struktur, in die einzelnen Umgebungen eingebettet wurden:

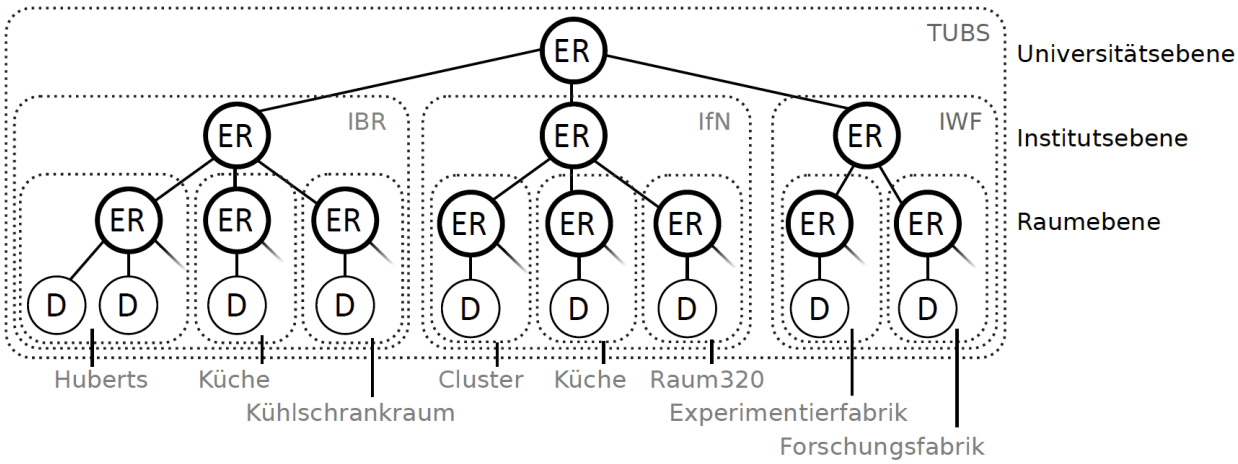


Abbildung 130 Beispielnetz einer ER-Architektur zum Sammeln und Weiterleiten von Daten im Umfeld der Universität [IBR]

Demnach wurde ein lokaler Koordinator für die TU Braunschweig eingebacht. Dieser verbindet die einzelnen Umgebungen und bindet externe Koordinatoren an, die hier unter dem Koordinator „global“ zusammengefasst sind. Dieser könnte z.B. für Anforderungen des Netzbetreibers, der Stadt Braunschweig oder auch des Landes Niedersachsen stehen. Dem lokalen Koordinator der TU Braunschweig sind drei lokale Koordinatoren für a) das Institut für Nachrichtentechnik (IfN), b) das Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR) und c) das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), die jeweils mehrere eingebundene Umgebungen besitzen.
Durch die Privatsphäreregelsätze (Policies) werden ausschließlich der akkumulierte Energieverbrauch, d.h. die Summe der Verbräuche aller angebundenen Geräte, an den jeweils übergeordneten lokalen Koordinator weitergeleitet. Zusätzlich wird für die automatische Energieverbrauchsoptimierung noch die Prognose des akkumulierten Energieverbrauchs ermittelt und weitergeleitet. Daten über den Status von Geräten oder überhaupt die Gerätenamen werden nicht weitergeleitet.
In der Bachelorarbeit „Auswahl, Adaption und Evaluation verschiedener Routing-Protokolle für ein semi-statisches Sensor-Aktor-Netzwerk“ von Jost Stolze wurden außerdem verschiede Routing-Protokolle verglichen, die besonders für ressourcenarme Kleinstrechner zum Einsatz kommen könnten. Hintergrund ist hier, dass besonders kleine (und wenig komplexe) Geräte einfach und ressourcenschonend in das Netzwerk integriert werden können sollen. Ein übergeordneter Energy-Router müsste dazu mit einem weiteren (drahtlosen und ressourcenschonenden) Kommunikationsinterface ausgestattet werden – bspw. IEEE 802.15.4 im 2,4-GHz-Bereich. Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit des Routings – also der Wegewahl – der evaluierten Verfahren vor allem von der Anzahl der Hops abhängt – also von der Anzahl der Weiterleitung innerhalb des drahtlosen Netzes (lineare Topologie, siehe Abbildung 131) und nicht so sehr von der Blockierung durch viele benachbarte Knoten (gerasterte Topologie).

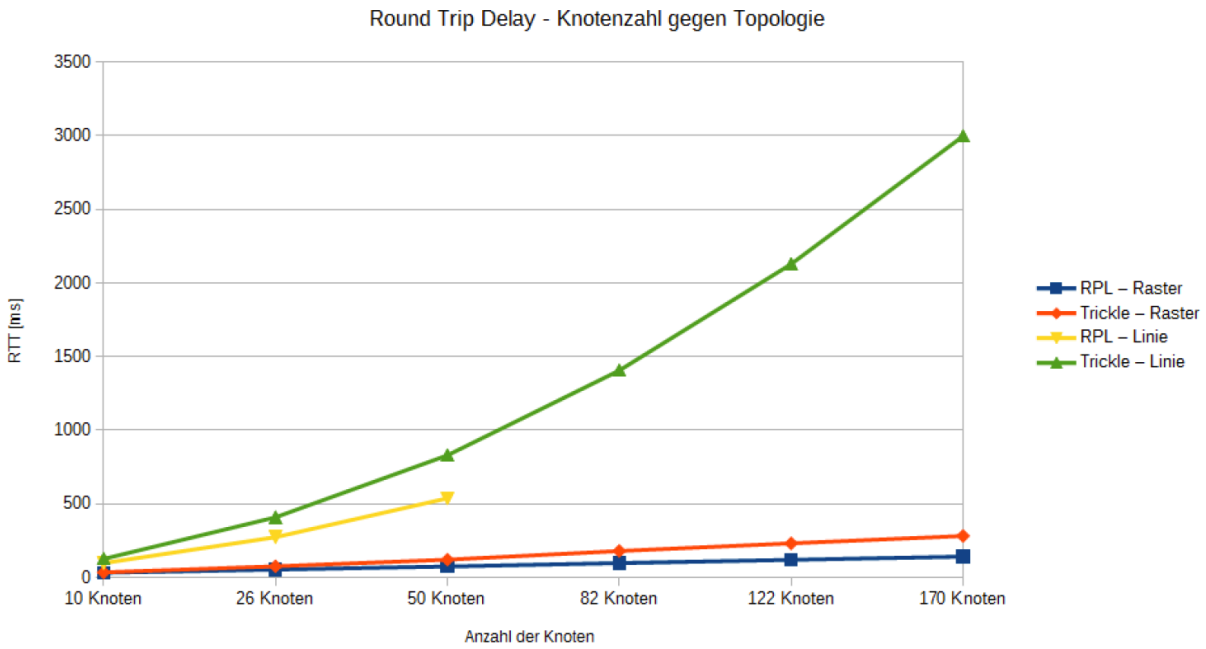


Abbildung 131 RTT-Messung mit vergleichbaren Knotenzahlen [IBR]

Die grundsätzliche Konzeption des Prinzips der Energy-Router, sowie des hierarchischen Privacy- und Sicherheits-Ansatzes wurde schon früher beschrieben. Die Umsetzung der Energy-Router erfolgte zunächst auf Kleincomputern, wobei das vorläufige Ziel war, dass ein Energy-Router pro Raum alle dort befindlichen Verbraucher/Erzeuger verwaltet. Um ein solches Netzwerk aufzubauen und die einzelnen Geräte miteinander logisch zu verknüpfen, werden außerdem Mechanismen zum Pairing und zur sicheren Kommunikation benötigt. Ein entsprechender Mechanismus wurde in der Bachelorarbeit von David Hellmers auf Basis eines Arbiters (siehe Abbildung 132) realisiert.

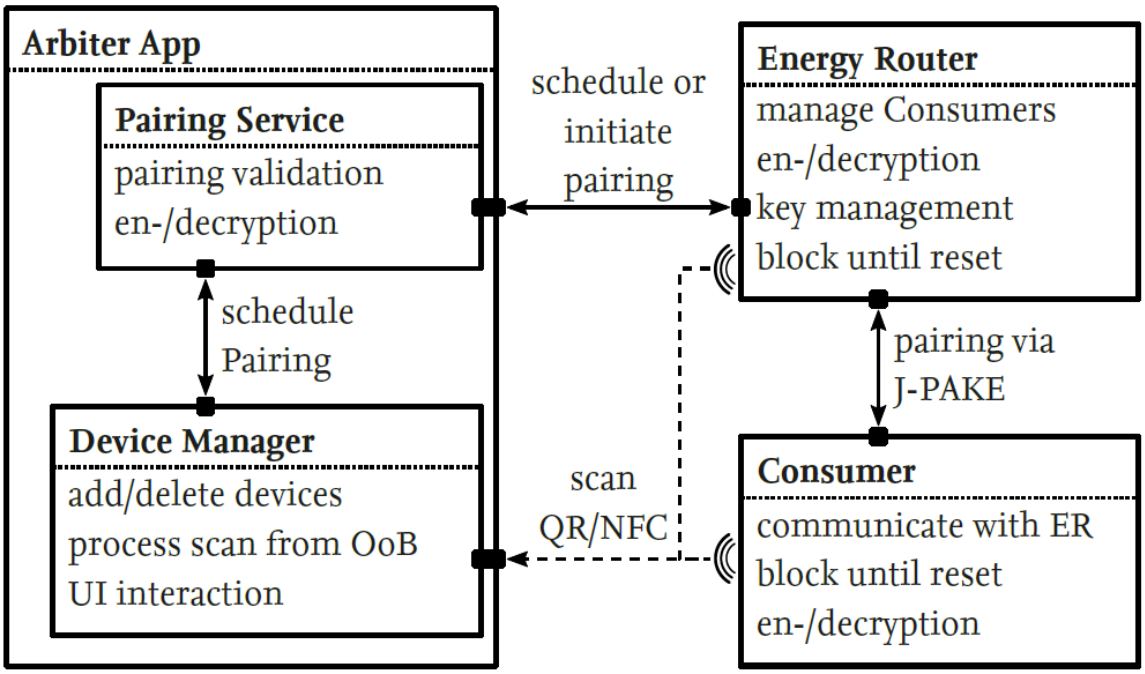


Abbildung 132 Architektur der Arbiter-Implementierung [IBR]

Als Arbiter dient im konkreten Fall ein Smartphone, welches die verschiedenen Geräte auf Basis von (verschiedenen) „Geheimnissen“ (Secrets) gegeneinander authentifizieren kann (siehe Abbildung 133). Das Protokoll ist in drei Schritte geteilt, wobei zwischen den einzelnen Schritten beliebig viel Zeit vergehen kann. Im ersten bzw. zweiten Schritt führen jeweils Alice und Bob ein Pairing mit dem Arbiter durch und bauen so eine gesicherte Verbindung auf:
Der Arbiter initiiert die Verbindung von verlangt von Alice und Bob jeweils ein Geheimnis (secret), welches in der Regel einer Zufallszahl entspricht. Alice und Bob generieren jeweils diese (unterschiedliche) Geheimnis und übermitteln es an der Arbiter. Der Aribiter liest die jeweiligen Geheimnisse und initiiert je einen J-PAKE („Password Authenticated Key Exchange by Juggling“) mit Alice und Bob. Im dritten Schritt können Alice und Bob direkt über einen Tunnel des Arbiters miteinander verschlüsselt kommunizieren und ein Pairing durchführen.

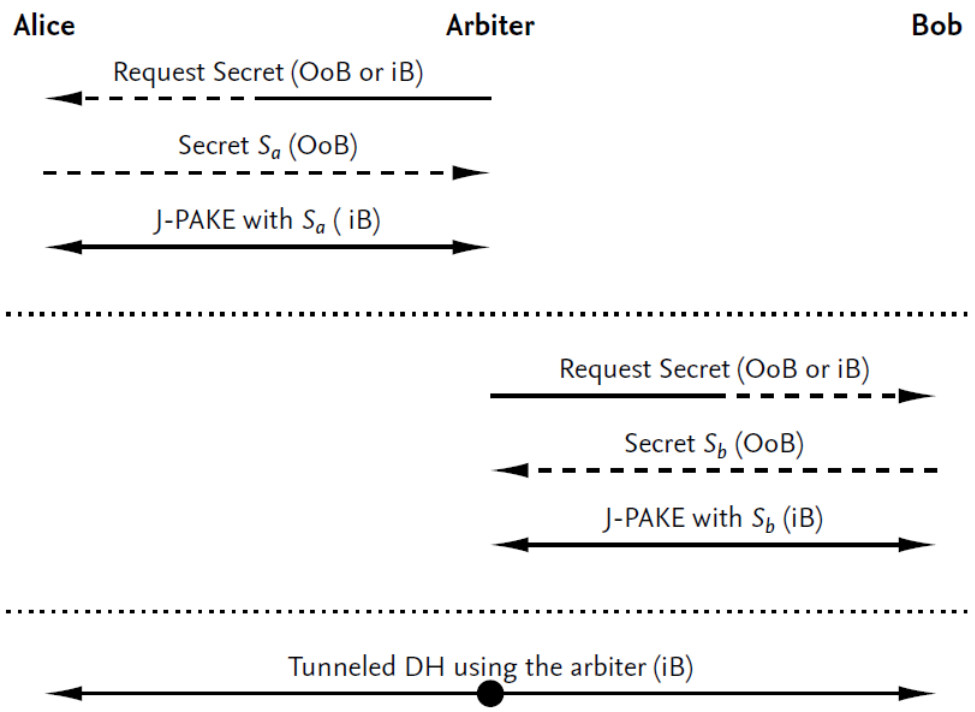


Abbildung 133 Generelle Funktionsweise des Arbiters [IBR]

Für das im oben beschriebene hierarchischen EnEff-Netzwerk lässt sich der Ablauf noch weiter vereinfachen: Da jedes Gerät (C) nur mit seinem übergeordneten Knoten (Engergy-Router – ER) gepairt wird, kann ein Pairing mit dem Arbiter wegfallen – dieser leitet (wie in Abbildung 134 dargestellt) lediglich das verschlüsselte Geheimnis von C an den ER weiter; der J-PAKE findet dann direkt zwischen ER und C statt.

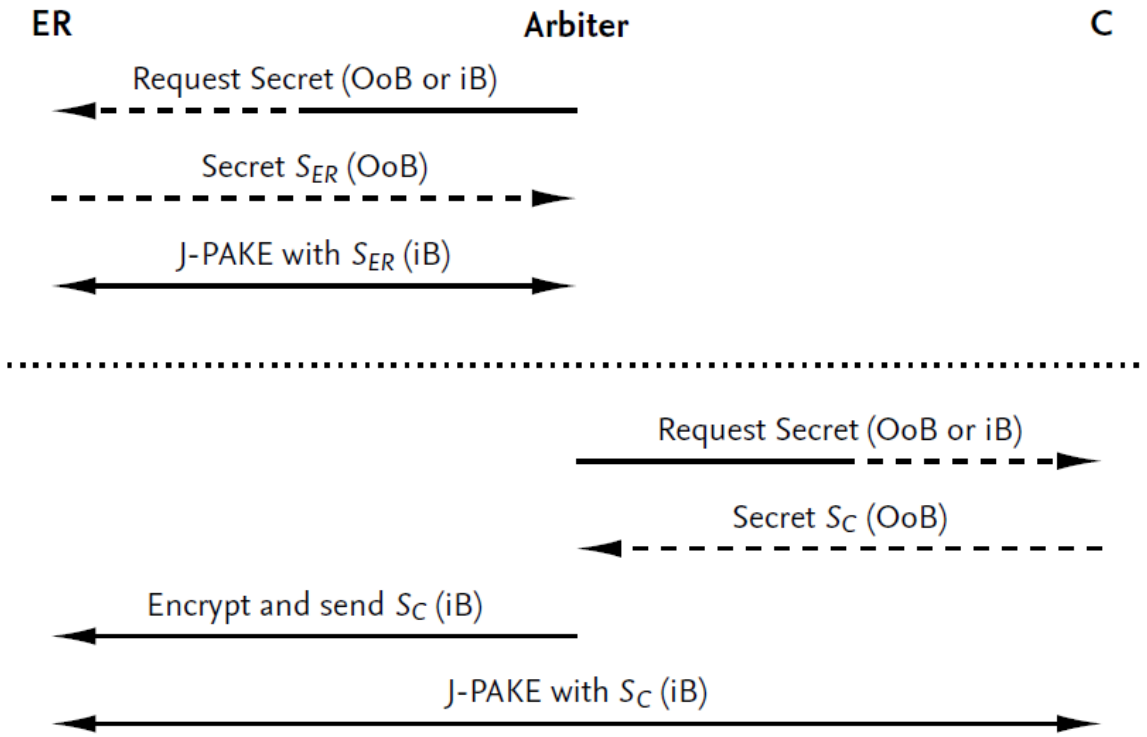
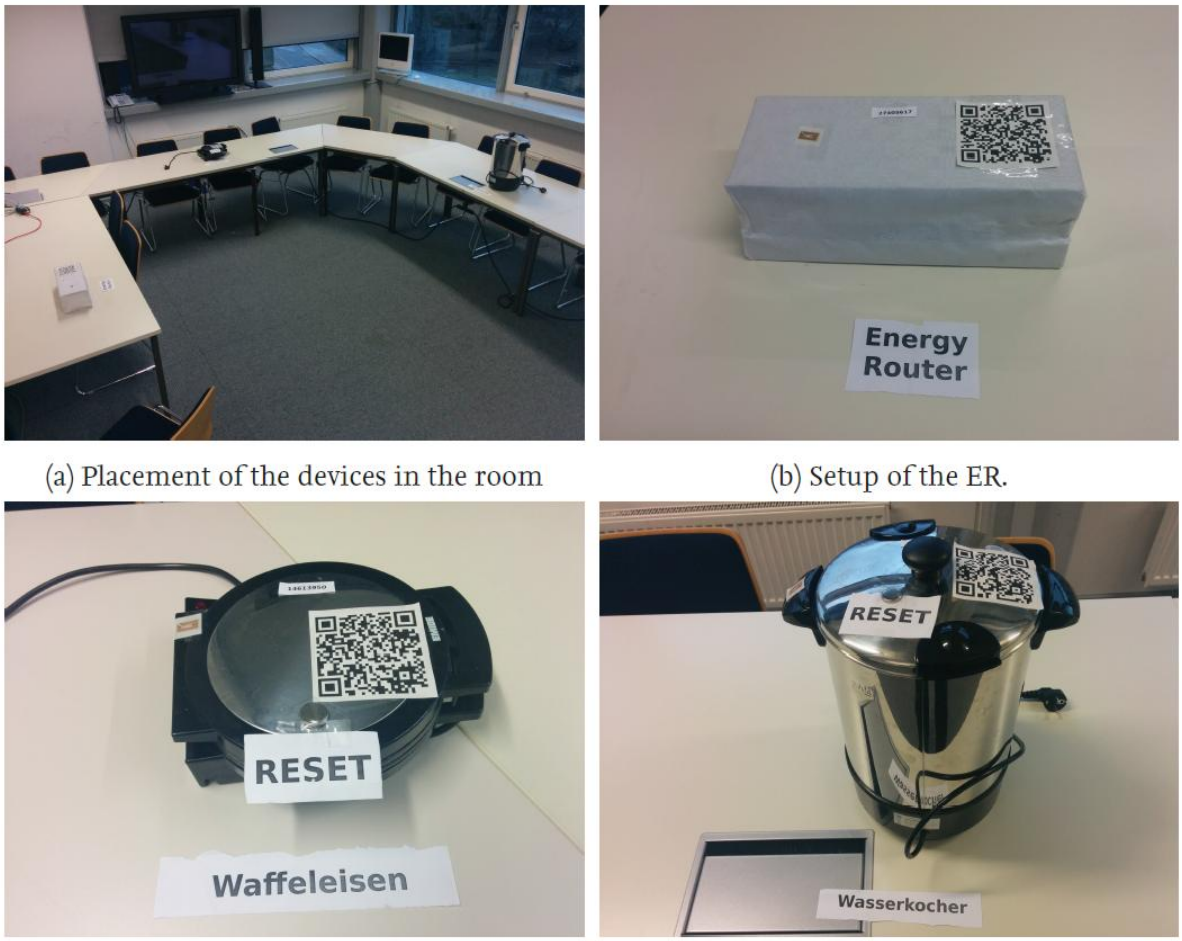


Abbildung 134 Funktionsweise des Arbiters im EnEff-Netzwerk

Die Sicherheit des gewählten Protokolls wurde durch eine detaillierte Analyse der Angriffsvektoren gezeigt, wobei „Denail-of-Service“ (DoS), „Eavesdropping“, „Man-in-the-Middle“-Angriffe, sowie „Dictionary-“ und „Replay-“Angriffe betrachtet wurden. Außerdem implementiert das Protokoll sogenannte „Forward Secrecy“, was auch bei einem späteren „enthüllen“ des initialen Passworts die Sicherheit des ausgetauschten J-PAKE-Schlüssels bewahrt. In einer quantitativen Evaluation auf einem beispielhaften System innerhalb des später beschriebenen Evaluationssystems (Real-Life-Lab Campus 2020) wurden die Ausführungszeiten des Pairings in unterschiedlichen Umgebungen gemessen (siehe Abbildung 136)
Es wurde außerdem evaluiert, welche Geheimnisarten sowohl sicher als auch benutzbar sind; dazu wurde unter anderem eine Benutzerstudie (siehe Abbildung 135) durchgeführt, die die verschiedenen Arten (PIN, QR-Code, NFC-Tag) auf ihre Benutzbarkeit hin untersucht hat. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Eingabe eines PINs die schlechteste Performance aufwies. Die Ergebnisse für das Scannen von QR-Codes bzw. NFC-Tags sind sehr ähnlich. Aus Gründen der Sicherheit sind NFC-Tags zu bevorzugen, da man hier das Geheimnis auch dynamisch erzeugen, bzw. verändern kann. Zur weiteren Absicherung wird auf TOFU (trust on first use) gesetzt: Sobald ein Gerät mit einem Energy-Router verbunden ist, kann es erst nach einem aktiven Reset der vorherigen Verbindung wieder mit einem neuen Router verbunden werden.



(a) Placement of the devices in the room (b) Setup of the ER.

(c) Setup of the waffle maker. (d) Setup of the water boiler.

Abbildung 135 Versuchsaufbau der Benutzerstudie [IBR]

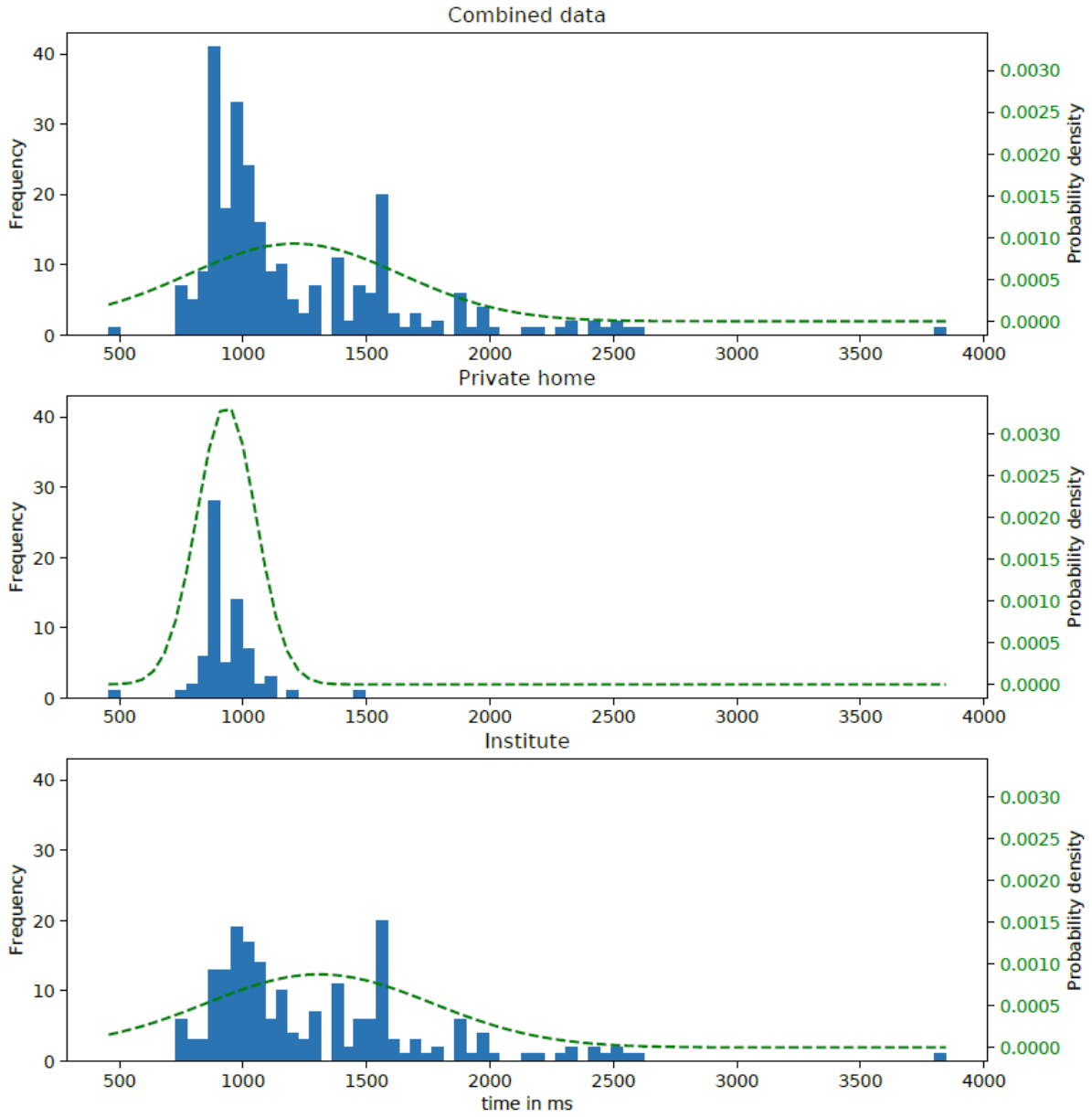


Abbildung 136 Ausführungszeiten der J-PAKE-Pairing [IBR]

7.5.2 Teil 2: Einbindung von Geräten

Um diverse Geräte in die gerade beschriebene Kommunikationsinfrastruktur einzubinden, wurden parallel verschiedene Ansätze verfolgt. Ziel ist es jeweils zunächst den Energieverbrauch möglichst feingranular zu bestimmen, um darauf aufbauend dann sowohl Informationen für die Nutzer bereit stellen zu können, als auch eine automatische Steuerung (bzw. Regelung) zu ermöglichen.

Nachfolgend wird in vernetzte und nicht-vernetzte Geräte unterschieden. Unter vernetzten Geräten werden Geräte verstanden, die über eine Kommunikationsverbindung ihren Betriebsstatus mitteilen können. Unter nicht-vernetzte Geräte werden alle verbleibenden Geräte verstanden.

Zur weiteren Forschung und Evaluierung wurde in der Bachelorarbeit von Thomas Büttner mit dem Titel „Entwicklung einer Softwareplattform zur Nutzung von Smart Plugs durch intelligente Geräte“ zunächst eine Marktanalyse vorhandener Geräte zu Strommessung und Steuerung (Zwischensteckdosen) durchgeführt. Dabei wurde zunächst anhand von Datenblättern und Produktbeschreibungen geeignete Geräte für die Strommessung und Steuerung analysiert. Wobei auch auf eine mögliche Funktionserweiterung (OpenSource Software auf den Geräten und genügend Ressourcen) geachtet und die Verwendung von Standardprotokollen Wert gelegt wurde. Basierend auf dieser Analyse wurde eine Auswahl geeigneter Hardware getroffen, angeschafft und in Betrieb genommen.
In Tabelle 34 ist eine beispielhafte Vorevaluation auf Basis von Datenblättern und Herstellerangaben zu sogenannten Smartplugs mit Dimmfunktion gegeben. Weitere Übersichten zu Smartplugs mit Schaltfunktion und Smartplugs mit Schalt- und Messfunktion sind in der entsprechenden Abschlussarbeit zu finden. Letztendlich wurden die beiden Smartplugs Edimax SP-2101W und D-Link DSP-W215 aufgrund ihrer technischen Spezifikationen für am geeignetsten befunden und für die reale Einbindung und Evaluation angeschafft (Abbildung 137).

Abbildung 137 ***Zur Untersuchung ausgewählte Zwischenstecker Edimax SP-2101W und D-Link DSP-W215 [Quelle: Edimax & D-Dlink]***

Tabelle 34 ***Übersicht der Smatplugs mit Dimmfunktion („ZwS“ = Zwischenstecker; „-“ = keine Angabe)***

Hersteller	Modell	Protokoll	Max. Last	Aufnahme	Gateway	Reichweite	Preis (€)
bitronHome	SP mit Dimmer	ZigBee	575 W	0,4-0,9 W	ja	-	41,90
COQON	QLight PSDMZ001	Z-Wave	3680 W	<0,5 W	ja	-	89,99
COQON	QLight PSDQ0001	proprietär	3680 W	0,7 W	ja	-	110,49
tapHOME	EASYPlug Dim	Z-Wave	500 W	-	ja	100 m	49,00
Telekom	ZwS m. Dimmfunktion	proprietär	300 W	1 W	ja	100 m	59,99

Nachdem Schnittstellen (siehe Abbildung 138) zu den vorhandenen Datenbrokern geschaffen wurden, welche im Laufe des Projekts zu Energy-Routern ausgebaut wurden, konnten die einzelnen Geräte evaluiert werden. Dazu wurde der in Abbildung 139 gezeigte Evaluationsaufbau verwendet. Es wurde neben der Schaltverzögerung, der Messverzögerung und der Messabweichung (siehe die entsprechende Abschlussarbeit) auch der Eigenverbrauch der Zwischenstecker in Abhängigkeit der angelegten Last ermittelt (Abbildung 140). Gerade die Betrachtung des Eigenverbrauchs ist in gewisser Weise ernüchternd: Beide evaluierten Geräte nehmen mit jeweils >2 Watt selbst im Leerlauf mehr als viermal soviel Leistung auf, wie der Hersteller behauptet. Unter Last steigt die Eigenaufnahme dann bis auf 4,5 Watt.

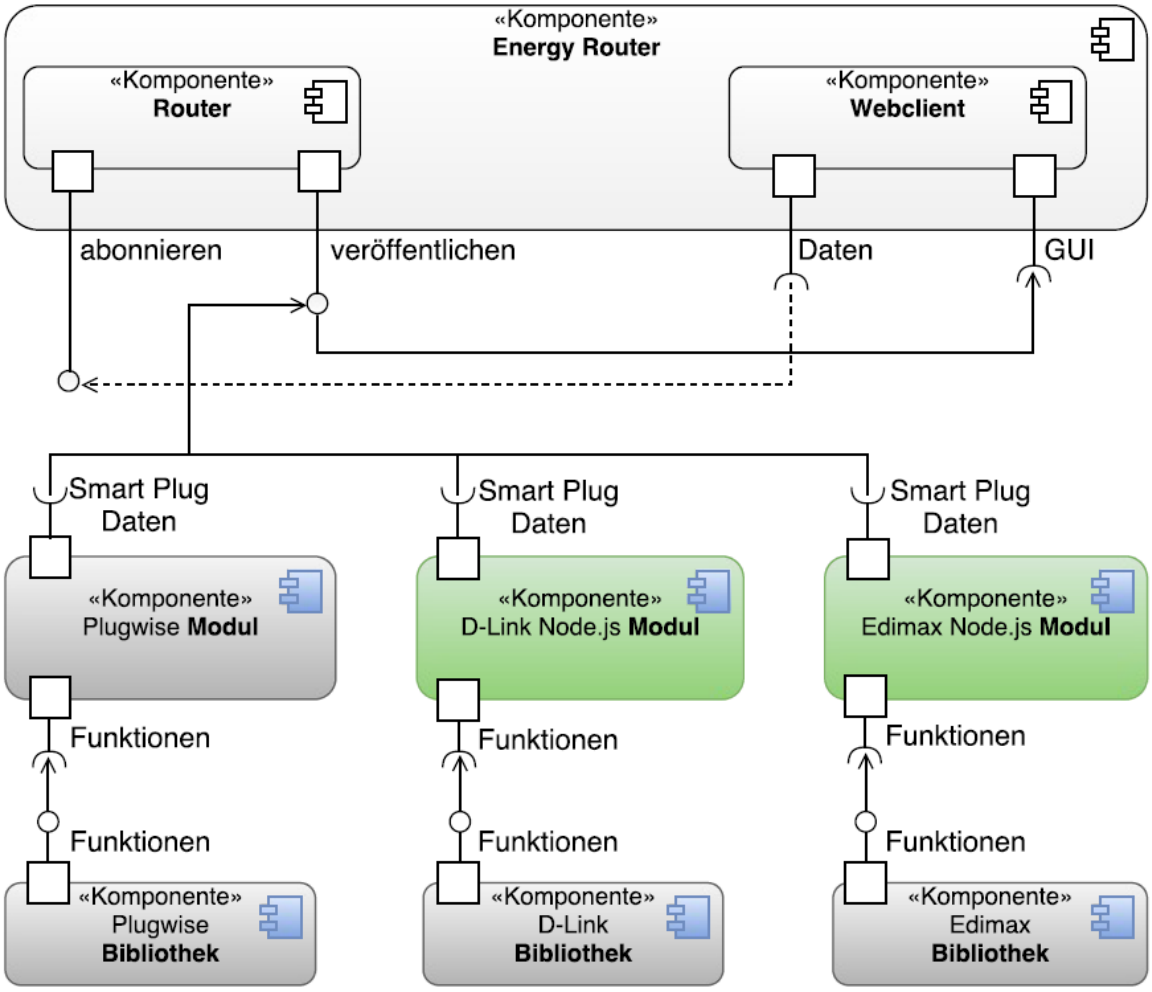


Abbildung 138 Komponentendiagramm der Softwarearchitektur [IBR]

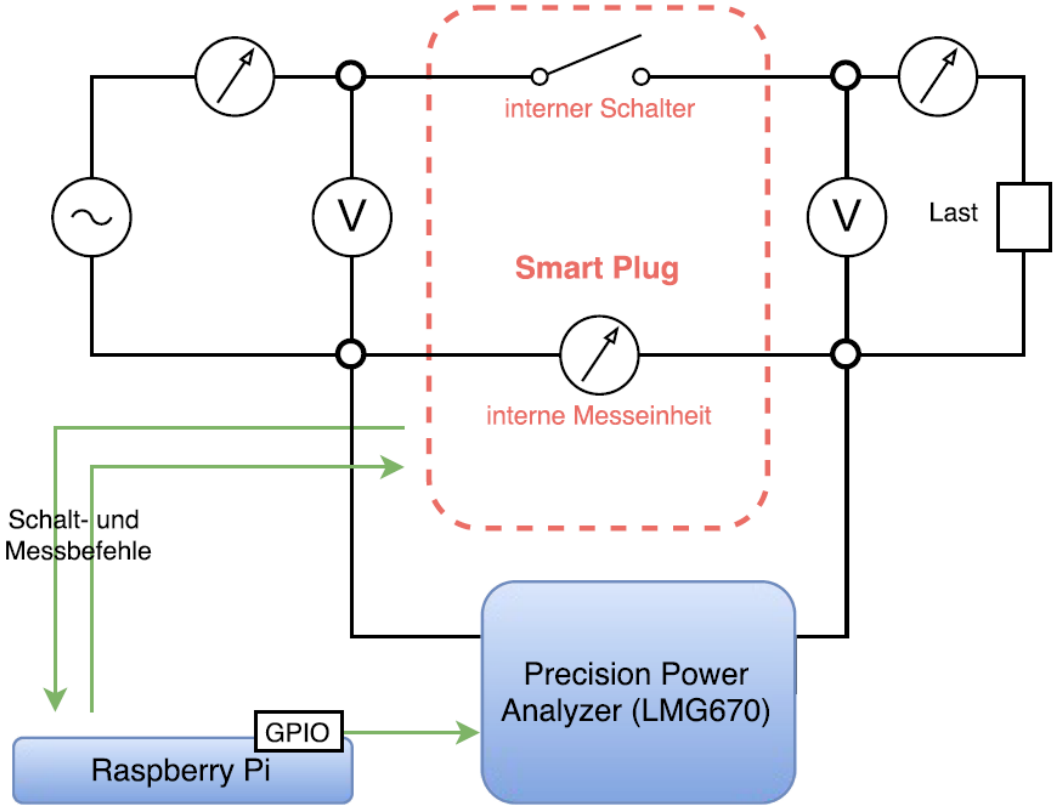


Abbildung 139 Versuchsaufbau zur Evaluation der Smartplugs [IBR]

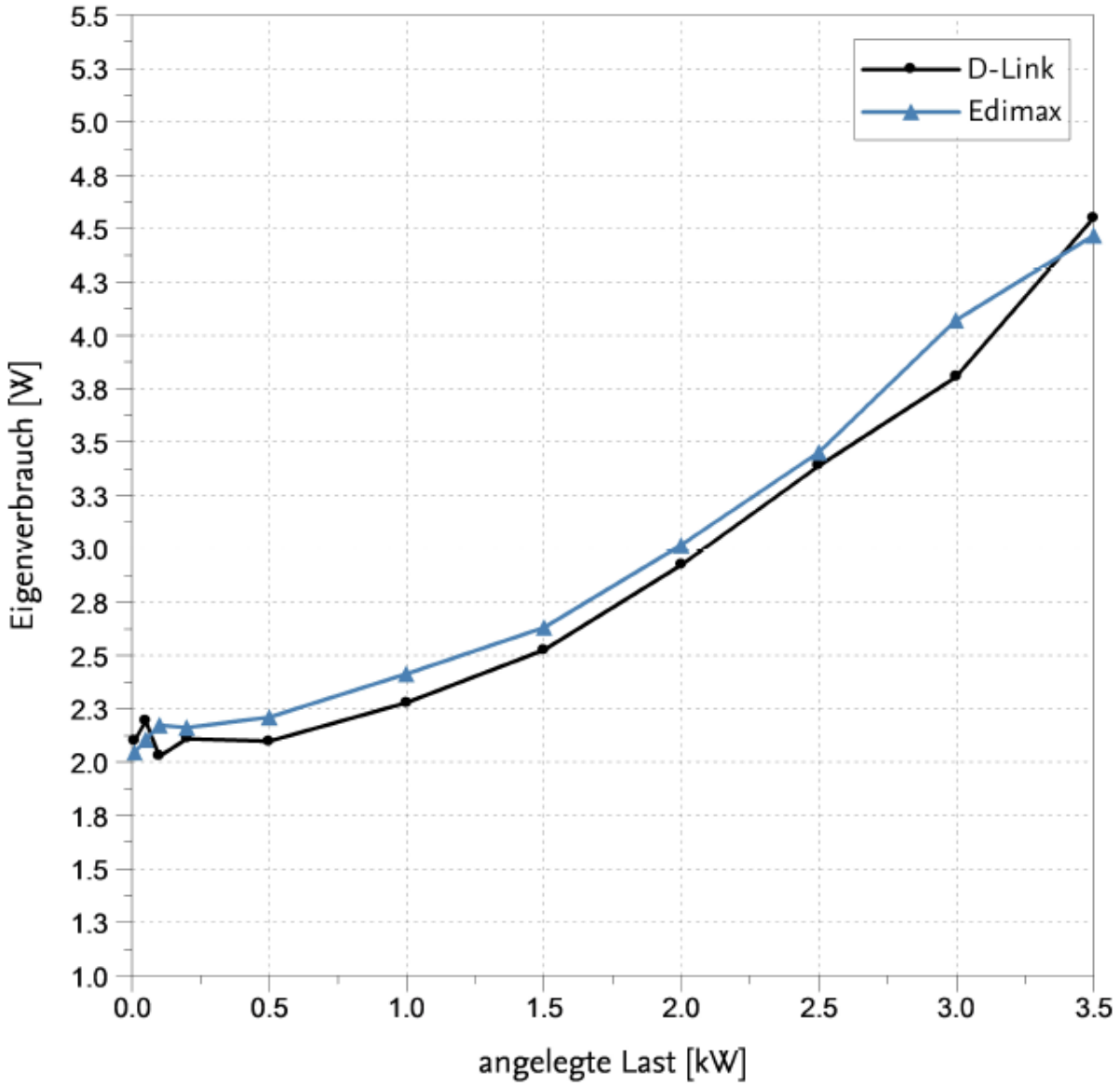


Abbildung 140 Eigenverbrauch der Smartplugs [IBR]

Die untersuchten Smartplugs können zwar die Leistungsaufnahme der angeschlossenen Geräte messen und die angeschlossenen Geräte ein und ausschalten – von einer wirklichen Steuerung kann man jedoch nicht sprechen, da ja nur binär zwischen ein- und ausgeschaltet unterschieden werden kann. Für Leuchten mag das ausreichend sein, die meisten anderen Geräte haben jedoch mehr als nur zwei Zustände und zur weiteren Beeinflussung und Steuerung müssen auch andere/verschiedene Parameter herangezogen werden.
Aus diesem Grund wurden in mehreren Studentischen Arbeiten („Lokale bedarfsangepasste Steuerung für elektrische Verbrauchern“ von Daniel Heidorn und „Entwicklung und Evaluation eines steuerbaren RGB-LED-Strahlers“ von Adrian Weimann) mehrere vernetzt steuerbare Prototypen geschaffen: Ein Kühlschrank, ein Gefrierschrank und eine LED-Leuchte wurden mit entsprechender Steuerungstechnik und Kommunikationsschnittstellen ausgestattet, die eine vollständige Steuerung durch die später erläuterte Infrastruktur ermöglichen (siehe

Abbildung 141). Die physikalische Anbindung (LAN, WLAN, ZigBee, IEEE802.15.4) an das System der Energy-Router wurden ebenfalls geschaffen. Die Verbrauchsdaten lassen sich aus dem Netz der Energy-Router abfragen und visualisieren.
In einer weiteren studentischen Arbeit („Eine energieeffiziente Plattform zur Einbindung vorhandener Haushaltsgeräte in das Internet-of-Things“ von Torben Schmidt) wurde die Kühl- bzw. Gefrierschranksteuerung weiter optimiert, prototypisch implementiert (Abbildung 145) und evaluiert.

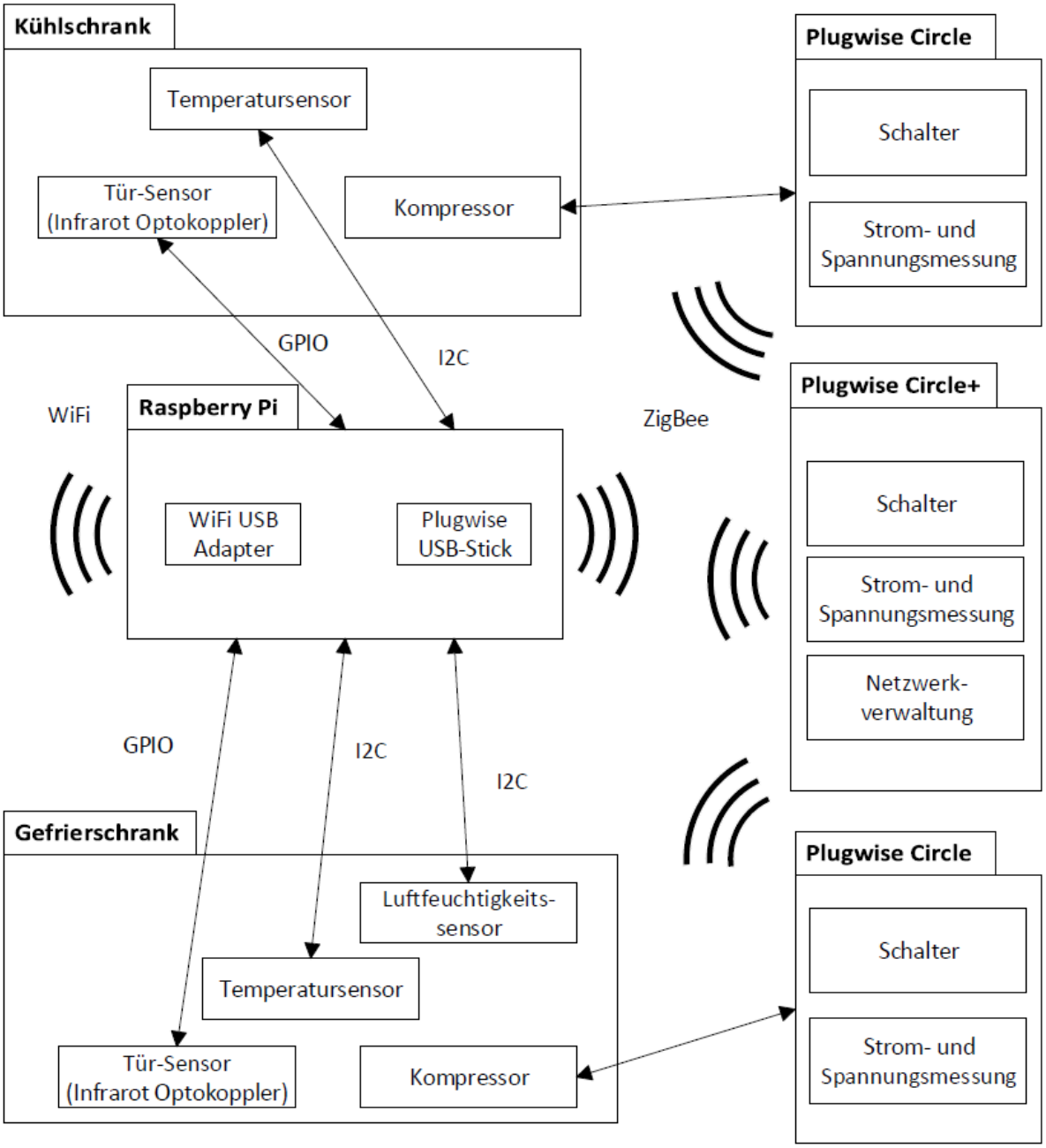
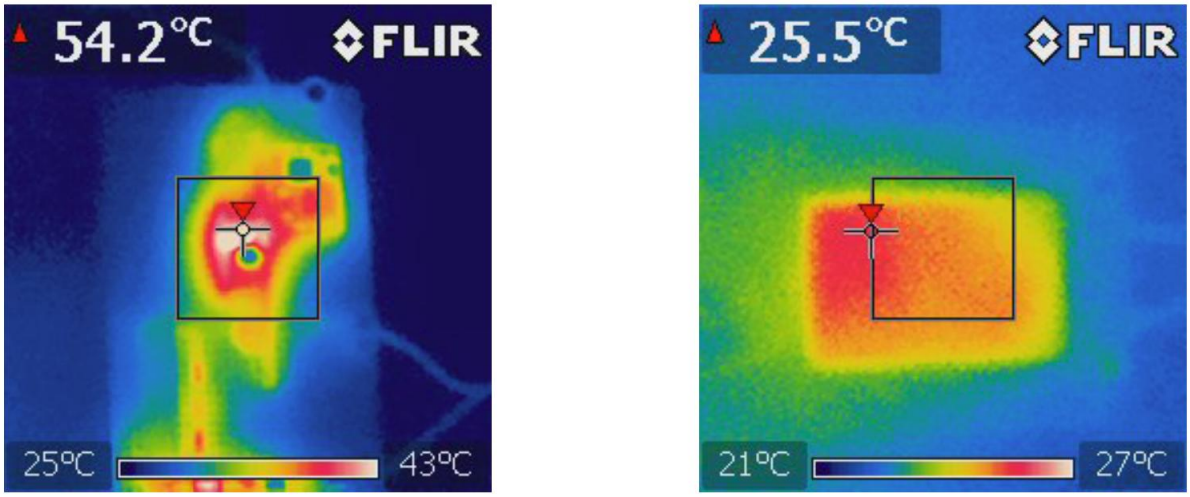


Abbildung 141 Komponenten von Kühl- und Gefrierschrank-Prototypen [IBR]

Ziel dieser Arbeit war es, ein herkömmliches Kühlschrankthermostat (siehe Abbildung 144) zu ersetzen, wobei zunächst die Grundfunktionalität (autarker Thermostatbetrieb) und im weiteren Verlauf auch die vernetzte Steuerung implementiert wurde. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Kosten und den Eigenverbrauch der entwickelten Schaltung gelegt. In Abbildung 143 ist dazu beispielhaft der gemessene Stromverbrauch des Microcontrollers über die Zeit aufgetragen.
Der verwendete Microcontroller (ESP8266) verfügt bereits über ein WLAN-Interface, ist weit verbreitet und bei Einkaufspreise von unter 3 Euro pro Stück auch sehr kostengünstig. Durch seine weite Verbreitung gibt es bereits eine Vielzahl von Entwicklungsumgebungen und Betriebssysteme für den Conroller, was das fertige Thermostat auch für versierte Bastler interessant machen dürfte, da hier einfach eine neue (eigene) Software aufgespielt werden kann.
Zur Spannungsversorgung der Schaltung (innerhalb eine Kühlschranks gibt es i.d.R. nur die Netzspannung von 230 Volt) mit 3,3 Volt wurde ein entsprechender Spannungswandler benötigt, der unter den Aspekten Kosten, Baugröße und Verlustleistung evaluiert uns ausgewählt wurde. In Abbildung 142 ist der direkte Vergleich zwischen einem Kondensatornetzteil und einem Schaltnetzteil in Bezug auf Wärmeentwicklung zu sehen; die Aufnahmen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 24° C gemacht. Es ist schnell ersichtlich, warum letztendlich ein (vergleichsweise) teures Schaltnetzteil eingesetzt wurde: Eine zusätzliche starke Wärmequelle, wie sie ein Kondensatornetzteil im Teillastbetrieb darstellt, wäre innerhalb eines Kühlschranks kontraproduktiv.



(a) Kondensatornetzteil (b) Schaltnetzteil

Abbildung 142 Kondensatornetzteil vs. Schaltnetzteil - Temperaturentwicklung im Realbetrieb [IBR]

Das Schalten der Last (Kühlschrankkompressor) erfolgt durch ein Solid-State-Relais (SSR), welches gegen ein herkömmliches Relais evaluiert wurde. Ein SSR kostet zwar i.d.R. bis zum 10-fachen eines vergleichbaren „normalen“ Relais, benötigt aber nur einen sehr geringen Schaltstrom, welcher im evaluierten Fall auch um ca. Faktor 10 geringer ist.

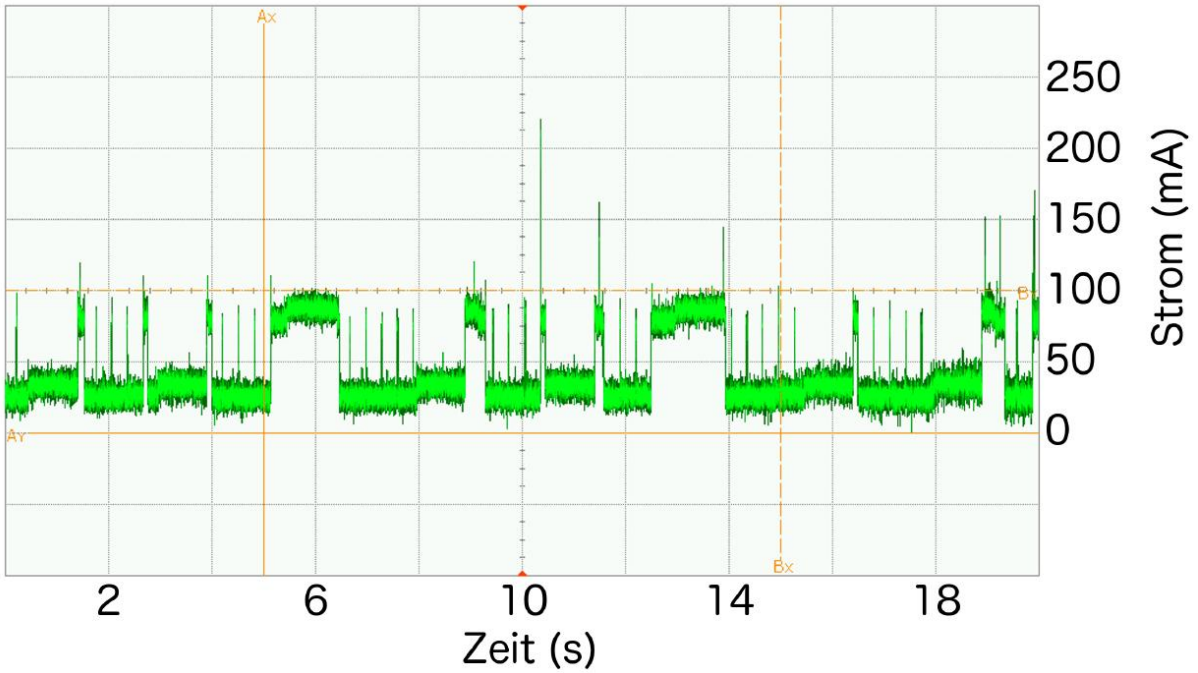


Abbildung 143 Stromverbrauch des Microcontrollers des entwickelten Smart-Thermostats [IBR]

Summiert man die Verbräuche der weiteren Komponenten, liegt die Eigenaufnahme nur noch bei 0,8 Watt im Durchschnitt – bei erheblich erweitertem Funktionsumfang. Im Vergleich zu den zuvor evaluierten Zwischensteckern ist das eine beträchtliche Einsparung. Bei maschineller Serienfertigung der vorgestellten Lösung wären die Kosten eines fertigen Produkts bei ca. 25 Euro anzusetzen (inkl. Gewinnmarge von 100%) – das ist in etwas auch der Preis, der für ein herkömmliches Thermostat als Ersatzteil berechnet wird.
Um nicht immer mit realen Kühl- bzw. Gefrierschränken arbeiten zu müssen, wurden auch mehrere Modelle von gemessenem Kühlschrankverhalten implementiert, die das reale Verhalten hinreichend genau abbilden (Abbildung 146).

Abbildung 144 Herkömmliches Kühlschrankthermostat [Fa. Danfoss]

Durch die vereinheitlichte Kommunikation sind erste Grundlagen für eine systemübergreifende Kommunikation zwischen vorhandenen Geräten und vollintegrierten Geräten geschaffen worden, die die Grundlage für den Vergleich der beiden Strategien liefern soll. Über die Energy-Router können verschiedenste Geräte über unterschiedliche Netzwerke kommunizieren und mit den Energy-Routern verknüpft werden.

Eine Klassifikation und Unterteilung in unterschiedliche Geräteklassen erlaubt dabei die Einschätzung, für welche Geräte eine volle Integration und für welche eine Teilintegration sinnvoll ist. Für rein benutzergesteuerte Geräte (bspw. Lampen) ist keine Steuerung sondern nur eine Abschätzung des erwarteten Energieverbrauchs basierend auf gelernten Daten der Vergangenheit möglich.

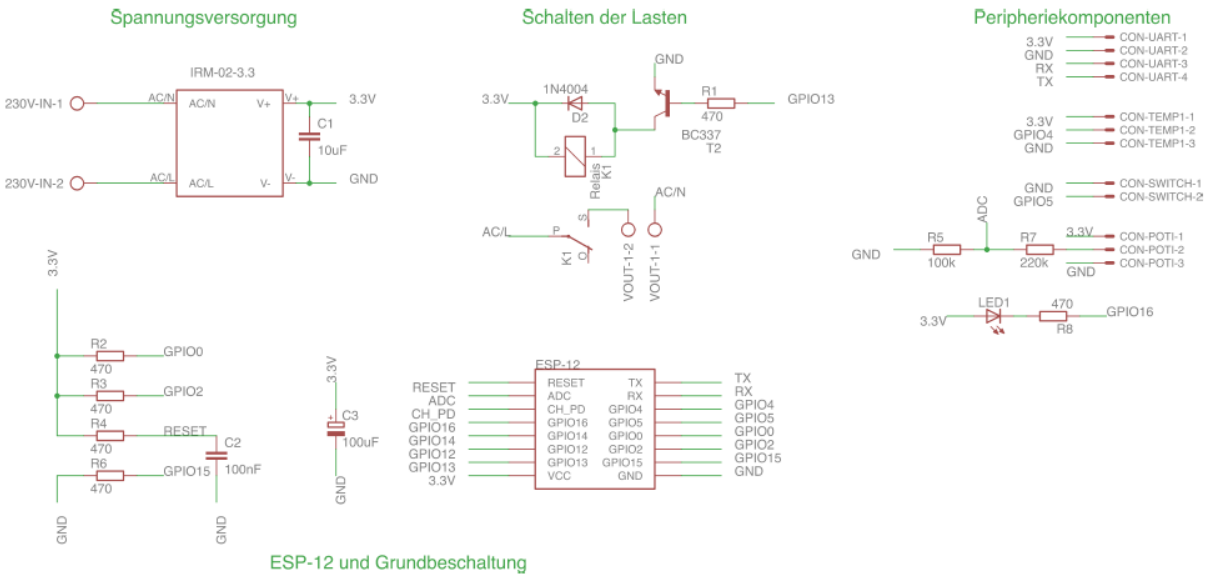


Abbildung 145 Schaltplan des zweiten Prototypen [IBR]

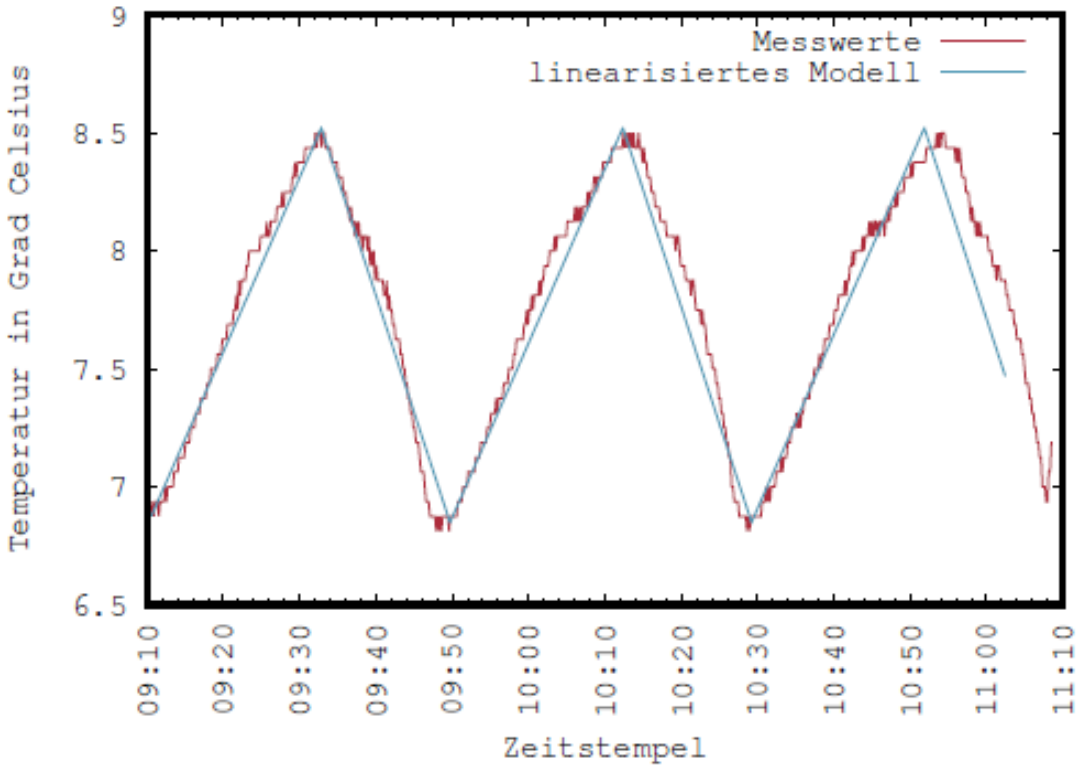


Abbildung 146 Linearisiertes Kühlschrankmodell [IBR]

7.5.2.1 Mehrgeräte-Erkennung anhand von elektromagnetischen Störungen

Zur Ermittlung der notwendigen Einzelverbräuche soll außerdem eine Geräteerkennung eingesetzt werden. Wie in Abbildung 148 dargestellt, werden für diese Geräteerkennung geeignete (aggregierte) Energiemessdaten sowie Gerätemodelle benötigt. Die Gerätemodelle geben das Verhalten der Geräte wider. Sie müssen zuvor in einer Trainingsphase über separat gemessene Einzelverbräuche bestimmt werden. Um diesen beiden Mess-Anforderungen gerecht zu werden, wurden zwei Mess-Systeme realisiert:
Das Mess-System 1 besteht aus zahlreichen Mess-Steckdosen, die unter Verwendung der Funktechnik Zigbee zu einer Komplett-Lösung verbunden wurden. Mittels einer am IfN implementierten Software werden diese sekündlich von einem Mini-PC abgefragt.
Das Mess-System 2 dient zur Messung der aggregierten Verbräuche komplexer Systeme. Dieses Mess-System kann Energieverbräuche mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu 50 Hz messen.
Da die Mess-Systeme an verschiedene IT-Systeme angeschlossen sind und teilweise sogar über mehrere Räume verteilt sind, wurde eine Lösung zur Übermittlung der Messdaten benötigt. Dazu wurde der zuvor beschriebene „Energy-Router“ verwendet. Dieser ermöglicht es anderen Programmen, Daten miteinander auszutauschen. Diese Software dient dem IfN und dem IBR als gemeinsame Forschungsplattform. Insgesamt haben etliche Studierende beider Institute in ihren Abschlussarbeiten mit dem Energy-Router gearbeitet.
Für das Training der Gerätemodelle wurden auf der Basis der mathematischen Berechnungsumgebung MATLAB Algorithmen implementiert. Dazu wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt:
Der Algorithmus 1 arbeitet auf der Basis von Hidden-Markoff-Modellen sowie angepassten Gerätemodellen. Mit diesem kann das zeitliche Verhalten von Geräten nachgebildet und erkannt werden.
Der Algorithmus 2 basiert auf der Modellierung von neuronalen Netzen. Mit diesem kann das aktuelle Verhalten aller Geräte zugeordnet werden.
Die vorhandenen Algorithmen zeigen die grundsätzliche Funktionsweise, jedoch auch die Komplexität des Themas. Die Algorithmen sollen weiter ausgearbeitet werden.

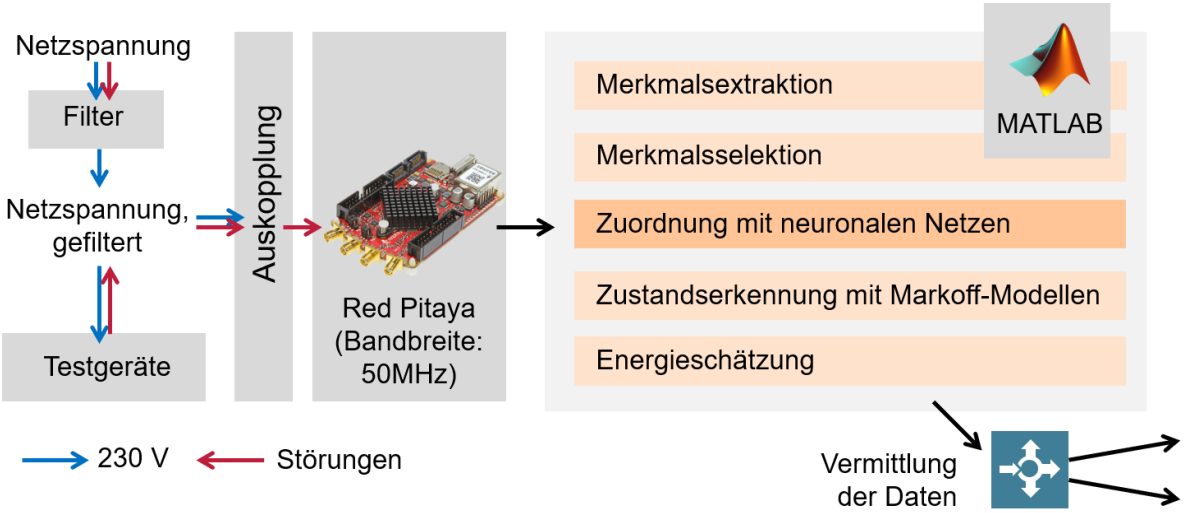


Abbildung 147 Funktionsweise der Geräteerkennung [IBR]

Die Mess-Systeme und der Energy-Router wurden bereits in verschiedenen Versuchsfeldern installiert: Neben der Teeküche sowie einem Büroraum des IfN, sowie Einzelanlagen im IBR (s.u.) wurden auch die Forschungs- und die Experimentierfabrik des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) für Messungen verwendet. Für Forschungen an realen Werkzeugmaschinen unterhält das IWF einen Maschinenpark, die sogenannte Forschungsfabrik. Bei der Experimentierfabrik handelt es sich um eine automatisierte Miniatur-Modelfabrik. Diese bildet reale Fertigungsprozesse nach. Zusätzlich wurden die einzelnen Versuchsfelder zu einem Gesamtdemonstrator dem "Real-Life-Lab Campus 2020" verbunden. Dadurch können zukünftig auch komplexe Zusammenspiele erprobt werden. Die Messungen in diesen verschiedenen Versuchsfeldern werden u.a. zur Entwicklung und Evaluation der Geräteerkennung verwendet.
Zusätzlich zu den oben beschrieben Messdaten werden weitere Messdaten auf ihre Eignung für die Geräteerkennung überprüft. Elektrische Geräte verursachen bei ihrem Betrieb kleinste Veränderungen der Netzspannung. Es wurde mit positivem Resultat untersucht, ob diese Veränderungen für die Geräteerkennung eingesetzt werden können. Dazu wurde eine Hardware-Lösung zur Ermittlung der Veränderungen der Netzspannung gebaut und daraus ein Demonstrator entwickelt. Für den Aufbau des Demonstrators wurde der oben beschriebene Algorithmus 2 auf Basis von neuronalen Netzen genutzt. Mit dem Demonstrator sollen weitere Evaluationen durchgeführt werden.
Insbesondere elektronische Geräte lassen sich durch die zuvor beschriebene Technik kaum identifizieren. Das liegt zum einen an ihrem geringen Energieverbrauch, der sich unter Umständen kaum von den Störungen anderer aktiver Geräte abhebt. Des Weiteren besitzen elektronische Geräte teilweise sogar einen variablen Verbrauch, was deren Identifikation deutlich erschwert.
Trotz der geringen Leistungsaufnahmen besitzen solche Geräte teilweise erhebliche Laufzeiten, teilweise handelt es sich sogar um Dauerläufer.
Deshalb wurde die Idee verfolgt, ob sich weitere Daten zur Identifikation der Geräte eignen könnten. In Voruntersuchungen zeigte sich, dass insbesondere elektrische (eher günstige) Geräte elektromagnetische Störungen zurück in das Energieversorgungsnetz einspeisen. In direkter Nachbarschaft zu den Geräten können diese Störungen detektiert werden.

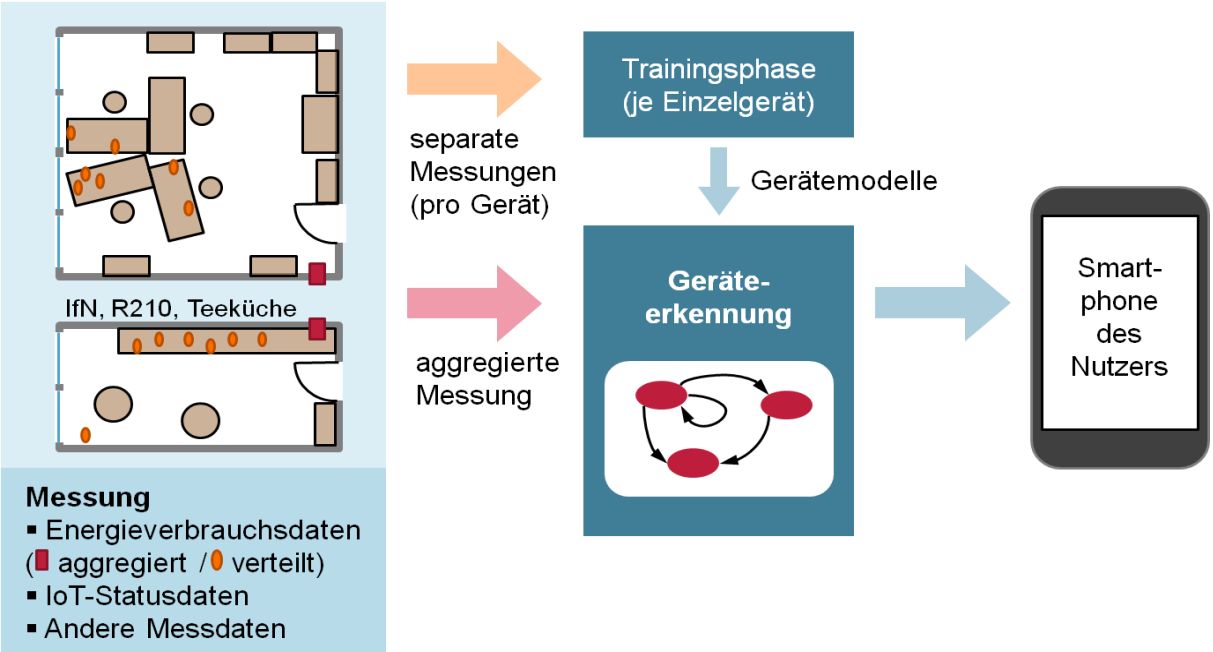


Abbildung 148 Systembild zur Realisierung einer Geräteerkennung [IfN]

Anhand des nachfolgend dargestellten Messaufbaus wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit neuronale Netze trainiert. Dazu wurden die untersuchten Geräte einzeln Vermessung und die Charakteristika der Störungen extrahiert. Teilweise waren auch Langzeitmessungen notwendig, da sich die Störungen mit der Zeit veränderten, da sich beispielsweise das Gerät aufheizte.
Durch eine Trainingsmethode, die die einzelnen Gerätecharakteristika beim Training miteinander kombiniert, konnte schließlich ein neuronales Netz trainiert werden, dass die Gerätezustände ermittelt.

7.5.2.2 Demonstrator: „Real-Life-Lab Campus 2020“ – Die Umgebungen

In diesem Kapitel werden die Umgebungen beschrieben, die in den zuvor beschriebenen Demonstrator eingebunden wurden. Dabei wird auch auf die Geräte in den Umgebungen, deren Charakteristiken sowie auf die zuvor beschriebenen Techniken der Einbindung eingegangen.

7.5.2.3 Institut für Nachrichtentechnik – Teeküche

Die erste eingebundene Umgebung war die Teeküche des Instituts für Nachrichtentechnik (IfN). Die bestehenden, enthaltenen Küchengeräte, die durchweg elektrische Energie in thermische Energie umsetzen, waren durch ihre hohe Leistungsaufnahme – im Vergleich zu den sonst am Institut vorhandenen Bürogeräten – gut für die Erprobung und Demonstration der frühen Algorithmen und System geeignet. Aus diesem Grund, sowie aus dem Grund, dass in die Geräte keine Einweisung erfolgen musste, wurden auch viele der entstandenen Smartphone- und Tablet-Anwendungen in dieser Umgebung evaluiert.

Auch in der heutigen Zusammenstellung des Demonstrators, steht diese Umgebung von ihrem Aufbau und ihrer Ausstattung stellvertretend für Teeküchen bzw. für Pausenräume in Unternehmen und Einrichtungen. Darüber hinaus kann und wurde sie auch zur Evaluation im Kontext privater Haushalte verwendet.

Die Küchengeräte im Einzelnen:

- Kühlschrank
- Wasserkocher
- (festinstallierter) Wasserboiler
- Zwei Herdplatten
- Kaffeevollautomat
- Zwei Kaffeemaschinen
- Geschirrspüler

7.5.2.4 Institut für Nachrichtentechnik – IT & Simulationscluster

Das IfN betreibt durch seine informationstechnische Ausrichtung eine höhere Anzahl Server, IT-Infrastrukturgeräte, sowie mehrere Simulationscluster zur Berechnung aufwendiger Algorithmen. Dazu unterhält das Institut auch einen eigenständigen Serverraum.
Diese IT-Ausstattung kann zur Demonstration repräsentativ für IT-Unternehmen, jedoch auch normale Unternehmen stehen, da die IT-Ausstattung von Unternehmen stetig steigt.

Die Geräteausstattung nach Kategorien:

- Server, variable Last bis ..., Last bei Leerlauf
- Simulationsserver, Last bei Simulation: , Last bei Leerlauf
- Switch, typische Last im IfN:
- Klimaaggregat: Nicht vermessen

7.5.2.5 Verschiedene Büros im Institut für Nachrichtentechnik sowie im Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund

Darüber hinaus wurden auch ausgewählte Büros von Mitarbeiterinnen sowie Mitarbeitern im IfN sowie im IBR mit Messtechnik bzw. Software ausgestattet.
Da die Daten dieser Arbeitsplätze direkt Mitarbeiterinnen bzw. Mitarbeitern zugeordnet werden könnten, wurden hier bereits direkt zu Beginn auf eine Datenschutzkonforme Verarbeitung mit Hilfe der erarbeiteten Konzepte der Daten geachtet. Dies ließ die Evaluation der Datenschutzkonzepte zu, verhinderte jedoch die Evaluation der Energieverbrauchsschätzung dieser Computer.
Die Computer-gestützten Arbeitsplätze stehen im Demonstrationsaufbau stellvertretend für Schreibtischarbeitsplätze in jeglichen Unternehmen oder Einrichtungen.

Die Geräteausstattung eines Arbeitsplatzes mit PC:

- PC
- Monitore

Die Geräteausstattung eines Arbeitsplatzes mit Laptop:

- Laptop (inkl. Dockingstation)
- Monitore

Weitere beobachtete Geräte:

- Luftbefeuchter
- Diverse Netzteile (für Zusatzgeräte)

7.5.2.6 Institut für Werkzeugmaschinen – Forschungsfabrik

Das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) beschäftigt sich unteranderem mit der Fragestellung, wie Energieflüsse in der Produktion aufgeschlüsselt und verringert werden können. (siehe https://www.tu-braunschweig.de/iwf)
Für Forschungen an realen Werkzeugmaschinen unterhält das Institut einen Maschinenpark, die sogenannte Forschungsfabrik. Auf einer Fläche von über 800m2 wird das Ziel verfolgt Prototypen unter Realbedingungen erproben zu können (siehe https://www.tu-braunschweig.de/iwf/die-lernfabrik). Die einzelnen Werkzeugmaschinen wurden im Laufe des Projektes (jedoch nicht aus Projektgeldern) mit industriellen Energiemessgeräten der Firma Beckhoff ausgestattet und an die Infrastruktur des EnEff Campus 2020-Demonstrators angeschlossen.
Neben den Fragestellungen dieses Projektes wurden mit Hilfe der Infrastruktur auch Fragestellungen zur vorausschauenden Instandhaltung (predictive maintenance) untersucht.
Institut für Werkzeugmaschinen – Experimentierfabrik
Neben der Lernfabrik betreibt das IWF auch die sogenannte Experimentierfabrik. Bei dieser handelt es sich um eine automatisierte Miniatur-Modelfabrik bestehend aus X Produktionsstraßenelementen, die jeweils ineinandergreifen. Die Experimentierfabrik, die insbesondere auf die Lehre zugeschnitten wurde, bildet reale Fertigungsprozesse nach. (siehe ebenfalls https://www.tu-braunschweig.de/iwf/die-lernfabrik)

7.5.2.7 Institut für Werkzeugmaschinen – Technische Gebäudeausstattung inklusive Solar- und Windkraftanlage

Zum Betrieb der Lernfabrik wird zudem eine aufwendige technische Gebäudeausstattung (TGA) betrieben.

Diese besteht unter anderem aus:

- Druckluftaggregat und -verteilung
- Kühlungsaggregate
- einer Hallenbeleuchtung,
- einer Solaranlage, sowie
- einer Windkraftanlage.

Alle diese Komponenten werden ebenfalls mit Hilfe der industriellen Messsysteme angebunden und wurden in die Infrastruktur des Demonstrators integriert (siehe Abbildung 149).

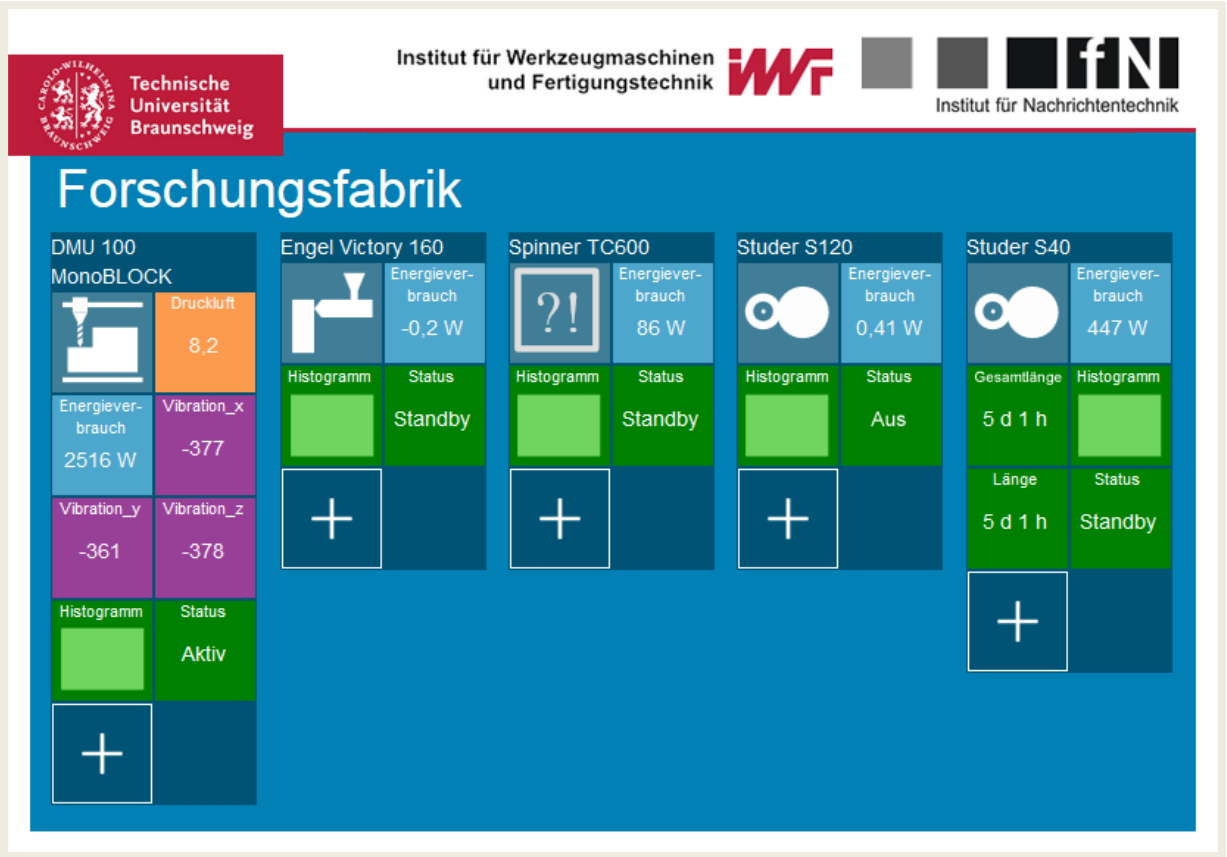


Abbildung 149 Webansicht - Integration der IWF-Forschungsfabrik [IfN]

Die Lernfabrik, die Forschungsfabrik sowie die korrespondierende technische Gebäudeausstattung dienen zur Demonstration von Anwendungsfällen der produzierenden Industrie. Durch die Vernetzung der verschiedenen Umgebungen konnten zudem auch komplexe Zusammenspiele erprobt werden.

7.5.3 Teil 3: Anwendungen zum Energiemanagement

Nutzer-Unterstützungen zum Energiesparen

Für die Interaktion mit Nutzerinnen und Nutzern wurden eine Smartphone-Anwendungen basierend auf der oben beschriebenen Softwareplattform implementiert. Hierzu wurden zwei verschiedene Visualisierungskonzepte ausgearbeitet:

a) Die Anwendung 1 soll Experten helfen, Geräte mit hohem Energiesparpotential zu finden.
b) Die Anwendung 2 soll Nutzern den Energieverbrauch ihrer Geräte präsentieren. Dadurch sollen sie in die Lage versetzt werden, die Kosten für eine einzelne Gerätenutzung einzusehen.

Beide Anwendungen wurden für Smartphones implementiert (siehe Abbildung 150) und evaluiert.

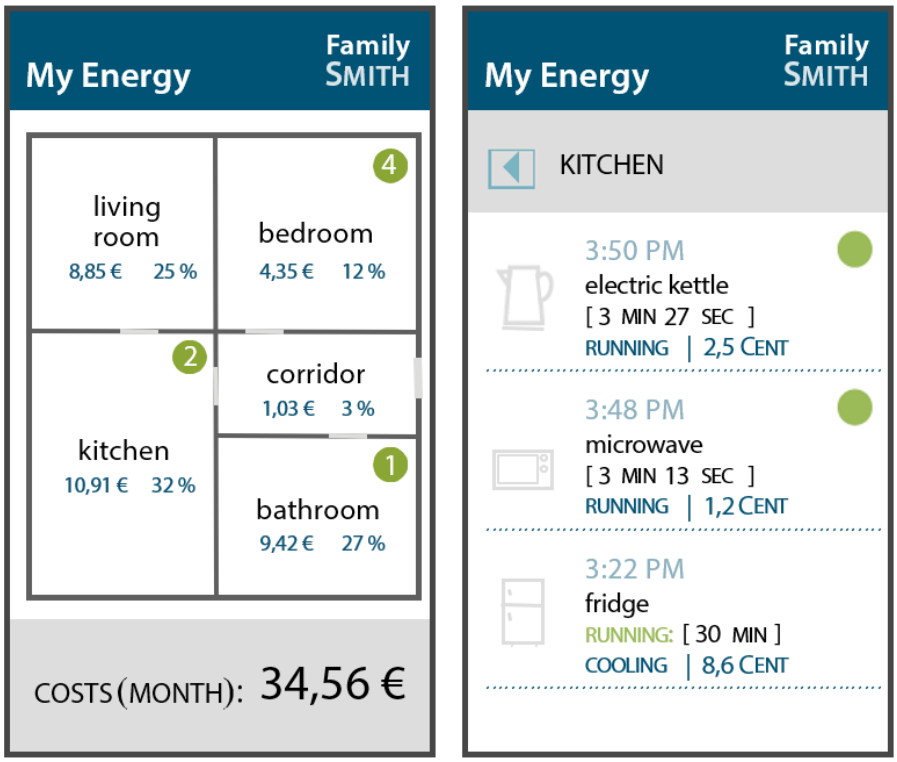


Abbildung 150 Nutzerfeedback in der Teeküch des IfN [IfN]

7.5.3.1 Automatische Energieverbrauchsoptimierung

Als Energiemanagement-Anwendung wurde beispielhaft ein Verfahren zur Reduzierung der Spitzenleistung realisiert (siehe Abbildung 151). Die Stromkosten von Großkunden (wie der TUBS) berechnen sich aus einem verbrauchsabhängigen Arbeitspreis sowie einem Leistungspreis. Der Leistungspreis berechnet sich aus der maximal beanspruchten elektrischen Leistung im Abrechnungszeitraum. Betrachtet wird die Vierteilstundendurchschnittsleistung. Bei der Spitzenleistungs-Reduktion werden Verbraucher abschaltet, um die beanspruchte Leistung oberhalb eines Schwellenwerts zu verringern.

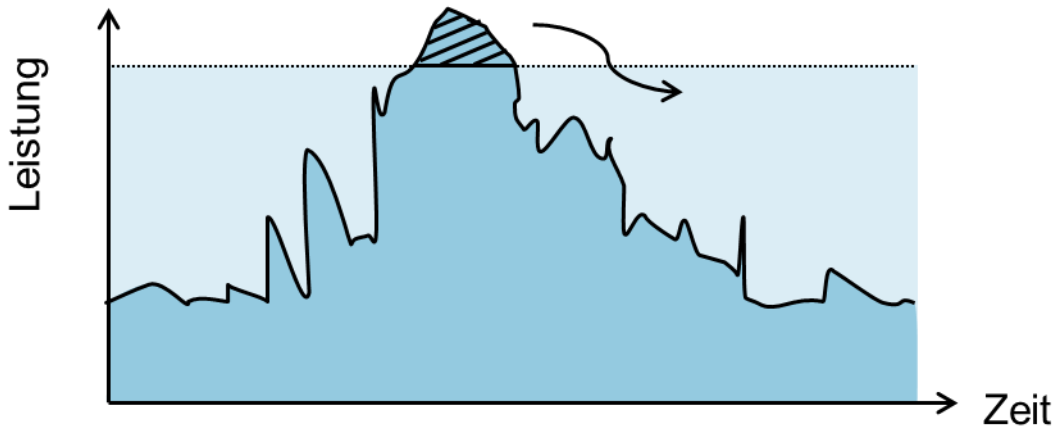


Abbildung 151 Mögliche Anwendung - Lastspitzenvermeidung [IfN]

In der Literatur wird zwischen sechs verschiedenen Arten der Lastbeeinflussung unterschieden, die auch sinnbildlich in Abbildung 152 dargestellt sind:

- Mit peak clipping ist die Reduktion einer Lastspitze zu bestimmten Zeitperioden gemeint, die durch direkte Beeinflussung des Verbrauchers geschieht.
- Beim valley filling wird gezielt versucht, neben den Lastspitzen weitere Lasten zu erzeugen, um eine gleichmäßige Auslastung zu erreichen. Dies kann beispielsweise durch die Nutzung von Stromspeichern in Zeiten geringer Nachfrage aber starker Einspeisung von (regenerativer) Energie geschehen.
- Unter load shifting wird die Verschiebung von Lasten von Spitzenlastzeiten hin zu Zeiten mit weniger Auslastung verstanden. Dies kann beispielsweise durch Steuerung von Klimaanlagen geschehen, die einen Raum bereits vor einer Spitzenlastperiode abkühlen um während des Zeitraums der Spitzenlast keine Energie zu benötigen.
- Unter strategic conservation werden allgemeine Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs gemeint. Darunter fallen unter Anderem der Einsatz effizienterer Geräte, wie beispielsweise der Ersatz von Glühlampen durch LED-Lampen.
- Mit strategic load growth wird der allgemein erhöhte Gebrauch von elektrischer Energie durch neue Technologien, wie zum Beispiel die Benutzung elektrischer Autos oder Automatisierung vieler Prozesse durch Einsatz von Maschinen beschrieben.
- Unter flexible load shape wird die flexbile Gestaltung der Lastkurve verstanden, die durch spezielle Lastplanung, meist unter Benutzung von EMS, erreicht werden kann. Dabei kann es zu einer Minderung der Quality of Service (QoS) durch Unterbrechung der Stromzufuhr kommen.

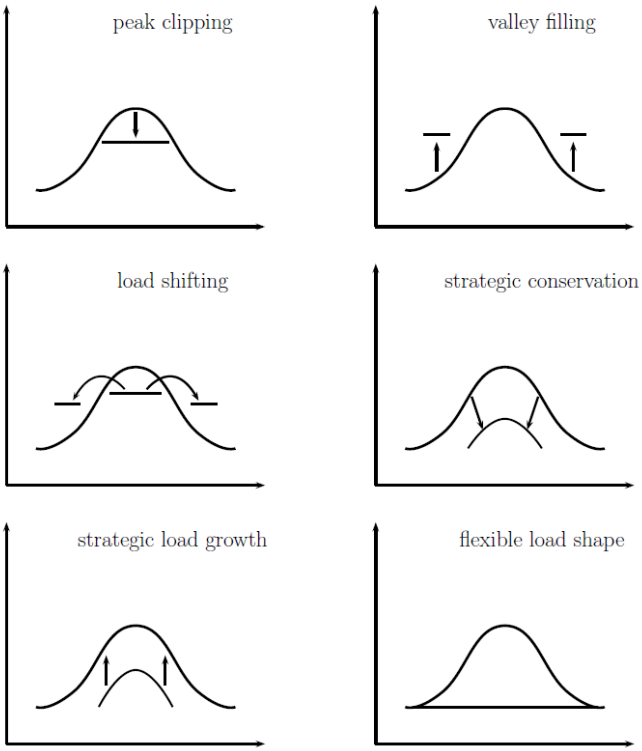


Abbildung 152 Sechs unterschiedliche Einsatzziele von DSM [IfN]

Durch das Konzept der Energy-Router wurde die grundlegende Möglichkeit zur Steuerung auf verschiedenen Ebenen geschaffen. Es stellen sich hier insbesondere Fragen der Privatsphäre und der Sicherheit. Durch eine Aggregation und Abstraktion der Daten an den jeweiligen Hierarchiegrenzen lassen sich persönliche Daten „verwischen“, sodass bei höheren Ebenen kaum Rückschlüsse auf den Urheber der Daten mehr möglich sind. „Ein Privatsphäre-schützendes Energy-Management-System“ (Masterarbeit von Marcel Schubert), welches flexible Anforderungen abbilden kann, wurde auf Basis der Energy-Router implementiert und evaluiert. Der gewählte Ansatz beinhalten evolutionäre Algorithmen und skaliert für eine lokale Steuerung ausreichend gut. Für eine globale Nutzung müssen die Daten an den verschiedenen Hierarchieebenen aggregiert werden, was im Gesamtkonzept auch so vorgesehen ist (Abbildung 125).

Mit einer Steuerung der Kleinverbraucher über das IoT ist es also nun möglich, auf lokale oder globale Einflüsse zu reagieren. So ist es bspw. denkbar, Strom nur dann zu verbrauchen, wenn er gerade von der lokalen Solaranlage auf dem Dach erzeugt wird. Auch eine Kopplung an den Preis kann sinnvoll sein: Bestimmte Geräte werden möglichst nur dann betrieben, wenn die Energie gerade besonders günstig (weil im Überfluss vorhanden) ist.

Prinzipiell würde sich eine solch feingranulare Steuerungsmöglichkeit auch zur Netzsteuerung bzw. Sicherung nutzen lassen, wobei das aber auch die eigentliche Krux des Ansatzes zeigt: Welche Daten werden wohin kommuniziert und welche Instanz trifft letztendlich die Steuerentscheidungen? So muss bspw. sichergestellt werden, dass der Energieversorger oder Netzbetreiber eben nicht den elektrischen Durchlauferhitzer ausstellt, während gerade geduscht wird. Auch die Information, dass ein Durchlauferhitzer vorhanden ist und zu welchen Zeiten er in Betrieb ist, sollte die eigenen vier Wände möglichst nicht verlassen, denn sie lässt wiederum einen Rückschluss auf das Nutzerverhalten zu.

Um das zu ermöglichen wurde ein Energie-Management-System (EMS) entworfen und implementiert, welches mit Hilfe von evolutionären Algorithmen den Energieverbrauch der (Klein-)Verbraucher an zuvor festgelegte Lastkurven anpasst. Da dieses System verhältnismäßig rechenintensiv ist, eignet es sich besonders zur Steuerung auf lokaler Ebene. Für eine verteilte bzw. globale Steuerung ist es nötig, die Daten zuvor zu aggregieren – was aber auch aus Gründen des Datenschutzes sinnvoll ist.
Das EMS setzt sich aus den drei Komponenten Energiemanager (EM), Optimierer und Gerät zusammen, wie in Abbildung 153 dargestellt ist. Um ein Bestandteil des gesamten EMS- Netzes zu werden, werden nicht zwangsläufig alle Komponenten benötigt.
Der Energiemanager (EM) hat zwei Aufgaben: Zum einen die Addition und Weiterleitung der Prognosen an die Eltern- bzw. Kindknoten, sowie das Starten des Optimierungsvorganges.
Der Optimierer ist die Schnittstelle zwischen dem EM und dem Gerät. Umgesetzt wurde im Rahmen der Masterarbeit eine Optimierung basierend auf Evolutionsstrategien, im Allgemeinen ist der Optimierungsalgorithmus aber austauschbar, solange die implementierten und in der Arbeit beschriebenen Schnittstellen umgesetzt werden. Für den Optimierungsprozess steht dem Optimierer eine Prognose des gesamten Netztes, die ihm vom EM übermittelt wird, sowie die Prognose eines bestimmten Einschaltzeitpunktes des Geräts zur Verfügung. Wurden die hinreichend guten Parameter eines Geräts bestimmt, so werden diese durch den Optimierer an das Gerät übermittelt.
Die Geräte bzw. die Gerätekomponente, die mit den Hardwaregeräten kommuniziert, benötigt eine Funktion zur Berechnung einer Prognose des Verbrauchs, wenn die Parameter (z.B. Startzeit) bekannt sind. Ein Gerät erhält durch den Optimierungsprozess einen Plan vom Optimierer, der sämtliche Parameter enthält, die benötigt werden, um zu einem im Plan spezifizierten Zeitpunkt seine Aufgabe wahrzunehmen. Wird dieser Zeitpunkt erreicht, startet das Gerät und sperrt gleichzeitig die Möglichkeit des Optimierers, einen neuen Plan zu setzen. Da programmgetriebene Geräte keine Interaktion mit dem Benutzer erfordern, wird diese Sperre nach einer zuvor festgelegten Zeit automatisch wieder aufgehoben. Bei aufgabengetriebenen Geräten hingegen erfordert es eine Interaktion mit dem Benutzer zum entfernen der Sperre. Würde die Sperre auch bei aufgabengetriebenen Geräten automatisch entfernt werden, so würde beispielsweise ein Geschirrspüler nachdem er sein Programm beendet hat, erneut starten, was eine nicht gewünschte Funktionalität darstellt.

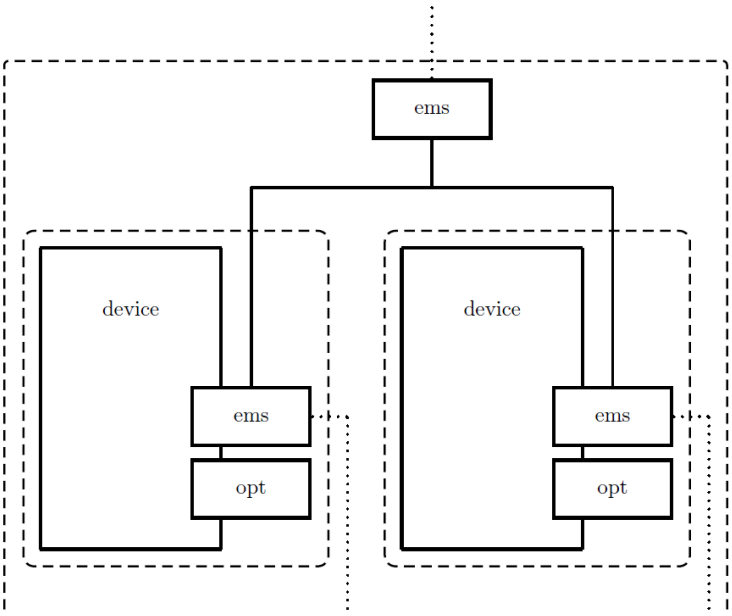


Abbildung 153 Komponenten des EMS [IfN]

Die Kommunikation zwischen EM, Optimierer und Gerät findet in einer festen zeitlichen Abfolge statt, wie Abbildung 154 zeigt. Zunächst wird die globale Prognose vom EM an den Optimierer „optimizer“ übermittelt. Im Falle eines auf Evolutionsstrategien beruhenden Optimierungsprozesses sendet der Optimierer anschließend verschiedene parametrisierte Pläne an das Gerät „device“, das aus diesen Prognosen seines Verbrauchs ableitet und zurücksendet. Dieser zweite Schritt findet solange statt, bis ein hinreichend gutes Ergebnis erzielt wird. Das Gerät wird nun im dritten Schritt mit dem Plan konfiguriert, deren Prognose die beste Bewertung hat. Die Prognose des konfigurierten Geräts wird im vierten Schritt an den EM weitergeleitet, der diese zur Summe der globalen Prognose addiert.

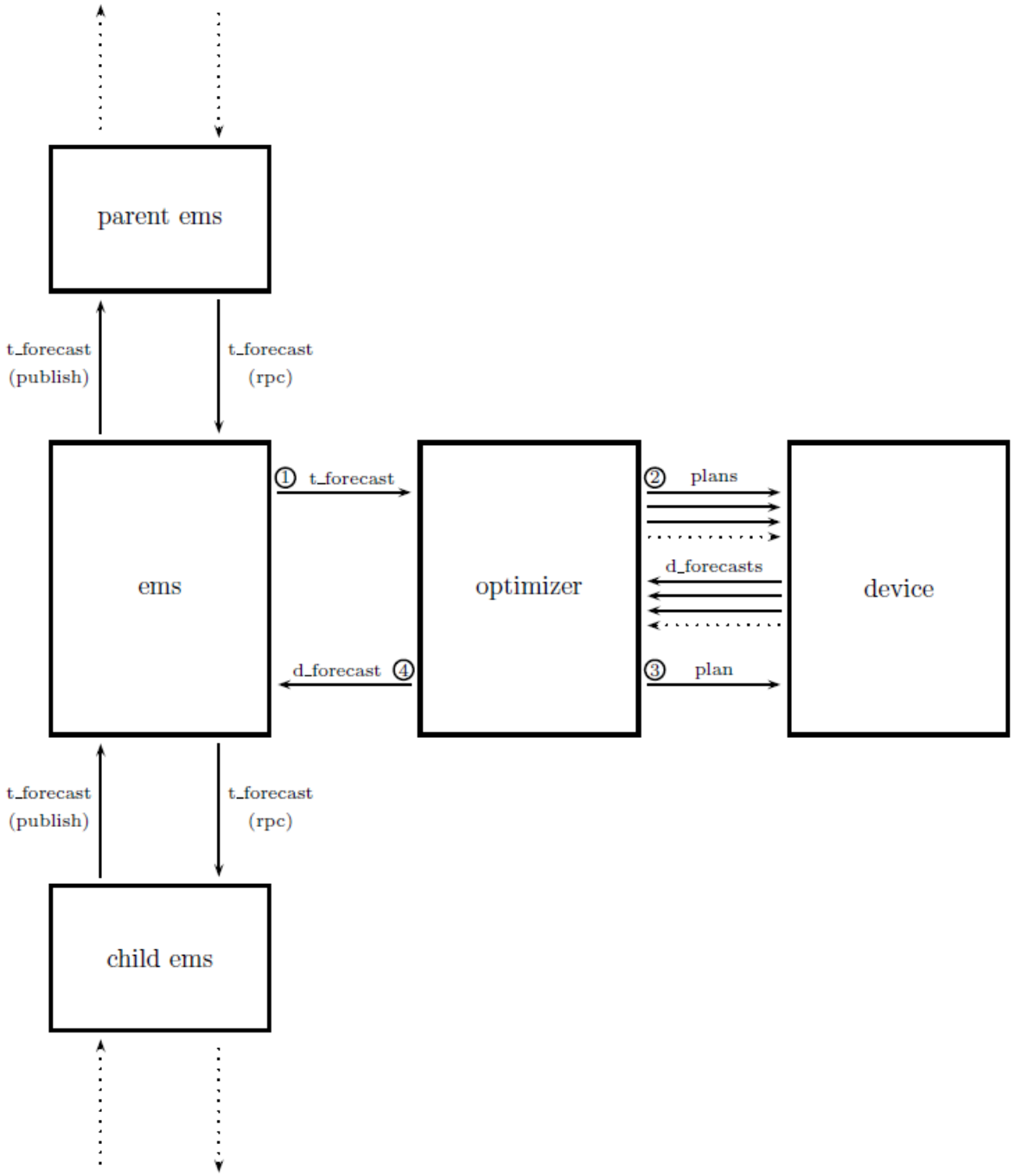


Abbildung 154 Übersicht über die Kommunikation der Knoten [IfN]

In Abbildung 155 sind die ist die verteilte Selbst-Optimierung von 20 Verbrauchern dargestellt, welches sich sin mehreren Optimierungsschritten an den Verlauf einer vorgegebenen Kurve annähern.

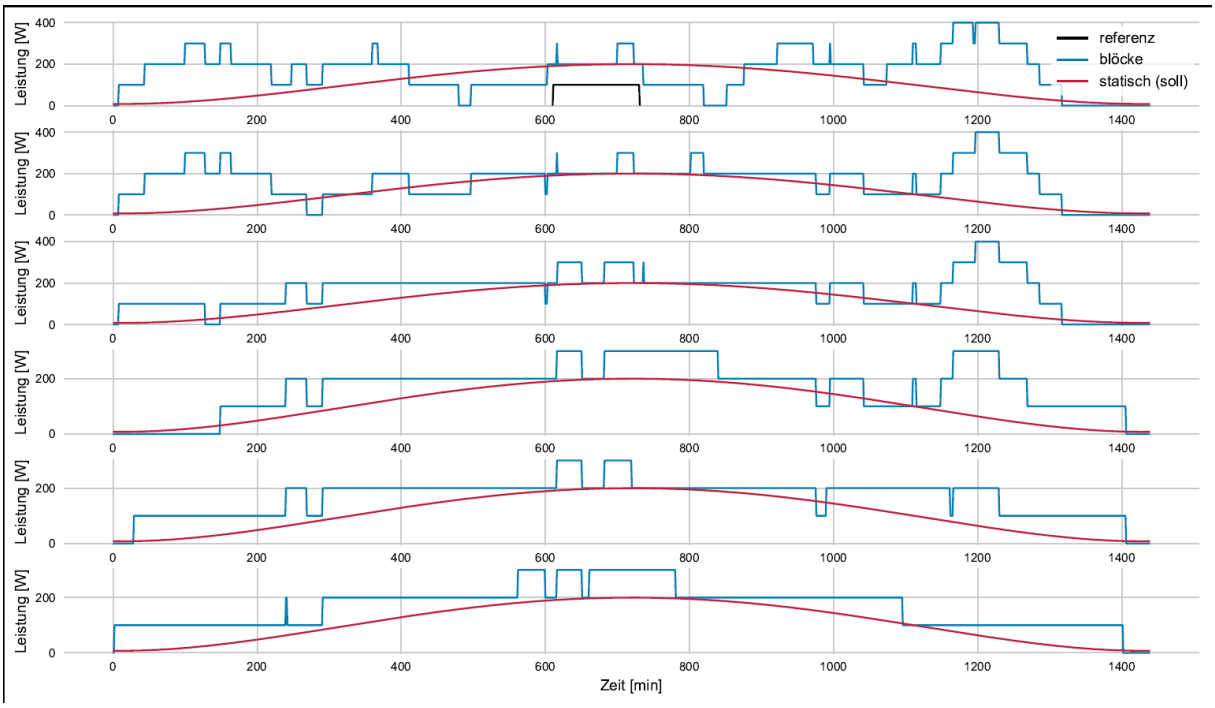


Abbildung 155 Verteilte Optimierung mehrerer (20) konzeptioneller Geräte an Soll-Kurve f (x) = 13x⁴ - 100x² + 200 (von oben nach unten) [IfN]

7.5.3.2 Wartung der einzelnen Komponenten

Im zukünftigen Internet der Dinge wird es eine wachsende Anzahl an Geräten für die unterschiedlichsten Aufgaben geben. Viele davon bleiben dem Nutzer verborgen und sollen nur für Experten sichtbar sein (bspw. Sensorik zur Raumklimatisierung), andere Geräte sind zur expliziten Nutzerkommunikation vorgesehen (bspw. Wandterminals) und andere bewegen sich irgendwo dazwischen. Um eine Gesamtsicht auf alle vernetzten Geräte zu bekommen wurde ein Weg auf Basis von Mixed-Reality beschritten: In der Bachelorarbeit „IoT Visualisierung mit Mixed Reality“ von Nicholas Gao können mit Hilfe einer speziellen Brille (im konkreten Falle eine Microsoft HoloLens) Experten „versteckte“ (weil bspw. in der Wand) verbaute Geräte sichtbar gemacht werden. Neben dem reinen Auffinden der Geräte kann auf Grundlage der Energy-Router-Infrastruktur auch aktuelle Daten bzw. Fehlerzustände dargestellt werden, die eine umfassende Analyse und Wartung ermöglichen.

Abbildung 156 Expertensicht auf das Wartungsinterface [IfN]

In einer Nutzerstudie wurde das System auf Bedienbarkeit und Skalierung hin evaluiert, wobei die Mixed-Reality-Anwendung (im Gegensatz zu einer alternativen Tablet-Anwendung) besonders für das Auffinden von Geräten geeignet scheint. In Abbildung 156 ist die Mixed-Reality-Sicht (MR) dargestellt: Die detaillierten Daten der einzelnen Geräte erscheinen dem Nutzer als „Overlay“ in seiner realen Umgebung.
Für die Auswertung der Ergebnisse der Studie wurden einige Versuchsdurchführungen aus den Datensätzen entfernt, da technische oder Verständnisprobleme aufgetreten sind. Es wurde allerdings jeweils nur die betroffene Aufgabe von der Auswertung ausgenommen und nicht der gesamte zum Probanden gehörende Datensatz. Insgesamt wurden 19 Ergebnisse aus der Evaluation entfernt. Somit wurden für die Auswertung 260 Ergebnisse berücksichtigt. Da die meisten entfernten Ergebnisse zur Experimentalgruppe gehören und damit eine gleichmäßige demografische Verteilung vorliegt, wurden der Experimentalgruppe 17 und der Kontrollgruppe 14 Probanden zugeordnet.
Für die Auswertung der Nützlichkeit für den Anwender sind besonders zwei Faktoren von Bedeutung. Zum einen die benötigte Zeit, um eine Lösung zu finden und zum anderen die Fehlerrate bei der Festlegung einer Lösung. Die pro Aufgabe benötigten Zeiten lassen sich der Abbildung 157 entnehmen. Bei der Aufgabe, ein defektes Gerät ausfindig zu machen, benötigten die Probanden mit der MR-Lösung bei weniger als 10 Geräten im Durchschnitt weniger Zeit, um das entsprechende Gerät zu finden. Im Gegenzug war die Kontrollgruppe in allen anderen Fällen im Durchschnitt mindestens genauso schnell wie die Experimentalgruppe. Allerdings sind beide Aussagen aufgrund der starken Schwankungen beider Gruppen statistisch nicht sicher. Die Schwankungen resultieren nach den Angaben der Probanden bei beiden Gruppen aus verschiedenen Gründen. Laut der Aussagen der Probanden litt die Eindeutigkeit der Farbcodierung im Lageplan stark unter der zunehmenden Anzahl an Geräten. Dies sorgte bei den Probanden zu einer erhöhten Unsicherheit, woraus die steigende Schwankung resultierte. Bei der Experimentalgruppe resultierten die hohen Abweichungen laut den Probanden meistens aus der Unsicherheit des Probanden, ob er alle Geräte überhaupt gefunden und betrachtet hat.

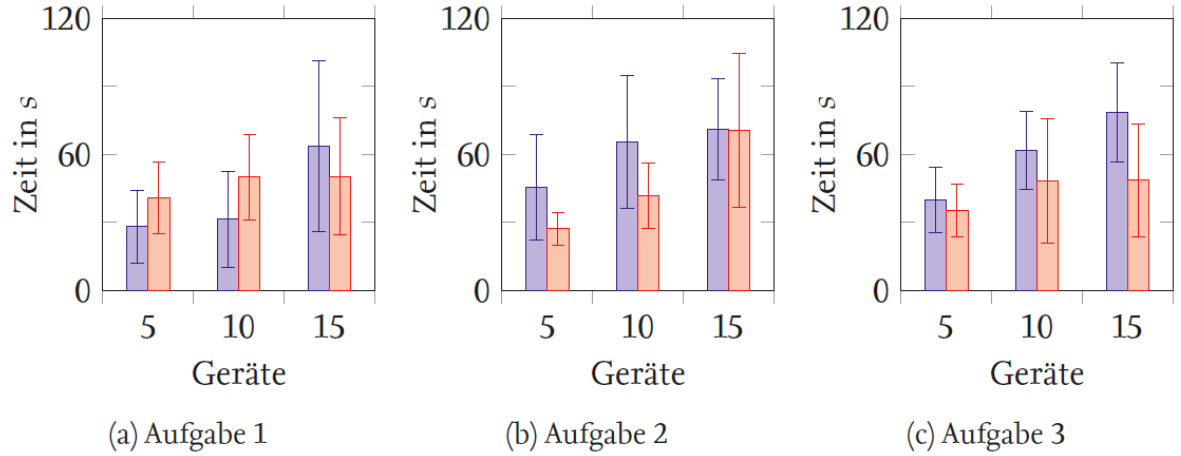


Abbildung 157 Zeit pro Aufgabe. Dargestellt ist der jeweilige Durchschnitt mit der Standardabweichung (links, blau: Mixed Reality; rechts, rot: Tablet) [IfN]

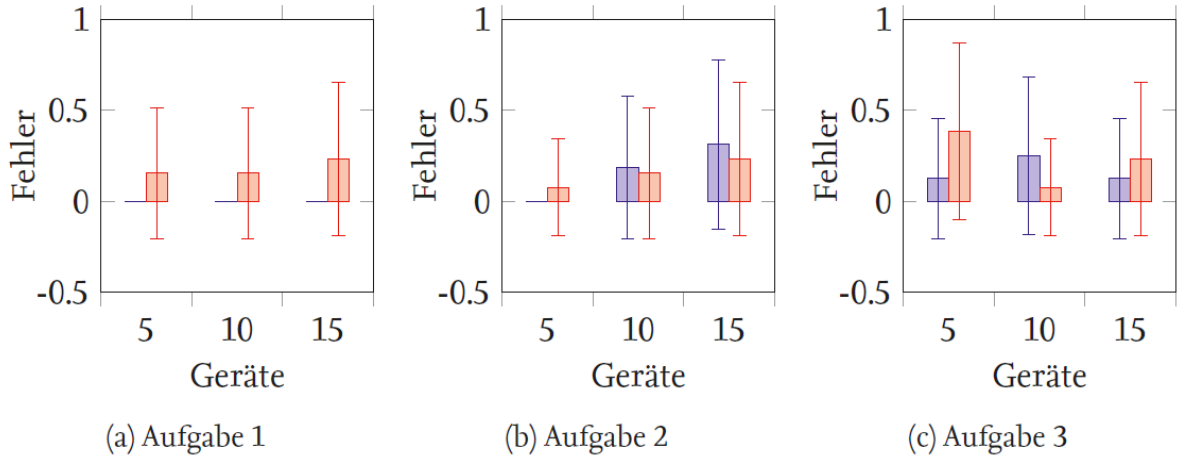


Abbildung 158 Fehler pro Aufgabe. Dargestellt ist der jeweilige Durchschnitt mit der Standardabweichung.(links, blau: Mixed Reality; rechts, rot: Tablet) [IfN]

Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass die Probanden mit dem MR-System keine eindeutig schlechteren oder besseren Ergebnisse erzielten als die Probanden mit der Desktopanwendung. Während der durchgeführten Tests haben die Probanden der Experimentalgruppe mit 0,9 Fehlern im Durchschnitt pro Proband fast halb so viele Fehler gemacht wie die Kontrollgruppe mit 1,7 Fehlern pro Proband. Aber auch bei der in Abbildung 158 pro Aufgabe dargestellten Fehlerrate ist eine starke Streuung zu beobachten, die eine eindeutige Aussage nicht möglich macht. Es ist allerdings während der Durchführung der Tests aufgefallen, dass die Hauptfehlerquelle der Kontrollgruppe im falschen Ablesen des Lageplans lag, wohingegen bei der Experimentalgruppe Fehler hauptsächlich aus der mangelnden Übersicht hervorgingen. Aus diesem Grund steigt die Fehlerquote der Probanden mit Head Mounted Display (HMD) auch mit der zunehmenden Anzahl an Geräten. Außerdem unterstützt die Tatsache, dass kein Proband der Experimentalgruppe die Position des defekten Gerätes falsch genannt hat, wohingegen die Fehlerquote der Kontrollgruppe über alle Aufgaben hinweg ähnlich

blieb, diese Vermutung. Die Ergebnisse des Fragebogens zur Zufriedenheit sind in Abbildung 159 dargestellt.
Bezüglich der Zufriedenheit, Nützlichkeit und Angemessenheit der Anwendung zeigten die Probanden keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den drei Bildraten. Den meisten Probanden fiel der Wechsel der Bildraten nicht auf oder sie empfanden diese nicht als hinderlich bei der Bearbeitung der Aufgabe. Auch auf das Wohlbefinden der Probanden hatten die Bildraten keinen Einfluss. Nur zwei Proband haben sich an den niedrigen Bildraten gestört, auch wenn diese kein Unwohlsein verursachten oder sie bei der Bearbeitung der Aufgabe behinderten. Außerdem lässt sich kein signifikanter Unterschied innerhalb dieser Kriterien zwischen der Experimental- und Kontrollgruppe feststellen. Im Durchschnitt sind zwar die Probanden der Experimentalgruppe leicht zufriedener, aber dafür streuen beide Gruppen zu sehr, um eine sichere Aussage daraus zu folgern. Insgesamt haben nur zwei Probanden von einer Verschlechterung ihres Gesundheitszustandes berichtet. Beide gehörten zur Experimentalgruppe und haben laut eigener Angabe leichte Schmerzen durch das verhältnismäßig hohe Gewicht der HoloLens. Es haben außerdem zwei Probanden angegeben, dass sich ihr Gesundheitszustand während der Tests verbessert hat. Je einer gehörte zur Experimentalgruppe und einer zur Kontrollgruppe. Die Verbesserung resultierte laut den Probanden in beiden Fällen aus der Bewegung, die während der Bearbeitung erforderlich war. Die restlichen Probanden gaben keinerlei Unterschied bezüglich Unwohlsein, Schmerzen oder Schwindel über alle Tests hinweg an. Somit lässt sich festhalten, dass das MR-System bei keinem der Probanden Nebeneffekte hervorrief. Allein das HMD sollte nach dem Empfinden der Probanden leichter sein. Außerdem konnte kein Zusammenhang zwischen der Bildrate und der Leistung des Probanden festgestellt werden. Somit sind alle in der Bachelorarbeit bestimmten Bildraten der MR-Anwendung für den normalen Betrieb gut geeignet.

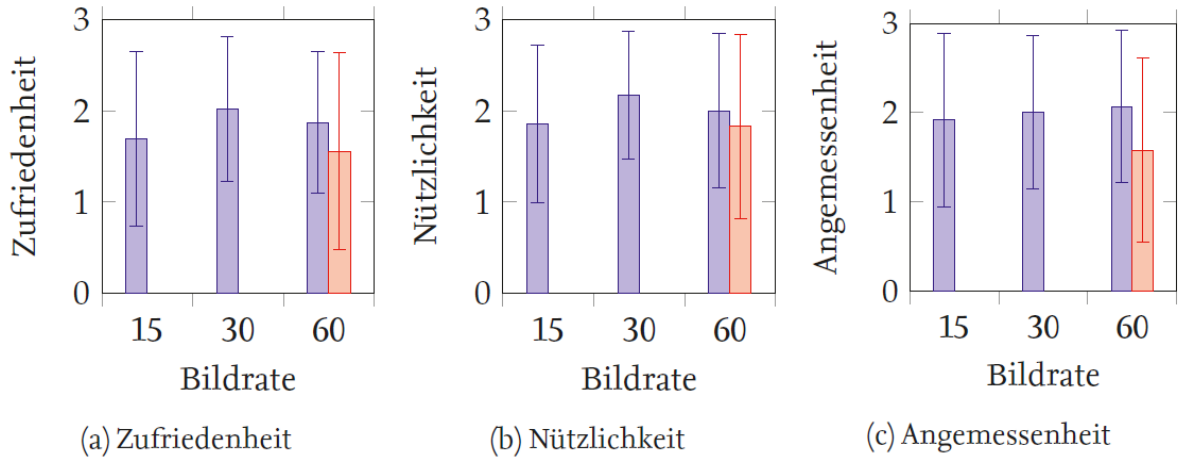


Abbildung 159 Ergebnisse des Fragebogens zur Zufriedenheit. Dargestellt ist der jeweilige Durchschnitt mit der Standardabweichung (links, blau: Mixed Reality; rechts, rot: Tablet) [IfN]

7.6 Teil-Automatisierte Betriebsoptimierung (SIZ+)

Das SIZ energie+ hat im Rahmen des Projekts ein Konzept für die teil-automatisierte Betriebsoptimierung erprobt und dazu eine Datenerfassung aus dem Energiemanagementsystem energo+ (Strom, Wärme) sowie für die Daten der Gebäudeleittechnik (BACnet/IP Fabrikat Siemens) aufgebaut.

7.6.1 Methodisches Vorgehen

Die Methodik der Betriebsanalyse basiert auf dem Konzept Aktiver Funktionsbeschreibungen nach Plesser[7], siehe Abbildung 160. Diese definiert einen Prüfprozess für Anlagen- und Automationsfunktionen auf Basis von Zustandsräumen, mit denen Betriebszustände und Betriebsregeln für Anlagen spezifiziert werden. Die Einhaltung der Spezifikationen kann durch Zuweisung entsprechender Betriebsdaten aus der Gebäudeautomation teil-automatisiert erfolgen.

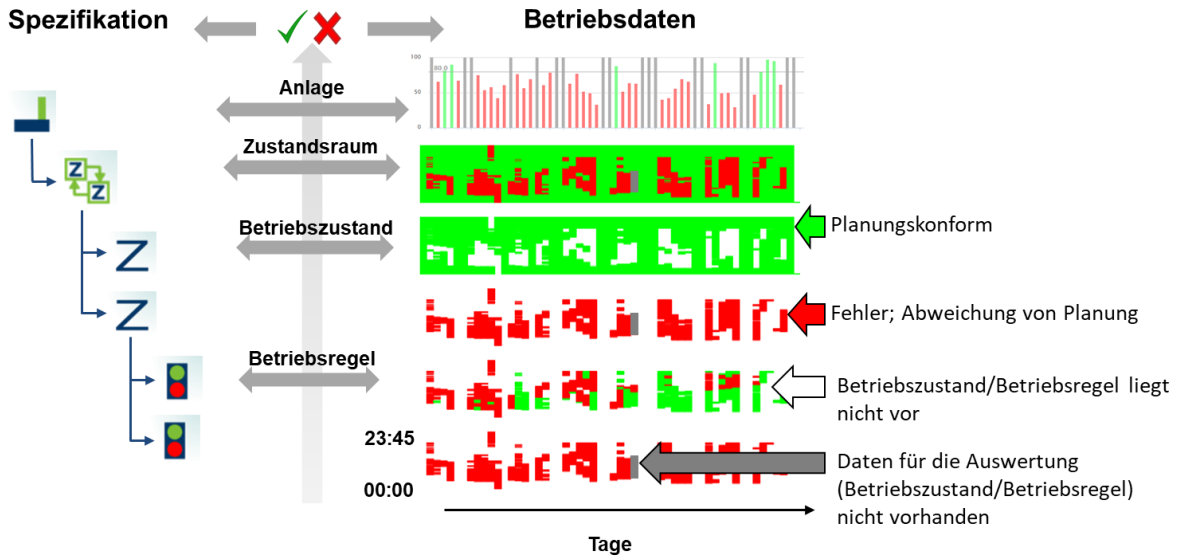


Abbildung 160 Methodische Grundlage: Aktive Funktionsbeschreibung [synavision]

Die Bearbeitung erfolgte unter Verwendung der Software „Digitaler Prüfstand“ der synavision GmbH.

7.6.1.1 Bestandsaufnahme

Die Bestandsaufnahme der Anlagen erfolgt in Abstimmung mit dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig. Zur Verfügung standen in der Regel Anlagenübersichtsschemen. Automationsschemen und textuelle Funktionsbeschreibungen lagen nicht vor. Eine Ortsbegehung wurde nicht durchgeführt.

[7] Plesser, Dr. Stefan: „Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen“, Dissertation an der Technisches Universität Braunschweig, 2013

7.6.1.2 Erstellung der Prüfspezifikation

Ausgehend von den Anlagenschemen wurden zunächst die relevanten und anschließend die davon über die Gebäudeleittechnik verfügbaren Datenpunkte im digitalen Prüfstand definiert. Mit diesen wurden dann typische Regelungskonzepte für die Anlagen mit ebenfalls typischen Sollwerten spezifiziert.

7.6.1.3 Erfassung und Verarbeitung von Automationsdaten

Für die Erfassung aus der Automationsdaten wurde notwendige Hardware (ein WAGO BACnet-Controller und Logger sowie ein Gateway der Firma MBS) installiert.

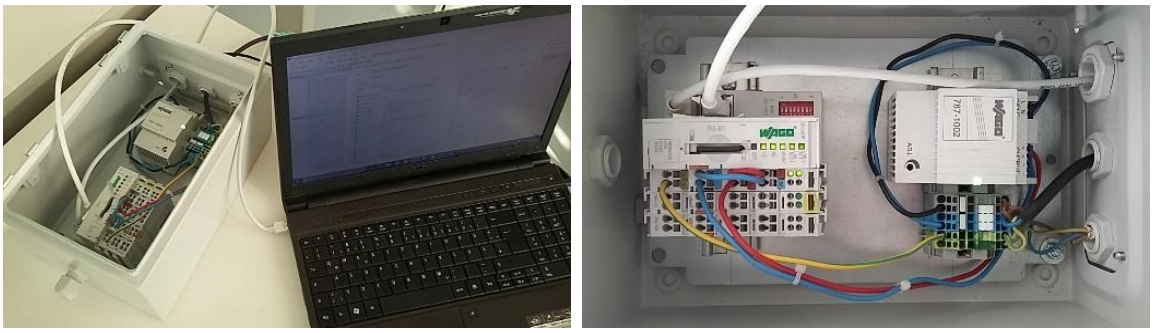


Abbildung 161 Installation des WAGO-Controllers im BACnet der TU Braunschweig [SIZ]

Mithilfe der Controller können einzelne BACnet-Objekte ausgelesen werden. Für die Prüfung wurden die vorhandenen BACnet-Objekte gesichtet und aus den relevanten und verfügbaren Objekten die Betriebsdaten (BACnet-Property „Present Value“) viertelstündlich gespeichert.

7.6.1.4 Durchführung der Prüfung

Für die Prüfung der Anlagenspezifikation wurden die erfassten Daten in den Digitalen Prüfstand importiert. Dann wurden die Betriebsdatenpunkte (Ist-Werte) den jeweils spezifizierten Datenpunkten (Soll-Werte) zugewiesen. Anschließend erfolgte die automatisierte Auswertung durch den Vergleich der spezifizierten Vorgaben mit den Betriebsdaten für jeden viertelstündlichen Zeitpunkt im jeweiligen Prüfzeitraum. Die Ergebnisse wurden mit den Visualisierungswerkzeugen des Digitalen Prüfstands im Detail bis zur Betriebsregel und bis auf Anlagenebene aggregiert dargestellt.

7.6.1.5 Erfassung und Verarbeitung von Messdaten zum Energieverbrauch

Die Erfassung für die Energieverbrauchsdaten war bereits vor Projektbeginn umgesetzt. Die Daten wurden aus dem EMS exportiert und auf einem Server der TU Braunschweig abgelegt. Von dort wurden die Daten in den digitalen Prüfstand importiert, ausgewertet und visualisiert. Sie dienten im Zuge der Betriebsoptimierung nicht der eigentlichen Prüfung, sondern nur der Bewertung von Einsparungen.

7.6.2 Bearbeitung von 3 Gebäuden

Bei drei Gebäuden wurde eine teilautomatisierte Betriebsoptimierung durchgeführt. Die Methodik wurde dabei sowohl „konventionell“ als Fehleridentifikation angewendet (Audimax), als auch ergänzt durch Strategien zur Betriebsoptimierung (Forumgsgebäude). Beim dritten Gebäude (Bürogebäude am Bültenweg) ergaben sich bei der Bearbeitung Probleme bei der Datenerfassung, sodass das stattdessen die Bearbeitung des Forumsgebäudes mit einem Ansatz zur automatisierten Erkennung von Betriebsfehlern erweitert wurde.

7.6.2.1 Betriebsoptimierung Audimax

Im Audimax der TU Braunschweig wurden die beiden Hauptlüftungsanlagen des großen Hörsaals überprüft. Die beiden Anlagen RLT West und RLT Ost umfassen die Funktionen Heizen, Kühlen und WRG und verfügen jeweils über eine Umluftklappe, siehe Abbildung 162 und Abbildung 163. Die gezeigten Anlagenschemen waren gleichzeitig die einzigen verfügbaren Dokumentationsunterlagen zu den Anlagen und ihrer Betriebsführung.

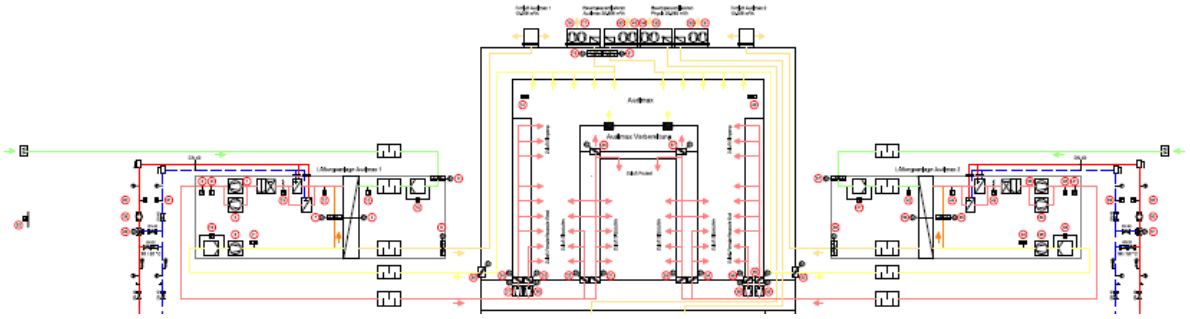


Abbildung 162 Aufbau der beiden RLT-Anlagen für den großen Hörsaal [SIZ; TUBS]

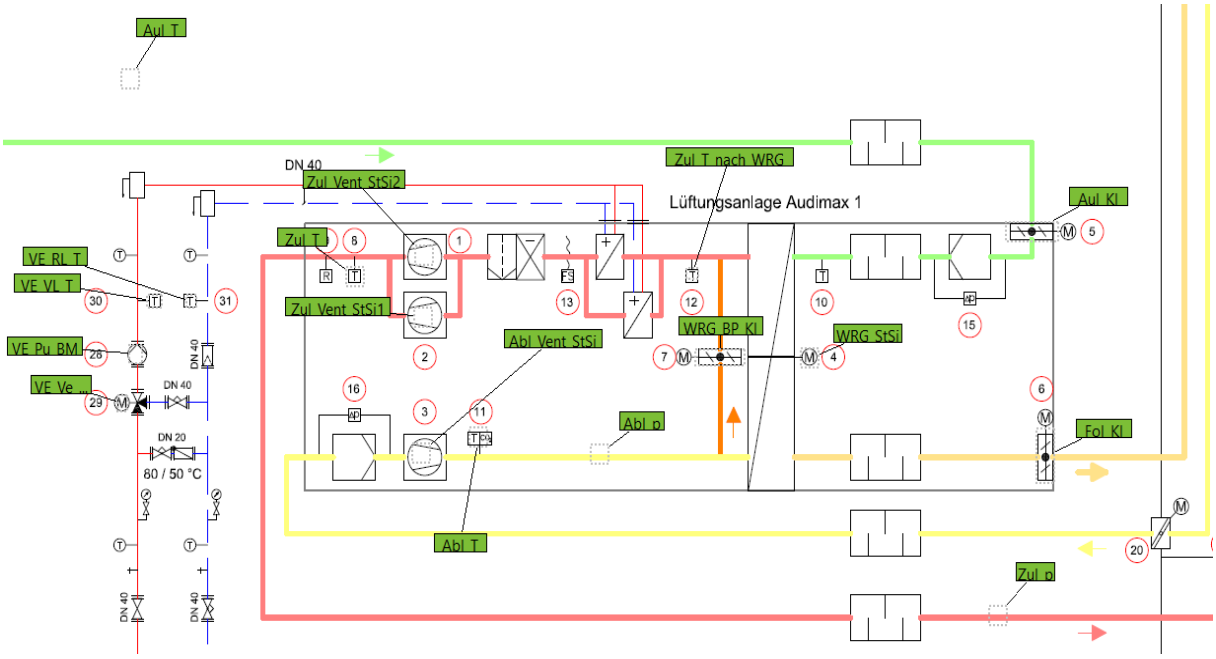


Abbildung 163 RLT-Anlage West mit den verfügbaren Datenpunkten (identisch bei RLT-Ost) [SIZ; TUBS]

Für die Anlagen wurden für die verfügbaren Datenpunkte Betriebsdaten für den Zeitraum vom 14.3.18 bis 14.4.18 erfasst und geprüft, siehe ***Abbildung 164***.

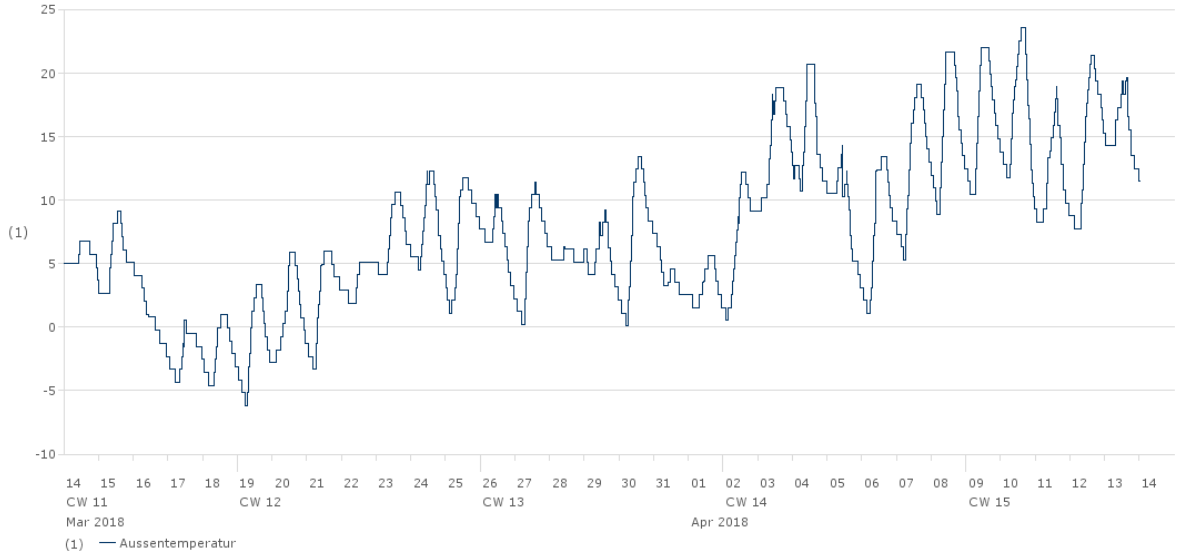


Abbildung 164 Witterungsbedingungen im Prüfzeitraum [SIZ; synavision]

Die Außenlufttemperaturen lagen im Prüfzeitraum zwischen -6 und 24°C. Spezifiziert wurden die Betriebszustände „EIN“ und „AUS“.

Beide Prüfungen zeigten, dass die Anlagen sehr ähnlich betrieben sind. Die Prüfergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Betriebszeiten waren für einen Vorlesungssaal nachvollziehbar, sollten jedoch auf Plausibilität überprüft werden (Betrieb bis teilweise 23 Uhr über mehrere Tage hintereinander in der vorlesungsfreien Zeit; siehe unten Abbildung 165).
- Die Ablufttemperaturen lagen teilweise zu hoch (z.B. bei Außenlufttemperatur unter 25°C schon bei mehr als 26°C).
- Die Zulufttemperaturen im Betrieb lagen innerhalb erwartbarer Grenzen, hätten aber bei überhöhten Ablufttemperaturen auch noch niedriger sein können. Die Kühlung setzte nicht ein. Hier sind Komfort- und Energieziele gegeneinander abzuwägen.
- Die Sequenz von WRG und Heizregister funktionierte plausibel.
- Die WRG-Funktion lag im Heizbetrieb mit gutem Wirkungsgrad vor.
- Die Vorerhitzerpumpen liefen bei niedrigen Außenlufttemperaturen durch. Dies ist vermutlich eine beabsichtigte Forstschutzfunktion, der entsprechende Grenzwert könnte ggf. abgesenkt werden.
- Die Anlagendrücke schwanken zeitweise stark, insbesondere bei moderaten Außenluttemperaturen über 10°C. Dies fällt zusammen mit schnellen Zyklen

der Bypassklappe. Hier droht ein beschleunigter Verschleiß der Klappe. Die Regelung sollte angepasst werden, um das Schwingen zu vermeiden.

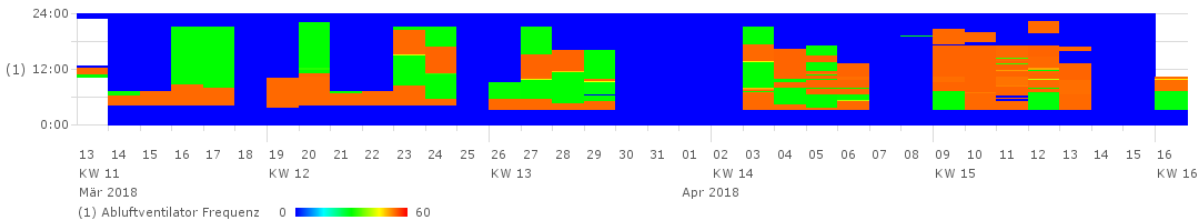


Abbildung 165 Betriebszeiten der Lüftungsanlage [SIZ; synavision]

Durch die Beeinträchtigungen der Betriebsgüte ergeben sich folgende Einsparpotentiale:

- Die Sequenz aus WRG und Heizregister ist optimal eingestellt (siehe Abbildung 166, Mitte), jedoch ist der Sollwert der Zuluft vermutlich zu hoch eingestellt, welches aus Abbildung 166, links hervorgeht. Daraus ergibt sich eine Erhitzer-Mehrleistung von 26 kW, die im übertragenen ein **Einsparpotential** von ca. **1.300 €/a** liefert[8].

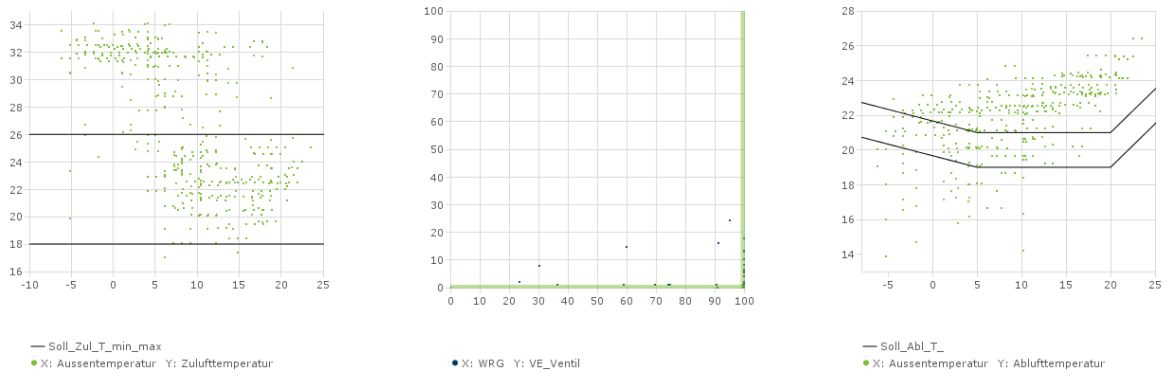


Abbildung 166 Links: RLT 1 West Zulufttemperatur, Mitte: Sequenz von WRG und Erhitzer

***Rechts: Ablufttemperatur* [SIZ; synavision]**

7.6.2.2 Betriebsoptimierung Forumsgebäude

[8] Details zur Berechnung des Einsparpotentials:
Spezifische Enthalpien: $h_{26°C} \approx 36 \frac{kJ}{kg}$, $h_{32°C} \approx 42 \frac{kJ}{kg}$
2 x Auslegungsvolumenstrom für je Anlage Ost und West $13.000 \frac{m^3}{h}$
Dichte Luft (20°C): $1{,}2 \frac{kg}{m^3}$
Betriebsdauer abgeleitet nach Prüfzeitraum: 508 h
Berechnung: $2 * 13.000 \frac{m^3}{h} * \frac{1\,h}{3600\,s} * 1{,}2 \frac{kg}{m^3} * 6 \frac{kJ}{kg} * 508\,h * 0{,}05 \frac{€}{kWh*a} = 1.300 \frac{€}{a}$

Der Gebäudebetrieb des Forumsgebäudes war bereits im Rahmen des EU-Projekts QUANTUM geprüft worden[9]. Im Rahmen dieses Projekts wurde sie als teil-automatisierte Betriebsanalyse weitergeführt und durch eine systematische Optimierung von Nutzer-relevanten Funktionen und Regelgrößen ergänzt. Dazu wurde mit dem Gebäudemanagement ein Fahrplan für die Implementierung von Parameteränderungen in der GLT erarbeitet und im Januar/Februar 2018 umgesetzt, siehe Abbildung 167. Hier wurde also über die Qualitätssicherung durch *Prüfung* von Automationsfunktionen hinaus konkrete Maßnahmen zur *Optimierung* der Anlagen umgesetzt und bewertet.

		Ist-Zustand	Woche 1 ab 25.01.2018	Woche 2 ab 01.02.2018	Woche 3 ab 08.02.2018	Woche 4 ab 15.02.2018
Heizkreis Nord	Normalbetrieb	Mo 05:00 - 19:30 Di-Do 06:15 - 19:30 Fr 06:15 - 18:00 Sa-So -	**Mo - Do 05:30 - 17:00 Fr 05:30 - 16:00 Sa-So -**	**Mo - Do 05:30 - 16:30 Fr 05:30 - 15:00 Sa-So -**	-	-
	Kennlinie Normalbetrieb [T_Außen/ T_Vorlauf]	(-20/85, -12/85, 10/48, 20/25	-	-	**Heizkörperexp. von 1,4 auf 1,0 (-20/80, -12/80, 18/25, 20/25)**	**VL-max von 80 auf 65 (-20/65, -12/65, 18/25, 20/25)**
	Kennlinie Absenkbetrieb [T_Außen/ T_Vorlauf]	(-20/70, -12/70, 5/40, 11/22)	-	-	-	**VL-max von 80 auf 65 (-20/65, -12/65, 18/25, 20/25)**
Heizkreis Süd	Normalbetrieb	Mo 05:00 - 19:30 Di-Do 06:15 - 19:30 Fr 06:15 - 18:00 Sa-So -	-	-	-	-
	Kennlinie Normalbetrieb [T_Außen/ T_Vorlauf]	(-20/85, -12/85, 10/48, 20/25	-	-	-	-
	Kennlinie Absenkbetrieb [T_Außen/ T_Vorlauf]	(-20/70, -12/70, 5/40, 11/22)	-	-	-	-
Heizkreis EG/1.OG	Normalbetrieb	Mo 05:00 - 19:30 Di-Do 06:15 - 19:30 Fr 06:15 - 18:00 Sa-So -	-	-	-	-
	Kennlinie Normalbetrieb [T_Außen/ T_Vorlauf]	(-20/85, -12/85, 10/48, 20/25	-	-	-	-
	Kennlinie Absenkbetrieb [T_Außen/ T_Vorlauf]	(-20/70, -12/70, 5/40, 11/22)	-	-	-	-
RLT 1 Schacht Nord	Normalbetrieb	Mo - Do 08:00 - 18:00 Fr 08:00 - 18:00 Sa-So -	**Mo - Do 08:00 - 17:00 Fr 08:00 - 16:00 Sa-So -**	**Mo - Do 08:00 - 16:30 Fr 08:00 - 15:00 Sa-So -**		
	Zulufttemperatur [°C]	20	-	-	**19,5**	**19**
RLT 2 Schacht Süd	Normalbetrieb	Mo - Do 08:00 - 18:00 Fr 08:00 - 18:00 Sa-So -	-	-	-	-
	Zulufttemperatur [°C]	20	-	-	-	-

Abbildung 167 Fahrplan zur Betriebsoptimierung im Forumsgebäude [SIZ]

Die Auswertung der Optimierungsphasen wurde für die RLT-Anlage 1 umgesetzt. Es zeigte sich, dass die vorgegebenen Veränderungen durch das Gebäudemanagement mit Hilfe der GLT tatsächlich umgesetzt worden waren (s. Abbildung 168).

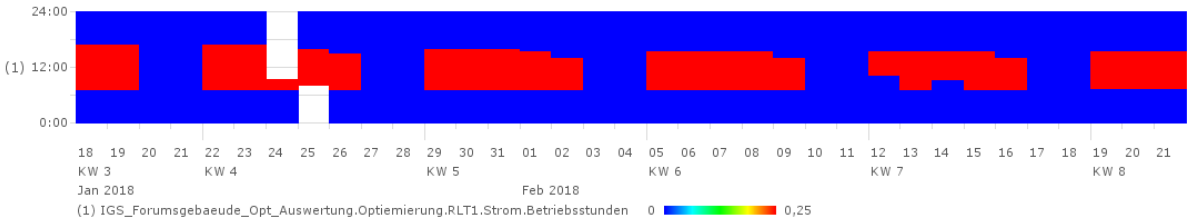


Abbildung 168 Veränderte Betriebszeiten im Zuge der Betriebsoptimierung [SIZ; synavision]

[9] www.quantum-project.eu, unveröffentlicht

Die Bewertung der umgesetzten Maßnahmen ergab, dass allein für die mit diesen Maßnahmen optimierten Anlagen eine Einsparung (Strom) von rund 2.000,- €/a bzw. rund 20.000 kWh/a erreicht werden kann, siehe Abbildung 169. Die Maßnahmen sind Teil der Betriebsführung und annähernd kostenneutral.

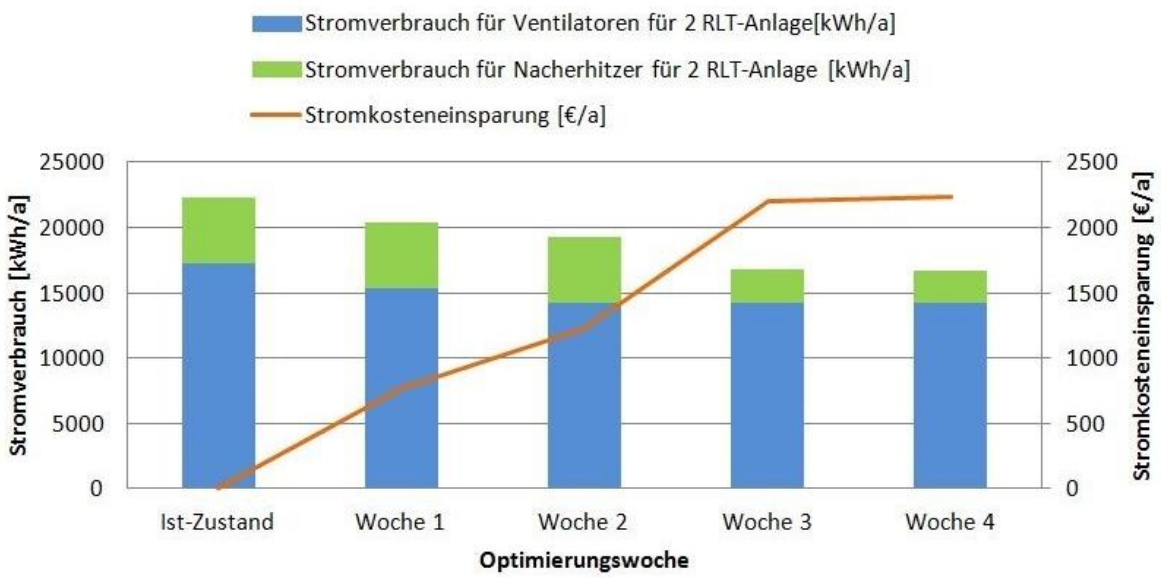


Abbildung 169 Einsparung Stromverbrauch und Stromkosten durch die Betriebsoptimierung [SIZ; synavision]

Während der Optimierungsphasen wurden dem Gebäudemanagement keine diesbezüglichen Nutzerbeschwerden gemeldet.
Hochgerechnet auf den Bürogebäudebestand der TUBS von rund 76.000 m² kann das kostenneutral zu erschließende Einsparpotential für diese Maßnahmenart auf rund 16.000 €/a abgeschätzt werden.

7.6.2.3 Automatisierte Erkennung von Betriebsfehlern an Umwälzpumpen für Heizkreise

Im Forumsgebäude wurde neben der Betriebsprüfung eine innovative Methode zur automatisierten Erkennung von Betriebsfehlern an Umwälzpumpen exemplarisch an insgesamt fünf Pumpen getestet. Die Auswahl der Pumpen erfolgte nach dem exportierbaren Datenumfang. Häufig ist der Export von Pumpendaten auf die Betriebsmeldung der Pumpe beschränkt. Bei den untersuchten Pumpen liegt ein erhöhter Anteil an Informationen in Form von exportierbaren Zeitreihen vor. Deshalb wurde das gesamte BACnet nach Pumpen mit erhöhter Anzahl an Datenpunkten durchsucht. Es ergab sich ein Querschnitt an folgenden untersuchten Heizkreisen die in der folgenden Tabelle aufgelistet sind.

Tabelle 35 Datenumfang der untersuchten Umwälzpumpen [IGS]

Datenpunkt	Pumpe HK_1	Pumpe HK_2	Pumpe RLT_1	Pumpe RLT_2	Pumpe WEZ

Datenpunkt	Pumpe HK_1	Pumpe HK_2	Pumpe RLT_1	Pumpe RLT_2	Pumpe WEZ
Betriebsmeldung Pumpe	X	X	X	X	X
Differenzdruck Pumpe	X	X	X	X	X
Drehzahl Pumpe	X	X	X	X	X
Leistungsbedarf Pumpe	X	X	X	X	X
Förderstrom Pumpe	X	X	X	X	X
Medientemperatur Pumpe	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
maximaler Förderstrom Pumpe	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.
Stellsignal Ventil	X	X	n.A.	X	X
Vorlauftemperatur	X	X	n.A.	X	X
Rücklauftemperatur	X	X	n.A.	X	X
Betriebsmeldung Verbraucher 01	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	X
Betriebsmeldung Verbraucher 02	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	X
Betriebsmeldung Verbraucher 03	n.A.	n.A.	n.A.	n.A.	X
Anforderung Verbraucher	X	X	n.A.	X	n.A.
Vorlauftemperatur-Sollwert Verbraucher	X	X	n.A.	n.A.	n.A.
Außenlufttemperatur	X	X	X	X	X

Nachfolgend werden die Erkenntnisse der Analyse der insgesamt fünf Pumpen beschrieben. In Abhängigkeit des Datenumfangs variieren die Aussagen über die erkannten Betriebsfehler.

Tabelle 36 Analyse Pumpe HK_1 [IGS]

Regelung der Vorlauftemperatur

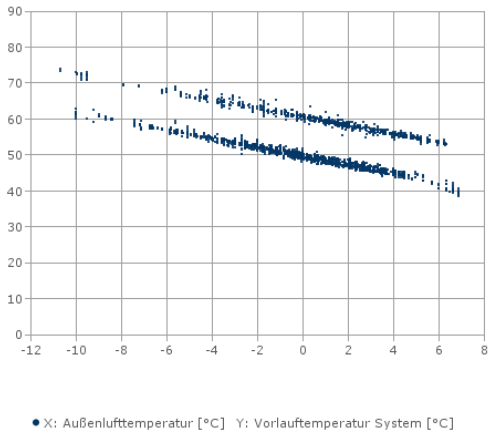


Abbildung 170 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe HK_1 [IGS, synavision]

Die Vorlauftemperaturen von Pumpe HK_1 sind in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur geregelt (vgl. Abbildung 170). Zudem ist erkennbar, dass es ein oberes und unteres Temperaturband gibt. Ein Grund hierfür können unterschiedliche Temperaturniveaus für Normal- und Absenkbetrieb des Heizsystems sein.

Zeitprogramm

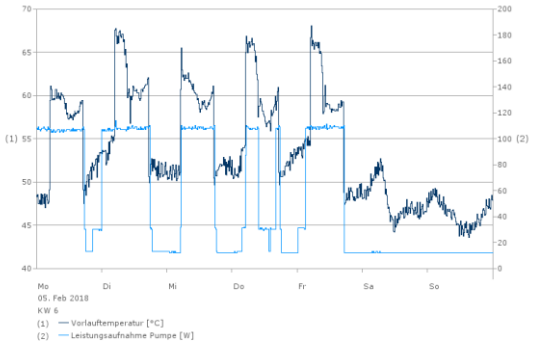


Abbildung 171 Zeitprogramm Pumpe HK_1 [IGS, synavision]

Pumpe HK_1 ist über den gesamten Zeitraum in Betrieb (Abbildung 171).
Zusätzlich ist anhand der Vorlauftemperatur (dunkelblau) und dem Leistungsbedarf der Pumpe (hellblau) ein Zeitprogramm zu erkennen (Abbildung 171). Dieses Verhalten lässt auf die Nutzung des Gebäudes bzw. der angeschlossenen Verbraucher schließen. Das Zeitprofil entspricht dem eines Bürogebäudes.

Betriebsgüte

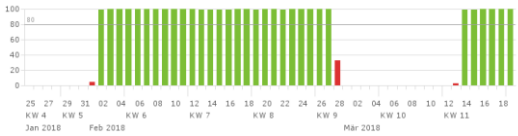


Abbildung 172 Betriebsgüte Pumpe HK_1 [IGS, synavision]

Die Betriebsgüte von Pumpe 2 erreicht über den gesamten Zeitraum mit vollständig vorhandenen Werten 100%. Demnach werden alle Betriebsregeln erfüllt (Abbildung 172).

Nachfolgend sind in Gleichung (1) die Einsparungen von Energie und Energiekosten durch eine Anpassung des Pumpenbetriebs berechnet. Die Annahmen dazu sind in Tabelle 37 dokumentiert.

Tabelle 37 Annahmen für Berechnung Kosteneinsparung - Pumpe HK_1 [IGS]

Annahmen	
Wochen je Jahr	52 Wochen
Wochenenden je Monat	8 Tage
Täglich ineffiziente Laufzeit	24 Stunden
Mittlerer Leistungsbedarf[10]	15 Watt
Angenommener Strompreis	0,30 ct/kWh

$$Energieeinsparung\ per\ anno = \left(12\frac{mon.}{a} \times 8\frac{d}{mon} \times 24\frac{h}{d} \times 0{,}015\ kW\right) = 34{,}56\ \frac{kWh}{a}$$

$$Kosteneinsparung\ per\ anno = 34{,}56\ kW \times 0{,}30\frac{€}{kWh} = 10{,}37\ \frac{€}{a} \qquad \textbf{(1)}$$

$$Kosteninsparung\ gesamt = 10{,}37\frac{€}{a} \times 10a^{11} = 100{,}70\ \frac{€}{Lebensdauer, Pumpe}$$

Pumpe HK_1 wird gut betrieben. Die Betriebsgüte dieser Pumpe beträgt über den gesamten Betrachtungszeitraum 100%.
Pumpe HK_1 versorgt offensichtlich ein Heizsystem mit Heizkörpern in einem Gebäude mit Büronutzung. Dies geht aus der Analyse der Vorlauftemperaturen und des Zeitprofils hervor.

Der Betrieb der Pumpe am Wochenende ist zu überprüfen. Dies geht aus der Analyse des Zeitprogramms hervor. Die hydraulische Einbindung und weitere von der Pumpe versorgte Verbraucher sind zu analysieren und ein Abschalten der Pumpe im genannten Zeitraum zu bewerten. Durch diese Maßnahme können Energiekosten in Höhe von 100,- € und 180 kg CO2 über die Lebensdauer von 10 Jahren der Pumpe eingespart werden.

[10] Abgeleitet aus ***Abbildung 171***

[11] Lebensdauer einer Umwälzpumpe nach VDI 2067

Tabelle 38 Analyse Pumpe HK_2 [IGS]

Regelung der Vorlauftemperatur

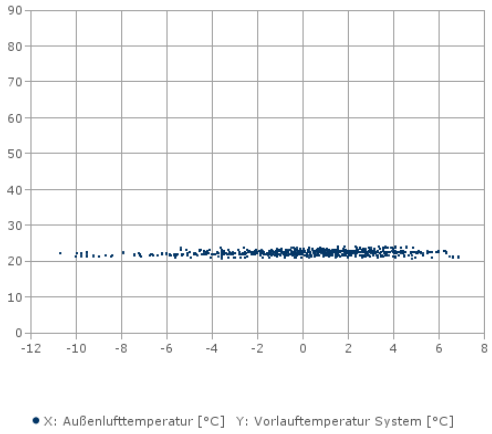


Abbildung 173 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe HK_2 [IGS, synavision]

Die Vorlauftemperatur von Pumpe HK_2 weist keine Änderungen auf und befindet sich im gesamten Betrachtungszeitraum im Bereich von ca. 20°C (vgl. Abbildung 173). In Verbindung mit dem nicht vorhandenen Regelungsverhalten in Abbildung 173 ist davon auszugehen, dass die Pumpe nicht in Betrieb ist.

Zeitprogramm

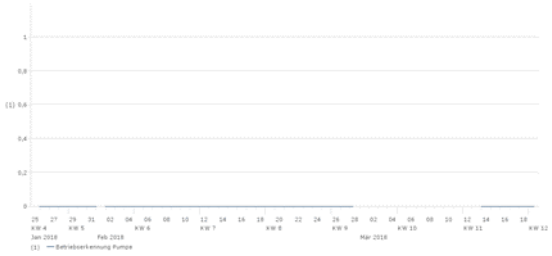


Abbildung 174 Zeitprogramm Pumpe HK_2 [IGS, synavision]

Wie bereits zuvor erkannt, ist die Pumpe im gesamten Zeitraum aus.

Betriebsgüte

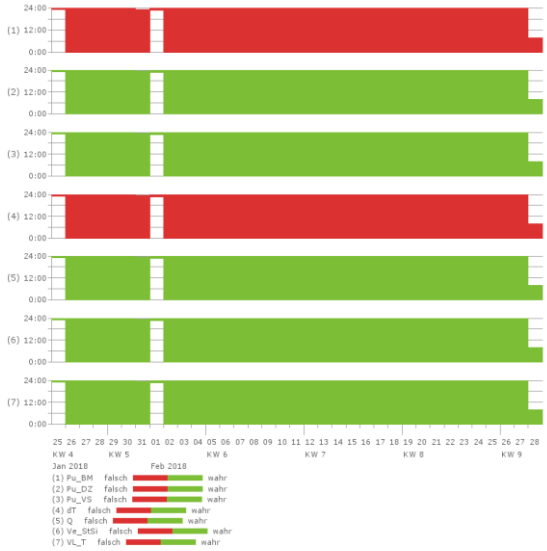


Abbildung 175 Betriebsgüte Pumpe HK_2 [IGS, synavision]

Bei Pumpe HK_2 werden **Betriebsregel 1 (Pu_BM)** und **Betriebsregel 4 (delta_T)** im Betriebszustand AUS über den gesamten Zeitraum nicht erfüllt.

Betriebsregel 1:

Die Betriebsmeldung der Pumpe muss im Zustand AUS gleich 0 sein. Der Leistungsbedarf der Pumpe ist im gesamten Zeitraum gleich 0 und die weiteren Regeln zum Förderstrom (Pu_VS) werden erfüllt. Demnach ist die Pumpe nicht in Betrieb, jedoch die Betriebsmeldung der Pumpe = 1.

Ursache kann ein fehlerhaft verknüpfter Datenpunkt sein.

Betriebsregel 4:

Der definierte Sollwert der Temperaturspreizung soll nach dieser Regel 2 K nicht überschreiten. Dieser Sollwert wird nie erreicht.

Eine mögliche Ursache ist eine große räumliche Distanz zwischen Temperaturfühler in Vor- und Rücklauf oder eine Ungenauigkeit der Fühler.

Die Aussagen über Pumpe HK_2 sind aufgrund des nicht vorhandenen Betriebs gering.

Bei der Zuordnung des Datenpunktes der Betriebsregel 1 ist zu überprüfen, ob diese der Freigabe der Pumpe oder der Betriebsmeldung der Pumpe entspricht. Der Sollwert der Temperaturspreizung ist im Auswertungs-Template so anzupassen, dass er im Betriebszustand AUS richtig erkannt wird.

Tabelle 39 Analyse Pumpe RLT_1 [IGS]

Regelung der Vorlauftemperatur

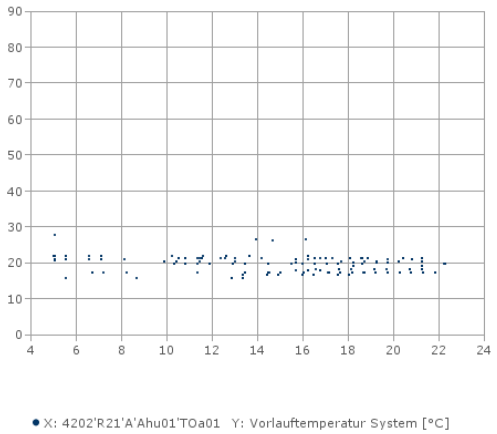


Abbildung 176 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe RLT_1 [IGS, synavision]

Die Vorlauftemperaturen im Systemkreis von Pumpe RLT_1 befinden sich im Betrachtungszeitraum im Bereich von 20°C (Abbildung 176). Eine Möglichkeit ist, dass die angezeigte Temperatur der Umgebungstemperatur des Temperaturfühlers entspricht.

Zeitprogramm

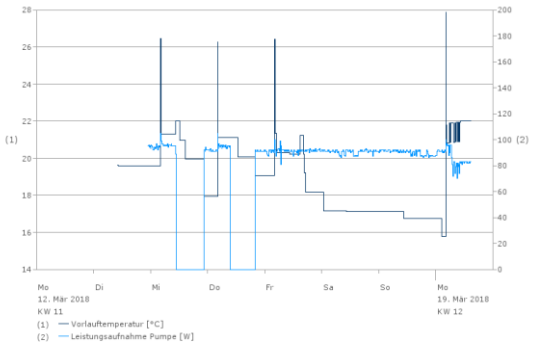


Abbildung 177 Zeitprogramm Pumpe RLT_1 [IGS, synavision]

Der kurze Ausschnitt der aufgezeichneten Daten zeigt einen Teil eines Zeitprogramms mit der Charakteristik einer Büronutzung auf. Der Betrieb der Pumpe ist von Dienstag bis Freitag an der hellblauen Kurve des Leistungsbedarfs erkennbar (Abbildung 177). Am Wochenende ist die Pumpe dennoch an bzw. weist eine Grundlast von 15 W auf. Die Temperaturkurve der Vorlauftemperatur weist an den drei Werktagen der Woche kurzzeitige Spitzen von ca. 26°C auf und sinkt anschließend auf ca. 20 Grad ab. Dieses Verhalten lässt auf ein hinterlegtes Zeitprogramm für einen Vereisungsschutz schließen, der täglich bei Anfahren der Lüftungsanlage die Temperaturspitzen auslöst. Während der Nutzungszeit der Lüftungsanlage geht die Pumpe aus.

Betriebsgüte

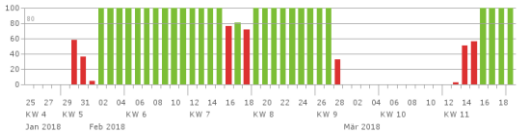


Abbildung 178 Betriebsgüte Pumpe RLT_1 [IGS, synavision]

Pumpe RLT_1 weist eine überwiegend gute Betriebsgüte auf (Abbildung 178). Lediglich zu Beginn der Datenauswertung und ungefähr in der Mitte des gesamten Zeitbereichs werden 80% nicht erreicht.

An Pumpe RLT_1 ist eine Δp-c-Regelung erkennbar. Der Differenzdruck an der Pumpe wird nahezu konstant gehalten. Pumpe RLT_1 versorgt ein Heizsystem in einem Gebäude mit Büronutzung. Dies geht aus den Vorlauftemperaturen und dem Zeitprofil der Pumpe hervor. Der kurze Ausschnitt der aufgezeichneten Daten zeigt einen Teil eines Zeitprogramms mit der Charakteristik einer Büronutzung auf. Der Betrieb der Pumpe ist von Dienstag bis Freitag an der Kurve des Leistungsbedarfs erkennbar. Am Wochenende ist die Pumpe an bzw. weist eine Grundlast von 15 W auf. Die Temperaturkurve der Vorlauftemperatur weist an den drei Werktagen der Woche kurzzeitige Spitzen von ca. 26°C auf und sinkt anschließend auf ca. 20 Grad ab. Während der Nutzungszeit der Lüftungsanlage (ca. 08:00- 20:00 Uhr) geht die Pumpe aus. Dieses Verhalten lässt auf ein hinterlegtes Zeitprogramm für einen Vereisungsschutz schließen, der täglich bei Anfahren der Lüftungsanlage die Temperaturspitzen auslöst. Eine überwiegend gute Betriebsgüte weist Pumpe 04 auf. Lediglich zu Beginn der Datenauswertung und ungefähr in der Mitte des gesamten Zeitbereichs wird da Minimum von 80% nicht erreicht. Ursache hierfür ist eine Abweichung der Betriebsmeldung der Pumpe im Zustand AUS. Bei der Zuordnung dieses Datenpunktes ist zu überprüfen, ob diese der Freigabe der Pumpe oder der Betriebsmeldung der Pumpe entspricht.
Bei der Zuordnung des Datenpunktes der Betriebsregel ist zu überprüfen, ob diese der Freigabe der Pumpe oder der Betriebsmeldung der Pumpe entspricht.

Tabelle 40 Analyse Pumpe RLT_2 [IGS]

Regelung der Vorlauftemperatur

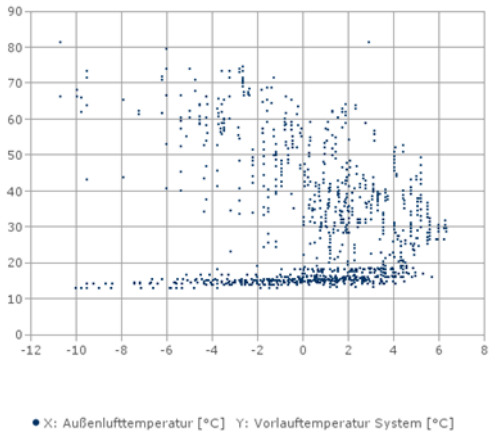


Abbildung 179 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe RLT_2 [IGS, synavision]

Das Verhalten der Vorlauftemperatur während des Betriebs der Pumpe (Abbildung 179) lässt keinen Zusammenhang mit einer außenluftgeführten Vorlauftemperaturkurve erkennen. Der Temperaturverlauf ist an einem Wärmeübertrager ebenso unüblich, kann jedoch beispielsweise zu Gewährleistung einer Sicherheitsfunktion in diesem Betrieb sein. Möglich ist der Erhitzer einer Lüftungsanlage in der Frostschutzfunktion.

Zeitprogramm

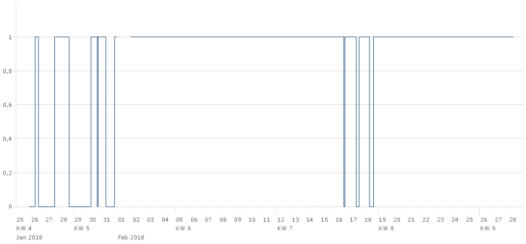


Abbildung 180 Zeitprogramm Pumpe RLT_2 [IGS, synavision]

Pumpe RLT_2 weist zu Beginn der Datenaufzeichnung und zur Mitte des Monats Februar einen wechselnden Betriebszustand auf (Abbildung 180). In den Zeiträumen dazwischen ist sie konstant in Betrieb.

Betriebsgüte

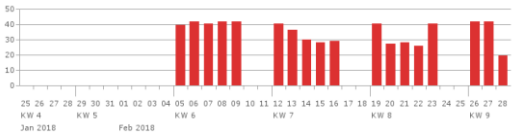


Abbildung 181 Betriebsgüte Pumpe RLT_2 [IGS, synavision]

Pumpe RLT_2 weist eine nicht ausreichende Betriebsgüte auf (Abbildung 181). Das Minimalziel von 80% wird nie erreicht, teilweise liegt die Betriebsgüte aufgrund komplett fehlerhafter Regeln bei 0%.

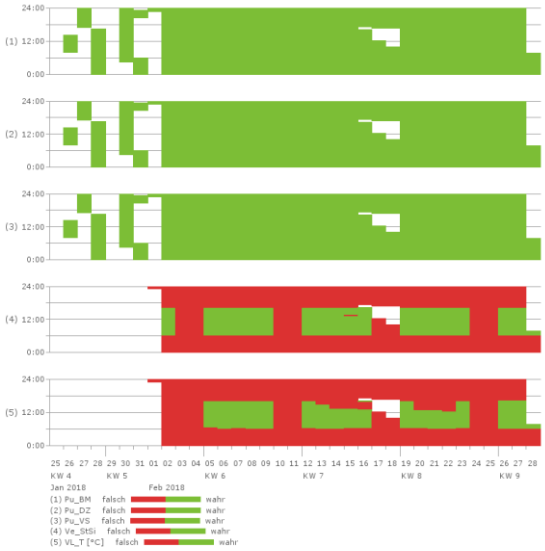


Abbildung 182 Betriebsregel Zustand EIN - Pumpe RLT_2 [IGS, synavision]

Im Betriebszustand EIN (Abbildung 182) werden die **Betriebsregeln 4 (Ve_StSi)** und **5 (VL_T)** zeitweise nicht erfüllt. Auffällig hierbei ist ein Muster, an dem ein Zeitprofil erkennbar ist. Der grüne Bereich in den Grafiken zeigt die Nutzungszeit des Gebäudes an. Der rote Bereich ist morgens, abends und ganztägig am Wochenende.

Betriebsregel 4:

Die Stellung des Ventils muss im Zustand EIN größer 0 sein. Der Leistungsbedarf der Pumpe ist im betrachteten Zeitraum größer 0 und die weiteren Regeln zum Förderstrom (Pu_VS) und Drehzahl (Pu_DZ) werden erfüllt. Demnach ist die Pumpe in Betrieb, jedoch das Ventil im roten Bereich geschlossen.

Betriebsregel 5:

Die Vorlauftemperatur muss der Definition nach **Regel 5 (VL_T) ≥ 28°C** sein. Sie wird im selben Zeitbereich wie Regel 4 nicht erfüllt. Ein möglicher Zusammenhang liegt in der hydraulischen Schaltung der Pumpe. Befindet sie sich in einem Mischkreis pumpt sie Wasser mit einer geringen Temperatur kontinuierlich im Kreis. Dieses Verhalten würde zur Vermutung des Vereisungsschutzes einer Lüftungsanlage passen.

Pumpe RLT_2 versorgt ein Heizregister einer Lüftungsanlage. Die lässt sich aus der Regelungsart, Verhalten der Vorlauftemperatur und der Temperaturspreizung erkennen. Die Vorlauftemperaturen steigen während der Nutzungszeit des Gebäudes an. Außerhalb der Nutzungszeit ist die Pumpe weiterhin in Betrieb, um den Vereisungsschutz der Lüftungsanlage aufrecht zu erhalten. Dabei ist zu überprüfen wie sich das Ventil verhält, das der Pumpe zugordnet ist. Hierbei ist die hydraulische Einbindung ein wichtiger Aspekt der berücksichtigt werden muss. Die Betriebsregel des Ventils zeigt außerhalb der Nutzungszeit an, dass dieses geschlossen ist. Denkbar ist eine Beimischschaltung. Ist das 3-Wege-Ventil dann geschlossen, wird das Wasser im Kreislauf weiterhin gefördert, um den Vereisungsschutz aufrechtzuerhalten. Bei einer Lüftungsanlage mit Dachaufstellung ist dies verbreitet.

Um den erkannten Fehler der Betriebsregel der Mindestvorlauftemperatur im Pumpenbetrieb für diesen Anwendungsfall zu beheben, ist zu der obigen Vermutung des Einsatzortes der Pumpe in einem Erhitzerkreislauf eines Lüftungssystems und des Vereisungsschutzes zu überprüfen. Trifft dieser Fall zu, ist der hinterlegte Sollwert im Analyse-Template entsprechend der Funktionsbeschreibung der Anlage anzupassen.
Im Betriebszustand AUS wird ein Fehler in Betriebsregel 1 erkannt. Diese besagt, dass die Betriebsmeldung der Pumpe = 0 sein muss, wenn Leistungsbedarf und Förderstrom ebenfalls = 0 sind. Da dies zeitweise nicht zutrifft, kann ein Messfehler der Pumpenleistungsdaten vorliegen. Eine weitere mögliche Ursache ist eine falsche Zuordnung des Datenpunktes der Betriebsmeldung. Wurde diese versehentlich mit dem Freigabebefehl der Pumpe verknüpft, ist dies eine Ursache des Fehlers. Die Datenpunktzuordnung muss an der MBE überprüft werden.

Tabelle 41 Analyse Pumpe WEZ [IGS]

Regelung der Vorlauftemperatur

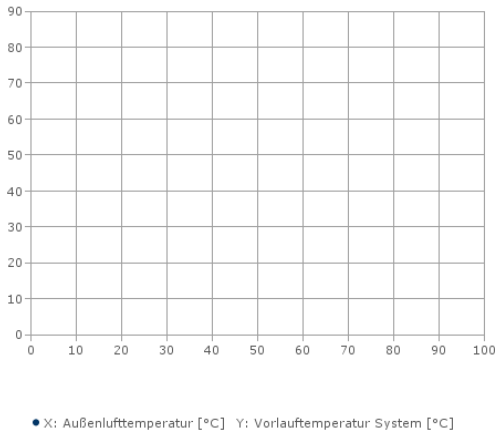


Abbildung 183 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe WEZ [IGS, synavision]

Bei Pumpe WEZ liegen keine Daten zur Vorlauftemperatur vor. Deshalb ist keine Grafik darstellbar.

Zeitprogramm

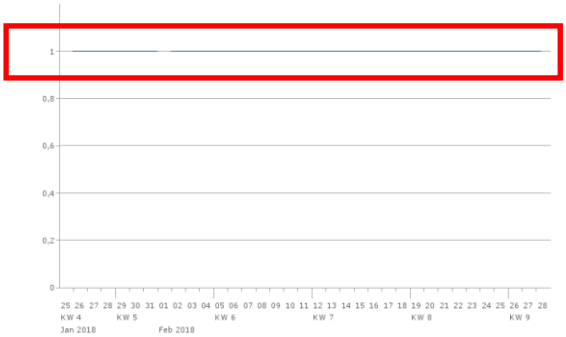


Abbildung 184 Zeitprogramm Pumpe WEZ [IGS, synavision]

Pumpe WEZ ist über den gesamten Betrachtungszeitraum in Betrieb (Abbildung 184).

Betriebsgüte

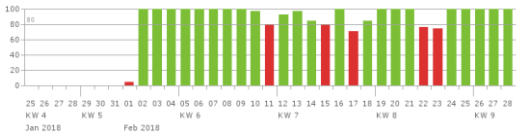


Abbildung 185 Betriebsgüte Pumpe WEZ [IGS, synavision]

Die größtenteils bestimmende Betriebsgüte von Pumpe WEZ liegt zwischen 80% und 100% (Abbildung 185). Lediglich an 5 Tagen werden die Betriebsregeln nicht ausreichend erfüllt.

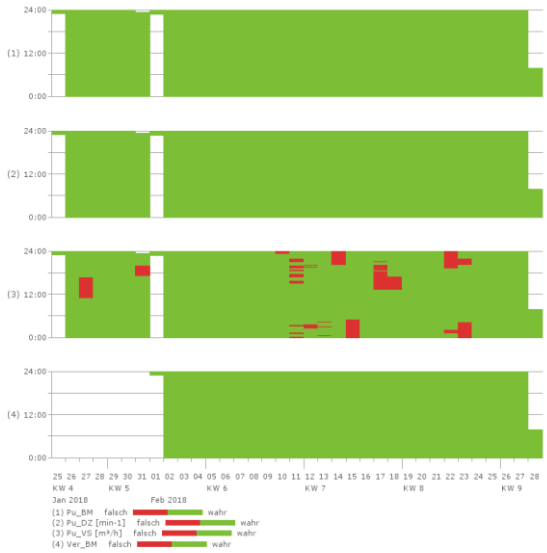


Abbildung 186 Betriebsregel Zustand EIN - Pumpe WEZ [IGS, synavision]

Größtenteils werden alle Betriebsregeln erfüllt. Lediglich Betriebsregel **3 (Pu_VS)** weist gelegentliche Mängel auf.

Betriebsregel 3:

Der Förderstrom der Pumpe muss im Zustand EIN größer 0 sein. Der Leistungsbedarf der Pumpe ist im betrachteten Zeitraum größer 0 und die weitere Regel zur Drehzahl (Pu_DZ) wird erfüllt. Demnach ist die Pumpe in Betrieb, stellt sich kurzzeitig kein Förderstrom an der Pumpe ein.

Ursache dafür kann ein Messfehler sein, der einen sehr geringen Förderstrom der Pumpe nicht richtig aufzeichnet. Ein weiterer Hinweis liefert das Hinzufügen des Stellsignal des Ventils. Gegebenenfalls ist dies kurzzeitig geschlossen, wodurch die Pumpe gegen ein geschlossenes Ventil drückt.

Pumpe WEZ wird mit einer Δp-c-Regelung betrieben und ist den gesamten Betrachtungszeitraum über in Betrieb. Dies geht aus der Analyse der Regelungsart und des Zeitprogramms hervor. Die Betriebsgüte der Pumpe ist überwiegend gut. Geringe Abweichungen treten im Betriebszustand EIN in der Betriebsregel des Förderstroms aus. Dieser ist kurzzeitig trotz Betrieb der Pumpe = 0. Dies kann zur Ursache haben, dass die Pumpe gegen ein geschlossenes Ventil drückt oder dass der Förderstrom in dieser Zeit sehr gering ist und nicht exakt gemessen wird.

Zur Analyse der Ursache ist zunächst die Messeinrichtung auf deren Genauigkeit zu überprüfen. Sollte die Pumpe gegen ein geschlossenes Ventil drücken, besteht die Gefahr einer Überhitzung des Pumpenrotors und Dampfblasenbildung (Gefahr von Kavitation).

Das entwickelte Werkzeug zur automatisierten Analyse von Betriebsdaten aus Pumpen erkennt bereits mit einer geringen Anzahl an Zeitreihen aus Pumpen mögliche Betriebsfehler. Durch Anpassung von wenigen Parameter in Analyse-Tool kann eine Anpassung an die realen Betriebsparameter der Pumpe vorgenommen werden. Dadurch ist eine breite Anwendung dieser Methodik zur Betriebsanalyse auf weitere Umwälzpumpen in Heizsystemen möglich. Unter Berücksichtigung der Größe des Campus einer Hochschule, der Vielzahl von Gebäuden unterschiedlicher Nutzung und Anforderungen an Heizkreise ist dies für das Gebäude- und Energiemanagement einer Hochschule hilfreich Energiebedarf und mögliche Betriebsfehler an den Pumpen der Heizsysteme frühzeitig und mit einfachen Werkzeugen zu lokalisieren und beseitigen.

7.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der teil-automatisierten Betriebsoptimierung

Die drei Anwendungen zur Betriebsoptimierung zeigten, dass sie sowohl praktikabel sind als auch energetisch effektiv sind und wirtschaftlich eingesetzt werden können. Insbesondere die Chance, die Methoden fast vollständig automatisiert bzw. digitalisiert anzuwenden, können es ermöglichen, auch bei kleinen Einsparpotentialen je Anlage (z.B. Heizkreis bzw. Pumpe) wirtschaftliche Optimierungsmaßnahmen umzusetzen.

7.6.4 Zusätzliche wissenschaftliche Arbeiten und Ergebnisse

Neben den ursprünglich geplanten Maßnahmen wurden im Projekt noch zwei weitere Aspekte untersucht. Zum einen wurde in Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement ein integriertes Visualisierungskonzept für die Energie- und Automationsdaten entwickelt. Zum anderen wurde eine Analyse von Meta- und Massendaten zu empirische Identifikation und Zuordnung von Einsparungen zu Maßnahmen im Gebäudebestand durchgeführt.

7.6.4.1 Integriertes Visualisierungskonzept

Die Ergebnisse der Betriebsoptimierung basieren auf digitalen Modellen. Sie können deshalb über die einmalige Prüfung hinaus auch für eine kontinuierliche Überwachung des Gebäudebetriebs eingesetzt werden. Datenauswertung und Visualisierung verfolgen zwei Ziele:

1. Die Dokumentation und Bewertung der Entwicklung des Energieverbrauchs des Campus und einzelner Gebäude in den nächsten Jahren
2. Die Analyse von Veränderungen im Energieverbrauch und der Effekt von Maßnahmen

Für die Auswertung wurde ein Konzept von Indikatoren auf Gebäudeebene für Strom und Wärme definiert:

- Energieverbrauch [kWh/m²a)]
- Spitzenlast [W/m²], definiert als oberes Dezil in einem Zeitraum
- Grundlast [W/m²], definiert als unteres Dezil in einem Zeitraum

Die Indikatoren sollen in unterschiedlichen Zeitschritten verfolgt werden, um einen bestmögliche Identifikation von Veränderungen und Maßnahmen je Gebäude zu ermöglichen.

Zur Bewertung der Campus-Ebene werden die Daten aggregiert. Hierzu wurden verschiedene Ansätze erprobt (absolute Gesamtwerte, spezifische Gesamtwerte, Mittel- oder Medianwerte etc.).
Für die Visualisierung von Energieverbrauchs- und Automationsdaten wurde in Abstimmung mit dem Gebäudemanagement ein integriertes Dashboard entwickelt, auf dem die Gebäudeperformance in hierarchischer Weise dargestellt auf folgenden Ebenen wird:

Campusebene	Kompakte Übersicht des Energieverbrauchs über alle Gebäude
Gebäudeebene	Kompakte Übersicht über die Betriebsgüte aller Anlagen
Anlagenebene	Detaillierte Darstellung über alle Betriebszustände einer Anlage und einzelne Betriebsregeln je Betriebszustand (Popup), dazu anlagenspezifische ingenieurtechnische Einzelauswertungen

Die Visualisierungen und anschließenden Analysen wurden mit dem Gebäudemanagement abgestimmt und auf rund ein Duzend Gebäude übertragen, um das Skalierungspotential zu demonstrieren.

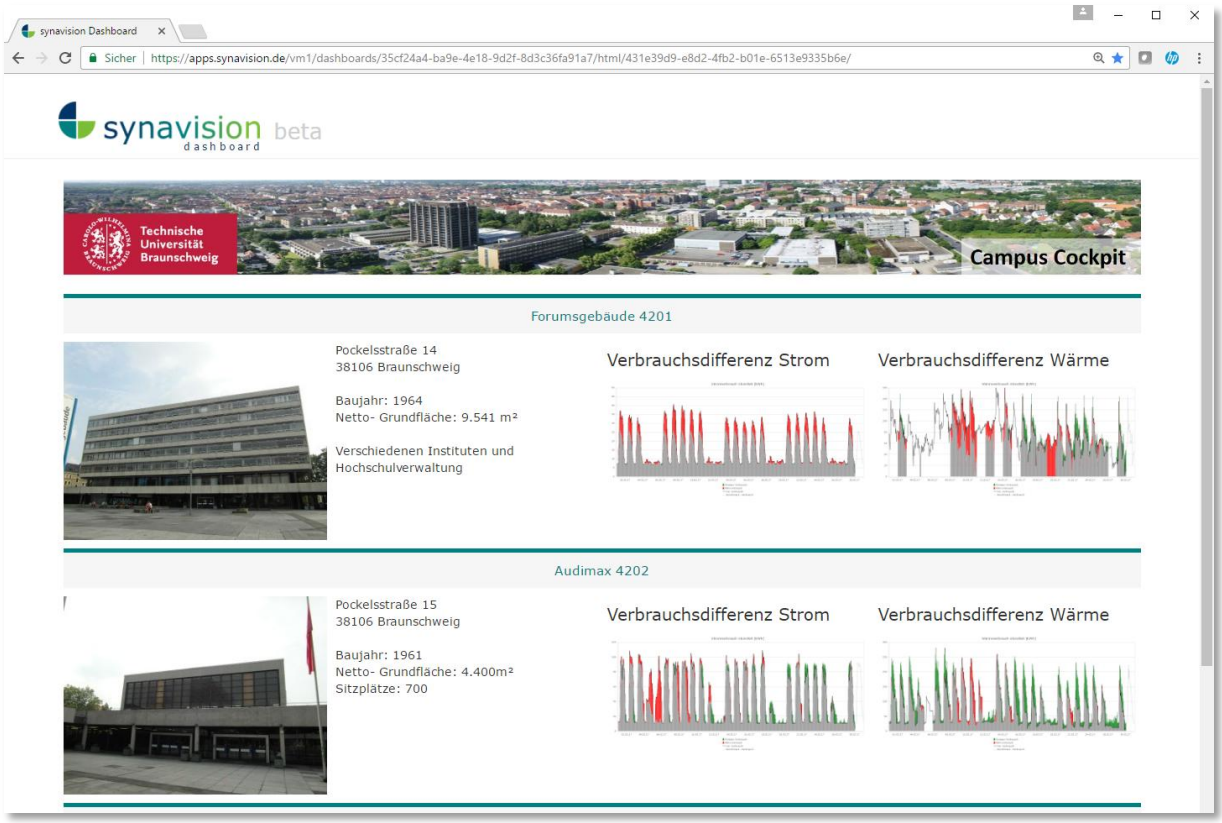


Abbildung 187 Campusebene [SIZ; synavision]

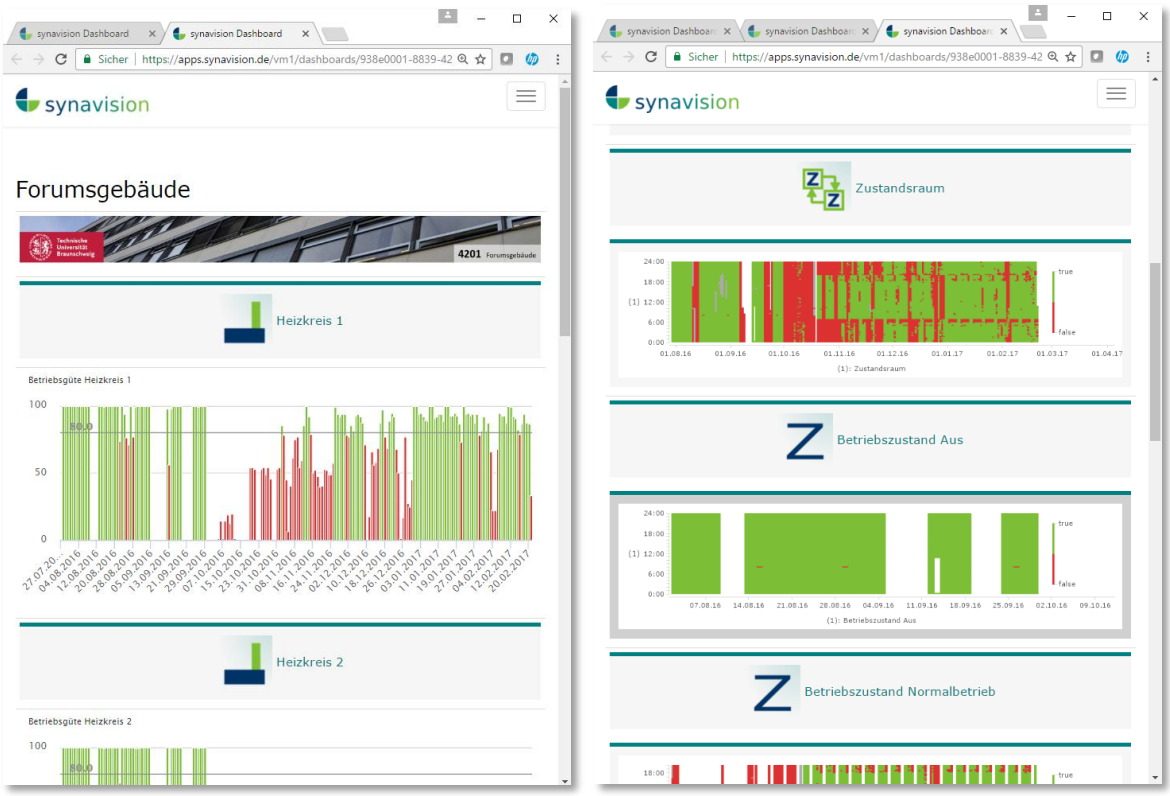


Abbildung 188 Gebäudeebene (links) und Anlagenebene (rechts) [SIZ; synavision]

7.6.4.2 Metadatenanalyse im Kontext der Energiekostenbudgetierung

Mit dem Ziel einer schnellen Analyse und Identifikation von Zusammenhängen innerhalb der Mess- und Metadaten zum Energieverbrauch der Gebäude, wurde ein Analyse-Dashboard mit Hilfe der Web-Software BOKEH auf Python-Basis entwickelt. Mit diesem können sowohl Messdaten als Zeitreihen als auch Metadaten wie z.B. der Gebäudetyp, das Alter oder auch eine jährliche Einsparung durch leistungsfähige Filter und Visualisierungstechniken schnell und anschaulich analysiert werden.
Für die Analysen wurden die Daten zunächst in einer importfähigen Struktur aufbereitet, siehe Abbildung 189.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Gebäudekennung	Energietyp	NGF [m²]	Maßnahmen ergriffen?	Ges. spez pro m², 2012 [kWh/m²]	Wasser, 2012 [m³/a]	Ges. spez pro m², 2012 [kWh/m²]	Gesamt, 2012 [MWh/a]	Gesamt Tag [kWh]	Anteil Tag, 2012 [%]	Gesamt Nacht [kWh]	Anteil Nacht, 2012 [%]	Gesamt Mo-Fr [kWh]	Anteil Mo-Fr, 2012 [%]	Gesamt Sa-So [kWh]	Anteil Sa 2012 [%]
2	'4202	Strom	4400	**Maßnahme: nein**	22,6	603,1	165,0	**99,5**	71178	71,5%	28351	28,5%	83524	83,9%	16006	1
3	'2430	Strom	5585	**Maßnahme: nein**	131,0	1092,5	669,9	**731,9**	604958	82,7%	126922	17,3%	668528	91,3%	63351	
4	'3401	Strom	13206	**Maßnahme: ja**	132,6	2212,1	791,8	**1751,7**	960584	54,8%	791082	45,2%	1311829	74,9%	439837	2
5	'2418	Strom	1076	**Maßnahme: nein**	22,9	205,8	119,5	**24,6**	14929	60,7%	9667	39,3%	19405	78,9%	5191	2
6	'3404	Strom	3716	**Maßnahme: ja**	440,4	425,4	3847,2	**1636,6**	848118	51,8%	788474	48,2%	1188475	72,6%	448117	2
7	'4203	Strom	14364	**Maßnahme: ja**	116,2	2142,9	778,6	**1668,5**	1137655	68,2%	530796	31,8%	1426910	85,5%	241541	1
8	'4207	Strom	9658	**Maßnahme: ja**	62,8	4932,0	122,9	**606,3**	345644	57,0%	260688	43,0%	461663	76,1%	144669	2
9	'3314	Strom		**Maßnahme: nein**	#DIV/0!	581,1	324,4	**188,5**	120404	63,9%	68131	36,1%	148872	79,0%	39662	2
10	'2415	Strom	17303	**Maßnahme: nein**	58,0	5143,0	195,0	**1003,0**	554765	55,3%	448197	44,7%	800469	79,8%	202493	2
11	'3322	Strom	2622	**Maßnahme: nein**	71,7	250,8	749,9	**188,0**	107523	57,2%	80517	42,8%	145279	77,3%	42761	2
12	'2410	Strom	3974	**Maßnahme: nein**	126,0		#DIV/0!	**500,7**	294244	58,8%	206434	41,2%	396837	79,3%	103840	2
13	'2414	Strom	6328	**Maßnahme: nein**	97,6	5250,7	117,6	**617,4**	344563	55,8%	272818	44,2%	475462	77,0%	141920	2
14	'2423+24+25	Strom	10262	**Maßnahme: nein**	185,1		#DIV/0!	**1899,6**	1082568	57,0%	817061	43,0%	1434136	75,5%	465494	2
15	'3205+04+06	Strom		**Maßnahme: nein**	#DIV/0!	3223,4	185,0	**596,4**	377582	63,3%	218774	36,7%	467182	78,3%	129173	2
16	'3302_FZT	Strom		**Maßnahme: nein**	#DIV/0!		#DIV/0!	**269,7**	178005	66,0%	91689	34,0%	221975	82,3%	47719	1
17	'3302_ThDyn	Strom		**Maßnahme: nein**	#DIV/0!		#DIV/0!	**115,4**	78282	67,9%	37077	32,1%	95592	82,9%	19767	1
18	'3303+04+05	Strom	9929	**Maßnahme: nein**	55,0	679,3	804,4	**546,4**	347384	63,6%	199015	36,4%	440013	80,5%	106387	1
19	'4101	Strom	4495	**Maßnahme: nein**	58,3	583,1	449,3	**262,0**	150569	57,5%	111389	42,5%	200351	76,5%	61606	2
20	'4102	Strom	6504	**Maßnahme: nein**	27,1		#DIV/0!	**176,1**	106858	60,7%	69260	39,3%	138088	78,4%	38031	2
21	'1405	Strom	1166	**Maßnahme: nein**	13,3		#DIV/0!	**15,5**	6384	41,2%	9108	58,8%	10970	70,8%	4522	2
22	'1409+04+07+11+25	Strom	8525	**Maßnahme: nein**	21,4		#DIV/0!	**182,8**	119901	65,6%	62935	34,4%	149338	81,7%	33498	1
23	'4103	Strom	17490	**Maßnahme: nein**	54,2	1621,1	584,5	**947,5**	535545	56,5%	411939	43,5%	727028	76,7%	220456	2
24	'4202	Wärme	4400	**Maßnahme: nein**	78,8	603,1	574,9	**346,7**	250593	72,3%	96111	27,7%	268709	77,5%	77995	2
25	'2430	Wärme	5585	**Maßnahme: nein**	133,7	1092,5	683,3	**746,5**	547000	73,3%	199530	26,7%	652690	87,4%	93840	1
26	'3401	Wärme	13206	**Maßnahme: ja**	204,9	2212,1	1223,0	**2705,4**	1368471	50,6%	1336919	49,4%	1987527	73,5%	717863	2
27	'2418	Wärme	1076	**Maßnahme: nein**	55,2	205,8	288,6	**59,4**	31104	52,4%	28280	47,6%	44316	74,6%	15068	2
28	'3404	Wärme	3716	**Maßnahme: ja**	42,2	425,4	369,0	**157,0**	83042	52,9%	73913	47,1%	117417	74,8%	39538	2

Abbildung 189 Aufbereitung der Mess- und Metadaten [SIZ]

Anschließend konnten die Daten in flexibler Weise gefiltert und visualisiert werden, siehe Abbildung 190.

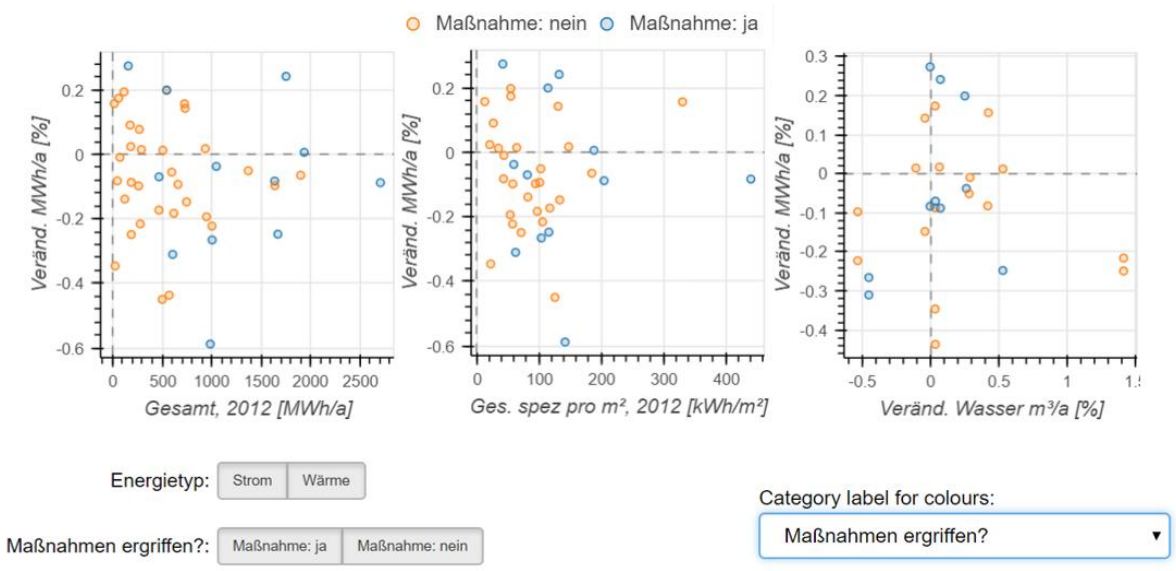


Abbildung 190 Flexibles Analyse-Werkzeug [SIZ]

Die Testanwendungen der Visualisierung verliefen positiv, da die Daten schnell gute und neue Einblicke ermöglichten. Unter anderem konnte festgestellt werden, dass sich noch kein unmittelbarer, deutlich erkennbarer Zusammenhang zwischen dokumentierten Einsparmaßnahmen und tatsächlichen Verbrauchsänderungen erkennen lässt.

8 ZUSAMMENFASSUNG DER SCHWERPUNKTTHEMEN

Im Folgenden werden die verschiedenen Schwerpunktthemen jeweils in einer Kurzfassung erläutert.

8.1 Neubau, Sanierung, Instandhaltung

Innerhalb des Arbeitspakets werden die generierten Maßnahmen aus dem im Vorprojekt „EnEff Campus: *blue*MAP TU Braunschweig“ entwickelten konkreten Entwicklungsplan für den Campus der TU Braunschweig bis 2020 für die Umsetzung festgelegt, mit der Hochschulleitung und den weiteren verantwortlichen Institutionen zu einem konkreten Umsetzungsplan zur Umsetzung gebracht. Die Maßnahmen werden dabei in folgende Kategorien gegliedert: Gebäudehülle /-technik, Beleuchtung, Photovoltaik, techn. Ausstattung und Nutzerverhalten.

Im Rahmen der Umsetzung wird der Fokus im Bereich Betriebsoptimierung RLT-Anlagen, Austausch der Beleuchtung und Integration von PV auf den Dachflächen der Gebäude der TU Braunschweig gelegt.

Zur Dokumentation aller geplanten und umgesetzten Sanierungsmaßnahmen wurde ein Katalog auf MS-Excel-Basis entwickelt. Zur Gewährleistung einer umfangreichen Auswertungsgrundlage werden dabei sämtliche Gebäude und die ihnen zugeordnete Maßnahmen in einer Gesamtübersicht erfasst und gegenübergestellt.

Nach Eingabe der dokumentierten Maßnahmen erfolgt die Ergebnisauswertung hinsichtlich Investitionskosten, Reduzierung Energiekosten, Verringerung CO2-Emissionen, sowie die Einsparung von Primärenergieverbrauch und Endenergieverbrauch.

Bis Ende 2018 sind 97 bereits durchgeführte und geplante Umsetzungen aus den o.g. Maßnahmenkategorien dokumentiert.
Zur verbesserten, öffentlichen Darstellung der Bestandssituation, der Sanierungsprognosen und der Umsetzung von Maßnahmen bei den TU-Gebäude werden die Ergebnisse in einer interaktiven Campuskarte eingebunden. Als Web-Oberfläche wird eine Applikation des Kartendienstes von google.de verwendet, das dadurch eine einfache und unkomplizierte Anwendung möglich ist.

Ein weiterer Schwerpunkt innerhalb dieses Arbeitspakets bildet die Zusammenführung diverser Berechnungs-Tools für die Maßnahme- und Szenarienentwicklung, die im Zuge der ersten Projektphase entwickelt wurden. 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 einem **An**alysetools zur **Sa**nierung von **Ge**bäuden „AnSaGe“ im MS-Excel-Format zusammengefasst. Ziel ist die Anwendbarkeit des Berechnungswerkzeugs auf andere Bestandsquartiere.

8.2 Energieversorgung

Bearbeitungsschwerpunkt „Energieerzeugung und –speicherung“

Zusammen mit BS|Energy und dem Gebäudemanagement erfolgte auf Basis der Verbrauchsprofile eine detaillierte Dimensionierung (thermische Leistung, Volllaststunden, Anforderungen an die hydraulische & elektrische Einbindung) zweier BHKW-Aggregate (Campus Nord & 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 Amortisationzeitraum 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.

Bearbeitungsschwerpunkt „Energieverteilung und Netzstabilität“

Als Planungs- und Prognoseinstrument für die Integration von elektrischen Energiesystemen wurde das Energieversorgungsnetz der Universität im Rahmen einer Simulationsumgebung implementiert. Zusätzlich zu der qualitativen Abbildung der Netzstruktur sowie der qualitativen Hinterlegung der Betriebsmitteldaten wurden für unterschiedliche Betrachtungszeiträume reale Last- und Erzeugungsprofile hinterlegt. Zur Verifizierung des Simulationsmodells wurde für das Jahr 2011 der gemessene Verbrauch mit dem Simulationsergebnis verglichen. Die Auswirkungen der in EnEff Campus bereits umgesetzten Maßnahmen auf das Verteilnetz der Universität wurde für das Jahr 2017 betrachtet. Für die künftigen Auswirkungen wurden Szenarien für 2020, 2030 und 2050 erstellt und evaluiert. Diese berücksichtigen die Integration von erneuerbaren Energieanlagen in Form von Photovoltaik und BHKW sowie künftige Hochleistungsverbraucher durch die Elektromobilität.

Im Bereich von Gleichstromnetzen wurde anhand von Simulationen die Realisierbarkeit und der Vorteil dieser Technologie untersucht und evaluiert.

Bearbeitungsschwerpunkt „Netzinfrastruktur und Netzintegration bei einem Ausbau leistungsintensiver Stromverbraucher (Elektromobilität)“

Der Ausbau der Elektromobilität wurde für den Standort Mühlenpfordthaus durch die Planung und Inbetriebnahme eines neuen Ladebereiches forschungsbegleitend realisiert. Sowohl das AC- als auch das schnelles DC-Laden wird bereitgestellt. Zur Autorisierungsfreigabe, Ladedatenerfassung und Ladevorgangssteuerung wurde ein datenbankbasiertes Backend-System umgesetzt. Die Auslastung der Ladebereiche wurde untersucht. Im Rahmen einer Testumgebung wurde ein Energiemanagementsystem entwickelt, dass anhand eines Haushaltslast- und Erzeugungsprofils eigenverbrauchsoptimierte Ladeprofile generiert.

8.3 Interface „Mensch – Technologie

Die Teilstrategie bestand ursprünglich aus den beiden Arbeitspaketen „Ausbildung der Energienutzungskoordinator/innen“ und „Nutzerworkshops.“ Beide Arbeitspakete bestätigen den positiven Effekt von MI auf die Bereitschaft der Nutzer/innen mehr Energie an der Universität zu sparen, der auch schon im Vorläuferprojekt „EnEff Campus: blueMAP“ gefunden wurde. In den Kommunikationsschulungen konnte gezeigt werden, dass bereits kurze Interventionen in MI 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.

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[12] 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_2 Challenge, initiiert, die dazu beitragen sollte eine soziale Norm für das Energiesparen zu entwickeln. Hier treten alle Gebäude der TU Braunschweig gegeneinander, 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_2 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_2 produzierte. Diese Steckbriefe wurden an die Energienutzungskoordinator/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.

[12] https://magazin.tu-braunschweig.de/m-post/vom-ich-muss-zum-ich-will/

8.4 Städtebauliche Entwicklung

Die Campus der TU Braunschweig entwickeln sich, unter sich stetig ändernden Vorzeichen, weiter. Die Analyse früherer Masterplanungen und auch eigener Überlegungen zu einem adaptiven Masterplan haben eines gemeinsam: sie sind bald wieder – trotz der Fähigkeit zu Adaption –überholt. Das bringt einerseits die pluralistische Struktur einer Universität mit sich, andererseits bedingt die Notwendigkeit langer Planungshorizonte bei sich kurzfristig ändernden Rahmenbedingungen eine gewisse Unwegsamkeit. Die intensive Beschäftigung mit der Entwicklung der TU Braunschweig führt daher zu der Erkenntnis, dass es, neben einem laufend anzupassenden (und entsprechend zu kommunizierenden) Masterplan, verbindliche Kriterien zur Einschätzung und zur Bewertung der einzelnen Projekte und Maßnahmen auf dem Campus geben muss. Mit Hilfe der Projektsammlung und durch Auswertung bzw. Weiterentwicklung der Projekte konnte ein Kriterienkatalog erstellt werden. Dieser ist für jeden anwendbar und ermöglicht so eine schnelle Einschätzung des Synergetischen Potentials einzelner Maßnahmen. Diese kommen nicht ohne eine ortsspezifische Einordnung oder Wichtung aus und gerade hier liegt das Potential in– oft intransparente – Planungsprozesse eine Vielzahl von Nutzern und Akteuren einzubinden. Die, auch in anderen Bereichen zu beobachtende Zunahme von Beteiligungs- bzw. Partizipationsverfahren trägt zu einer gesteigerten Identifikation mit den Entscheidungsprozessen und damit langfristig auch zu einem nachhaltigeren Umgang mit den Ergebnissen bei. Die vermittelte Kooperation zur gemeinsamen Entwicklung des Gebietes um den Campus Nord – zum CoLiving Campus – wird Gelegenheit bieten, diese Vorgehensweise – eben in einem Reallabor – zu untersuchen.

8.5 Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalanalyse / Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge

Es hat sich im Laufe der Projektbearbeitung gezeigt, dass eine Zusammenlegung der Schwerpunktthemen „Transparenz des Energieverbrauchs mit Hilfe von Signalanalyse“ und „Intelligente Steuerung des Energieverbrauchs im Internet der Dinge“ aufgrund der erzielten Synergien sinnvoll war, da ohnehin eine enge Zusammenarbeit der Beteiligten Partner (IfN und IBR) vorgesehen war. Am deutlichsten zeigt sich diese Synergie in einer gemeinsam konzipierten, entwickelten und implementierten Kommunikationsinfrastruktur, die im Rahmen des Projekts dann auch im verteilten Demonstrator „Real-Life-Lab Campus 2020“ evaluiert wurde: An insgesamt drei Instituten der TU Braunschweig (IfN, IBR und IWF) wurden verschiedenste Verbraucher mit entsprechender Technik zur Erfassung und Steuerung des Energieverbrauchs ausgestattet und in das übergreifende Netzwerk zur gemeinsamen Evaluation integriert. Durch implementierte hierarchische Kommunikation konnte neben Aspekten der Datensicherheit auch Anforderungen an Datenschutz und Privatsphäre umgesetzt und evaluiert werden.
Für die Erfassung der notwendigen Daten wurde dabei ein mehrgleisiger Ansatz verfolgt: Zum einen wurden herkömmliche schaltbare Mess-Zwischensteckdosen in das Netzwerk integriert – so konnte der Stromverbrauch einzelner (hinter der Zwischensteckdose angeschlossener) Geräte quantifiziert werden und diese Geräte konnten in gewissem Rahmen auch gesteuert (also ein- oder ausgeschaltet) werden.

Ein weiter Ansatz wurde durch Signalanalyse von Störungen auf der Stromleitung evaluiert: Durch charakteristische Störungen, die einzelne Geräte hervorrufen, lassen sich verschiedene Zustände mehrerer Verbraucher gleichzeitig erfassen. D.h. mit nur einem Messgerät lässt sich der Stromverbrauch mehrerer Verbraucher abschätzen – eine Steuerung der erfassten Geräte war für diesen Ansatz nicht vorgesehen.
Der am weitesten gehende Ansatz der Erfassung und Steuerung von Verbrauchern basiert auf der Vorstellung, dass in Zukunft immer mehr Geräte ohnehin schon mit Recheneinheiten und Kommunikationsschnittstellen ausgestattet sind und so das sogenannte Internet-of-Things (IoT) bilden. Integriert in das oben beschriebene hierarchische Netzwerk lassen sich solche Geräte im Idealfall feingranular steuern, d.h. nicht nur ein- und ausschalten, sondern es können dynamisch durch von innen oder außen kommenden Anforderungen verschiedene Parameter angepasst und/oder unterschiedliche Programme ausgeführt werden. Da es solche Geräte zum Zeitpunkt Projektdurchführung noch nicht vorhanden waren, wurden diese prototypisch implementiert, sodass für die Versuche mehrere „vollintegrierte“ IoT-Geräte geschaffen wurden, die durch das Netzwerk in verschiedener Weise erfasst und gesteuert werden konnten.
Mit den gewonnenen Daten wurden dann wiederum zwei verschiedene Ansätze verfolgt: Zum einen wurde durch entsprechendes Feedback (bspw. durch Applikationen für Tablets oder Smartphones) dem Nutzer eines Geräts die „Kosten“ (bspw. Energieverbrauch, CO2-Emisson oder Geld) seiner gerade ausgeführten Aktion (bspw. Nutzung des Kaffeevollautomaten) gemeldet. Auf diese Weise wird der Nutzer zunächst darüber informiert, was für einen Einfluss seine gerade getätigte Aktion hat. Aus dieser Information kann er dann selbstständig Schlüsse für die Zukunft ziehen und ggf. sein Verhalten in Bezug auf Geräte mit besonders hohen Kosten ändern.
Zum anderen wurden im Netzwerk auch automatische Regelungen umgesetzt, die bestimmte Geräte auf Basis definierter Ziele (bspw. einer Lastspitzenminimierung) steuern können - so wurde u.a. ein dynamisches Energiemanagement für Kleinverbraucher umgesetzt.

8.6 Teil-Automatisierte Betriebsoptimierung

Das SIZ energie+ hat im Rahmen des Projekts Konzepte für die teil-automatisierte Betriebsoptimierung erprobt und dazu eine Datenerfassung aus dem Energiemanagementsystem energo+ (Strom, Wärme) sowie für die Daten der Gebäudeleittechnik (BACnet/IP Fabrikat Siemens) aufgebaut.

Die Methodik der Betriebsanalyse basiert auf dem Konzept Aktiver Funktionsbeschreibungen nach Plesser[13]. Diese definiert einen Prüfprozess für Anlagen- und Automationsfunktionen auf Basis von Zustandsräumen, mit denen Betriebszustände und Betriebsregeln für Anlagen spezifiziert werden. Die Einhaltung der Spezifikationen kann durch Zuweisung entsprechender Betriebsdaten aus der Gebäudeautomation teil-automatisiert erfolgen. Die Bearbeitung erfolgte unter Verwendung der Software „Digitaler Prüfstand“ der synavision GmbH.

[13] Plesser, Dr. Stefan: „Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen“, Dissertation an der Technisches Universität Braunschweig, 2013

Die Bestandsaufnahme der Anlagen erfolgt in Abstimmung mit dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig. Zur Verfügung standen in der Regel Anlagenübersichtsschemen. Automationsschemen und textuelle Funktionsbeschreibungen lagen nicht vor. Eine Ortsbegehung wurde nicht durchgeführt.

Ausgehend von den Anlagenschemen wurden zunächst die relevanten und anschließend die davon über die Gebäudeleittechnik verfügbaren Datenpunkte im digitalen Prüfstand definiert. Mit diesen wurden dann typische Regelungskonzepte für die Anlagen mit ebenfalls typischen Sollwerten spezifiziert.

Für die Erfassung aus der Automationsdaten wurde notwendige Hardware (ein WAGO BACnet-Controller und Logger sowie ein Gateway der Firma MBS) installiert. Für die Prüfung der Anlagenspezifikation wurden die erfassten Daten in den Digitalen Prüfstand importiert. Bei drei Gebäuden wurde eine teilautomatisierte Betriebsoptimierung durchgeführt. Die Methodik wurde dabei sowohl „konventionell“ als Fehleridentifikation angewendet (Audimax), als auch ergänzt durch Strategien zur Betriebsoptimierung (Forumsgebäude). Beim dritten Gebäude (Bürogebäude am Bültenweg) ergaben sich bei der Bearbeitung Probleme bei der Datenerfassung, sodass das stattdessen die Bearbeitung des Forumsgebäudes mit einem Ansatz zur automatisierten Erkennung von Betriebsfehlern erweitert wurde.

Als Ergebnis wurden in den Gebäuden Einsparpotentiale identifiziert, die ohne Investitionskosten erschlossen werden können bzw. konnten. In den Lüftungsanlagen des Audimax konnte ein Einsparpotential von 1.300 €/a durch eine Optimierung der Zulufttemperatur identifiziert werden. Im Forumsgebäude wurde eine systematische Optimierung einzelner Parameter von Heizungs- und Lüftungsanlage, also ohne Investitionen, durchgeführt. Diese ergaben eine Einsparung von rund 2.000,- €/a. Hochgerechnet auf die Bürofläche der TUBS von 76.000m² ergibt dies ein Potential von rund 16 T€/a. Weitere Arbeiten des SIZ umfassten die automatisierte Fehlererkennung und Visualisierungsmethoden.

9 ERGEBNISSE

9.1.1.1 Zusammenfassung Umsetzung Maßnahmen

Die in den verschiedenen Schwerpunktthemen durchgeführten und detailliert dokumentierten energetischen Maßnahmen zu Gebäudehülle, Anlagentechnik, technischer Ausstattung, Nutzerverhalten, usw. mit Angaben zu Energieeinsparpotentialen, eine Beschreibung der jeweiligen Maßnahme im Einzelnen sowie der erforderlichen Investitionskosten werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 42 Übersicht Ergebnisse Umsetzung Maßnahmen [IGS]

Maßnahme	Bemerkung	Einsparungen
Gebäudehülle	Energetische Sanierung der Gebäudehülle nach gültiger Energieeinsparverordnung (EnEV). Investition: 15,9 Mio. €	Strom: 94 MWh/a Wärme: 1.225 MWh/a Energiekosten: 122.465 €/a Primärenergie: 857 MWh/a CO2-Emissionen: 245 t/a
Gebäudetechnik	Betriebsoptimierung RLT-Anlagen und Austausch von Heizungspumpen Investition: 3,79 Mio. €	Strom: 2.151 MWh/a Wärme: 1.617 MWh/a Energiekosten: 478.506 €/a Primärenergie: 6.087 MWh/a CO2-Emissionen: 1.451 t/a
Photovoltaik	Integration von Photovoltaik auf den Dachflächen der TU-Gebäude zur Eigenstromerzeugung. Investition: 1,31 Mio. €	Strom: 730 MWh/a Energiekosten: 133.623 €/a Primärenergie: 1.897 MWh/a CO2-Emissionen: 412 t/a
Beleuchtung	Austausch der vorhandenen gegen eine energieeffiziente Beleuchtung (LED). Investition: 287.214 €	Strom: 372 MWh/a Energiekosten: 287.214 €/a Primärenergie: 955 MWh/a CO2-Emissionen: 235 t/a
Nutzerverhalten	Energieeinsparungen durch Motivation und aktive Einbindung der Nutzer. Investition: - €	Strom: 75 MWh/a Wärme: - MWh/a Energiekosten: 14.250 €/a Primärenergie: 195 MWh/a CO2-Emissionen: 46 t/a
Technische Ausstattung	Austausch veralteter gegen energieeffiziente Geräte. Investition: 19.400 €	Strom: 87 MWh/a Energiekosten: 16.430 €/a Primärenergie: 225 MWh/a CO2-Emissionen: 53 t/a

Für die Öffentlichkeit werden auf der Instituts-Homepage unter dem Link „www.tu-braunschweig.de/igs/forschung/eneffcampus2“ je Maßnahmenpaket die bereits umgesetzten und die in der Planung befindlichen Maßnahmen in einer Übersicht zusammengestellt. Jede Kategorie beginnt mit einer Zusammenfassung der Investitionen und Einsparungen der dazugehörigen Maßnahmen, im Anschluss werden die Einzelmaßnahmen kurz dargestellt.

9.1.1.2 Übersicht dokumentierter Maßnahmen

Bis Projektende sind 97 durchgeführte und geplante Umsetzungen aus den o.g. Maßnahmenpaketen dokumentiert, die in der nachfolgenden Tabelle dargestellt werden:

Tabelle 43 Dokumentation Maßnahmenpakete [IGS]

Maßnahmenpaket		Einsparungen		
	Umsetzung	Primärenergie [MWh/a]	CO2-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
gesamt	97	10.316	2.455	841.684

Nach erfolgter Dokumentation der einzelnen Maßnahmen, sowohl geplant als auch umgesetzt, erfolgt die Ergebnisauswertung hinsichtlich Investitionskosten, Reduzierung Energiekosten, Verringerung CO2-Emissionen, sowie die Einsparung von Primärenergieverbrauch und Endenergieverbrauch. Diese werden unter Berücksichtigung der für die Umsetzung der Maßnahmen erforderlichen Gesamtinvestitionskosten und Maßnahmennutzungsdauern bewertet.

Die Eingabe der erwarteten Nutzungsdauer der Maßnahme ist für die Berechnung zwingend erforderlich. Als Grundlage für die technischen Anlagen können die Angaben nach VDI 2067 verwendet werden. Für baukonstruktive Maßnahmen kann der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ des BBSR / BMVBS [5] zu Grunde gelegt werden.

Die Darstellung der Kennwerte aus den Einzelmaßnahmen erfolgt als Punktdiagramm. Es werden jeweils die spezifischen Kennwerte über den Zeitraum der Maßnahmen-Gesamtnutzungsdauer nach den 5 Maßnahmenkategorien Gebäudehülle, Gebäudetechnik, Beleuchtung, technische Ausstattung sowie Photovoltaik unterteilt. Als farbliche Rauten hervorgehoben sind hierbei jeweils die prognostizierten Kennwerte aus dem Vorprojekt „EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig“ gekennzeichnet. Die tatsächlich erzielten bzw. geplanten Kennwerte der Einzelmaßnahmen werden als Kreuze durch eine auf die Maßnahmenkategorie festgelegte Zufallsstreuung dargestellt.

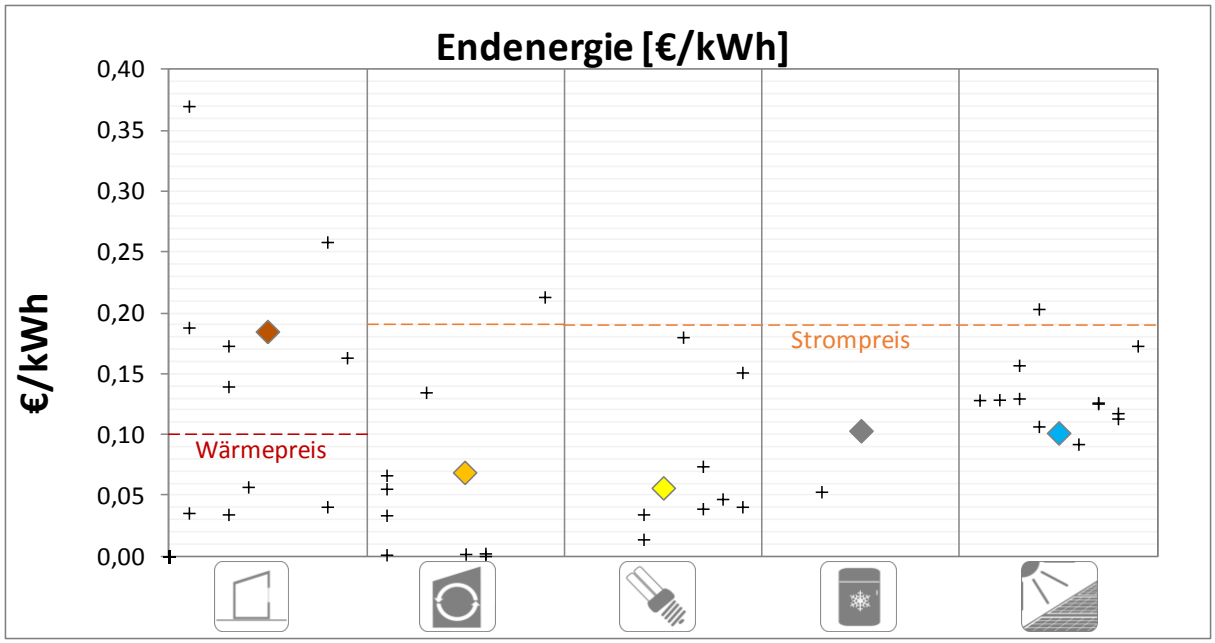


Abbildung 191 Maßnahmen - erforderliche Investition zur Vermeidung einer kWh Endenergie [IGS]

Die Abbildung 191 zeigt - in Maßnahmenkategorien unterteilt -den erforderlichen Gesamt-Investitionsaufwand um den Endenergieverbrauch effektiv um eine Kilowattstunde (kWh) zu reduzieren. Im Folgenden werden diese als Energievermeidungskosten bezeichnet. Dabei ist zur Vergleichbarkeit für die Kategorie „Gebäudehülle“ der aktuelle Wärme-Bezugspreis der TU Braunschweig als „Wärmepreis“ in €/kWh dargestellt. Für die stromrelevanten Maßnahmen wird der „Strompreis“, also der aktuelle Energiebezugspreis für Netzstrom, gegenübergestellt. Liegen die berechneten, spezifischen Maßnahmenkennwerte unterhalb der Bezugspreise, können sie als wirtschaftlich innerhalb der Nutzungsdauer betrachtet werden. Liegen die Werte oberhalb der Energiebezugspreise, gelten die Maßnahmen als unwirtschaftlich. Diese direkte Vergleichbarkeit ist insbesondere für die Priorisierung von Maßnahmen und deren Durchführbarkeit entscheidend.

Bei der Betrachtung der Abbildung 191 wird zum einen deutlich, dass die umgesetzten Maßnahmen zum großen Teil im Bereich der prognostizierten Werte liegen. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Energievermeidungskosten der wärmebezogenen Kategorie „Gebäudehülle“ bei 4 Maßnahmen in einem Bereich von 3,5 bis 6,0 Cent je kWh im wirtschaftlichen Bereich, für weitere 5 Maßnahmen in einem Bereich von 14 bis 37 Cent je kWh im nicht wirtschaftlichen Bereich liegen. Es kann daher nicht eindeutig gesagt werden, ob diese Maßnahmenkategorie wirtschaftlich ist – dies muss im Einzelfall der Maßnahme geprüft werden.

Für die Kategorien mit Stromrelevanz kann gesagt werden, dass der überwiegende Teil der Maßnahmen (mit Ausnahme von 2 Maßnahmen) im wirtschaftlichen Bereich liegen. Als wirtschaftlich günstigste Maßnahmen steht hierbei die Kategorie „Gebäudetechnik“, insbesondere im Bereich Betriebsoptimierung bestehender RLT-Anlagen.

Ein anderes Ergebnis ist für die Maßnahmen „Beleuchtung“ und „Photovoltaik“ zu beobachten. Hier ist die Abweichung von Prognose und Umsetzung insgesamt eher gering, was auf die genauen Berechnungen der Energieeinsparungen aufgrund vorhandener Leistungspara-

meter, genauer Investitionskosten, Nutzungsdauern und detaillierten Simulationen zurückzuführen ist.

Ebenso wie in der vorangegangenen Betrachtung zu den Vermeidungskosten des Endenergieverbrauchs ist in der Auswertung der CO2-Emissionen in Abbildung 192 ein größeres Einsparpotenzial bei den stromrelevanten Maßnahmen für den erforderlichen Investitionsaufwand zur Reduzierung von CO2-Emissionen zu erkennen.

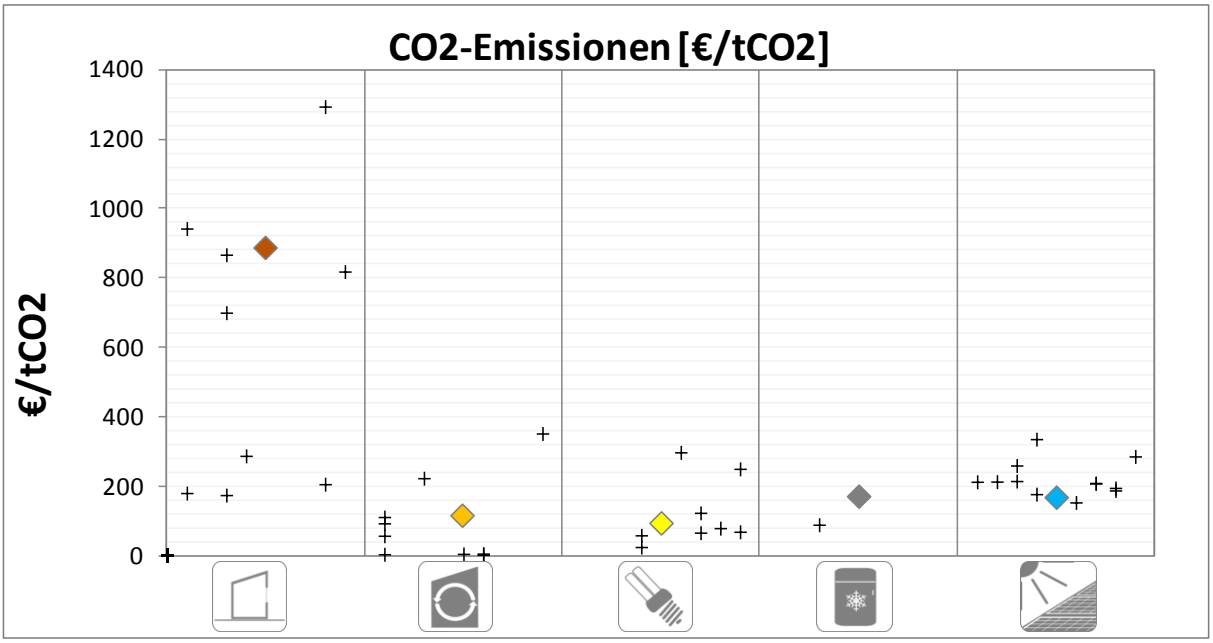


Abbildung 192 Maßnahmen - erforderliche Investition zur Vermeidung einer Tonne CO2-Ausstoß [IGS]

9.1.2 Entwicklung Gesamtenergieverbrauch TU Braunschweig

Zur Dokumentation des erreichten energetischen Projektziels erfolgt eine Visualisierung der Primärenergie- und CO2-Reduzierungen aus umgesetzten Maßnahmen mit Darstellung von Einzelmaßnahmen, Maßnahmenpaketen und der Gesamtbetrachtung der Projektzielvorgabe.

9.1.2.1 Primärenergieverbrauch Wärme und Strom

Eine Darstellung des Jahres-Primärenergieverbrauchs für Wärme und Strom soll die energetische Entwicklung des Campus der TU Braunschweig seit dem Basisjahr 2011 aufzeigen. Die Jahreswerte für den Primärenergieverbrauch werden dabei unverändert zum Forschungsprojekt „EnEff Campus:*blue*MAP TU Braunschweig“ mit konstanten Faktoren von 0,7 für Fernwärme und 2,6 für Strom berechnet. Dadurch soll eine künstliche Verschiebung des primärenergetischen Verbrauchsanteils von bisher 80 % Strom und 20 % Wärme vermieden werden, um eine objektive Vergleichbarkeit der Entwicklung zu gewährleisten.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Verlauf der absoluten Primärenergie-Kennwerte von 2011 bis 2018.

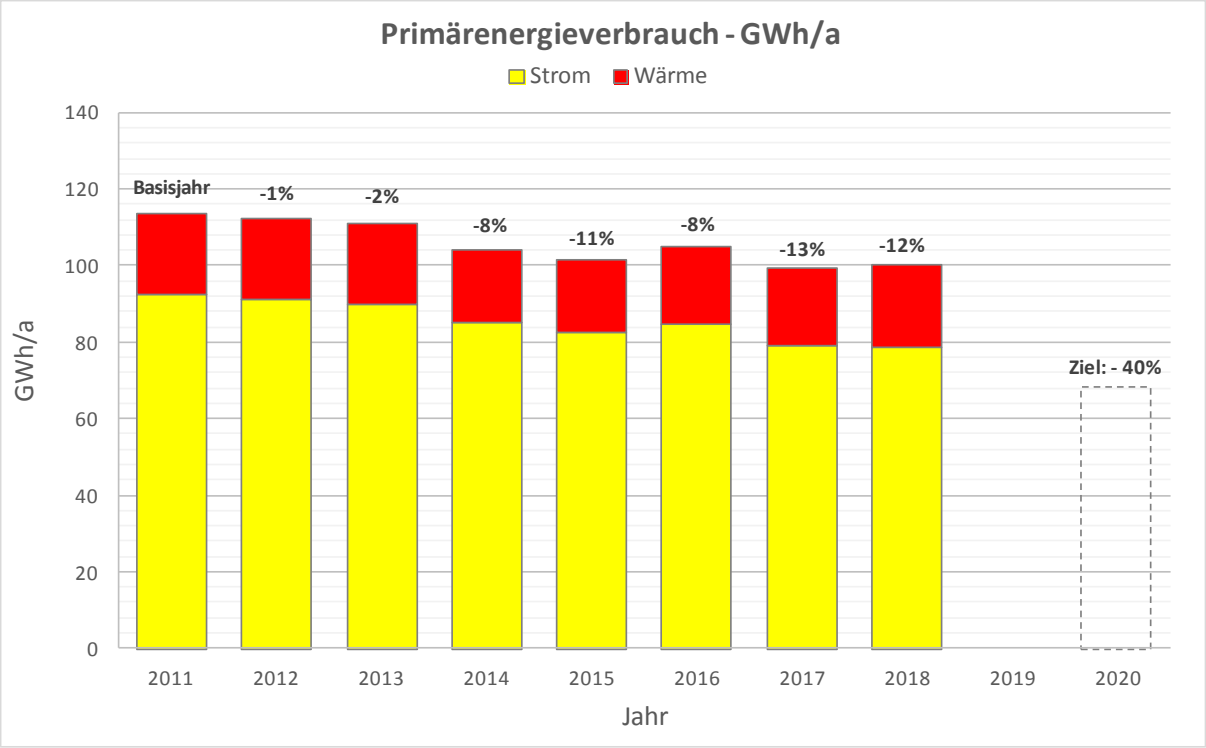


Abbildung 193 Primärenergieverbrauch absolut [IGS]

Dabei sind folgende Entwicklungen ersichtlich: durch die Einführung der universitätsinternen Energiekostenbudgetierung des Gebäudemanagements zum 01.01.2014 konnten die Primärenergieverbräuche im Jahr 2014 um 6% gegenüber dem Vorjahr und 8 % gegenüber dem Basisjahr gesenkt werden.

Im Jahr 2018 ist im Bereich des Primärenergieverbrauchs eine weitere Reduzierung auf 24% gegenüber dem Basisjahr zu verzeichnen.

Zum einen kann davon ausgegangen werden, dass der einmalige Effekt der Anpassung des Nutzungs- und Nutzerverhaltens durch die Budgetierung gesunken ist und daraus eine rückwärtige, d.h. eine negative Entwicklung der Energiekenndaten resultiert. Diese Annahme könnte darauf gestützt werden, dass trotz Umsetzung einer Vielzahl an kostenintensiven Einsparmaßnahmen in den Folgejahren eine weitere, signifikante Veränderung des Energieverbrauchs ausgeblieben ist.

Insbesondere durch die Betriebsoptimierung von RLT-Anlagen einiger hochinstallierter Forschungsgebäude und der Nachrüstung von technischen Anlagen, die tatsächlich deutliche Reduzierungen der Energieverbräuche aufweisen, hätte ein Einspareffekt in den Bereichen Strom und Wärme auch für den Gesamtcampus eintreten müssen.

Um einen objektiven Vergleich zu erhalten ist die Betrachtung auf spezifische Parameter sinnvoll. In dem Betrachtungszeitraum seit 2011 ist eine Vielzahl an nutzungsänderungsbedingten Reduzierungen der Bestandsgebäude sowie ein Flächenzuwachs durch Neubauten auf den Campusarealen der TU Braunschweig zu verzeichnen. Die Nettogrundfläche hat sich dabei in Summe von ca. 400.000 m² auf ca. 435.000 m² bzw. um 9% erhöht. Aus diesem Grund wird eine spezifische Betrachtung bezogen auf die Grundflächen des Campus (hier: kWh/m²NGFa) bevorzugt, die in Abbildung 194 dargestellt wird.

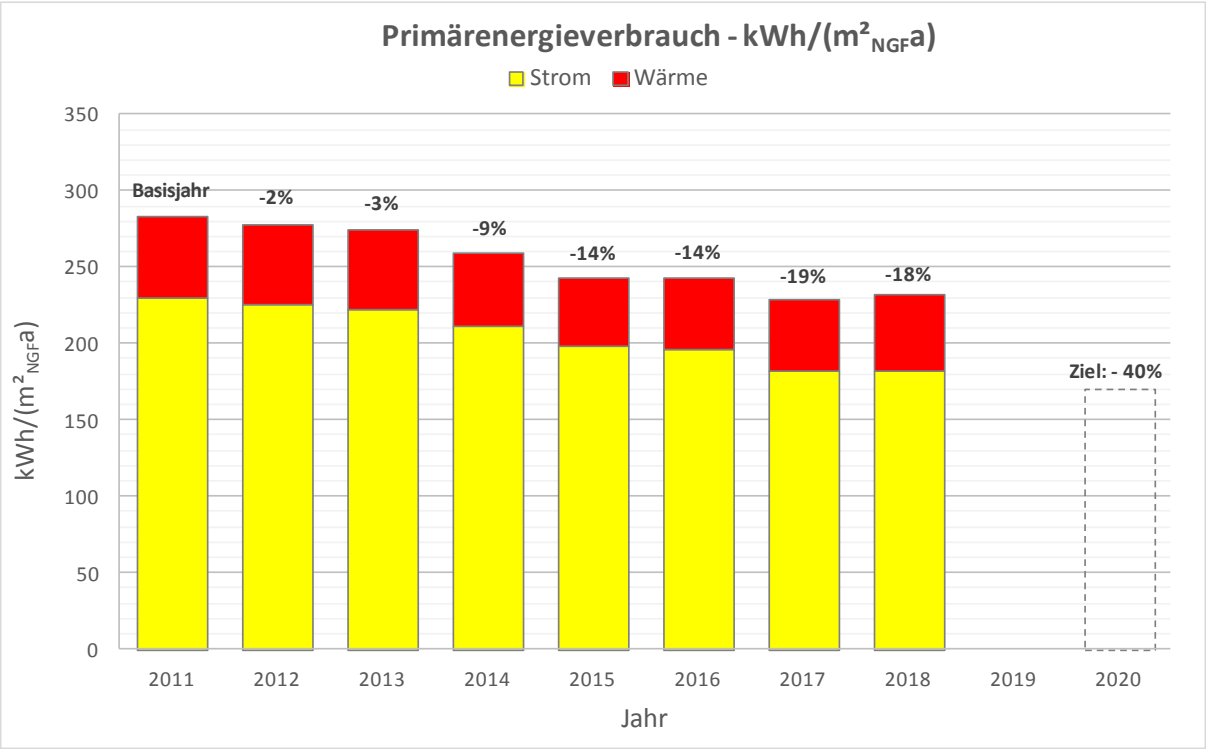


Abbildung 194 spez. Primärenergieverbrauch [IGS]

Der spezifische Primärenergieverbrauch für den Wärmebezug hat sich von 2011 bis 2018 von 53 kWh/(m²NGFa) auf 50 kWh/(m²NGFa) bzw. um 6 % verringert. Für den spezifischen Primärenergieverbrauch des Strombezugs ist im gleichen Zeitraum eine Veränderung von 230 kWh/(m²NGFa) auf 182 kWh/(m²NGFa) zu verzeichnen, was einer Reduzierung von 21 % entspricht.

In der Gesamtbetrachtung konnte der Primärenergieverbrauch der Campus-Areale der TU Braunschweig seit 2011 von 283 kWh/(m²NGFa) auf 232 kWh/(m²NGFa) bis 2018 und damit insgesamt um 18 % gesenkt werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die spezifische energetische Entwicklung des Gesamtcampus ohne Neubauten, die in den vergangenen vier Jahren mit einer Gesamtnettogrundfläche von ca. 35.000 m² dazu gekommen sind.

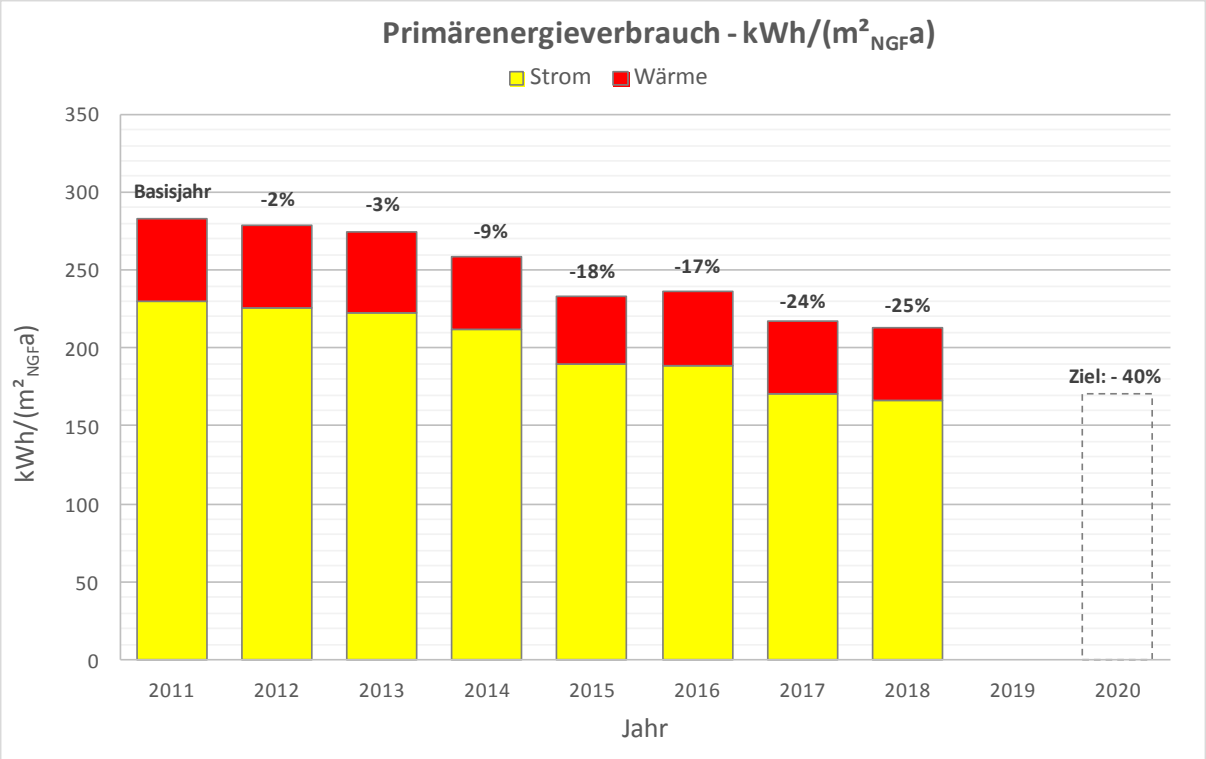


Abbildung 195 spez. PE-Verbrauch ohne Neubauten [IGS]

Der spezifische Primärenergieverbrauch für den Wärmebezug hat sich von 2011 bis 2018 von 53 kWh/(m²NGFa) auf 47 kWh/(m²NGFa) bzw. um ca. 13 % verringert. Für den spezifischen Primärenergieverbrauch des Strombezugs ist im gleichen Zeitraum eine Veränderung von 230 kWh/(m²NGFa) auf 166 kWh/(m²NGFa) zu verzeichnen, was einer Reduzierung von ca. 28 % entspricht.

In der Gesamtbetrachtung konnte der Primärenergieverbrauch der Campus-Areale in den Bestandsgebäuden der TU Braunschweig seit 2011 von 283 kWh/(m²NGFa) auf 213 kWh/(m²NGFa) bis 2018 und damit insgesamt um 25 % gesenkt werden.

9.1.2.2 CO2-Emissionen

Eine Darstellung der CO2-Emissionen für Wärme und Strom soll die energetische Entwicklung des Campus der TU Braunschweig seit dem Basisjahr 2011 aufzeigen. Für die entsprechenden CO2-Äquivalente für Fernwärme und Strom werden nach Grundlage des Umweltbundesamts (UBA) die Kennwerte des Jahres 2011 verwendet. Diese sind mit 200 g/kWh für Fernwärme und 565 g/kWh für Strom angesetzt.

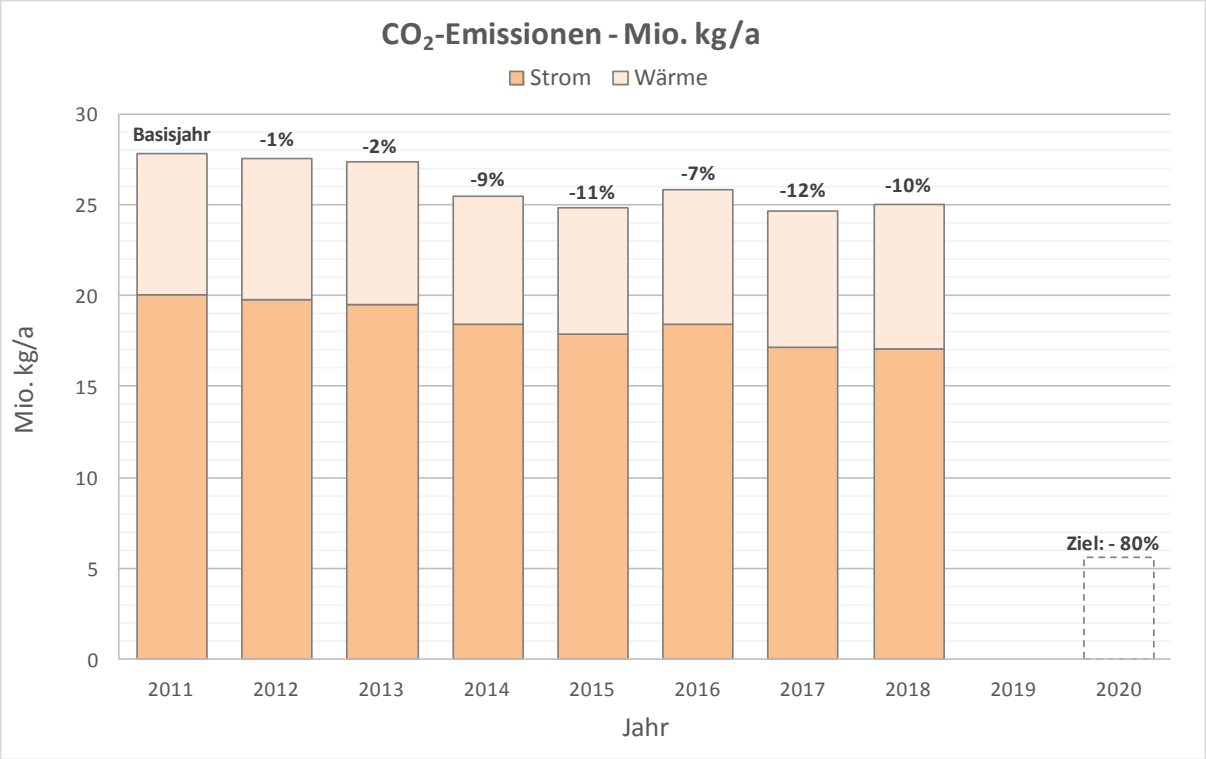


Abbildung 196 CO2-Emissionen absolut [IGS]

Um auch in diesem Fall einen objektiven Vergleich zu erhalten, ist wie bereits beim Primärenergieverbrauch durchgeführt, die Betrachtung auf spezifische Parameter sinnvoll. Ergänzend zur absoluten Energieverbrauchsauswertung wird eine spezifische Betrachtung bezogen auf die Grundflächen des Campus (hier: kWh/m²NGFa) bevorzugt.

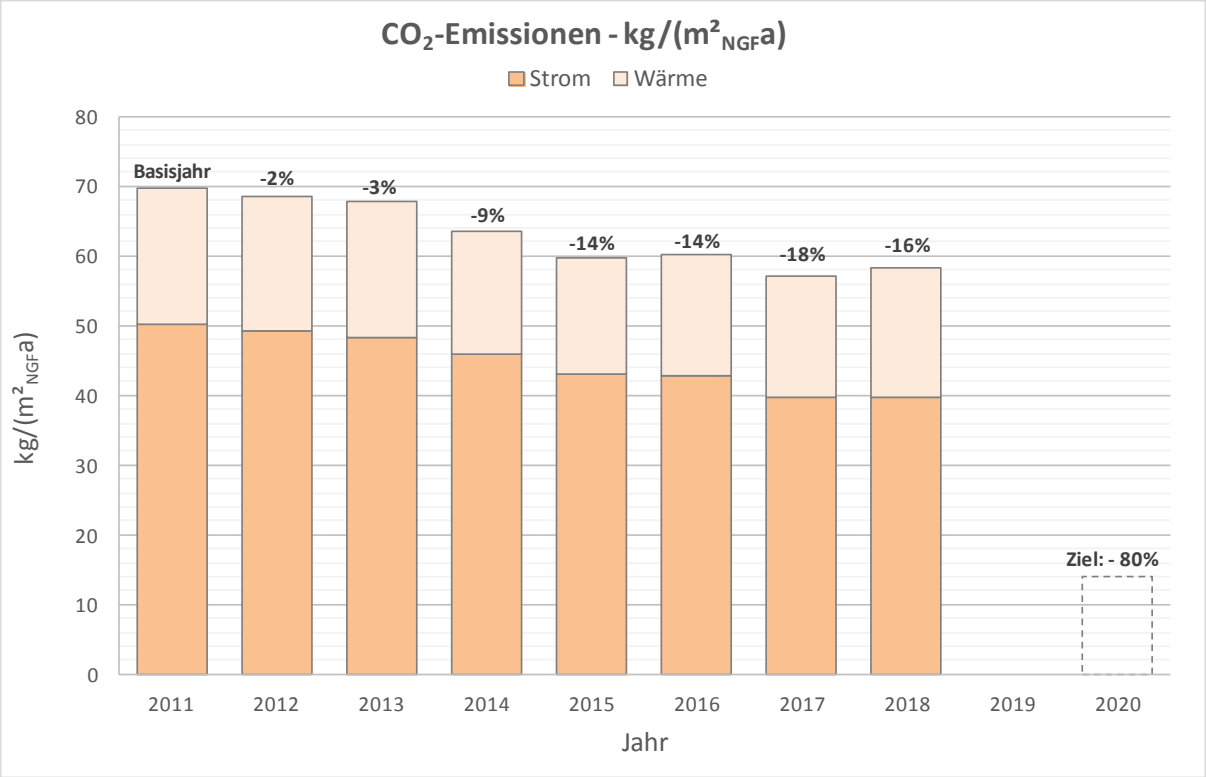


Abbildung 197 spez. CO2-Emissionen [IGS]

Abbildung 197 zeigt die spezifische energetische Entwicklung des Gesamtcampus und verdeutlicht, dass die Kennwerte für CO2-Emissionen auch im Jahr 2018 um weitere 5 % im Vergleich zum Vorjahr reduziert werden konnten.

Die nachfolgende Abbildung 198 zeigt die spezifische energetische Entwicklung des Gesamtcampus ohne die Neubauten.

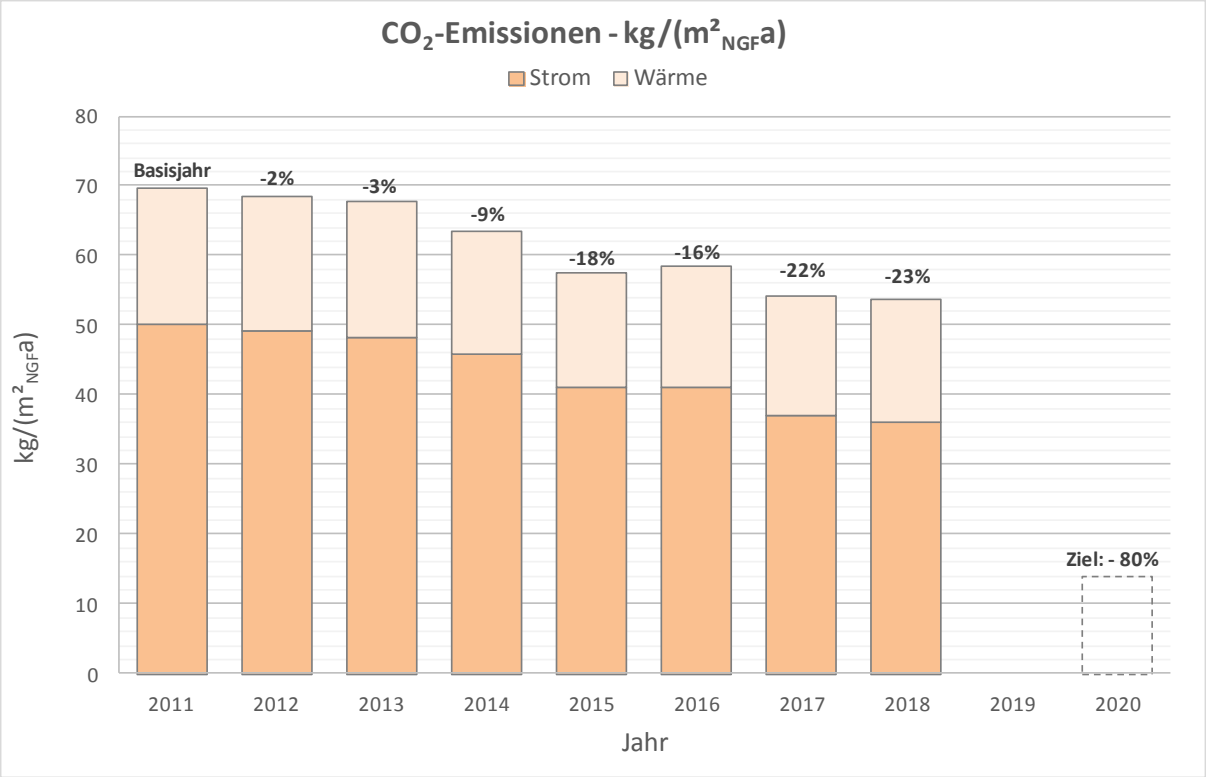


Abbildung 198 spez. CO2-Emissionen ohne Neubauten [IGS]

Ohne die Betrachtung der hinzugekommenen Neubauten in den Jahren 2016 und 2017 reduzieren sich die Kennwerte für die CO2-Emissionen im Jahr 2018 im Vergleich zum Basisjahr deutlich um 23%.

Seit dem 01.01.2017 bezieht die TU Braunschweig Ökostrom aus 100% erneuerbaren Energien. Bei heutiger Betrachtung der CO2-Bilanzierung würde die Berücksichtigung des Stromverbrauchs entfallen, so dass lediglich die Wärme mit 17 kg/m²NGF a um 3 kg/m²NGF a in den kommenden zwei Jahren reduziert werden müsste, um das Projektziel bis 2020 zu erreichen (s. Abbildung 204).

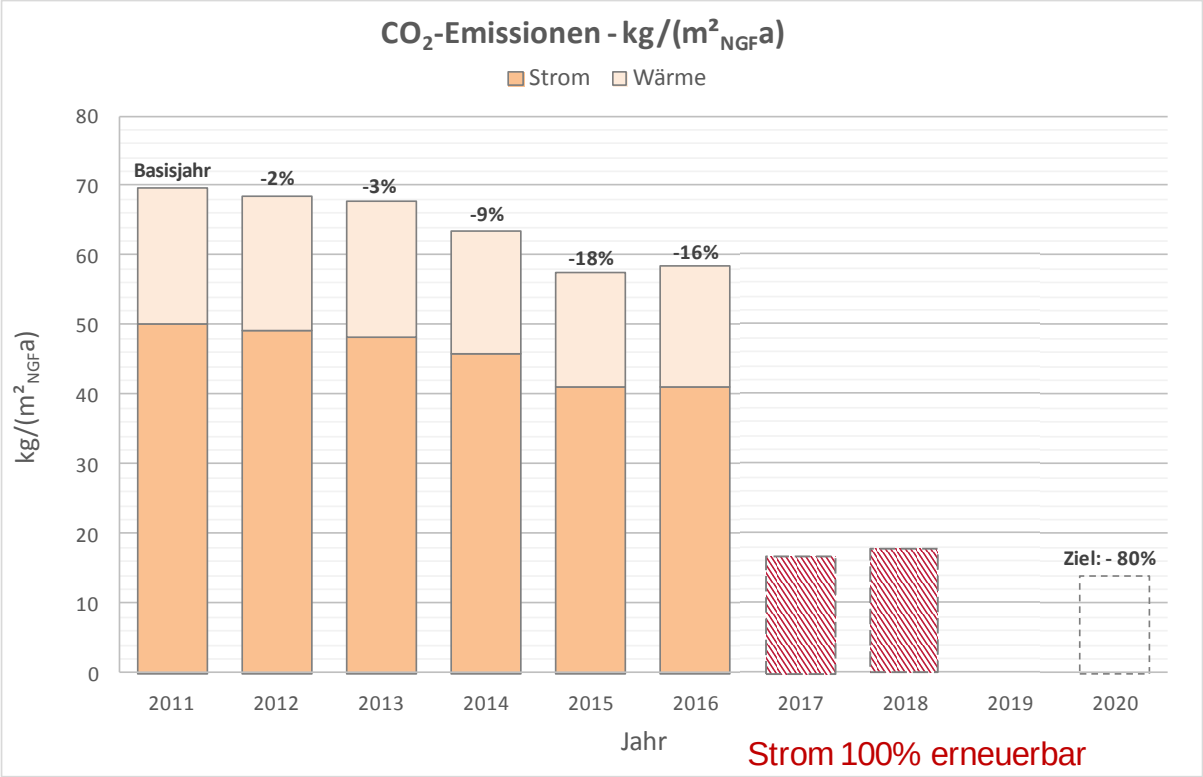


Abbildung 199 spez. CO2-Emissionen mit Ökostrom ohne Neubauten [IGS]

Die Abbildung des Campusareals und die Bilanzierung im Bereich CO2-Emissionen erfolgt bis zum Projektende jedoch auf Grundlage der Basisdaten, damit eine Vergleichbarkeit der Daten und der tatsächlichen Erfassung der Einsparungen auch im Bereich Strom gegeben ist.

Konkrete Maßnahmen, wie der Ausbau der Photovoltaik, die Einführung einer Energiebudgetierung, die Sanierung von Anlagentechnik zur Erreichung der Ziele und der Aufbau eines technischen Monitorings für die Überwachung des Anlagenbetriebs sind umgesetzt und zeigen messbare Erfolge.

Um die primärenergetischen Zielvorgaben des Projekts, die Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um 40 % bis 2020 in Bezug auf das Basisjahr 2011 sowie die Reduzierung der CO2-Emissionen um 80% zu erreichen, müssen aufbauend darauf in den nächsten zwei Jahren deutlich mehr Maßnahmen umgesetzt werden.

Das Umsetzungskonzept mit Handlungsempfehlung an umzusetzenden Energieeffizienzmaßnahmen pro Jahr, die zur Erreichung der geplanten Einsparungen führen können, wurde in Kapitel 7.1.1. bereits erläutert.

Um den Primärenergieverbrauch und die CO2-Emissionen weiter zu senken und bis 2050 eine 100%ige Energieversorgung des Campus der TU Braunschweig mit ausschließlich regenerativen Energien zu ermöglichen, wird der Einsatz dezentraler Energieanlagen erforderlich (s. Anschlussvorhaben Kapitel 0).

10 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

In der Fachpresse, auf Tagungen, Symposien, Workshops und über das Internet unter (www.campus...) wird das Forschungsprojekt publiziert und die Ergebnisse den breiten Interessensgemeinschaften zur Verfügung gestellt.

10.1 Veröffentlichungen in Presse und Fachliteratur

11/2015 Beier, Tanja: Initiative „EnEff: Stadt - Forschung für die energieeffiziente Stadt", Projekt-Visitenkarte des Pilotprojekts „EnEff Campus: TU Braunschweig 2020", www.eneff-stadt.info, 2015

11/2015 Hauspost der TU, Im Namen des Präsidenten der TU Braunschweig, "Energieeffizienter Campus: Kommunikationstrainings und Nutzerworkshops", 04.11.2015

11/2015 Brederlau, Uwe; Nestler, Jonathan; Tillot, Chantal: "CAMPUS+STADT" zu Auftaktwoche des Forschungsschwerpunktes "Stadt der Zukunft", BDA Galerie Braunschweig, 17.11.2015

12/2015 Brederlau, Uwe; Nestler, Jonathan; Steiner Cornelia: "2030 - So wollen Wir leben", Brauschweiger Zeitung, 10.12.2015

03/2016 Beier, Tanja: "Campus wird Forschungslabor für energetische Quartierssanierung", Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 02/ 2016

03/2016 Beier, T. : „EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig"
Wettbewerb "NachbarschaftsInnovation: Ausgezeichnete Ort im Land der Ideen 2016" der Initiative "Deutschland - Land der Ideen", 03.03.2016

03/2016 Beier, Tanja: "Campus als Forschungslabor für energetische Quartierssanierung", Detail research, OnlineMagazin, 08.03.2016

03/2016 Beier, T.: „Forschungslabor Campus TU Braunschweig", Wettbewerb "Intelligente Regionen Deutschlands" der Initiative "Intelligente Vernetzung" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), 20.03.2016

04/2016 Beier, Tanja: "Forschungslabor für energetische Quartierssanierung", DBZ Deutsche BauZeitschr., Ausgabe 04, Digitales Planen und Bauen, 2016, S. 36

07/2016 Endrejat, Paul C., Güntner, Amelie V.: Vom „Ich muss!" zum „Ich will!" Workshops und Trainings im Rahmen von „EnEff: Campus 2020" , Newsletter TU Braunschweig, Ausgabe 04/2016

08/2016 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

08/2016 Beier, T.; Schulze, S.: "Demonstrationsvorhaben Braunschweig (Campus): blueMAP TU Braunschweig" einen Beitrag, in Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H.: Energetische Bilanzierung von Quartieren, Ergebnisse und Benchmarks aus Pilotprojekten - Forschung zur Energieeffizienten Stadt , Bonn, 2016, S. 24, 150

08/2016 Beier, T.; Schulze, S.: "EnEff Campus TU Braunschweig" einen Beitrag, in Erhorn-Kluttig, S. Doster, H.; Erhorn, H.: Der energieeffiziente Universitätscampus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt, Bonn, 2016, S. 41-53

09/2016 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

10/2016 Beier, Tanja: " 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

2017 Endrejat, Paul; Baumgarten, Franz; Kauffeld, Simone: When Theory Meets Practice: Combining Lewin's Ideas about Change with Motivational Interviewing to Increase Energy-Saving Behaviours within Organisations. Journal of Change Management

01/2017 Göbel, Matthias; Soleymani, Lorenz Rahman: "EnEff Campus 2020: Energieverteilung und Netzstabilität, Gebäudemanagement und elenia machen Uni-Netz fit für die Zukunft", Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 01/ 2017

04/2017 Klaaßen, Lars: „Grüner Strom vom Nachbarn", Süddeutsche Zeitung, Ausgabe: 17.04.2017

04/2017 Endrejat, Paul; Baumgarten, Franz; Kauffeld, Simone: When Theory Meets Practice: Combining Lewin's Ideas about Change with Motivational Interviewing to Increase Energy-Saving Behaviours within Organisations. Journal of Change Management, 17(2), 101–120.

05/2017 Walz, S; Schröder, Yannik; Büsching, Felix: „Energiesparen mit dem „Internet der Dinge" - EnEff Campus 2020: „Real-Life-Lab Campus TUBS", Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 03/ 2017

11/2017 Beier, Tanja: „Auf dem Weg zum klimaneutralen Stadtquartier - EnEff Campus 2020 | Technische Universität Braunschweig“, Zukunftsraum Schule Tagungsband

11/2017 Nestler, Jonathan; Touhidi, Amir: „EnEff Campus 2020: Stadtplanung für Campus-Qualität - ISE-Forscher entwickeln Leitfaden und Bewertungs-Tool“, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 06/ 2017

11/2017 Endrejat, Paul C., Güntner, Amelie V.: „CO_2-Challenge startet: Wer spart, gewinnt Uniweiter Wettbewerb zum Energieverbrauch auf dem Campus“, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 06/ 2017

2017 Endrejat, Paul C. & Kauffeld, Simone: From ‘I Should’ to ‘I Want’: Increasing the Internalization of Organizational Members’ Energy-Saving Motivation through Participatory Interventions. Zeitschrift für Umweltpsychologie 21(2), 56-73.

02/2018 Güntner, Amelie V. & Eckhoff, R.: CO_2 Challenge: Erstes Siegergebäude steht fest. Newsletter TU Braunschweig Challenge, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 01/ 2018

04/2018 Güntner, Amelie V. & Eckhoff, R.: CO_2 Challenge: Mit optimierter Nutzung der Klimakammer zum SiegCO2 Challenge: Das zweite Siegergebäude steht fest, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 02/ 2018

05/2018 Endrejat, Paul C. & Kauffeld Simone: Can’t get no satisfaction?: Motivating organisational energy efficiency efforts in Germany. In: Energy Research & Social Science, 44, 146–151.

06/2018 Güntner, Amelie V. & Eckhoff, R.: CO_2 Challenge: Energiesparen in der Versuchshalle des NFL - Scheckübergabe an das dritte Siegergebäude der CO_2-Challenge, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 03/ 2018

06/2018 Beier, Tanja; Altendorf, Lars: 1,3 Millionen Euro für neue PV-Anlagen auf Campus EU und Land fördern Infrastruktur auf dem Weg zum CO2-neutralen Universitätscampus, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 03/ 2018

08/2018 Endrejat, Paul C. & Eckhoff, R.: CO_2 Challenge: Kleine Handgriffe, große Auswirkungen - Das vierte Siegergebäude der CO2 Challenge steht fest, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 04/ 2018

10/2018 Endrejat, Paul C., Güntner, Amelie V. & Eckhoff, R.: CO_2 Challenge: Dank optimierter Lüftungsschaltung auf dem Siegertreppchen - Fünftes Siegergebäude der CO_2-Challenge erhält Preisgeld, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 05/ 2018

12/2018 Güntner, Amelie V. & Eckhoff, R.: CO_2 Challenge: „Die CO_2 Challenge sorgt für Ansporn!“ Das sechste Siegergebäude steht fest, Newsletter TU Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 06/ 2018

10.2 Vorträge

10/2015 Beier, Tanja: "Energieeffizienter Campus TU Braunschweig", 8. Niedersächsische Energietage (NET), Energiemärkte im Spannungsfeld zwischen Staat, Bürger und Wettbewerb, Goslar, 30.09.-01.10.2015

11/2015 Schulze, Stephan: "EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig. Integral energetic Masterplan TU BS 2020/2050", Management Incubator Workshop, FU Berlin, 18.11.2015

11/2015 Beier, Tanja: "Energieeffizienter Campus TU Braunschweig", Stadt der Zukunft - hochschulöffentliche Veranstaltung an der TU Braunschweig vom 16. bis 21.11.2015

11/2015 Smyrek, Dietmar: „Campus 2020 – Reallabor in der Energiewende“, Forschungsnetzwerk Energie in Gebäuden und Quartieren, „FORSCHUNG für die Praxis: Energieoptimierte Gebäude in Bund, Ländern und Kommunen“ 26.10.2015

01/2016 Brederlau, Prof. Uwe; Nestler Jonathan: "CAMPUS+STADT", Fakultätsratssitzung (FK6) TU Braunschweig, Braunschweig, Jan. 2016

03/2016 Hesselbach, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jürgen: „Energie- und Ressourceneffizienz: Vision 2050 für den Campus der TU BS“, Regionale Energieagentur Wettbewerb Ressourceneffizienz für die Region Braunschweig, Braunschweig, 03.03.2016

03/2016 Brederlau, Prof. Uwe; Nestler Jonathan: "CAMPUS+STADT", Baukommission TU Braunschweig, Braunschweig, 23.03.2016

05/2016 Beier, Tanja: "EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig - Integraler energetischer Masterplan TU BS 2020/2050", Leipnitz Uni Hannover, 04.05.2016

05/2016 Walz, S.: „Internet of Things: Visualisierung des Energieverbrauchs im IoT", 27. Fachtagung der Fernseh- und Kinotechnischen Gesellschaft (FKTG) in Leipzig, 10.05.2016

06/2016 Beier, Tanja: „EnEff Campus 2020 - Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung und Monitoring“, ENKo Treffen TU Braunschweig, 13.06.2016

06/2016 Fisch, Prof. Dr.-Ing. M. Norbert: „Campus 2020 - Reallabor in der Energiewende“, Forschungsnetzwerk Energie, Forschung für die Praxis: Energieoptimierte Gebäude und Quartiere, BMWi Berlin, 16.06.2016

06/2016 Beier, Tanja: „EnEff Campus 2020 - Der energieeffiziente Campus, Forschungslabor TU Braunschweig“ 8. Forum Energie (HIS-HE), Energieeffizienz in Hochschulen und wissenschaftlichen Einrichtungen, TU Clausthal, 20.-22.06.2016

06/2016 Güntner, Amelie; Endrejat, Paul; Klonek, Florian; Kauffeld, Simone: „Motivierende Gesprächsführung im Energiekontext“, 2. Symposium der Deutschsprachigen Gesellschaft für Motivierende Gesprächsführung, Heidelberg, 25.06.2016

09/2016 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, 13.09.2016

09/2016 Fisch, Prof. Dr.-Ing. M. Norbert: „EnEff Campus 2020 - Integral energetic masterplan”, 7th Canadian german conference on renewable energies and energy efficiency in buildings, 13.09.2016

09/2016 Klonek, Florian; Kauffeld, Simone: “Using an interactive training feedback instrument to improve Motivational Interviewing training transfer with engineers”, An evaluation study. 50th Congress of German Society for Psychology, Leipzig, 20.09.2016

09/2016 Klonek, Florian; Kauffeld, Simone: “Raising motivation for energy-saving behaviors in organizations: Development of a screening instrument to assess energy managers’ Motivational Interview fidelity. 50th Congress of German Society for Psychology, Leipzig, 20.09.2016.

10/2016 Beier, Tanja: „EnEff Campus: blueMAP TU Braunschweig - Masterplan 2020/2050“, 3. Symposium „Nachhaltigkeit in der Wissenschaft“ (SISI), Berlin, 06.-07.10.2016, Berlin

10/2016 Schulze, Stephan: „EnEff Campus 2020 - TU Braunschweig Forschungslabor für eine energetische Quartierssanierung“, 2. Fachforum - Green Buildings - Innovative Gebäude und Quartiere mit erneuerbaren Energien (Otti - Tagung), 26.-27.10.2016

11/2016 Walz, S.: „Eine Softwareplattform zur Realisierung von verteilten Smart-Energy-Anwendungen im IoT", In Proc. VDE-Kongress 2016 (Internet der Dinge), elektronisch (5 Seiten), 08.11.2016

11/2016 EnEff Campus 2020 - Umsetzung des integralen Masterplans zur energetischen Optimierung des Campus der TU Braunschweig, Ganztägige Veranstaltung zum Forschungsprojekt an der TU Braunschweig, 09.11.2016

11/2016 Fisch, Prof. Dr.-Ing. M. Norbert: Forward to climate neutral city districts - First projects in Germany, Bangkok, 28.11.2016

03/2017 Büsching, Felix: FameLab Braunschweig – „Das Internet der Dinge: Wie man mit Kühlschränken Energie sparen kann“, Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung, 30.03.2017

05/2017 Beier, Tanja: „EnEff Campus 2020 - Masterplan | Umsetzung | Monitoring“, Berliner Energietage - Energiewende in Deutschland, 03.-05.05.2017

06/2017 Beier, Tanja: „EnEff Campus 2020 - Masterplan | Umsetzung | Monitoring“, TU Night TU Braunschweig „Wissenschaft weltoffen“, 17.06.2017

06/2017 Endrejat, Paul C., Klonek, Florian E. & Kauffeld, Prof. Dr. Simone: “Applying Motivational Interviewing within Non-Clinical Group Settings”, International Conference on Motivational Interviewing (ICMI 2017) Philadelphia, United States, 06.2017

08/2017 Endrejat, Paul C., Müller-Frommeyer, L. C. Klonek, Florian E. & Kauffeld, Prof. Dr. Simone: “How to Respond to Resistance to Change? An Analysis of Change Agents' Communication Behaviors”, Academy of Management (AOM, 2017), Atlanta, United States, 08.2017

09/2017 Endrejat, Paul C., Güntner, Amelie V., & Kauffeld, Prof. Dr. Simone: “Empowering Employees to Behave Sustainably: Participatory Interventions as an Instrument to Raise Energy-Saving Motivation at the Workplace.”, 2nd ARTEM Organizational Creativity and Sustainability International Conference, Nancy, France, 09.2017

10/2017 Beier, Tanja: „CO2 Challenge TU Braunschweig“, Energienutzungskoordinatoren Vollversammlung TU Braunschweig, 24.10.2017

11/2017 Fisch, Prof. Dr.-Ing. M. Norbert: „Campus TU Braunschweig - Auf dem Weg zum klimaneutralen Stadtquartier“, 5. Kongress Zukunftsraum Schule - Bildungsbauten nachhaltig gestalten, Stuttgart, 14.11.2017

11/2017 Soleymani, Lorenz; Kurrat, Michael: Energy Efficiency in the Campus: Case Study of TU Braunschweig, ETG Kongress 2017, Bonn, 28. November 2017

06/2018 Stadt der Zukunft – Research Insights (Doktorandensymposium) „Internet of Energy-Efficient Things: Smarte Steuerung von Kleinverbrauchern“. 6.6.2018, TU-Braunschweig

07/2018 Güntner, A.V., Endrejat, P.C., & Kauffeld, S.: „When Intentions Become Commitment: How Participants' Language Changes Throughout a Guided Team Workshop“, 13th Annual INGRoup Conference, Bethesda, Maryland, United States, Juli 2018

09/2018 Endrejat, P. C., & Güntner, A. V., & Kauffeld, S.: „Vortrag: Ein Blick in die Blackbox: Wie muss die Interaktion mit Organisationsmitgliedern aussehen, um deren Motivation für nachhaltiges Verhalten zu steigern?“, 51st Conference of the German Society for Psychology, Frankfurt, Germany, Sept. 2018

10/2018 Endrejat, P. C., Kauffeld, S.: „Wie können positive und zielführende Dynamiken in Partizipationsprozessen gewährleistet werden?“, Werkstattgespräch: Bedeutung von Partizipation für sozial-ökologische Transformationen, artec Forschungszentrum, Bremen, Sep. 2018

11/2018 Endrejat, P. C., & Güntner, A. V., & Kauffeld, S.: „EnEff Campus 2020. Strategie: Interface Maschine-Mensch“. Echo Abschlussveranstaltung, HIS-Institut für Hochschulentwicklung e.V., Hannover, 07.11.2018

11/2018 Soleymani, Lorenz; Kurrat, Michael: „Zukünftige Auswirkungen der Elektromobilität auf das Energieversorgungsnetz der Technischen Universität Braunschweig“, ETG-CIRED-Workshop: Innovationen im Verteilnetz, Berlin, 13.-14.11.2018

10.3 Informationsstände

18.06.2016 TU Night - TU Braunschweig

17.06.2017 TU Night - TU Braunschweig

29.01.2018 Mensa - TU Braunschweig

11 AUSBLICK

An der TU Braunschweig wurde seit 2011 im Rahmen des Forschungsprojekts „EnEff Campus“ die Bedeutung des Quartiers als Baustein der Energiewende adressiert und interdisziplinär entwickelt. Die Vorreiterrolle Braunschweigs wurde mit der Umsetzung erster Maßnahmen am Campus seit 2015 konsequent ausgebaut und war Ausgangspunkt für den zwischenzeitlich an der TU BS etablierten universitären Schwerpunkt „Stadt der Zukunft“. Gestartet ist das Team mit dem übergeordneten Ziel den Primärenergieverbrauch um 40% zu verringern.

Durch die wissenschaftliche Begleitung wurde eine mehrdimensionale Grundlage für ein Reallabor entwickelt, indem interdisziplinär und ganzheitlich die Fragestellungen für eine Transformation der Stadt konkretisiert und die Potentiale eines Forschungsstandorts konsequent eingebunden wurden.

Die Umsetzung konkreter Maßnahmen zeigen messbare Erfolge. Darüber hinaus bieten die Teilaspekte aus dem konzeptionellen Teil des Masterplans Ansatzpunkte die Forschungsthemen und -schwerpunkte weiterzuentwickeln.

Die oben beschriebene Ausgangslage verdeutlicht, dass durch die langjährige wissenschaftliche Arbeit im Quartiersmaßstab zusammen mit einem interdisziplinär agierenden Team eine hervorragende Basis für die Weiterentwicklung des Campus der TU Braunschweig zu einem Reallabor der Energiewende gegeben ist. Der Wissenschaftsstandort ist gekennzeichnet durch mehrere Campus-Areale, die mit den angrenzenden städtischen Strukturen vernetzt sind und für die bereits eine Perspektive umrissen ist.

Das geplante Anschlussvorhaben „Reallabor Campus + Stadt | klimaneutral Zukunft gestalten“ hat direkten Bezug zu den aktuellen Forschungs- und Entwicklungsthemen und ist aufgrund der grundsätzlichen Ausrichtung der bisherigen Projektarbeit besonders geeignet, um die Zielsetzungen des Förderaufrufs im Technologiefeld „energieoptimierte Quartiere“ erfolgreich und sichtbar zu erreichen.

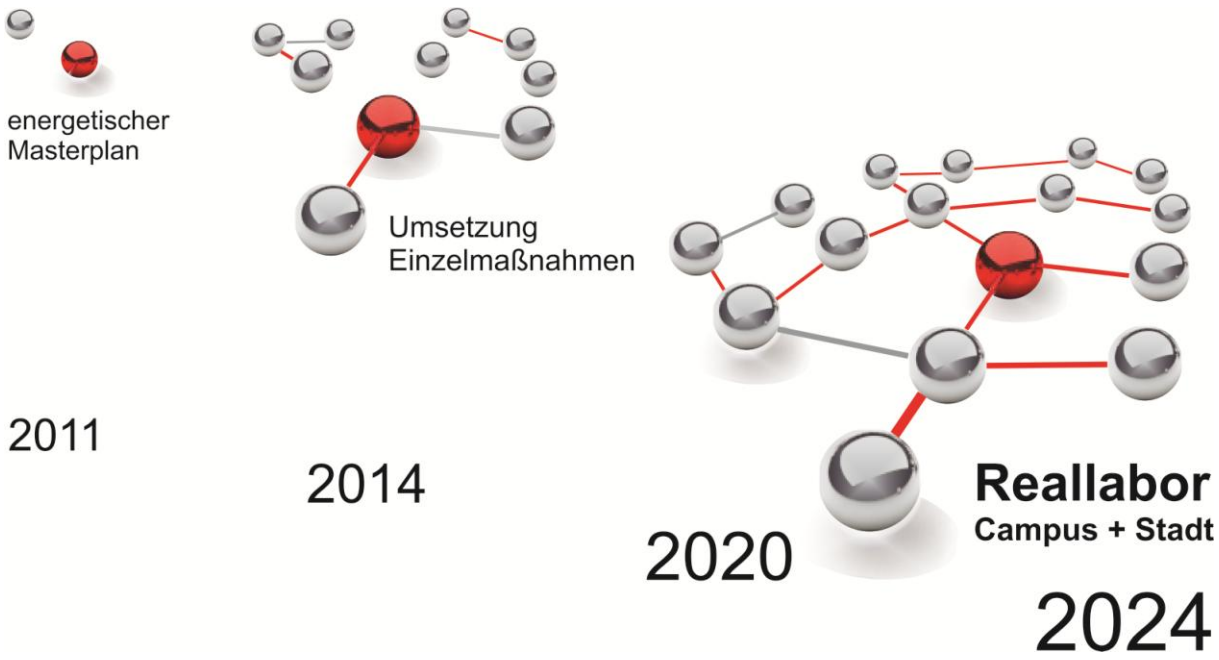


Abbildung 200 Kontext Reallabor an der TU Braunschweig [SIZ+]

Ausgehend vom Masterplan und auf der Basis der geschaffenen Strukturen und Arbeitsgruppen liefert Braunschweig einen ganzheitlichen Ansatz zur Erprobung technischer und nicht-technischer Innovationen im realen Umfeld.

Mit dem geplanten Anschlussvorhaben wird das Reallabor der TU Braunschweig zum großformatigen Innovationsprojekt, weil die Grundlage für die Entwicklung evaluiert vorliegen und sich die Projektpartner klar zur Umsetzung bekennen. Power-to-Gas, Power-to-Heat, Brennstoffzelle und Batteriespeicher sind Komponenten, die besonders die effiziente Verwertung von zeitweiser überschüssiger erneuerbarer Energie und die Integration von Elektromobilität auf Quartiersebene adressieren und im Reallabor Campus + Stadt fokussiert werden. Um das aktive Erleben alternativer Mobilitätsformen zu ermöglichen und den Wechsel zwischen den vier innerstädtischen Universitäts-Standorten einfacher, bequemer und effektiver bzw. zeitsparender zu gestalten, werden die Campus-Areale im Reallabor über ein „Uni-Shuttle-System“ miteinander verbunden. Die Realisierung erfolgt in drei Stufen. Während die autonomen Shuttle-Busse in der ersten Phase konduktiv geladen werden, wird in der zweiten Stufe ein Shuttle-Bus mit einem induktiven Ladesystem ausgerüstet. In der dritten Stufe wird der autonome Fahrbetrieb der mit Wasserstoff betriebenen Shuttle-Busse über Hochgeschwindigkeitsfunk (5G) angestrebt.

Der Transformationsprozess wird durch den Aufbau einer Plattform für Quartiere u.a. als Steuerungs- und Dokumentationswerkzeug begleitet und als digitale Schnittstelle entwickelt. Im Zuge möglicher Skalierungen auf andere Quartiere wird insbesondere die Kostenreduzierung für den Übertragungsnetzausbau in der Energiewende untersucht, um Akzeptanz und Effizienz zu erhöhen.

Abbildung 201 Übersicht der Bausteine und Projektkomponenten im Reallabor Campus + Stadt [SIZ e+]

Der Campus der TU Braunschweig wird in Verbindung mit den angrenzenden städtischen Quartieren der Stadt zum Reallabor in der Energiewende. Über die TU Areale hinaus werden Wohn- und Gewerbegebiete berücksichtigt und durch die vernetzte Planung der beteiligten Akteure ganzheitlich integriert. Damit wird die Stadt als Ganzes adressiert, was in Bezug auf die Aufgaben der Energiewende von hoher Relevanz ist.

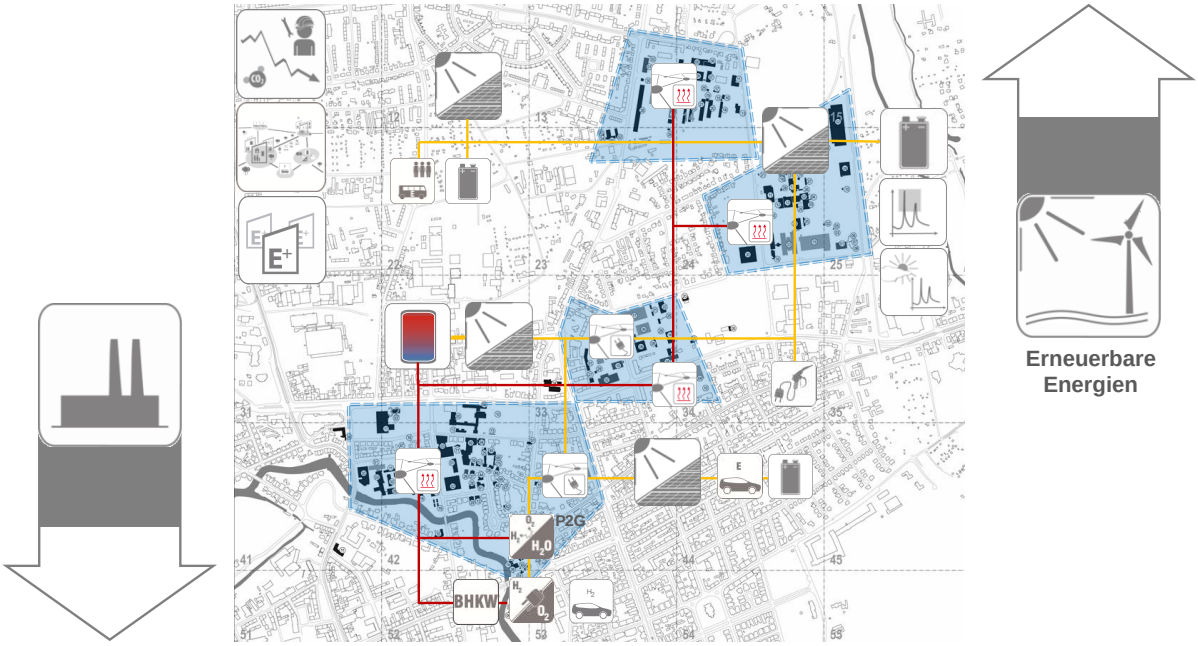


Abbildung 202 Übersichtsplan Reallabor ´Campus + Stadt | klimaneutral Zukunft gestalten´ [IGS, SIZ e+]

12 QUELLEN UND LITERATUR ZUM PROJEKT

[1] 6. Energieforschungsprogramm: Bundesumweltministerium, Berlin 19.04.2013

[2] Energieeinsparverordnung 2014: nichtamtliche Lesefassung, Bundesregierung, Berlin 16.10.2013

[3] DIN V 18599:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden, Teil 1-11, 2011-12, Deutsches Institut für Normung, Berlin 2011

[4] DIN 277-2:2005-02: Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau, 2005-02, Deutsches Institut für Normung, Berlin 2005

[5] Regeln für Energieverbrauchskennwerte und Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin 30. Juli 2009

[6] Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin 30. Juli 2009

[7] Bericht zur Evaluation der Energiekostenbudgetierung, Technische Universität Braunschweig, Geschäftsbereich 3 - Gebäudemanagement, Abteilung 34 – Kommunikation, Automation, Energiemanagement. Braunschweig 20.11.2017

[8] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin 11/2010.

[9] Öko-Institut e.V.: eMobil 2050 Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Berlin 11/2014.

[10] CLEAResult Plug Load Solutions: 80 PLUS Certified Power Supplies and Manufacturers. https://www.plugloadsolutions.com/80PlusPowerSupplies.aspx. [01.03.2019].

[11] Phoenix Contact: Datenblatt QUINT-PS/ 1AC/24DC/40. Blomberg 04/2010.

[12] Roesky, Ole; Bodmann, Michael; Mummel, Jan; Kurrat, Michael; Köhler, Jürgen: Impact of losses on the charging strategy of electric vehicles. Braunschweig 2015, S. 59-78.

[13] Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin 08/2009.

[14] Mummel, Jan; Soleymani, Lorenz; Kurrat, Michael: Ladekonzepte für Elektrofahrzeugflotten zur Weiterentwicklung der Verteilnetze. In: Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern. Hamburg 09/2014, S. 60-67.

[15] Gifford R.: Environmental psychology matters. In: Annual Review of Psychology, 65 2014, 541–579.

[16] Staddon SC, Cycil C, Goulden M, Leygue C, Spence A.: Intervening to change behaviour and save energy in the workplace: A systematic review of available evidence. In: Energy Research & Social Science, 17 2016, 30–51.

[17] Delmas MA, Fischlein M, Asensio OI.: Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012. In: Energy Policy, 61 2013, 729–739.

[18] Ajzen I, Joyce N, Sheikh S, Cote NG.: Knowledge and the Prediction of Behavior: The Role of Information Accuracy in the Theory of Planned Behavior. In: Basic and Applied Social Psychology, 33 2011, (2), 101–117.
[19] Endrejat PC, Klonek FE, Kauffeld S.: A psychology perspective of energy consumption in organisations: The value of participatory interventions. In: Indoor and Built Environment 24 2015, (7), 937–949.
[20] Matthies E.: Partizipative Interventionsplanung - Überlegungen zu einer Weiterentwicklung der Psychologie im Umweltschutz: Participatory Planning – Considering the Further Development of a Counseling Environmental Psychology. In: Umweltpsychologie 4 2000, (2), 84–99.
[21] Klonek FE, Kauffeld S.: „Muss, kann … oder will ich was verändern?“ Welche Chancen bietet die Motivierende Gesprächsführung in Organisationen. In: Wirtschaftspsychologie, 14 2012, (4), 58–71.
[22] Deci EL, Ryan RM.: The “What” and “Why” of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior. In: Psychological Inquiry, 11 2000, (4), 227–268.
[23] Endrejat PC, Kauffeld S.: Motivation Towards ‘Green’ Behaviour in the Workplace: Facilitating Employee Pro-Environmental Behaviour Through Participatory Interventions. In: Wells V, Gregory-Smith D, Manika D, (Hrsg.). Research Handbook on Employee Pro-Environmental Behaviour, 2018.
[24] Miller WR, Rollnick S.: Motivational interviewing: Helping people change. (3. Aufl.) New York 2013.
[25] Trianni A, Cagno E.: Dealing with barriers to energy efficiency and SMEs: Some empirical evidences. In: Energy, 37 2012, (1), 494–504.
[26] Endrejat PC, Kauffeld S.: Can’t get no satisfaction? Motivating organisational energy efficiency efforts in Germany. In: Energy Research & Social Science, 44 2018, 146–151.
[27] Endrejat PC, Meinecke AL, Kauffeld S.: Motivational Contagion for Change How Change Readiness is Elicited and Maintained during Participatory Interventions. In: Journal of Change Management (in Vorbereitung).
[28] Klonek FE, Lehmann-Willenbrock N, Kauffeld S.: Dynamics of Resistance to Change: A Sequential Analysis of Change Agents in Action. In: Journal of Change Management, 14 2014, (3), 334–360.
[29] Endrejat PC, Müller-Frommeyer L, Klonek FE, Kauffeld S.: How to Turn Resistance to Change into Change Readiness? An Analysis of Change Agents’ Communication Behaviors. In: Journal of Business and Psychology, (eingereicht).
[30] Senge PM.: The necessary revolution: How individuals and organizations are working together to create a sustainable world. London 2010.
[31] Reich JW, Robertson JL.: Reactance and Norm Appeal in Anti-Littering Messages. In: Journal of Applied Social Psychology, 9 1979, (1), 91–101.
[32] Güntner, Amelie, V., Endrejat PC, Kauffeld S.: Umweltbewusstes Verhalten in Zahnarztpraxen: Welche Faktoren es behindern und welche es fördern. In: Deutsche Zeitschrift für Zahnärztliche Hypnose, 24 2018, (1), 18–21.

[33] Klonek FE, Kauffeld S.: Providing engineers with OARS and EARS: Effects of a skills-based vocational training in motivational interviewing for engineers in higher education. In: Higher Education, Skills & Work-Based Learning, 5 2015, (2), 117–134.

[34] Güntner AV, Klonek FE, Kauffeld S.: A socio-motivational perspective on energy conservation in the workplace: The potential of motivational interviewing. In: Wells V, Gregory-Smith D, Manika D, (Hrsg.). Research Handbook on Employee Pro-Environmental Behaviour; 2018.

[35] Klonek FE, Güntner AV, Lehmann-Willenbrock NK, Kauffeld S.: Using Motivational Interviewing to reduce threats in conversations about environmental behavior. In: Frontiers in Psychology, 2015, (6), 1015.

[36] Klonek FE, Kauffeld S.: Watch Your Language! Analyzing active ingredients of client speech in a Motivational Interviewing Intervention for Environmental Behavior Change. In: Umweltpsychologie, 20 2016, (1), 63–84.

[37] Shorey RC, Martino S, Lamb KE, LaRowe SD, Santa Ana EJ.: Change talk and relatedness in group motivational interviewing: a pilot study. In: Journal of Substance Abuse Treatment, 51 2015, 75–81.

[38] Wagner CC, Ingersoll KS.: Motivational interviewing in groups. New York 2013.

[39] Endrejat PC, Kauffeld S.: From 'I Should' to 'I Want': Increasing the Internalization of Employees' Energy-Saving Motivation through Participatory Interventions. In: Umweltpsychologie 21 2017 (2), 56–73.

[40] Griesel C.: Nachhaltigkeit im Bürokontext eine partizipative Intervention zur optimierten Stromnutzung: [Sustainability in an office context – a participative intervention for an optimal use of energy]. In: Umweltpsychologie 8 2004, (1), 30–48.

[41] Endrejat PC, Baumgarten F, Kauffeld S.: When Theory Meets Practice: Combining Lewin's Ideas about Change with Motivational Interviewing to Increase Energy-Saving Behaviours Within Organizations. In: Journal of Change Management 17 2017, (2), 101–120.

[42] Endrejat PC, Volmerig L, Kauffeld S.: Wenn das „Säckchen der Verantwortung" abgegeben wird. Die Effekte einer MI-Ausbildung auf die psychische Gesundheit der Anwendenden. Vortrag auf dem 4. Symposium der Deutschsprachigen Gesellschaft für Motivierende Gesprächsführung (DeGeMG), Bad Säckingen, 2018.

[43] Endrejat PC, Güntner, Amelie, V., Kauffeld S.: What would Lewin do? Facilitating Change Readiness Through Participatory Interventions and Motivational Interviewing. In: Human Relations (eingereicht).

[44] Endrejat, PC, Güntner, AV, Stasewitsch, E., Abel, P., Robra-Bissantz, S., Kauffeld, S.: Advancing sustainability at universities through design thinking education. Internation Journal of Sustainability in Higher Education (eingereicht).

[45] Lewin K.: Frontiers in Group Dynamics: Concept, Method and Reality in Social Science; Social Equilibria and Social Change. In: Human Relations, 1 1947, (1), 5–41.

[46] Segger VC.: Let's talk about … Change! Motivational Interviewing in Gruppen zur Förderung des Energiesparens in Organisationen – eine Wirksamkeits- und Interaktionsanalyse [Masterarbeit]: TU Braunschweig; 2018.
[47] Siero FW, Bakker AB, Dekker GB, Van Den Burg, Marcel T.C.: Changing organizational energy consumption behaviour through comparative feedback. In: Journal of Environmental Psychology, 16 1996, (3), 235–246.
[48] Dixon GN, Deline MB, McComas K, Chambliss L, Hoffmann M.: Using Comparative Feedback to Influence Workplace Energy Conservation. In: Environment and Behavior 47 2015, (6), 667–693.
[49] Tajfel H.: Differentiation between social groups. London 1978.
[50] Wit A, Wilke H.: Public good provision under environmental and social uncertainty. European Journal of Social Psychology, 28 1998, (2), 249–256.
[51] Osbaldiston R, Schott JP.: Environmental Sustainability and Behavioral Science: Meta-Analysis of Proenvironmental Behavior Experiments. In: Environment and Behavior 44 2012, (2), 257–299.
[52] Stern PC, Gardner GT.: Psychological research and energy policy. In: American Psychologist 36 1981, (4), 329–342.
[53] Galvin R, Gubernat A.: The rebound effect and Schatzki's social theory: Reassessing the socio-materiality of energy consumption via a German case study. In: Energy Research & Social Science, 22 2016, 183–193.
[54] Kastner I, Stern PC.: Examining the decision-making processes behind household energy investments: A review. In: Energy Research & Social Science, 10 2015, 72–89.
[55] MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (kein Datum). Baden-Württemberg fördert Reallabore [online]. Verfügbar unter: https://mwk.baden-wuerttemberg.de/de/forschung/forschungspolitik/wissenschaft-fuer-nachhaltigkeit/reallabore/ [Zugriff am: 04.12.2017]
[56] SCHNEIDEWIND, UWE (2014): Urbane Reallabore – ein Blick in die aktuelle Forschungswerkstatt [online] 3/2014, S. 1-7. Verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5706 [Zugriff am: 19.09.2017]
[57] ID22: INSTITUT FÜR KREATIVE NACHHALTIGKEIT, LAFOND, M.L, TSVETKOVA, L. (Hg.) (2017): CoHousing Inclusive: Selbstorganisiertes, gemeinschaftliches Wohnen für Alle. Berlin
[58] BAUGENOSSENSCHAFT MEHR ALS WOHNEN: Gemeinschaftliche Allmendräume (kein Datum). Verfügbar unter: https://www.mehralswohnen.ch/angebote/allmendraeume/ [Zugriff am: 09.11.2017]
[59] STADT BRAUNSCHWEIG BAU- UND UMWELTSCHUTZDEZERNAT, STADTBAURAT HEINZ-GEORG LEUER (Hg.) (2018): Integriertes Stadtentwicklungskonzept Braunschweig 2030 - Denk Deine Stadt. S. 111 [online]. Verfügbar unter: https://www.denkdeinestadt.de/wp-content/uploads/181106_ISEK_Braunschweig_redu.pdf [Zugriff am: 06.03.2019]

[60] INSTITUT FÜR STÄDTEBAU UND ENTWURFSMETHODIK, BREDERLAU, U. (Hg.) (2018) CoLiving Campus - Johannes-Göderitz-Preis 2018. Verfügbar unter: http://www.tu-braunschweig-isl.de/goederitz/downloads/CoLivingCampus_Johannes-Goederitz-Preis2018_ISE_digital.pdf [Zugriff am 06.03.2019]

[61] DGNB GmbH (Hg.) Zertifizierungskosten [online]. Neubauten und Sanierungen https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_system/zertifizierung/Zertifizierungsgebuehren/2018/171106_GO_NBV_u.A._ab_1.1.2018.pdf?m=1519634035& [gültig seit: 01.01.2018]

[62] HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2016) Mitplanen | Mitreden | Mitmachen [online]. Ein Leitfaden zur städtebaulichen Planung. Wiesbaden.
Verfügbar unter:
https://www.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/mitplanen_mitreden_mitmachen_2016.pdf [Zugriff am 06.12.2017]

[63] HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR UND LANDESENTWICKLUNG (2012) Freiräume entwickeln Lebensräume schaffen [online]. Wiesbaden. Verfügbar unter: https://www.hessen-agentur.de/mm/Freiraeume_Orange_121127_lr.pdf [Zugriff am 06.12.2017]

[64] GEHL, JAN (2012): Leben zwischen Häusern. Berlin

[65] JACOBS, JANE (1976) Tod und Leben großer amerikanischer Städte. Gekürzte Auflage. Braunschweig

[66] HILLER, KLAUS (2010) Sicherheit im Stadtquartier [online] Angsträume und Präventionsmaßnahmen. [kein Ort] CIMA Beratung und Management GmbH, 29.11.2010.
Verfügbar unter:
https://www.cima.de/freedocs/home/7_Vortrag_LKA_Hiller_Sicherheit_im_Stadtquartier.pdf [Zugriff am 06.12.2017]

[67] GEHL, JAN (2016) Städte für Menschen. 3. Auflage. Berlin

[68] HERMANNSDÖRFER, INGRID (2011) Städtebauliche Kriminalprävention [PowerPoint-Präsentation]. Maßnahmen für nachhaltige Sicherheit und Sauberkeit im öffentlichen Raum. Berlin. Verfügbar unter: https://www.clara-west.de/sites/default/files/praesentation_massnahmen_nachhaltige_sicherheit_sauberkeit.pdf [Zugriff am 06.12.2017]

[69] BREDERLAU, U., JUREIT, A.-C., LUBHAN, S., NESTLER, J. (2015) Campus + Stadt – Analysen, Strategien und Szenarien für die stadträumliche Entwicklung der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig

[70] LAUENSTEIN, H., [kein Datum]. Lehr- und Forschungsgebiet Freiraum- und Grünplanung [Lehrmaterial, online]. Aachen.
Verfügbar unter: http://www.la.rwth-aachen.de/Lauenstein/Lehrmaterialien/Geb%C3%A4udeanordnung.pdf [Zugriff am 06.12.2017]

[71] CULLEN, GORDON (1965) Townscape. 4. Auflage. London

[72] BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2017) Urbane grüne Infrastruktur: Grundlage für attraktive und zukunftsfähige Städte. Berlin

[73] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (2017) Weißbuch Stadtgrün [online]. Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft. Berlin. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/weissbuch_stadtgruen_bf.pdf [Zugriff am 10.04.2018]

[74] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (kein Datum) Nationale Klimapolitik [online]. Berlin. Verfügbar unter: http://www.bmu.de/WS215 [Zugriff am: 06.12.2017]

[75] IBA HAMBURG (2015) Energieatlas, Werkbericht 1 [online]. Zukunftskonzept erneuerbares Wilhelmsburg. Hamburg. Verfügbar unter: https://www.iba-hamburg.de/fileadmin/Slideshows_post2013/02_Wissen/01_Whitepaper/150312_Whitepaper_Energieatlas_Werkbericht_DE.pdf [Zugriff am: 06.12.2017]

[76] ZUKUNFTSINSTITUT (kein Datum) Aufbruch in ein neues Zeitalter der Mobilität [online]. Frankfurt am Main. Verfügbar unter: https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/aufbruch-in-ein-neues-zeitalter-der-mobilitaet/ [Zugriff am: 10.04.2018]

[77] ZUKUNFTSINSTITUT (kein Datum) E-Mobility mischt den Markt auf [online]. Neue Technologien wirbeln den Mobilitätsmarkt durcheinander – und schaffen einen neuen Zugang für angrenzende Branchen. Das Energiekonzept der Zukunft ist ohne Elektromobilität nicht denkbar. Frankfurt am Main. Verfügbar unter: https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/e-mobility-mischt-den-markt-auf/ [Zugriff am: 10.04.2018]

[78] SOLARKATASTER BRAUNSCHWEIG (2018) Braunschweig. Verfügbar unter: http://www.braunschweig.de/leben/umwelt_naturschutz/klima/solarkataster/solarkataster.html und unter: http://braunschweig.publicsolar.de/ [Zugriff am: 05.03.2019]

[79] ZUKUNFTSINSTITUT (kein Datum) Urbanisierung: Die Stadt von morgen [online]. Frankfurt am Main. Verfügbar unter: https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/urbanisierung-die-stadt-von-morgen/ [Zugriff am: 19.03.2018]

[80] KULTURKREIS DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT IM BDI e. V. (2017) TRANSFORMATION 2017 [Architektur-Katalog] Ressource: Wohnraum - Lösungen für bezahlbaren Wohnungsbau in Ballungsgebieten. Berlin.
auch verfügbar unter:
https://www.kulturkreis.eu/kuenstlerfoerderung/architektur/transformation-2017 [Zugriff am 10.03.2019]

13 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BHKW	Blockheizkraftwerk
BS	Braunschweig
ENKo	Energienutzungskoordinator
EM	Energiemanagement
GB3	Geschäftsbereich 3 - Gebäudemanagement
HNF	Ehemaliger Begriff der DIN 277 für die Nutzflächen 1 bis 6
IKT	Information und Kommunikationstechnik
KGR	Kostengruppe (nach DIN 276)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NUF	Nutzfläche (nach DIN 277)
NGF	Nettogrundfläche (nach DIN 277)
OCPP	Open Charge Point Protocol
PV	Photovoltaik
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TU	Technische Universität

14 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Einzelmaßnahmen im Masterplan EnEff Campus:blueMAP TU BS 11
Abbildung 2 Szenarien 2020 „Gebäude“ – Primärenergieeinsparung [IGS] 13
Abbildung 3 Szenarien 2020 „Gebäude“ – Einsparung CO_2-Emissionen [IGS] 14
Abbildung 4 Maßnahmenpakete Verkehr und Mobilität [ITD] 15
Abbildung 5 Szenarien 2020 „Mobilität“ – Primärenergieeinsparung [IGS] 16
Abbildung 6 Szenarien 2020 „Mobilität“ – CO2-Emissionen [IGS] 16
Abbildung 7 Umsetzung [IGS] 19
Abbildung 8 Integrales Technologiekonzept „Real-Life-Lab Campus TUBS“ [IGS] 20
Abbildung 9 Zeitstrahl Projektablauf [IGS] 21
Abbildung 10 Integrales Forschungsteam [IGS] 22
Abbildung 11 Innerstädtische Campus Areale der TU Braunschweig [ISE] 24
Abbildung 12 Gebäude und NGF nach Baualtersklassen [IGS] 25
Abbildung 13 Aufteilung der Gebäude nach Nutzung, Baualter und NGF [IGS] 26
Abbildung 14 Entwicklung der Energiekosten von 2011 bis 2018 [GB3, IGS] 28
Abbildung 15 Struktur Energienutzungskoordinator / Energieberater (GB3) 29
Abbildung 16 Grundstruktur Verbrauchserfassung (GB3) 29
Abbildung 17 Entwicklung des Endenergieverbrauchs 2011 bis 2018 [IGS] 30
Abbildung 18 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs 2011 bis 2018 [IGS] 30
Abbildung 19 Ablaufplan zur Umsetzung auf Gebäude- und Quartiersebene [IGS] 32
Abbildung 20 Prognose Primärenergieverbrauch - Umsetzung erf. Maßnahmen [IGS] 34
Abbildung 21 Ausschnitt Interaktive Campuskarte: Zentralcampus [www.google.de] 35
Abbildung 22 Beispiel Steckbrief Gebäude 4226 [IGS] 35
Abbildung 23 Beispiel Fenster Bestandsgebäude TU Braunschweig [IGS] 38
Abbildung 24 Gesamter Strom-Lastgang vom 16.06.14 bis 02.09.14 [GB3] 39
Abbildung 25 Gesamter Strom-Lastgang vom 01.09.14 bis 01.01.15 [GB3] 41
Abbildung 26 Alte und neue hocheffiziente Umwälzpumpe Heizung 4207 [GB3] 42
Abbildung 27 Gebäude 4269 - Biozentrum [GB3] 42
Abbildung 28 Gebäude 2424 - Pharmazie / Tierhaltung [GB3] 42
Abbildung 29 Gebäude 2423 - Pharmazie 2 [IGS] 42
Abbildung 30 Alte und neue LED-Beleuchtung Gebäude 4269 [GB3] 45
Abbildung 31 Alte und neue effiziente Hallenbeleuchtung 3402 [GB3] 46
Abbildung 32 Alte und neue effiziente Werkstattbeleuchtung 3402 [GB3] 47
Abbildung 33 Kühl- und Gefriergeräte im Bestand [IGS] 47

Abbildung 34 BHKW zum Zeitpunkt der Modernisierung - Januar 2016 [GB3] 49
Abbildung 35 Maßnahmendokumentation – Indexprüfung [IGS] 50
Abbildung 36 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 1 [IGS] 51
Abbildung 37 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 2 [IGS] 51
Abbildung 38 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 3 [IGS] 52
Abbildung 39 Maßnahmendokumentation – Ausschnitt Beschreibung 4 [IGS] 52
Abbildung 40 Methodik Lastganganalyse zur Maßnahmenbewertung 54
Abbildung 41 Stromlastprofil gemessen [IGS] 55
Abbildung 42 Stromlastprofil virtuell angepasst [IGS] 55
Abbildung 43 Lastganganalyse Wärme zur Maßnahmenbewertung Wärmeverbrauchsprofil 56
Abbildung 44 Übersicht Lageplan Neubauten [IGS] 58
Abbildung 45 Gebäude 4228 Ansicht Süd-West [IGS] 61
Abbildung 46 Gebäude 4228 Ansicht Ost [IGS] 61
Abbildung 47 Übersicht Auswertung Berechnungs-Werkzeuge [IGS] 62
Abbildung 48 Struktur des Analysetools zur Sanierung von Gebäuden „AnSaGe“ [IGS] 63
Abbildung 49 Eingabefenster Kostendatenbank [IGS] 64
Abbildung 50 Potentieller Standort für das BHKW am Campus Ost [elenia, GB3] 66
Abbildung 51 Standort für das BHKW am Campus Nord mit akustikrelevanten Abmaßen [elenia] 66
Abbildung 52 Standort für das BHKW am Campus Ost mit akustikrelevanten Abmaßen [elenia] 67
Abbildung 53 BHKW-Modul ASV 20/43 [elenia] 69
Abbildung 54 Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von Preissteigerungen (Strom, Wärme, Biomethan) und Förderungen am Campus Ost [elenia] 70
Abbildung 55 Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von Preissteigerungen (Strom, Wärme, Biomethan) und Förderungen am Campus Nord [elenia] 71
Abbildung 56 Schematischer Aufbau der PV-Anlage [elenia] 73
Abbildung 57 Offizielle Einweihung der PV-Anlage [elenia] 73
Abbildung 58 Digitalisierung der elektrischen Versorgungsnetze der TU Braunschweig [elenia] 76
Abbildung 59 Leitungsplan Mittelspannungsbereich Zentralcampus in PowerFactory [elenia] 77
Abbildung 60 Leitungsplan Niederspannungssammelschienen Zentralcampus in PowerFactory [elenia] 77
Abbildung 61 Gegenüberstellung gemessener Stromverbrauch und Simulationsergebnisse für das Jahr 2011 nach Campusareal [elenia] 78

Abbildung 62 Künstlich erzeugte Netzengpässe am Energieversorgungsnetz des Nordcampus [elenia] 81
Abbildung 63 Simulierte Transformatorauslastung am Rechenzentrum (Geb. 3404) für das Jahr 2017 [elenia] 82
Abbildung 64 Lastflussberechnung mit Energiespeicher im Tagesverlauf (Szenario Energiespeicher) [elenia] 87
Abbildung 65 Lastflussberechnung mit Energiespeicher im Jahresverlauf (Szenario Energiespeicher) [elenia] 88
Abbildung 66 Prozentualer Anteil an integrierbarer Ladepunkte in Bezug auf die Parkplatzverfügbarkeit (Szenario Elektromobilität) [elenia] 91
Abbildung 67 Beleuchtungssystem im Flur des elenia [elenia] 93
Abbildung 68 Simulation der Leitungsverluste in LTSpice für die Flurbeleuchtung am elenia [elenia] 93
Abbildung 69 Leistungsaufnahme der Komponenten für die Flurbeleuchtung am elenia [elenia] 94
Abbildung 70 Energieeinsparpotential für die Flurbeleuchtung am elenia [elenia] 95
Abbildung 71 Vergleich Wechselstromversorgung und Gleichstromversorgung für Rechnerarbeitsplätze [elenia] 96
Abbildung 72 Gleichrichter der Firma Phoenix Contact zur Stromversorgung der Rechnerarbeitsplätze 97
Abbildung 73 Schaltschrank und Schaltplan zur Gleichstromversorgung von Rechnerarbeitsplätzen [elenia] 98
Abbildung 74 Anschlüsse zur Gleichstromversorgung von Rechnerarbeitsplätzen [elenia] 99
Abbildung 75 AC Microgrid mit AC Ladepunkt [elenia] 101
Abbildung 76 AC Microgrid mit DC Ladepunkt [elenia] 101
Abbildung 77 DC Microgrid mit AC Ladepunkt [elenia] 101
Abbildung 78 DC Microgrid mit DC Ladepunkt [elenia] 101
Abbildung 79 Aufbau des Ladebereichs Mühlenpfordthaus [elenia] 105
Abbildung 80 Übersicht der Ladebereiche der TU Braunschweig und Umgebung [elenia] 105
Abbildung 81 Anzahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland von 2006 bis 2018 nach Kraftfahrtbundesamt (KBA) 106
Abbildung 82 Schematischer Aufbau des Lademanagementsystems elias [elenia] 108
Abbildung 83 Ladestromverteilung nach dem Ladealgorithmus Equal [elenia] 110
Abbildung 84 Aufbau der Testumgebung zum dynamischen Lademanagement [elenia] 111
Abbildung 85 Vergleich ungesteuerter und eigenverbrauchsoptimierter Ladevorgang des Elektrofahrzeugs im Anwendungsfall [elenia] 112

Abbildung 86 Verwendung der eingespeisten Photovoltaikleistung im Anwendungsfall [elenia] ... 113
Abbildung 87 Standzeiten am Standort Schleinitzstraße zu Projektbeginn [elenia] ... 114
Abbildung 88 Ladezeiten am Standort Schleinitzstraße zu Projektbeginn [elenia] ... 115
Abbildung 89 Ladezeiten am Standort Mühlenpfordthaus zu Projektende [elenia] ... 116
Abbildung 90 Konzept des Solarcaports SolarHUB [Hannah Hemsing] ... 117
Abbildung 91 Berechneter Energieertrag des SolarHUB Carports und erzielbare Reichweite eines Elektrofahrzeugs [elenia] ... 118
Abbildung 92 Teilstrategien Kommunikationstraining und Nutzerworkshops zur Nutzereinbindung [IfP] ... 120
Abbildung 93 Übersicht über Module des MI Trainings für Energienutzungskoordinator/innen [IfP] ... 122
Abbildung 94 Schematische Darstellung des Vorgehens eines Workshops (aus [46], S. 37) ... 125
Abbildung 95 Ergebnisse einer Kraftfeldanalyse ([41], p. 110 © Routledge Taylor & Francis Group) ... 126
Abbildung 96 Die Sprücheklopferinitative als Folgeprojektes eines Workshops [IfP] ... 127
Abbildung 97 Kommunikationsstruktur der CO_2 Challenge [IfP] ... 129
Abbildung 98 Beispielsteckbrief [IGS] ... 130
Abbildung 99 Prozess Prämierung innovativer Energiesparmaßnahmen [GB3] ... 131
Abbildung 100 Werbung in der Mensa für die CO2 Challenge [IfP] ... 132
Abbildung 101 Entwicklung der Masterplanungen Campus Beethovenstraße 2014/16/18 [ISE] ... 141
Abbildung 102 Campus Nord als Reallabor [ISE] ... 142
Abbildung 103 Lage Campus Nord [ISE] ... 144
Abbildung 104 Liegenschaftsverteilung um den Campus Nord (gelb=TU / lila=Stadt BS) [ISE] ... 145
Abbildung 105 Vollgut-Areal [Hütten & Paläste Architekten] ... 146
Abbildung 106 Entwicklungsprinzipien für den CoLiving Campus [ISE] ... 148
Abbildung 107 ISEK Braunschweig 2030 [Stadt Braunschweig/urbanista/ISE] ... 151
Abbildung 108 Freiraum – Aufenthaltsangebote (Kriterienkatalog) [ISE] ... 155
Abbildung 109 Nutzung – Kulturangebot (Kriterienkatalog) [ISE] ... 157
Abbildung 110 Mobilität – Stellflächen PKW (Kriterienkatalog) [ISE] ... 159
Abbildung 111 Energie – Übergeordnetes Konzept (Kriterienkatalog) [ISE] ... 161
Abbildung 112 Sicherheit – Zuordnung der Außenräume (Kriterienkatalog) [ISE] ... 163
Abbildung 113 Wichtung Quartier (Projektsammlung) [ISE] ... 164
Abbildung 114 Vorstellung Projekt/Gebäude (Projektsammlung) [ISE] ... 165
Abbildung 115 Lageplan (Projektsammlung) [ISE] ... 166

Abbildung 116 Situationsplan (Projektsammlung) [ISE] 167
Abbildung 117 Auswertung aktuell (Projektsammlung) [ISE] 168
Abbildung 118 Auswertung Szenario (Projektsammlung) [ISE] 169
Abbildung 119 Wettbewerbsmodell 1.Preis [Jana Thalmann + Carla Kern] 171
Abbildung 120 Ausschnitt Zentralcampus (Masterplan) [ISE] 172
Abbildung 121 Ausschnitt Campus Langer Kamp (Masterplan) [ISE] 173
Abbildung 122 Ausschnitt Campus Beethovenstraße (Masterplan) [ISE] 175
Abbildung 123 Kombination der Teilprojekte [IBR] 177
Abbildung 124 Zusammenspiel der Teilprojekte [IBR] 179
Abbildung 125 Systemübersicht aus Sicht der Datenübertragung und Vernetzung [IBR] 181
Abbildung 126 Hierarchische Kommunikationsstruktur - detailliert [IBR] 182
Abbildung 127 Konzeptuelle Darstellung der Funktionsweise von Nodes [IBR] 184
Abbildung 128 Position des Policy-Managements im Bezug auf den Datenfluss [IBR] 185
Abbildung 129 Durch das Policy-Management erweitertes Klassendiagramm eines Energy-Routers [IBR] 186
Abbildung 130 Beispielnetz einer ER-Architektur zum Sammeln und Weiterleiten von Daten im Umfeld der Universität [IBR] 186
Abbildung 131 RTT-Messung mit vergleichbaren Knotenzahlen [IBR] 187
Abbildung 132 Architektur der Arbiter-Implementierung [IBR] 188
Abbildung 133 Generelle Funktionsweise des Arbiters [IBR] 189
Abbildung 134 Funktionsweise des Arbiters im EnEff-Netzwerk 190
Abbildung 135 Versuchsaufbau der Benutzerstudie [IBR] 191
Abbildung 136 Ausführungszeiten der J-PAKE-Pairing [IBR] 192
Abbildung 137 Zur Untersuchung ausgewählte Zwischenstecker Edimax SP-2101W und D-Link DSP-W215 [Quelle: Edimax & D-Dlink] 193
Abbildung 138 Komponentendiagramm der Softwarearchitektur [IBR] 194
Abbildung 139 Versuchsaufbau zur Evaluation der Smartplugs [IBR] 195
Abbildung 140 Eigenverbrauch der Smartplugs [IBR] 196
Abbildung 141 Komponenten von Kühl- und Gefrierschrank-Prototypen [IBR] 197
Abbildung 142 Kondensatornetzteil vs. Schaltnetzteil - Temperaturentwicklung im Realbetrieb [IBR] 198
Abbildung 143 Stromverbrauch des Microcontrollers des entwickelten Smart-Thermostats [IBR] 199
Abbildung 144 Herkömmliches Kühlschrankthermostat [Fa. Danfoss] 199
Abbildung 145 Schaltplan des zweiten Prototypen [IBR] 200
Abbildung 146 Linearisiertes Kühlschrankmodell [IBR] 200
Abbildung 147 Funktionsweise der Geräteerkennung [IBR] 201

Abbildung 148 Systembild zur Realisierung einer Geräteerkennung [IfN] 203
Abbildung 149 Webansicht - Integration der IWF-Forschungsfabrik [IfN]..... 206
Abbildung 150 Nutzerfeedback in der Teeküch des IfN [IfN]..... 207
Abbildung 151 Mögliche Anwendung - Lastspitzenvermeidung [IfN]..... 207
Abbildung 152 Sechs unterschiedliche Einsatzziele von DSM [IfN] 209
Abbildung 153 Komponenten des EMS [IfN]..... 211
Abbildung 154 Übersicht über die Kommunikation der Knoten [IfN]..... 212
Abbildung 155 Verteilte Optimierung mehrerer (20) konzeptioneller Geräte an Soll-Kurve f (x) = $13x^4 - 100x^2 + 200$ (von oben nach unten) [IfN] 213
Abbildung 156 Expertensicht auf das Wartungsinterface [IfN]..... 214
Abbildung 157 Zeit pro Aufgabe. Dargestellt ist der jeweilige Durchschnitt mit der Standardabweichung (links, blau: Mixed Reality; rechts, rot: Tablet) [IfN]..... 215
Abbildung 158 Fehler pro Aufgabe. Dargestellt ist der jeweilige Durchschnitt mit der Standardabweichung.(links, blau: Mixed Reality; rechts, rot: Tablet) [IfN] 215
Abbildung 159 Ergebnisse des Fragebogens zur Zufriedenheit. Dargestellt ist der jeweilige Durchschnitt mit der Standardabweichung (links, blau: Mixed Reality; rechts, rot: Tablet) [IfN] 216
Abbildung 160 Methodische Grundlage: Aktive Funktionsbeschreibung [synavision]..... 217
Abbildung 161 Installation des WAGO-Controllers im BACnet der TU Braunschweig [SIZ]..... 218
Abbildung 162 Aufbau der beiden RLT-Anlagen für den großen Hörsaal [SIZ; TUBS] 219
Abbildung 163 RLT-Anlage West mit den verfügbaren Datenpunkten (identisch bei RLT-Ost) [SIZ; TUBS]..... 219
Abbildung 164 Witterungsbedingungen im Prüfzeitraum [SIZ; synavision]..... 220
Abbildung 165 Betriebszeiten der Lüftungsanlage [SIZ; synavision] 221
Abbildung 166 Links: RLT 1 West Zulufttemperatur, Mitte: Sequenz von WRG und Erhitzer 221
Abbildung 167 Fahrplan zur Betriebsoptimierung im Forumsgebäude [SIZ] 222
Abbildung 168 Veränderte Betriebszeiten im Zuge der Betriebsoptimierung [SIZ; synavision] 222
Abbildung 169 Einsparung Stromverbrauch und Stromkosten durch die Betriebsoptimierung 223
Abbildung 170 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe HK_1 [IGS, synavision] 225
Abbildung 171 Zeitprogramm Pumpe HK_1 [IGS, synavision]..... 225
Abbildung 172 Betriebsgüte Pumpe HK_1 [IGS, synavision] 225
Abbildung 173 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe HK_2 [IGS, synavision] 227
Abbildung 174 Zeitprogramm Pumpe HK_2 [IGS, synavision] 227

Abbildung 175 Betriebsgüte Pumpe HK_2 [IGS, synavision] 228
Abbildung 176 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe RLT_1 [IGS, synavision] 229
Abbildung 177 Zeitprogramm Pumpe RLT_1 [IGS, synavision] 229
Abbildung 178 Betriebsgüte Pumpe RLT_1 [IGS, synavision] 230
Abbildung 179 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe RLT_2 [IGS, synavision] 231
Abbildung 180 Zeitprogramm Pumpe RLT_2 [IGS, synavision] 231
Abbildung 181 Betriebsgüte Pumpe RLT_2 [IGS, synavision] 231
Abbildung 182 Betriebsregel Zustand EIN - Pumpe RLT_2 [IGS, synavision] 232
Abbildung 183 Regelung der Vorlauftemperatur - Pumpe WEZ [IGS, synavision] 234
Abbildung 184 Zeitprogramm Pumpe WEZ [IGS, synavision] 234
Abbildung 185 Betriebsgüte Pumpe WEZ [IGS, synavision] 234
Abbildung 186 Betriebsregel Zustand EIN - Pumpe WEZ [IGS, synavision] 235
Abbildung 187 Campusebene [SIZ; synavision] 237
Abbildung 188 Gebäudeebene (links) und Anlagenebene (rechts) [SIZ; synavision] 238
Abbildung 189 Aufbereitung der Mess- und Metadaten [SIZ] 239
Abbildung 190 Flexibles Analyse-Werkzeug [SIZ] 239
Abbildung 191 Maßnahmen - erforderliche Investition zur Vermeidung einer kWh Endenergie [IGS] 248
Abbildung 192 Maßnahmen - erforderliche Investition zur Vermeidung einer Tonne CO2-Ausstoß [IGS] 249
Abbildung 193 Primärenergieverbrauch absolut [IGS] 250
Abbildung 194 spez. Primärenergieverbrauch [IGS] 251
Abbildung 195 spez. PE-Verbrauch ohne Neubauten [IGS] 252
Abbildung 196 CO2-Emissionen absolut [IGS] 253
Abbildung 197 spez. CO2-Emissionen [IGS] 254
Abbildung 198 spez. CO2-Emissionen ohne Neubauten [IGS] 255
Abbildung 199 spez. CO2-Emissionen mit Ökostrom ohne Neubauten [IGS] 256
Abbildung 200 Kontext Reallabor an der TU Braunschweig [SIZ+] 265
Abbildung 201 Übersicht der Bausteine und Projektkomponenten im Reallabor Campus + Stadt [SIZ e+] 266
Abbildung 202 Übersichtsplan Reallabor ´Campus + Stadt | klimaneutral Zukunft gestalten´ [IGS, SIZ e+] 266
Abbildung 203 Elektrisches Versorgungsnetz Campus Nord 294
Abbildung 204 Elektrisches Versorgungsnetz Campus Ost 295
Abbildung 205 Elektrisches Versorgungsnetz Zentralcampus 296
Abbildung 206 Übersicht Energieerzeuger 297
Abbildung 207 Übersicht Verbraucher 299
Abbildung 208 TU Braunschweig - Stromerzeugung 2011 301

Abbildung 209 TU Braunschweig - Stromerzeugung 2016 302
Abbildung 210 TU Braunschweig - Stromerzeugung 2017 302
Abbildung 211 TU Braunschweig - Stromerzeugung Vergleich 2011, 2016 und 2017 303
Abbildung 212 TU Braunschweig - Energiebilanz Strom 2011 303
Abbildung 213 TU Braunschweig - Energiebilanz Strom 2016 304
Abbildung 214 TU Braunschweig - Energiebilanz Strom 2017 304
Abbildung 215 TU Braunschweig - Stromverbrauch 2011 305
Abbildung 216 TU Braunschweig - Stromverbrauch 2016 305
Abbildung 217 TU Braunschweig - Stromverbrauch 2017 306
Abbildung 218 TU Braunschweig - Vergleich Stromverbrauch 2011, 2016 und 2017 306

15 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Ableitung Szenarien „Gebäude“ 12
Tabelle 2 Projektdaten 21
Tabelle 3 Interdisziplinäres Forschungsteam TU Braunschweig 23
Tabelle 4 Gebäudegrundflächen nach Nutzung gem. DIN 277-2 und prozentualer Anteil an der Gesamcampusfläche [IGS] 26
Tabelle 5 Gebäude 4201 - Übersicht der Maßnahme Gebäudehülle [IGS] 37
Tabelle 6 Gebäude 4304 - Übersicht der Maßnahme RLT-Anlage [IGS] 39
Tabelle 7 Gebäude 9962 - Übersicht der Maßnahme RLT-Anlage [IGS] 40
Tabelle 8 Gebäude 4207 - Übersicht der Maßnahme Umwälzpumpen [IGS] 41
Tabelle 9 Gebäudeauswahl Dachinstallation PV-Anlagen [IGS] 43
Tabelle 10 Gebäude 4269 - Übersicht der Maßnahme LED Beleuchtung [IGS] 45
Tabelle 11 Gebäude 3402 - Übersicht der Maßnahme LED Beleuchtung [IGS] 46
Tabelle 12 Gebäude 4304 - Übersicht der Maßnahme Modernisierung BHKW [IGS] 48
Tabelle 13 Übersicht Neubauten [IGS] 58
Tabelle 14 Zusammenfassung Reduzierung PE und CO2-Emissionen [elenia] 72
Tabelle 15 Energiebilanz Zentralcampus in GWh [elenia] 79
Tabelle 16 Energiebilanz Ostcampus in GWh [elenia] 80
Tabelle 17 Energiebilanz Nordcampus in GWh [elenia] 80
Tabelle 18 Hinterlegte Kilowatt Peak Leistungen der PV-Anlagen im Simulationsmodell [elenia] 83
Tabelle 19 Energiebilanz Zentralcampus in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia] 84

Tabelle 20 Energiebilanz Ostcampus in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia] ... 85
Tabelle 21 Energiebilanz Nordcampus in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia] ... 85
Tabelle 22 Energiebilanz Campus gesamt in GWh (Szenario erneuerbare Energieanlagen) [elenia] ... 85
Tabelle 23 Durchdringung am Campus nach Parkplätzen (Szenario Elektromobilität) [elenia] ... 89
Tabelle 24 Durchdringung am Campus nach Betriebsmittelgrenzen (Szenario Elektromobilität) [elenia] ... 90
Tabelle 25 Wirkungsgrade in Prozent nach 80 Plus® Standard [elenia] ... 96
Tabelle 26 Übersicht Wirkungsgrade der Leistungselektronik in AC und DC Ladebereichen [elenia] ... 102
Tabelle 27 Szenarien abhängige Gesamtwirkungsgrade in AC und DC Ladebereichen [elenia] ... 103
Tabelle 28 CO2-Challenge - Siegergebäude 01 ... 133
Tabelle 29 CO2-Challenge - Siegergebäude 02 ... 134
Tabelle 30 CO2-Challenge - Siegergebäude 03 ... 134
Tabelle 31 CO2-Challenge - Siegergebäude 04 ... 135
Tabelle 32 CO2-Challenge - Siegergebäude 05 ... 135
Tabelle 33 CO2-Challenge - Siegergebäude 06 ... 136
Tabelle 34 Übersicht der Smatplugs mit Dimmfunktion („ZwS“ = Zwischenstecker; „-“ = keine Angabe) ... 193
Tabelle 35 Datenumfang der untersuchten Umwälzpumpen [IGS] ... 223
Tabelle 36 Analyse Pumpe HK_1 [IGS] ... 225
Tabelle 37 Annahmen für Berechnung Kosteneinsparung - Pumpe HK_1 [IGS] ... 226
Tabelle 38 Analyse Pumpe HK_2 [IGS] ... 227
Tabelle 39 Analyse Pumpe RLT_1 [IGS] ... 229
Tabelle 40 Analyse Pumpe RLT_2 [IGS] ... 231
Tabelle 41 Analyse Pumpe WEZ [IGS] ... 234
Tabelle 42 Übersicht Ergebnisse Umsetzung Maßnahmen [IGS] ... 246
Tabelle 43 Dokumentation Maßnahmenpakete [IGS] ... 247
Tabelle 44 Denkmalschutz - Übersicht Gebäude TU Braunschweig ... 284
Tabelle 45 Übersicht Neubauten - Steckbriefe ... 288
Tabelle 46 PV AC Netz ... 289
Tabelle 47 PV DC Netz ... 289
Tabelle 48 Stationärer Energiespeicher AC Netz ... 289
Tabelle 49 Stationärer Energiespeicher DC Netz ... 290

Tabelle 50 AC Ladepunkt DC Netz 290
Tabelle 51 AC Ladepunkt im Auto 290
Tabelle 52 DC Ladepunkt AC Netz 290
Tabelle 53 DC Ladepunkt DC Netz 291
Tabelle 54 Anschluss Energieversorgungsnetz AC-AC 291
Tabelle 55 Anschluss Energieversorgungsnetz AC-DC 291
Tabelle 56 Übersicht elektrische Energiebilanzen Teil I 300
Tabelle 57 Übersicht Stromerzeugung der Campus-Areale 301
Tabelle 58 Übersicht Stromverbrauch der Campus-Areale 304
Tabelle 59 Übersicht Szenario Elektromobilität Teil I 307
Tabelle 60 Übersicht Szenario Elektromobilität Teil II 307

16 ANHANG

16.1 Neubau, Sanierung, Instandhaltung

16.1.1 Denkmalschutz

Tabelle 44 Denkmalschutz - Übersicht Gebäude TU Braunschweig

3205/ 3206		**Haus der Wissenschaft** Nutzung: Verwaltung Adresse: Pockelstraße 11 Fläche (NGF): 9.467 m² Baujahr: 1937
3307		**Institutsgebäude** Nutzung: Institut Typ III Adresse: Langer Kamp 6 Fläche (NGF): 1.817 m² Baujahr: 1963
3308		**Halle Strömungsmaschinen** Nutzung: Institut für Lehre und Forschung Adresse: Langer Kamp 6 Fläche (NGF): 2.308 m² Baujahr : 1963
3317		**Hauptgebäude** Nutzung: Institutsgebäude III Adresse: Langer Kamp 8 Fläche (NGF): 10.244 m² Baujahr : 1972
4102		**Mühlenpfordthaus** Nutzung: Institutsgebäude III Adresse: Schleinitzstraße 23 - 23 b Fläche (NGF): 6.504 m² Baujahr : 1928

4201		**Forumsgebäude** Nutzung: Institutsgebäude Adresse: Pockelsstraße 14 Fläche (NGF): 9.541 m² Baujahr : 1964
4202		**Audi Max** Nutzung: Hörsaal Adresse: Pockelstraße 15 Fläche (NGF): 4.400 m² Baujahr : 1961
4203		**Universitätsbibliothek** Nutzung: Bibliothek Adresse: Pockelsstraße 13 Fläche (NGF): 14.364 m² Baujahr : 1971
4204		**Hauptgeb.Trakt Pockelsstr.** Nutzung: Hörsaal Adresse: Pockelsstraße 4 Fläche (NGF): 7.288 m² Baujahr : 1877
4205		**Hauptgeb.Trakt Schleinitzstr.** Nutzung: Hörsaal Adresse: Schleinitzstraße 19 Fläche (NGF): 4.837 m² Baujahr : 1877
4206		**Hochhaus** Nutzung: Institut Typ I Adresse: Pockelsstraße 3 Fläche (NGF): 7.359 m² Baujahr : 1956

4208		**Hörsaaltrakt/ Versuchsh.** Nutzung: Hörsaal Adresse: Pockelsstraße 2 - 2 a Fläche (NGF): 3.398 m² Baujahr : 1958
4220		**Hörsaal** Nutzung: 0 Adresse: Pockelstraße 4 Fläche (NGF): k.a m² Baujahr : 2009
4225		**Betriebstechnik** Nutzung: Institutsgebäude III Adresse: Spielmannstraße 10 Fläche (NGF): 1.614 m² Baujahr : 1885
4228		**Wohnhaus** Nutzung: Institutsgebäude III Adresse: Abt-Jerusalem-Straße 4 Fläche (NGF): 832 m² Baujahr : 1891
4238		**Hauptgebäude** Nutzung: Hörsaal Adresse: Humboldtstraße 1 Fläche (NGF): 1.084 m² Baujahr : 1925
4244		**Wohnhaus** Nutzung: Institut für Lehre und Forschung Adresse: Gaußstraße 17 Fläche (NGF): 981 m² Baujahr : 1950

4247		**Wohnhaus** Nutzung: Institutsgebäude I Adresse: Schleinitzstraße 13 Fläche (NGF): 647 m² Baujahr : 1890
4261		**Wohnhaus** Nutzung: Gebäude für Sportplatz- und Freibad Adresse: Gaußstraße 16 Fläche (NGF): 972 m² Baujahr : 1894
5202		**Humboldtstraße 33** Nutzung: Verwaltung Adresse: Humboldtstraße 33 Fläche (NGF): 2.264 m² Baujahr : 1899

16.1.2 Neubauten - Steckbriefe

Tabelle 45 Übersicht Neubauten - Steckbriefe

Nr.	Gebäudebezeichnung
2405	MPA-Halle
2433	Erweiterungsbau iBMB
3210	BRICS - Braunschweig Integrated Centre for Systems Biology
3329	PVZ - Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik
3330	Studierendenhaus FK4
3331	LENA - Laboratory of Emerging Nanometrology and Analytics
9980	NFL - Niedersächsisches Forschungszentrum Luftfahrt
9988-89	NFF - Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik

16.2 Energieversorgung

16.2.1 Berechnungsgrundlage Fallstudie Ladeinfrastruktur

Tabelle 46 PV AC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[1]	400V AC-Netz	Hochsetzsteller+Pulswechselrichter (ca. 85-95% in Abh von P/Pn (cos(phi)=-1))
[2]	230V AC-Netz 4,5kW	Wechselrichter mit SIC-Bauelementen (<98%)
[3]		PWM mit 50Hz-Trafo (95%) PWM ohne Trafo (95%)
[4]	<100kW >100kW 0,1-0,6kW 0,1-0,6kW	Strangwechselrichter (<98%) Zentralwechselrichter (<98,5%) Modulwechselrichter (90-95%) Möglicher Zusatz zum Wechsel-richter: DC/DC Optimierer (<98,8%)
[5]	Microgrid/480V/100kW	97,6%
[6]	Single phase grid/120V/2kW	QZSI with PWM (96,27% full load)
[7]	Grid/230V/max 5200W	(<97,6%) aus Datenblatt

Tabelle 47 PV DC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[5]	Microgrid/380V/100kW	97,6%
[8]	Microgrid/120V/400W	Molule integrated converter MIC (boost converter) with Switching frequency modulation (SFM) (98%)
[9]	Microgrid/270V/2kW	LLC resonant converter with open-loop control (<93%)
[10]	Microgrid/400V/3kW	Buck-Boost converter with PWM (<97%)

Tabelle 48 Stationärer Energiespeicher AC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[5]	Microgrid/480V/100kW	97,6%
[11]	Single phase Grid/240V/750W	Transformerless Bidirectional AC/DC converter with PWM (<98,4%)
[12]	Single phase grid/120V/1kW	Dual-buck-inverter with current-loop control (<97,8%)
[13]	Three phase grid/110V/3kW	Three phase bidirectional AC-DC converter with model predictive control (<96,8%)

Tabelle 49 Stationärer Energiespeicher DC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/Batterietyp Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[1]	Li-Ionen-Akku	Hochsetzsteller (<99%)
[14]	Doppelschichtkondensator	Hochtiefsetzsteller (98%)
[5]	Microgrid/480V/100kW	97,6%
[15]	Microgrid/48V/1500W	Isolated bi-directional DC-DC converter (<93,6%)
[16]	Microgrid/400V/1500W	Bidirectional isolated boost converter with pwm plus phase shift control (<96,4%)
[17]	Microgrid/400V/2,5kW	buck-boost converter with hybrid control scheme (97-99%)
[18]	Microgrid/700V/3kW	Buck-Boost converter with open loop control (around 95,2%)

Tabelle 50 AC Ladepunkt DC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[2]		Einfacher Pulswechselrichter (94-97%)

Tabelle 51 AC Ladepunkt im Auto

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[19]	Niederspannung/22 kW	90,4 %

Tabelle 52 DC Ladepunkt AC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[20]	400V AC 50kW	94%
[21]	11kV AC 50kW	98,5%
[22]	208/415 AC 50kW	Beste Wahl (Begründung in Quelle): Vienna rectifier (90%) 3-phase AC/DC buck-boost(95%)
[23]	400V AC 50kW	Active three-phase PWM converter+three-phase dual active brige DC/DC converter(>95%)

Tabelle 53 DC Ladepunkt DC Netz

Quelle mit Verweis	Netztyp/ Spannung/Leistung	Stromrichter (WG)/ Steuerung
[24]	600V input DC/75kW	Partial power converter(H-Bridge) (<98,3%)
[25]	700V input DC/10kW	Buck converter (<98,6%)

Tabelle 54 Anschluss Energieversorgungsnetz AC-AC

Quelle mit Verweis	Spannung MG/Spannung maingrid/Leistung	Stromrichter (WG)
[5]	480V//480V/100kW	100%
[26]	400V/20kV/50kVA	97-98%
[27]	15-25kVA	97-98%
[28]	230V/13,8kV/200kVA	97%

Tabelle 55 Anschluss Energieversorgungsnetz AC-DC

Quelle mit Verweis	Spannung MG/Spannung maingrid/Leistung	Stromrichter (WG)
[5] Teil 1	Microgrid 380V/Maingrid 480V/100kW	DC-AC (97,6%) AC-DC (96,5%)
[29]	Microgrid 300V/Maingrid 110V/600W	Simplified PWM-rectifier(88% at 20% load-96% at 100% load)
[30]	Microgrid ?/Main 141V/2kW	Grid-tied Transformerless inverter with hybrid switches(92-94%)
[31]	Microgrid 400V/Main 380V three phase/3kW	Single stage three phase rectifier with Y-deltathree phase transformer (SVPWM) (91,5-93,2%(load))
[32]	Microgrid 700V/Main 400V three phase/150W	Standard three phase VSC converter with LCL output-filter(PWM) (max 96,2%, 92% weightened)
[33]	Microgrid 380V/Main 127Vrms (singlephase) /2kW	NPC Mosfet+Fullbridge (93,65%) NPC Mosfet+SNPC (94,51%) NPC IGBT Fullbridge (93,51%) NPC IGBT+SNPC (94,96%)
[34]	Microgrid 400V/Main 4160V threephase/225kW	Five cascade H-bridge converters together with high frequency isolated DC/DC converter (<98%)

Literaturverzeichnis

[1] J. Specovius, *Grundkurs Leistungselektronik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

[2] D. Schröder, *Leistungselektronische Schaltungen: Funktion, Auslegung und Anwendung,* 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.

[3] Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann und Detlef Schulz, *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis,* 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.

[4] V. Wesselak und S. Voswinckel, *Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

[5] S. N. Backhaus und G. W. Swift et al., *DC Microgrids Scoping Study. Estimate of Technical and Economic Benefits.* [Online] Verfügbar unter: https://energy.gov/oe/downloads/dc-microgrids-scoping-study-estimate-technical-and-economic-benefits-march-2015.

[6] S.A. Singh, N.A. Azeez und S.S. Williamson, Hg., *A new single-stage high-efficiency photovoltaic(PV)/grid-interconnected dc charging system for transportation electrification: 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society : November 9-12, 2015, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.

[7] Solar River, *SolarRiver Grid-tied Inverter Product Manual.*

[8] M. Adly und K. Strunz, "Irradiance-Adaptive PV Module Integrated Converter for High Efficiency and Power Quality in Standalone and DC Microgrid Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65. Jg., Nr. 1, S. 436–446, 2018.

[9] W. Dai, "Modeling and efficiency-based control of interleaved LLC converters for PV DC microgrid," in *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*: IEEE, Okt. 2015 - Okt. 2015, S. 1–8.

[10] Y. Zhang, Y. Bezawada, R. Fu, W. Tian und R. M. Winter, "Study of a 3kW high-efficient wide-bandgap DC-DC power converter for solar power integration in 400V DC distribution networks: Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA, 12-15 December 2017," (eng), S. 680–684, http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8283393, 2017.

[11] B. Gu, J. Dominic, B. Chen und J.-S. Lai, *A high-efficiency single-phase bidirectional AC-DC converter with miniminized common mode voltages for battery energy storage systems: 15 - 19 Sept. 2013, Colorado Convention Center, Denver, CO*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013.

[12] H. Qian, J.-S. Lai, J. Zhang und W. Yu, *High-efficiency bidirectional AC-DC converter for energy storage systems: 12 - 16 Sept. 2010, Atlanta, Georgia*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010.

[13] M. P. Akter, S. Mekhilef, N. M. L. Tan und H. Akagi, "Model Predictive Control of Bidirectional AC-DC Converter for Energy Storage System," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 10. Jg., Nr. 1, S. 165–175, 2015.

[14] Mirko Bodach, "Energiespeicher im Niederspannungsnetz zur Integration dezentraler, fluktuierender Energiequellen," Dissertationsschrift, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2006.

[15] X. Yu und P. Yeaman, *A new high efficiency isolated bi-directional DC-DC converter for DC-bus and battery-bank interface: Fort Worth, Texas, USA, 16-20 March 2014*. Piscataway NJ: IEEE, 2014.

[16] G. Spiazzi, S. Buso, D. Biadene, G. Rossetto und F. Mela, "High efficiency battery charger for photovoltaic inverters," in *2017 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*: IEEE, Dez. 2017 - Dez. 2017, S. 1–6.

[17] Z. Yu, *High Efficiency Bidirectional DC-DC Converter with Wide Input and Output Voltage Ranges for Battery Systems*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.

[18] C. Pham, T. Kerekes und R. Teodorescu, *High efficient bidirectional battery converter for residential PV systems: 25 - 28 June 2012, Aalborg, Denmark*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012.

[19] Ole Roesky, Michael Bodmann, Jan Mummel, Michael Kurrat, Jürgen Köhler, "Impact of losses on the charging strategy of electric vehicles," Paper, elenia, TU Braunschweig, Braunschweig, 2015.

[20] ABB, *Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge: DC-Ladestation Terra 53 - konform mit vielen Standards.* [Online] Verfügbar unter: https://www.eon-drive.de/content/dam/eon-emobility-de/Playground/PDFs/Datasheets/Fast_Datenblatt.pdf. Zuletzt geprüft am: 16.08.2017.

[21] L. Udawatta, U. K. Madawala, D. Muthumuni und M. Vilathgamuwa, *Control of solar powered micro-grids using electric vehicles*. Control of Solar Powered Micro-grids Using Electric Vehicles. Piscataway, NJ: IEEE, 2012.

[22] J. Channegowda, V. K. Pathipati und S. S. Williamson, "Comprehensive review and comparison of DC fast charging converter topologies: Improving electric vehicle plug-to-wheels efficiency: [Armação dos] Búzios, Rio de Janeiro, Brazil, 3 - 5 June 2015," (eng), S. 263–268, 2015.

[23] S. Haghbin, M. Alatalo, F. Yazdani, T. Thiringer und R. Karlsson, "The Design and Construction of Transformers for a 50 kW Three-Phase Dual Active Bridge DC/DC Converter," in *The Design and Construction of Transformers for a 50 kW Three-Phase Dual Active Bridge DC/DC Converter*: IEEE, Dez. 2017 - Dez. 2017, S. 1–5.

[24] J. Rojas, H. Renaudineau, S. Kouro und S. Rivera, Hg., *Partial power DC-DC converter for electric vehicle fast charging stations*: IEEE, Okt. 2017 - Nov. 2017.

[25] M. Jung, Hg., *Optimized design of DC-DC converter LC output filter for EV battery charging applications in terms of defined battery current and voltage ripple as well as overall system efficiency*: IEEE, Sep. 2016 - Sep. 2016.

[26] L. Petkovska, M. Digalovski, G. Cvetkovski und P. Lefley, *A novel approach to multi-objective efficiency optimisation for a distribution transformer based on the Taguchi method: 2 - 5 Sept. 2014, Berlin, Germany ; proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014.

[27] A. B. Baggini und A. Sumper, *Electrical energy efficiency: Technologies and applications*. Chichester West Sussex, Hoboken N.J.: Wiley, 2012.

[28] A. K. Faizan Dastgeer, *Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation*: IEEE, 2009.

[29] Y.-H. Liao und M.-C. Cheng, *A novel PWM strategy of bidirectional AC/DC converters for micro grid system: 22 - 25 April 2013, Kitakyushu, Japan*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013.

[30] C. Correa-Betanzo, H. Calleja, S. de Leon-Aldaco und E. Rodriguez, *Optimization of the light-load efficiency enhancement technique in a transformerless inverter aimed at DC microgrid: June 27-29, 2017, NH Collection, Nürnberg City, Nürnberg, Germany*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.

[31] L. Gu und K. Jin, *A single-stage three-phase AC/DC converter with Y-Δ three-phase transformer: 15 - 19 March 2015, Charlotte Convention Center, Charlotte, North Carolina*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.

[32] C. P. Dick, M. Biskoping, S. A. Richter und R. W. de Doncker, *Variable-Frequency Pulse-Width Modulation for an Improved Grid-Connected Converter Efficiency: IEEE Industry Applications Society annual meeting, 2008 ; 5 - 9 Oct. 2008, Edmonton, Alberta, Canada*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2008.

[33] H. H. Sathler, L. H. Sathler, F. L. F. Marcelino, T. R. de Oliveira, S. I. Seleme und P. F. D. Garcia, *A comparative efficiency study on bidirectional grid interface converters applied to low power DC nanogrids: COBEP 2017 : from 19th to 22nd November 2017, Grand Victory Hotel, Juiz de Fora - Minas Gerais*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.

[34] S. Zhao, Q. Li und F. C. Lee, *High frequency transformer design for modular power conversion from medium voltage AC to 400V DC: Thirty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition : March 26-30, 2017, Tampa, Florida*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.

16.2.2 Elektrische Versorgungsnetze

Campus Nord

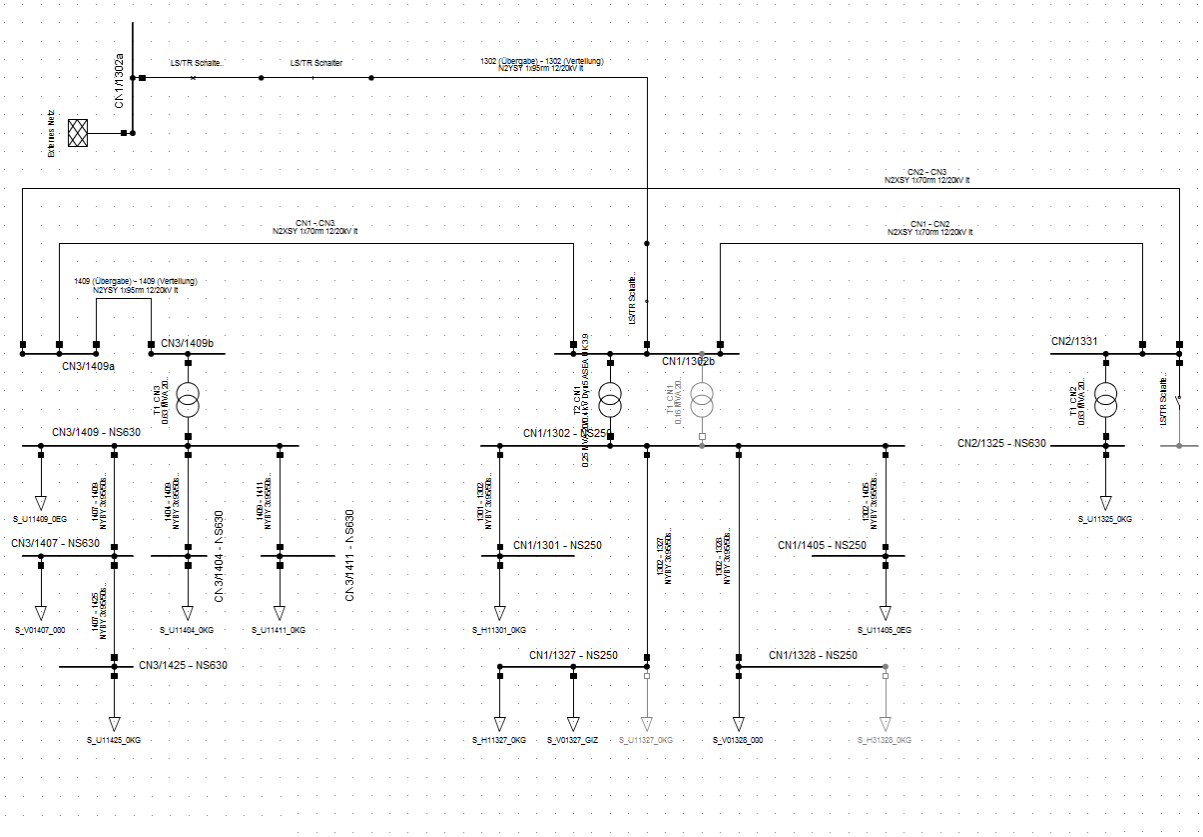


Abbildung 203 Elektrisches Versorgungsnetz Campus Nord

Campus Ost

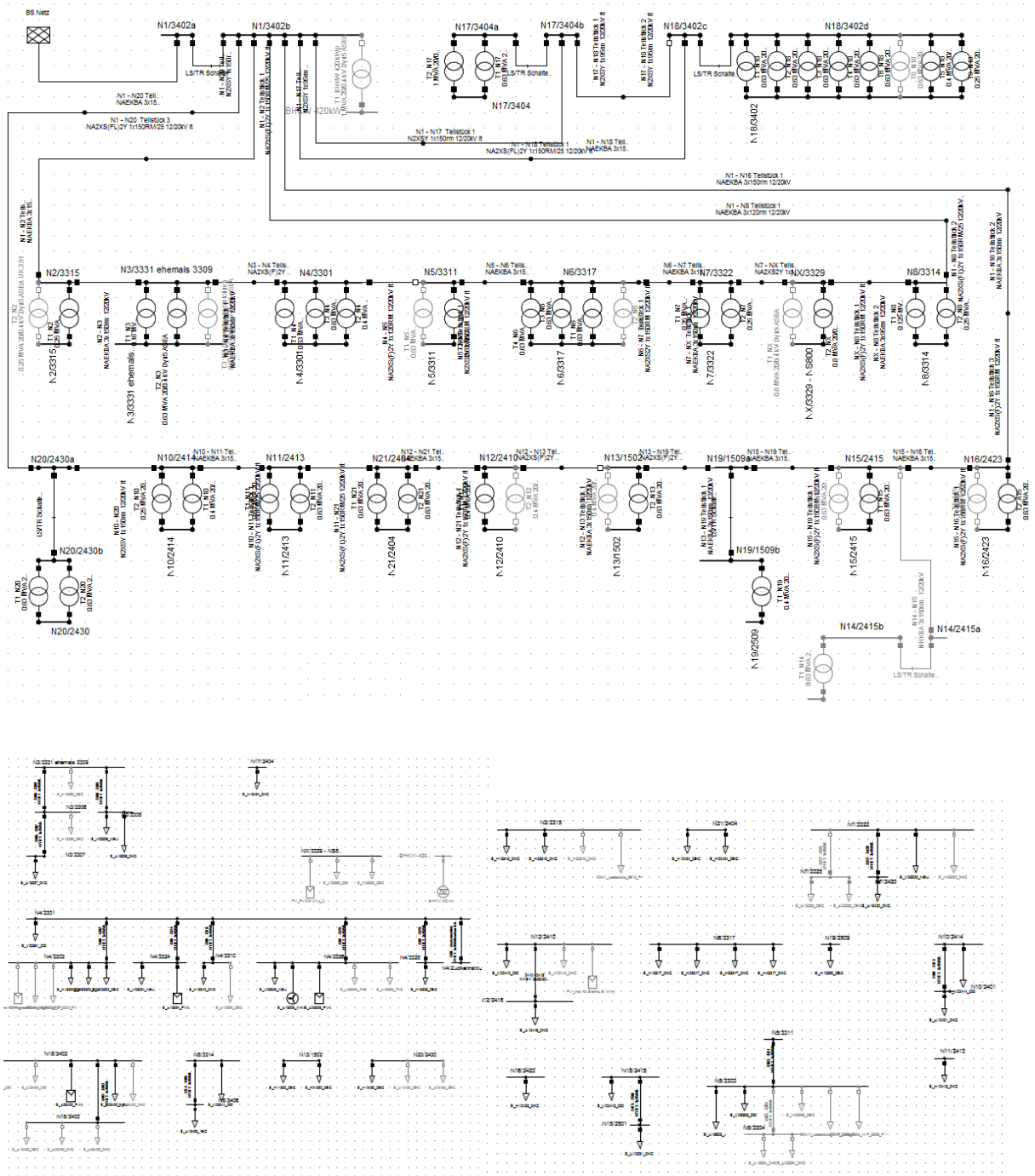


Abbildung 204 Elektrisches Versorgungsnetz Campus Ost

Zentralcampus

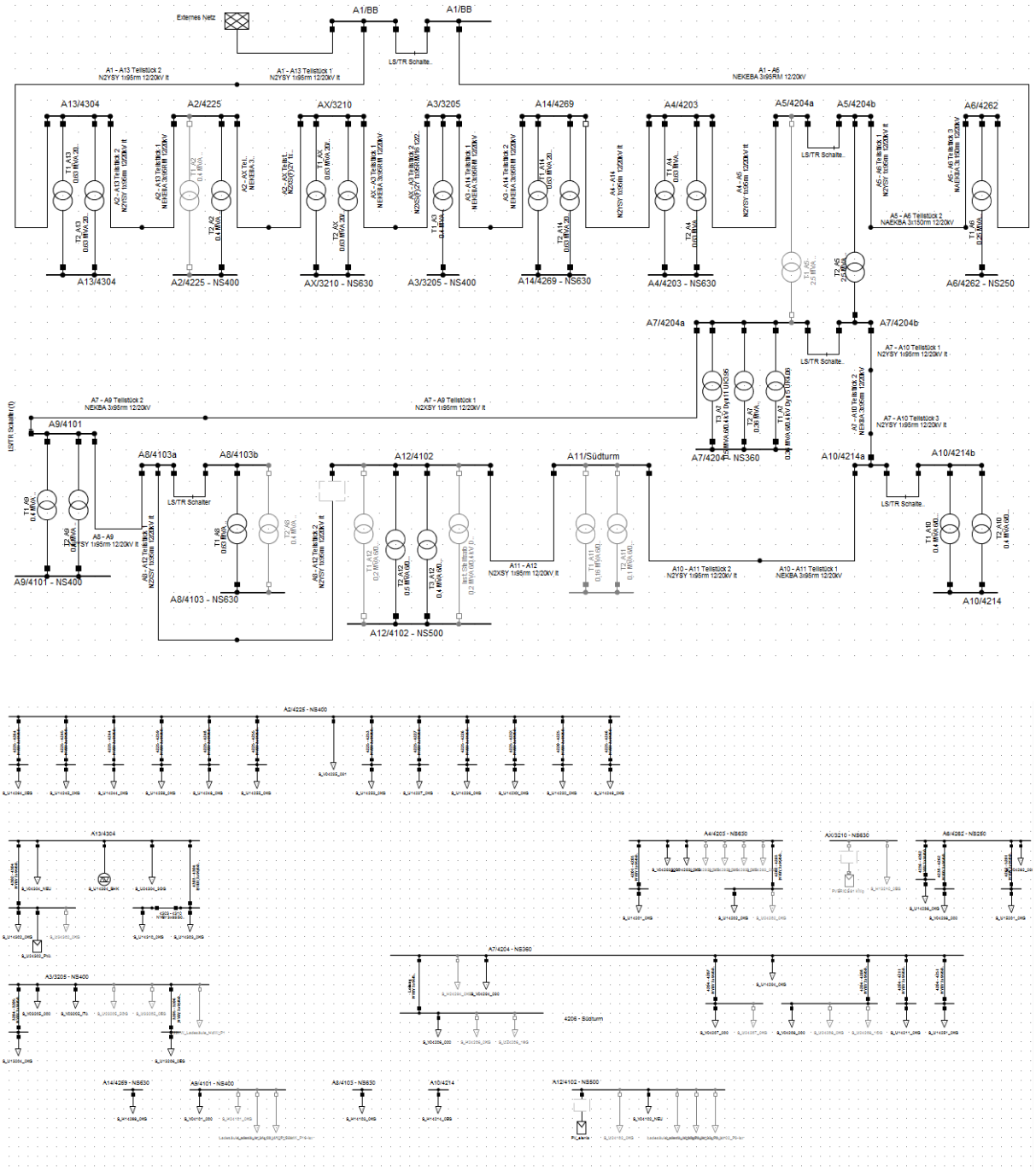


Abbildung 205 Elektrisches Versorgungsnetz Zentralcampus

16.2.3 Übersicht Erzeuger

Campus	Typ	Leistun	Gebäi	Beschreibung	Anschluss		Datenbasis	Faktc	Jahr	Anmerkungen
Zentral										
	PV	16	4302	S_U24302_PVA	4102 - NS500	Grotrian Nord	Profil Energo		2011	
	PV	14	4102	S_U34102_PVA an 4214	4102 - NS500	Mühlenpfordtstraße NS	Profil Energo		2011	
	BHKW	63	4304	S_U14304_BHK	4304	Chemie	Profil Energo		2011	
	PV	15	4101	15kWp_PV_2030_4101	4101 - NS400	Nachrichtentechnik	4302		2030	
	PV	22	4245	22kWp_PV_2030_4245	4245	Bioverfahrenstechnik	4302		2030	
	PV	29	4303	29kWp_PV_2030_4303	4303	Grotrian Süd	4302		2030	
	PV	43	4269	43kWp_PV_2030_4269	4269 - NS630	Biozentrum	4302		2030	
	PV	7	4255	7kWp_PV_2030_4255	4255	Spielmannstr. 8	4302		2030	
	BHKW	20	4206	BHKW_elenia 20 kW	4206	Südturm	Profil		2020	Jahr unbekannt
	PV	91	3210	PV BRICS 91 kWp	3210 - NS630	BRICS-NS	Profil IGS		2020	95kwp; Gebäude vorhanden, PV-Anlage nicht
Ost										
	BHKW	420		BHKW 420 kW			Profil			
	PV	40	3324	S_U13324_PVA	3324	Bültenweg 74/75	Profil Energo		2016	
	WKA	0,4	3326	S_U13326_WKA	3326	CIM - Langer Kamp 19b	Profil Energo		2016	
	PV	3	3326	S_U23326_PVA	3326	CIM - Langer Kamp 19b	Profil Energo		2016	
	PV	5	3402	S_U33402_PVA	3402	Elektrotechnik Tower - HS 66(1)	Profil Energo		2016	
	PV	31	2410	PV_Inst. für Stahlb. 31 kWp	2410	Statik u Stahlbau - Beethovenstr. 51	Profil IGS		2020	85kwp, Gebäude vorhanden, PV-Anlage nicht
	PV	39	3302	PV_Inst. für Thermo 39 kWp	3302	Hans-Sommer-Strasse 4u5	Profil IGS		2020	40kwp, Gebäude vorhanden, PV-Anlage nicht
	PV	31	3329	PV_PVZ 31 kWp_2020	NX/3329 - NS800		Profil IGS		2020	32kwp, Gebäude vorhanden, PV-Anlage nicht
	PV	49	2405	PV_2405_49 kWp_2020	2404	Baustoffkunde Neu - Beethovenstr. 51	Profil IGS		2020	48kwp
	PV	43	3404	PV_GITZ 43 kWp_2020	3404	Rechenzentrum Hans-Sommer-Str. 65(1)	Profil IGS		2020	45kwp
	PV	58	3331	PV_LENA 58 kWp_2020	3331 ehemals 3309	Str. u Verbr. Kraftmaschinen(1)	Profil IGS		2020	61kwp
	PV	42	2401	PV_Sporthalle_2401_42 kWp	2401	Sporthalle	Profil IGS		2020	44Kwp
	PV	13	2413	PV_2413_13 kWp_2030	2413	Baustoffkunde Alt - Beethovenstr. 52	2401	0,027	2030	
	PV	29	2414	PV_2414_29 kWp_2030	2414	Pharmazie I - Beethovenstr. 55	2403	0,071	2030	
	PV	75	2415	PV_2415_75 kWp_2030	2415	Physikzentrum - Mendelssohnstr. 2-3	2403	0,18	2030	
	PV	27	2418	PV_2418_27 kWp_2030	2418	Straßenwesen - Beethovenstr. 52	3402	0,033	2030	
	PV	124	2423	PV_2423_124 kWp_2030	2423	Pharmazie II - Mendelssohnstr. 1	2403	0,295	2030	
	PV	38	2501	PV_2501_38 kWp_2030	2501	Mendelsohnstr. 4	2401	0,079	2030	
	PV	59	2509	PV_2509_59 kWp_2030	2509	Magnetbahn GmbH(2)	2401	0,12	2030	
	PV	37	3302	PV_3302_37 kWp_2030	3302	Hans-Sommer-Strasse 4u5	2410	0,097	2030	
	PV	26	3310	PV_3310_26 kWp_2030	3310	Verfügungsgebäude - LK 19c	2410	0,067	2030	
	PV	29	3314	PV_3314_29 kWp_2030	3314	Verfahrenstechnik - LK 7	2402	0,049	2030	
	PV	23	3322	PV_3322_23 kWp_2030	3322	Brennstofftechnik - Franz-Liszt 85	3302	0,076	2030	
	PV	4	3326	PV_3326_4 kWp_2030	3326	CIM - Langer Kamp 19b	2410	0,01	2030	
	PV	5	3328	PV_3328_5 kWp_2030	3328	Hans-Sommer-Straße 4	2410	0,013	2030	
	PV	71	3402	PV_3402_71 kWp_2030	3402	Elektrische Institute - HS 66(1)	1501	0,166	2030	
	PV	15	3420	PV_3420_15 kWp_2030	3420	Sportzentrum - Franz-Liszt-Str. 34	3302	0,048	2030	
	PV	44	1501	PV_1501_44 kWp_2050	1502	Wasserbau - Beethovenstr. 51a	3324	0,536	2050	
	PV	43	2402	PV_2402_43 kWp_2050	2404	Baustoffkunde Neu - Beethovenstr. 51	2405	0,877	2050	
	PV	81	2403	PV_2403_81 kWp_2050	2404	Baustoffkunde Neu - Beethovenstr. 51	2405	1,653	2050	
	PV	43	2411	PV_2411_43 kWp_2050	2413	Baustoffkunde Alt - Beethovenstr. 52	3324	0,53	2050	
	PV	43	2412	PV_2412_43 kWp_2050	2413	Baustoffkunde Alt - Beethovenstr. 52	3420	1,036	2050	
	PV	29	2417	PV_2417_29 kWp_2050	2418	Straßenwesen - Beethovenstr. 52	2405	0,592	2050	
	PV	169	2430	PV_2430_169 kWp_2050	2430	Mensa 2 - Beethovenstr.	3420	4,04	2050	
	PV	7	3401	PV_3401_7 kWp_2050	3403	Hans-Sommer-Str. 66	3328	0,174	2050	
Nord										
	PV	91	1325	PV 1325 91 kWp	1325		4101	1	2030	
	PV	91	1327	PV 1327 91 kWp	1327		4101	1	2030	
	PV	33,5	1407	PV 1407 33 kWp	1407		3326	1,08	2030	
	PV	106	1327	PV 1327 106kwp	1327		4304	1,171	2030	Kopplung mit 1406, 1421, 1423
	PV	87	1405	PV 1405 87 kWp	1405		4303	0,956	2050	
	PV	75	1327	PV 1327 75kwp	1327		4304	0,825	2050	Kopplung mit 1414, 1424
	BHKW	93								geplant

Abbildung 206 Übersicht Energieerzeuger

16.2.4 Übersicht Verbraucher

Campus	Gebäudenr	Beschreibung	Lastprofil	Jahr	Anmerkungen
			Zentral		
Zentral	3204	Naturhistorisches Museum	S_U13204_0KG	2011	
	3205	Haus der Wissenschaft	S_H13205_0KG	2011	ersetzen durch S_V03205_000
	3205	Haus der Wissenschaft	S_U13205_7OG	2011	ersetzen durch S_V03205_ITA
	3205	Haus der Wissenschaft	S_U23205_5OG	2011	
	3205	Haus der Wissenschaft	S_U33205_0EG	2011	
	3206	Wohnung Borowiec	S_U13206_0EG	2011	
	3209 (mehrere)	Villen	S_V04000_GES	2011	
	3210	BRICS-NS	S_H13210_0EG	2016	Ab August 2016 (für 2020 Profil von 2017)
	4101	Nachrichtentechnik	S_H14101_0KG	2011	ersetzen durch S_V04101_000
	4101	Nachrichtentechnik	S_H24101_0KG	2011	
	4102	Mühlenpfordtstraße NS	S_U14102_0KG	2011	ersetzen durch S_V04102_000
	4102	Mühlenpfordtstraße NS	S_U24102_0KG	2011	
	4103	BS4	S_H14103_0KG	2011	
	4201	Forumsgebäude	S_U14201_0KG	2011	
	4202	Audimax	S_U14202_0KG	2011	
	4202	Audimax	S_U24202_0KG	2011	
	4203	Bibliothek	S_H14203_0KG	2011	ersetzen durch S_V04203_000
	4203	Bibliothek	S_U14203_0KG	2011	
	4203	Bibliothek	S_U24203_0KG	2012	
	4203	Bibliothek	S_U34203_0KG	2012	
	4203	Bibliothek	S_U44203_0KG	2012	
	4204	Pockelsstraße	S_H24204_0KG	2011	
	4204	Pockelsstraße NSb	S_H14204_0KG	2011	ersetzen durch S_V04204_000
	4204	Pockelsstraße NSb	S_U14204_0KG	2011	
	4206	Südturm	S_H14206_0KG	2011	ersetzen durch S_V04206_000
	4206	Südturm	S_H24206_0KG	2011	
	4207	Lebensmittelchemie	S_U14207_0KG	2011	ersetzen durch S_V04207_000
	4207	Lebensmittelchemie	S_U24207_0KG	2011	
	4208	Hörsaalgebäude	S_U14208_0KG	2011	ersetzen durch S_V04208_000
	4208	Hörsaalgebäude	S_U24208_0KG	2013	
	4208	Hörsaalgebäude	S_U24208_1OG	2011	
	4211	Steinbaracke	S_U14211_0KG	2011	
	4214	Elektrische Energieanlagen	S_H14214_0EG	2011	
	4220	Institutsgebäude	S_U14220_0KG	2011	
	4225	GB3	S_H14225_0EG	2011	ersetzen durch S_V04225_001
	4226	Verwaltung	S_U14226_0KG	2011	
	4227	Wohnhaus	S_U14227_0KG	2011	
	4236	Botanischer Garten	S_U14236_0KG	2011	
	4238	BotanikInstitut	S_U14238_0KG	2011	ersetzen durch S_V04238_000
	4244	Wohnhaus	S_U14244_0KG	2011	
	4245	Bioverfahrenstechnik	S_U14245_0KG	2011	
	4246	Wohnhaus	S_U14246_0KG	2011	
	4248	Wohnhaus	S_U14248_0KG	2011	
	4251	Kleine Baracke	S_U14251_0KG	2011	
	4253	Wohnhaus	S_U14253_0KG	2011	
	4255	Wohnhaus	S_U14255_0KG	2011	
	4259	Wohnhaus	S_U14259_0KG	2011	
	4262	FW-Übergabestation	S_H14262_0EG	2011	ersetzen durch S_V04262_000
	4264	Biochemie	S_U14264_0EG	2011	
	4269	Biozentrum	S_H14269_0KG	2011	
	4302	Grotrian Nord	S_U14302_0KG	2013	
	4302	Grotrian Nord	S_U34302_0KG	2013	
	4303	Grotrian Süd	S_U14303_0KG	2011	
	4304	Chemie	S_H14304_0KG	2011	ersetzen durch S_V04304_000 (Ohne Erzeuger)
	4304	Chemie	S_U24304_3OG	2011	
	4310	Wohnhaus	S_U14310_0KG	2011	
	5201	Torhaus	S_U15201_0KG	2013	
	42xx	Wohnh. Seiler	S_U142XX_0KG	2011	

			Ost		
Ost	1501	Wasserbau	S_H11502_0EG	2011	
	1502	Wasserbau	S_H21502_0EG	2011	
	2401	Sporthalle	S_U12401_0KG	2011	
	2404	Baustoffkunde Neu	S_H12404_0EG	2011	
	2404	Baustoffkunde Neu	S_H22404_0EG	2011	
	2410	Statik u Stahlbau	S_H12410_0KG	2011	ersetzen durch S_V02410_000 (da Unterzähler wichtig)
	2410	Statik u Stahlbau	S_H22410_0KG	2011	da immer 0
	2413	Baustoffkunde Alt	S_H12413_0KG	2011	
	2414	Pharmazie I	S_H12414_0KG	2011	ersetzen durch S_V02414_000 (da Unterzähler wichtig)
	2415	Physikzentrum	S_H12415_0KG	2011	ersetzen durch S_V02415_000 (da Unterzähler wichtig)
	2418	Straßenwesen	S_U12418_0KG	2011	
	2423	Pharmazie II	S_H12423_0KG	2011	
	2430	Mensa 2	S_H12430_0EG	2011	
	2430	Mensa 2	S_U12430_0EG	2011	da Unterzähler
	2430	Mensa 2	S_U22430_0EG	2011	da Unterzähler
	2501	Verfügungsgebäude	S_U12501_0KG	2011	
	2509	Magnetbahn GmbH(2)	S_H12509_0EG	2011	
	3301	Fahrzeugtechnik	S_H13301_0EG	2011	rausnehmen da Unterzähler wichtig, Ersetzen durch S_V03301_000
	3302	Thermodynamik	S_H13302_0EG	2011	
	3302	Fahrzeugtechnik	S_H13302_0KG	2011	
	3302	Thermodynamik Versuchsstand 3	S_U13302_0EG	2012	in 2011 (Versuch)
	3303	Landmaschinen	S_H13303_0EG	2011	für 2011, ab 2016 ersetzen durch S_V03303_000
	3303	Landmaschinen	S_H23303_0EG	2011	fällt weg für 2016
	3303	BLB	S_U13303_BLB	2016	für 2016 - Profil 2017 ab 2020
	3303	[illegible]	S_U13303_0KG	2011	[illegible]
	3308	Halle Verbrennungskraftmaschinen	S_U13308_0EG	2015	in 2011 (Versuch)
	3310	Verfügungsgebäude	S_H13310_0KG	2011	
	3314	Verfahrenstechnik	S_H13314_0KG	2011	ersetzen durch S_V03314_000
	3315	Technische Chemie	S_H13315_0KG	2011	
	3315	Technische Chemie	S_H23315_0KG	2011	
	3315	Technische Chemie	S_H33315_0KG	2011	kein Verbrauch
	3317	Werkstoffkunde	S_H13317_0KG	2011	
	3317	Werkstoffkunde	S_H23317_0KG	2011	
	3317	Werkstoffkunde	S_H33317_0KG	2011	
	3317	Werkstoffkunde	S_H43317_0KG	2011	
	3322	Brennstofftechnik	S_H13322_0KG	2011	Ersetzen durch S_V03322_NEU=S_H13322_0KG - S_U13420_0KG
	3322	Brennstofftechnik	S_H23322_0KG	2011	immer 0???
	3324	Fachbereich 10	S_H13324_0KG	2011	Anpassung mit PV S_U13324_PVA (nur 2016)
	3326	CIM	S_H13326_0KG	2011	Anpassung: - S_U33326_TKS + S_U_13326_0KG + S_U_23326_0KG (nur 2016)
	3326	CIM Elektrotankstelle 1	S_U33326_TKS	2013	TKA (laut Plan) -> zu EMOB
	3326	CIM Elektrotankstelle 2	S_U43326_TKS	2011	TKA (laut Plan) -> immer 0
	3328	Schallmesshaus	S_H13328_0EG	2011	
	3329	Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik (PVZ)	S_V03329_000	2017	Summe von S_H13329_0EG + S_H23329_0EG (Deaktiviert im 2017)
	3330	Studierendenhaus FK4	S_U13330_0EG	2017	Deaktiviert im 2017
	3401 - 3403	Haus der Elektrotechnik (BS8)	S_H13402_0KG	2011	Anpassen mit S_U33402_PVA (nur 2016)
	3402	Elektrische Institute	S_U13402_000	2011	da Unterzähler
	3402	Elektrische Institute	S_U23402_000	2011	da Unterzähler
	3403	Elektrische Institute	S_U13403_0EG	2014	da Unterzähler
	3403	Elektrische Institute	S_U23403_0KG	2014	da Unterzähler
	3403	Elektrische Institute	S_U33403_0KG	2014	da Unterzähler
	3404	Rechenzentrum	S_H13404_0KG	2011	
	3406	Fernwärmeübergabe	S_U13406_1EG	2011	
	3420	Sportzentrum	S_U13420_0KG	2011	
			Nord		
Nord	1301	Institute Geistenswissenschaft	S_H11301_0KG	2011	
	1325	Hochfrequenztechnik	S_U11325_0KG	2011	
	1327	Bibliothek	S_H11327_0KG	2011	
	1327	Gauß IT	S_H21327_0KG	2011	ersetzen durch S_V01327_GIZ
	1327	Bibliothek	S_U11327_0KG	2011	da Unterzähler
	1328	Seminargebäude	S_H11328_0KG	2011	ersetzen durch S_V01328_000
	1328	Seminargebäude	S_H21328_0KG	2011	
	1328	Seminargebäude	S_H31328_0KG	2011	
	1404	Naturwissenschaft	S_U11404_0KG	2011	
	1405	Sporthalle	S_U11405_0EG	2011	
	1407	Seminargebäude	S_U11407_0KG	2011	ersetzen durch S_V01407_000
	1409	Hörsaalgebäude	S_U11409_0EG	2011	
	1411	Mehrzweckgebäude	S_U11411_0KG	2011	
	1425	Cafeteria	S_U11425_0KG	2011	

Abbildung 207 Übersicht Verbraucher

16.2.5 Übersicht elektrische Energiebilanzen Teil I

Tabelle 56 Übersicht elektrische Energiebilanzen Teil I

Campus	Jahr	Einspeisung [kWh]	Erzeugung [kWh]	Last [kWh]	Verluste [kWh]
Zentral	2011	14.238	301	14.197	343
	2016	11.151	341	11.142	351
	2017	10.517	414	10.589	343
	2020	12.322	451	12.419	355
	2030	10.109	746	10.517	338
	2050	9.938	746	10.356	328
Ost	2011	16.784	-	16.253	530
	2016	15.316	53	14.841	528
	2017	14.953	48	14.473	529
	2020	14.534	329	14.341	522
	2030	13.180	878	13.545	513
	2050	11.142	1.311	11.951	501
Nord	2011	2.085	-	1.970	116
	2016	1.980	-	1.895	85
	2017	1.816	-	1.744	73
	2020	1.873	-	1.773	100
	2030	1.443	312	1.675	80
	2050	1.078	469	1.478	70
Gesamt	2011	33.107	301	32.421	116
	2016	28.447	394	27.878	964
	2017	27.287	462	26.805	945
	2020	28.729	781	28.534	977
	2030	24.731	1.936	25.737	932
	2050	22.158	2.526	23.785	900

16.2.6 Übersicht elektrische Energiebilanzen Teil II

Tabelle 57 Übersicht Stromerzeugung der Campus-Areale

Monate	Stromerzeugung [kWh]											
	PVA			BHKW			Windkraftanlage			gesamt		
	2011	2016	2017	2011	2016	2017	2011	2016	2017	2011	2016	2017
Januar	4,20	1,01	1,59	47,18	28,76	48,96	0,00	0,02	0,00	51,38	29,79	50,55
Februar	3,87	3,22	2,31	42,78	23,05	44,20	0,00	0,05	0,00	46,64	26,32	46,51
März	4,04	5,54	6,07	47,21	48,87	42,43	0,00	0,01	0,00	51,25	54,43	48,50
April	3,80	10,23	8,55	21,09	45,50	45,42	0,00	0,01	0,03	24,89	55,74	54,00
Mai	3,96	12,50	10,72	11,23	15,08	24,86	0,00	0,00	0,01	15,19	27,58	35,59
Juni	3,45	11,23	11,53	0,00	0,00	10,63	0,00	0,00	0,02	3,45	11,23	22,18
Juli	3,89	11,71	10,09	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,01	3,89	11,71	10,93
August	3,95	10,89	9,22	0,00	0,00	3,15	0,00	0,00	0,01	3,95	10,89	12,38
September	3,69	8,43	6,33	0,00	8,62	36,11	0,00	0,00	0,02	3,69	17,05	42,45
Oktober	3,85	3,23	4,21	37,95	48,27	42,82	0,00	0,00	0,04	41,80	51,51	47,07
November	3,81	1,89	1,46	45,91	47,16	46,53	0,00	0,00	0,02	49,72	49,04	48,01
Dezember	3,51	1,41	0,84	47,31	49,28	42,56	0,00	0,00	0,05	50,82	50,69	43,44

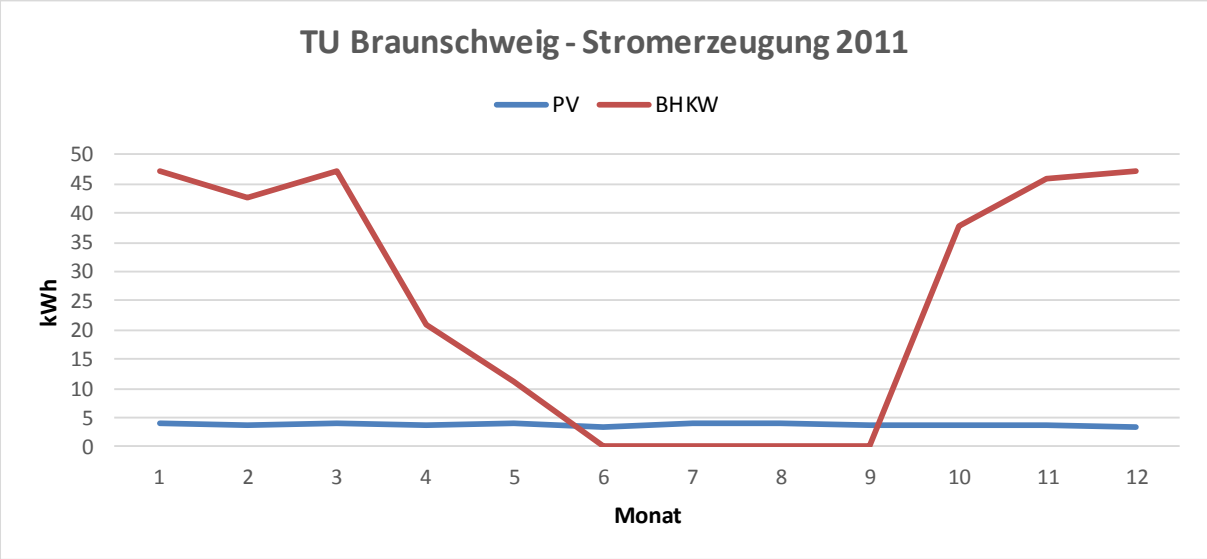


Abbildung 208 TU Braunschweig - Stromerzeugung 2011

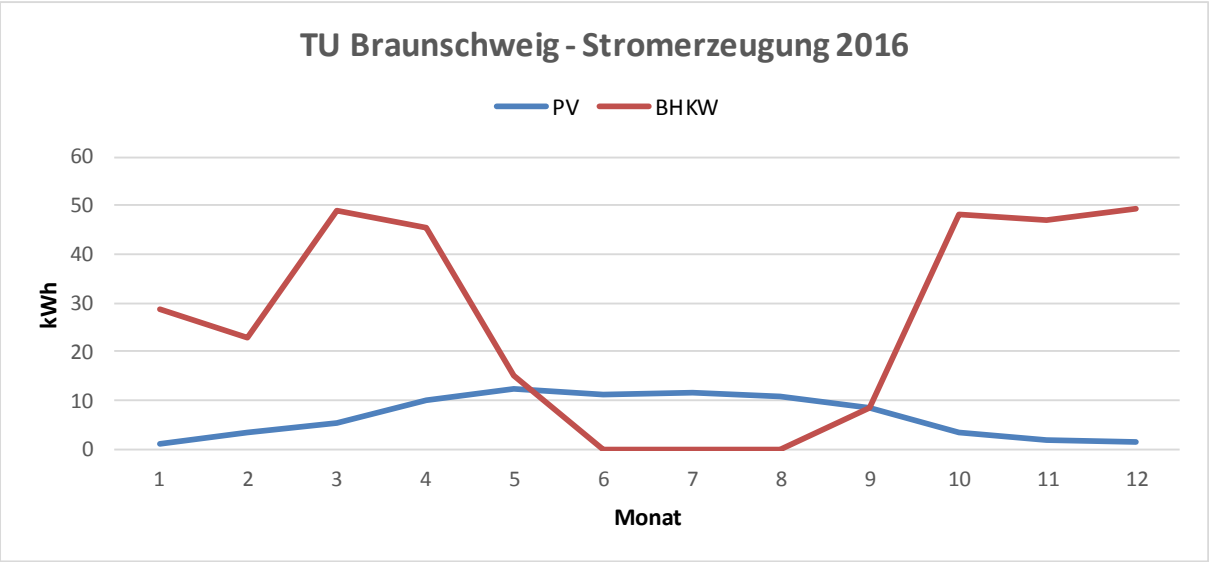


Abbildung 209 TU Braunschweig - Stromerzeugung 2016

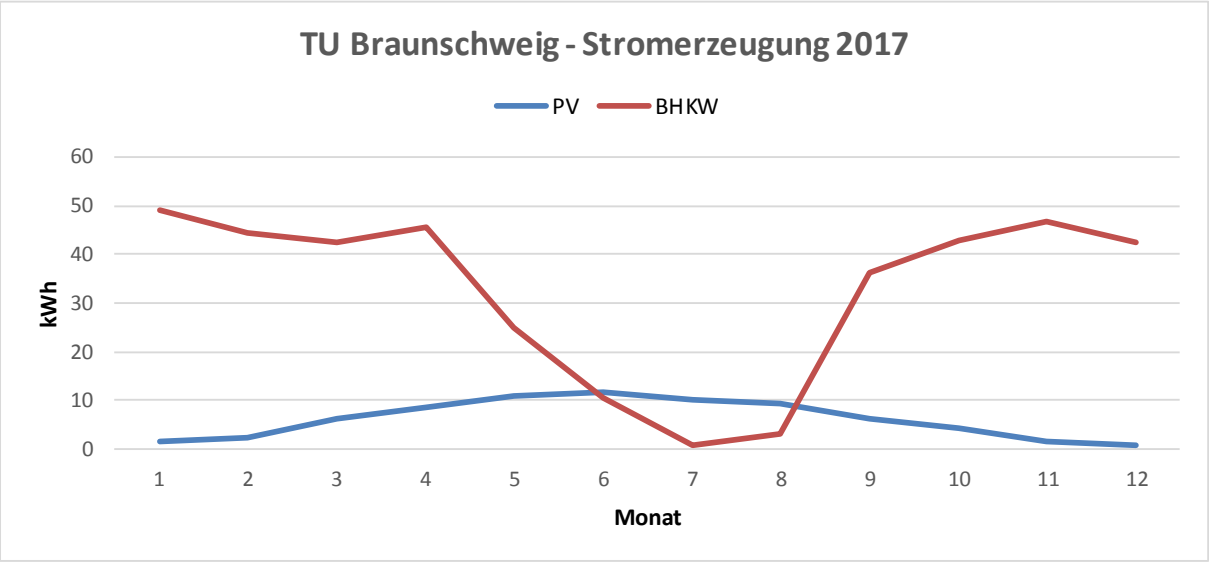


Abbildung 210 TU Braunschweig - Stromerzeugung 2017

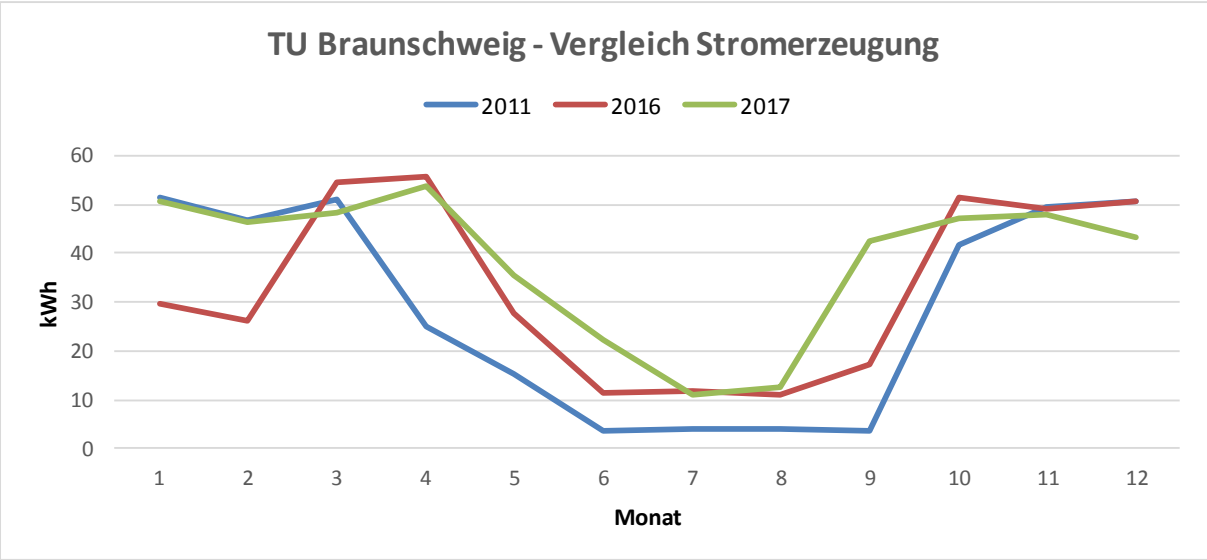


Abbildung 211 TU Braunschweig - Stromerzeugung Vergleich 2011, 2016 und 2017

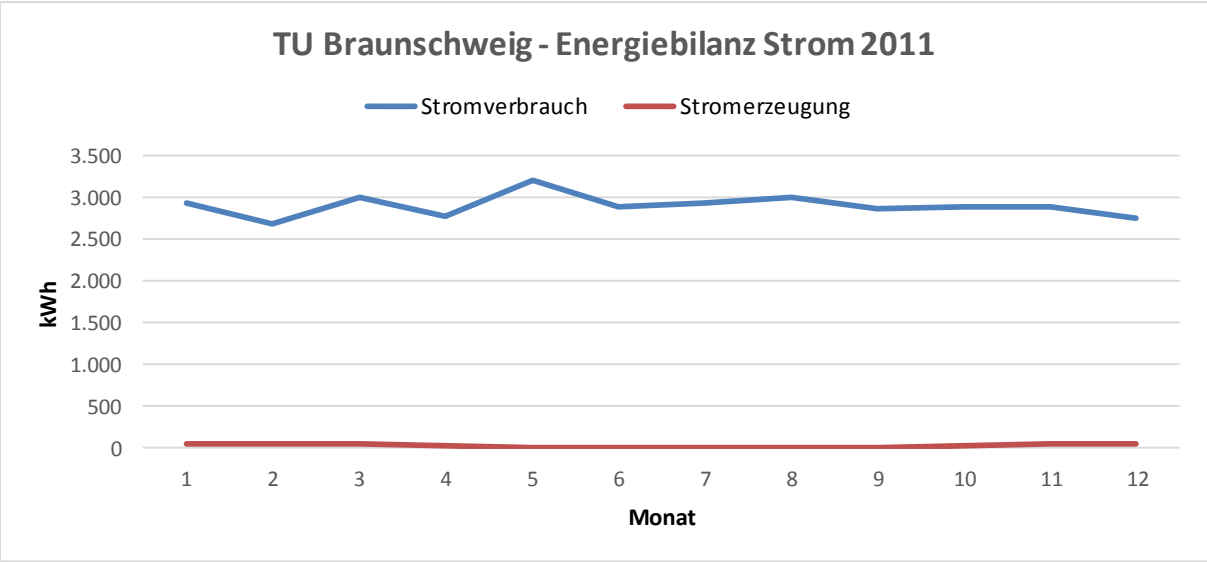


Abbildung 212 TU Braunschweig - Energiebilanz Strom 2011

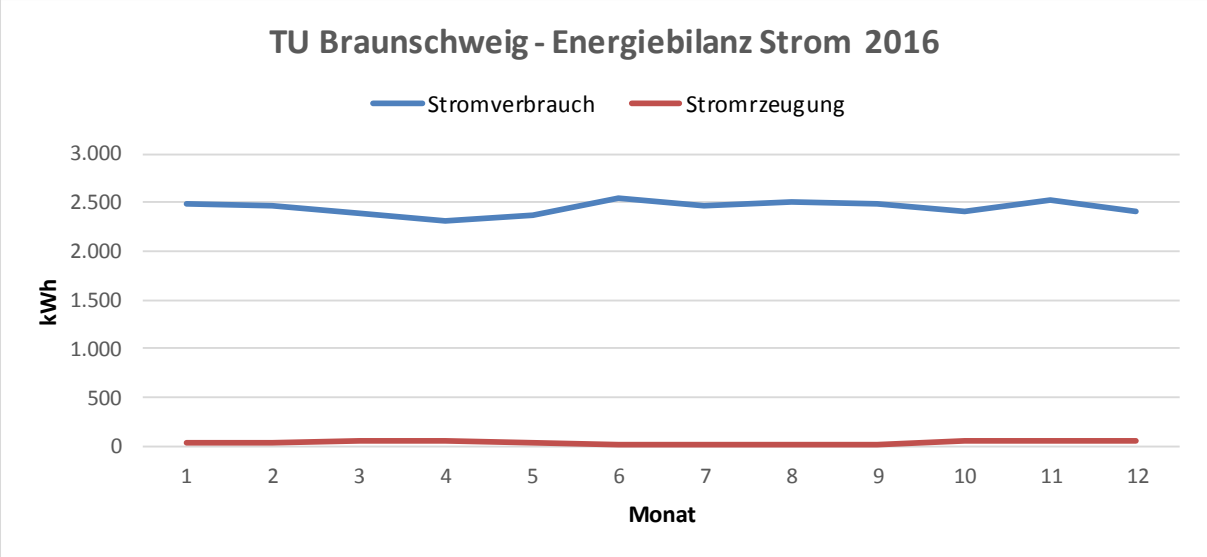


Abbildung 213 TU Braunschweig - Energiebilanz Strom 2016

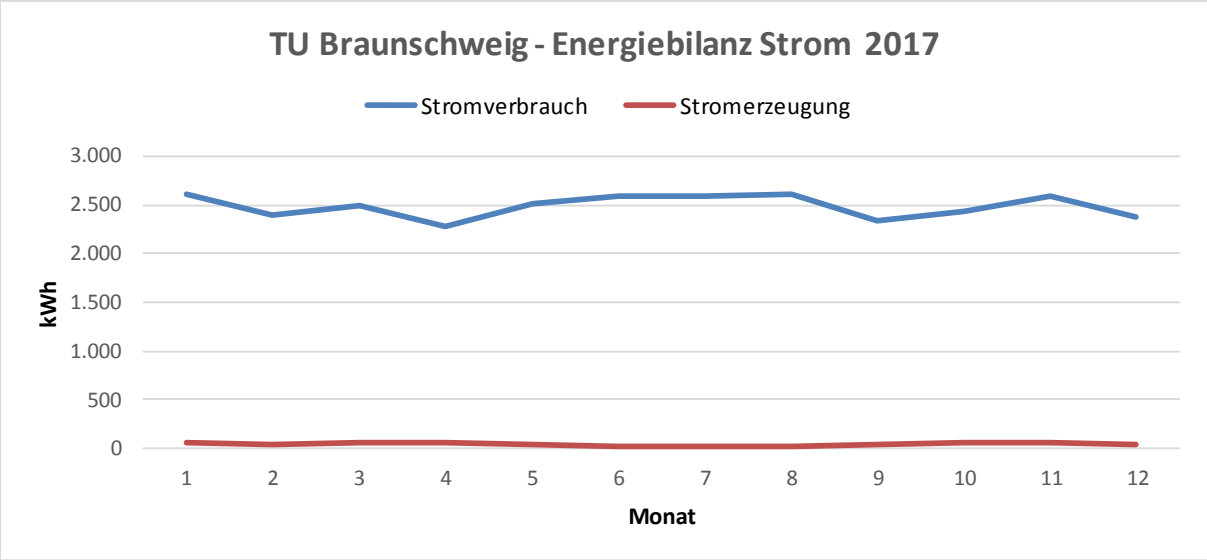


Abbildung 214 TU Braunschweig - Energiebilanz Strom 2017

Tabelle 58 Übersicht Stromverbrauch der Campus-Areale

Monate	Stromverbrauch [kWh]											
	Zentral			Ost			Nord			gesamt		
	2011	2016	2017	2011	2016	2017	2011	2016	2017	2011	2016	2017
Januar	1.214,24	981,87	980,34	1.525,45	1.340,31	1.431,64	198,71	175,62	188,56	2.938,40	2.497,80	2.600,55
Februar	1.090,55	942,48	897,12	1.435,53	1.355,04	1.330,24	176,65	163,22	167,06	2.702,73	2.460,73	2.394,42
März	1.196,80	908,57	952,87	1.611,58	1.313,28	1.377,96	195,60	171,61	158,31	3.003,97	2.393,46	2.489,14
April	1.149,68	897,54	840,88	1.427,56	1.224,88	1.268,41	203,01	183,25	160,08	2.780,25	2.305,68	2.269,37
Mai	1.249,60	965,66	977,84	1.756,57	1.221,54	1.385,14	213,02	184,05	157,24	3.219,19	2.371,25	2.520,23
Juni	1.220,39	1.034,64	981,40	1.477,82	1.333,75	1.460,85	205,59	180,80	152,92	2.903,80	2.549,19	2.595,17
Juli	1.257,71	1.038,45	1.020,92	1.465,73	1.251,31	1.425,11	213,17	182,61	151,85	2.936,61	2.472,37	2.597,89
August	1.266,40	1.042,66	1.019,27	1.511,50	1.291,06	1.432,14	221,94	179,18	150,85	2.999,84	2.512,90	2.602,26
September	1.172,50	993,83	884,69	1.484,10	1.328,81	1.308,84	209,81	169,55	148,74	2.866,41	2.492,19	2.342,27
Oktober	1.123,73	927,40	919,09	1.553,05	1.287,98	1.359,19	211,76	186,89	160,14	2.888,53	2.402,27	2.438,42
November	1.165,71	976,14	966,40	1.531,40	1.368,03	1.450,39	204,17	191,26	165,20	2.901,27	2.535,43	2.581,99
Dezember	1.108,85	884,55	882,15	1.458,50	1.338,27	1.341,01	197,54	180,69	152,32	2.764,89	2.403,51	2.375,48

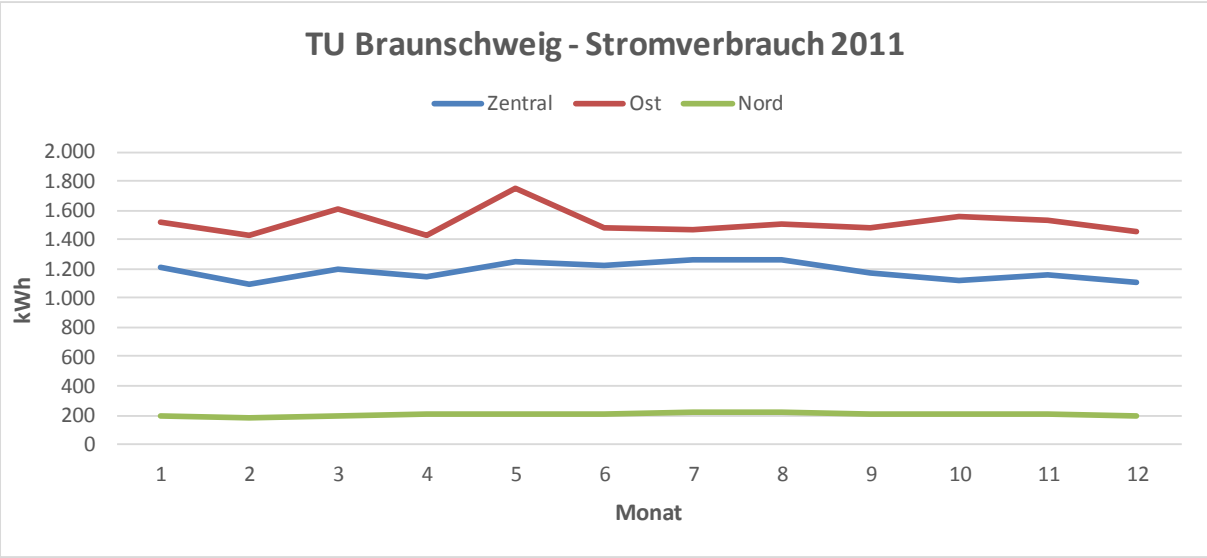


Abbildung 215 TU Braunschweig - Stromverbrauch 2011

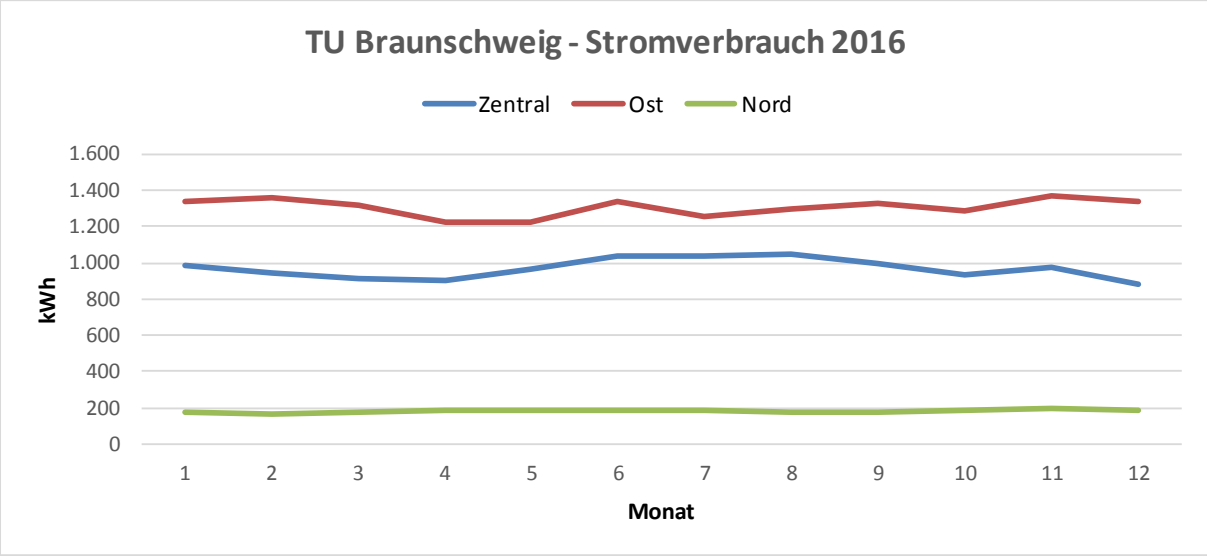


Abbildung 216 TU Braunschweig - Stromverbrauch 2016

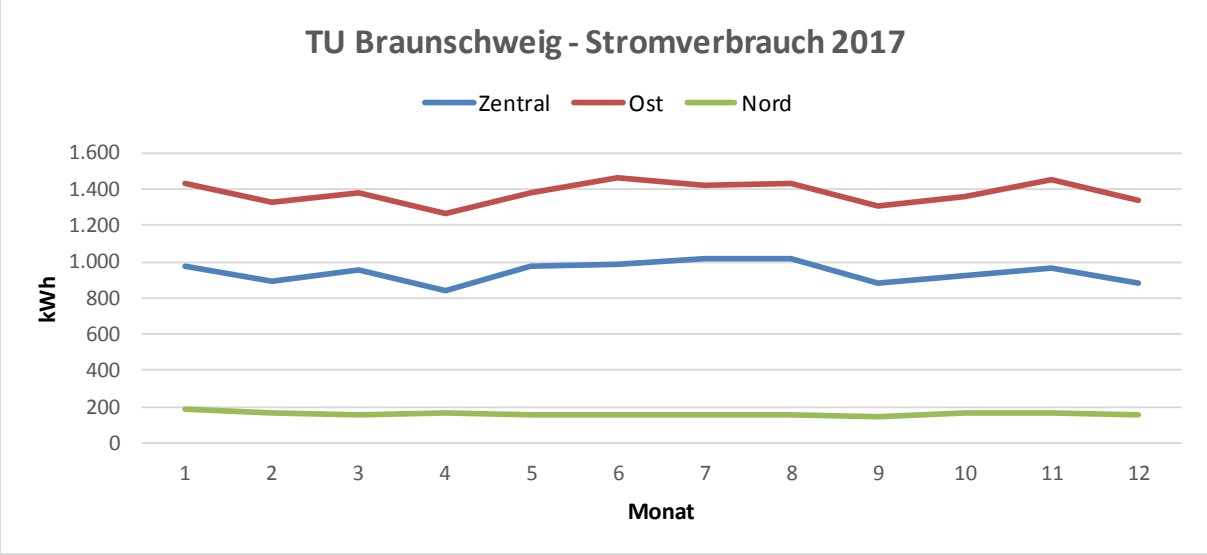


Abbildung 217 TU Braunschweig - Stromverbrauch 2017

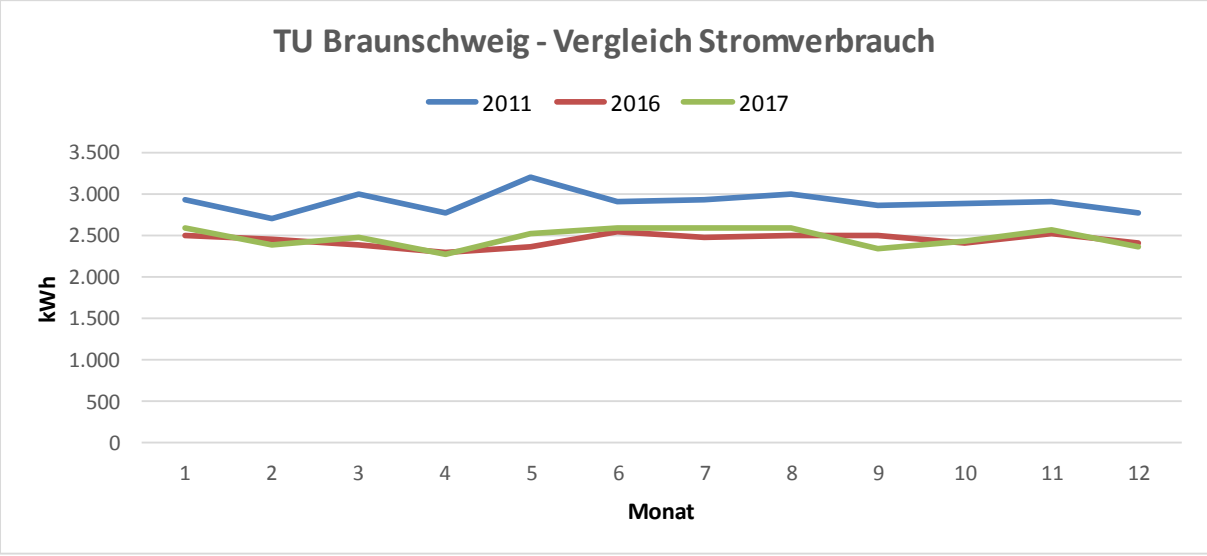


Abbildung 218 TU Braunschweig - Vergleich Stromverbrauch 2011, 2016 und 2017

16.2.7 Szenario Elektromobilität Teil I

Tabelle 59 Übersicht Szenario Elektromobilität Teil I

	Übersicht										Transformator Auslastung 2017 ohne Reserve																		Transformator Betrieb 2017						
											T1		T2		T3		T4		T5		T6		T8		T9		ges		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T8	T9
	Gebnr	SS	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T8	T9	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø								
Zentral	4304	A13	0,63	0,63							52,59%	23,18%	52,59%	23,18%													52,59%	23,18%	0,63	0,63						
	4203	A4	0,63	0,63							48,57%	18,70%	48,57%	18,70%													48,57%	18,70%	0,63	0,63						
	4269	A14	0,63	0,63							43,08%	24,98%	43,08%	24,98%													43,08%	24,98%	0,63	0,63						
	4225	A2	0,40	0,40									29,66%	11,51%													29,66%	11,51%		0,40						
	3205	A3	0,40								55,75%	19,16%															55,75%	19,16%	0,40							
	3210	AX	0,63	0,63							15,11%	8,81%	15,11%	8,81%													15,11%	8,81%	0,63	0,63						
	4262	A6	0,25								15,07%	4,34%															15,07%	4,34%	0,25							
	4204	A5	2,50	2,50							37,83%	15,62%															37,83%	15,62%	2,50							
	4204	A7	0,36	0,36	0,50						42,97%	16,90%	44,11%	17,32%	42,45%	16,70%											43,09%	16,94%	0,36	0,36	0,50					
	4103	A8	0,63	0,40							36,75%	8,00%															36,75%	8,00%	0,63							
	4101	A9	0,40	0,40							15,87%	9,08%	15,87%	9,08%													15,87%	9,08%	0,40	0,40						
	4214	A10	0,40	0,40							2,46%	1,63%	2,48%	1,65%													2,47%	1,64%	0,40	0,40						
	4206	A11	0,16	0,10																																
	4102	A12	0,20	0,50	0,40	0,20							12,10%	4,36%	10,00%	3,55%											11,17%	3,89%		0,50	0,40					
Ost	3404	N17	0,63	0,10							21,46%	13,02%	21,46%	13,01%													21,46%	13,02%	0,63	0,10						
	3331	N3	0,16	0,63	0,63						8,55%	1,55%	8,55%	1,55%													8,55%	1,55%	0,16	0,63						
	3402	N18	0,63	0,63	0,63	0,63	0,40	0,63	0,63	0,25	14,38%	8,18%	14,38%	8,18%	14,38%	8,18%	14,38%	8,18%	15,02%	8,55%	14,38%	8,18%		15,06%	8,58%		14,49%	8,25%	0,63	0,63	0,63	0,63	0,40	0,63		0,25
	3315	N2	0,25	0,25							21,52%	7,24%															21,52%	7,24%	0,25							
	3301	N4	0,63	0,40	0,63						22,01%	7,96%	22,30%	8,04%	22,01%	7,96%											22,08%	7,98%	0,63	0,40	0,63					
	3322	N7	0,25	0,25							6,64%	2,22%	6,64%	2,22%													6,64%	2,22%	0,25	0,25						
	3314	N8	0,13	0,25							27,65%	8,16%	27,40%	8,00%													27,48%	8,05%	0,13	0,25						
	3311	N5	0,63	0,63									57,86%	18,58%													57,86%	18,58%		0,63						
	3317	N6	0,63	0,40	0,63	0,63					22,84%	12,81%			22,84%	12,81%	22,84%	12,81%									22,84%	12,81%	0,63		0,63	0,63				
	2414	N10	0,40	0,25							24,76%	10,77%	24,10%	10,50%													24,51%	10,67%	0,40	0,25						
	2415	N15	0,63	0,63							48,55%	21,42%															48,55%	21,42%	0,63							
	2423	N16	0,40	0,63									69,86%	35,49%													69,86%	35,49%		0,63						
	1509	N19	0,40								65,60%	16,64%															65,60%	16,64%	0,40							
	1502	N13	0,40	0,63									38,78%	5,55%													38,78%	5,55%		0,63						
	2410	N12	0,40	0,40							39,17%	10,35%															39,17%	10,35%	0,40							
	2404	N21	0,63	0,63							67,98%	2,05%	67,98%	2,05%													67,98%	2,05%	0,63	0,63						
	2413	N11	0,63	0,63							65,98%	19,84%	41,52%	12,50%													53,75%	16,17%	0,63	0,63						
	3329	NX	0,80	0,80									0,24%	0,24%													0,24%	0,24%		0,80						
	2430	N20	0,63	0,63							47,27%	8,74%	47,27%	8,74%													47,27%	8,74%	0,63	0,63						
Nord	1302	CN1	0,16	0,25									98,21%	53,21%													98,21%	53,21%		0,25						
	1331	CN2	0,63								15,62%	10,62%															15,62%	10,62%	0,63							
	1409	CN3	0,63								23,70%	6,91%															23,70%	6,91%	0,63							

16.2.8 Szenario Elektromobilität Teil II

Tabelle 60 Übersicht Szenario Elektromobilität Teil II

	Transformator Auslastung 2017 mit Reserve																		Berechnung Anzahl Ladesäulen (ohne Reserve)								Berechnung Anzahl Ladesäulen (mit Reserve)							
	T1		T2		T3		T4		T5		T6		T8		T9		ges		3,7 kW		11 kW		22 kW		44 kW		3,7 kW		11 kW		22 kW		44 kW	
	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max	ø	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%	max 130%	ø 65%
Zentral	52,58%	23,18%	52,58%	23,18%													52,58%	23,18%	264	142	89	48	44	24	22	12	264	142	89	48	44	24	22	12
	48,57%	18,70%	48,57%	18,70%													48,57%	18,70%	277	158	93	53	47	27	23	13	277	158	93	53	47	27	23	13
	43,08%	24,98%	43,08%	24,98%													43,08%	24,98%	296	136	100	46	50	23	25	11	296	136	100	46	50	23	25	11
	14,89%	5,87%	14,89%	5,87%													14,89%	5,87%	108	58	36	19	18	10	9	5	249	128	84	43	42	22	21	11
	55,75%	19,16%															55,75%	19,16%	80	50	27	17	14	8	7	4	80	50	27	17	14	8	7	4
	15,11%	8,81%	15,11%	8,81%													15,11%	8,81%	391	191	132	64	66	32	33	16	391	191	132	64	66	32	33	16
	15,07%	4,34%															15,07%	4,34%	78	41	26	14	13	7	7	3	78	41	26	14	13	7	7	3
	18,93%	8,07%	18,93%	8,07%													18,93%	8,07%	623	334	209	112	105	56	52	28	1501	769	505	259	252	129	126	65
	42,74%	16,86%	42,23%	16,66%	43,88%	17,27%											43,06%	16,97%	287	158	96	53	48	27	24	13	287	158	96	53	48	27	24	13
	22,34%	5,29%	23,15%	5,53%													22,65%	5,38%	159	97	53	33	27	16	13	8	299	166	101	56	50	28	25	14
	15,79%	9,06%	15,79%	9,06%													15,79%	9,06%	247	121	83	41	42	20	21	10	247	121	83	41	42	20	21	10
	2,46%	1,64%	2,48%	1,65%													2,47%	1,65%	276	137	93	46	46	23	23	12	276	137	93	46	46	23	23	12
																			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8,91%	3,45%	10,18%	3,71%	8,44%	3,19%	7,31%	3,85%									9,01%	3,53%	289	149	97	50	49	25	24	13	425	216	143	73	71	36	36	18
																			2117	1110	712	373	356	187	178	93	3136	1615	1055	543	527	272	264	136
Ost	21,46%	13,02%	21,46%	13,01%													21,46%	13,02%	214	103	72	34	36	14	18	9	214	103	72	34	36	17	18	9
	4,85%	0,97%	4,85%	0,97%	4,85%	0,97%											4,85%	0,97%	259	135	87	46	44	17	22	11	480	246	162	83	81	41	40	21
	12,37%	7,06%	12,37%	7,06%	12,37%	7,06%	12,37%	7,06%	12,92%	7,37%	12,37%	7,06%	12,37%	7,06%	12,96%	7,40%	12,45%	7,11%	1186	583	399	196	200	69	100	49	1407	693	473	233	237	117	118	58
	10,87%	3,77%	10,87%	3,77%													10,87%	3,77%	73	39	25	13	12	6	6	3	161	83	54	28	27	14	14	7
	22,01%	7,96%	22,30%	8,04%	22,01%	7,96%											22,08%	7,98%	484	256	163	86	81	35	41	22	484	256	163	86	81	43	41	22
	6,64%	2,22%	6,64%	2,22%													6,64%	2,22%	167	85	56	29	28	13	14	7	167	85	56	29	28	14	14	7
	27,65%	8,16%	27,40%	8,00%													27,48%	8,05%	104	58	35	19	17	10	9	5	104	58	35	19	17	10	9	5
	28,76%	9,37%	28,76%	9,37%													28,76%	9,37%	123	79	41	27	21	14	10	7	345	189	116	64	58	32	29	16
	18,68%	10,50%	19,82%	11,15%	18,68%	10,50%	18,68%	10,50%									18,88%	10,61%	547	267	184	90	92	41	46	22	688	337	231	113	116	57	58	28
	24,76%	10,77%	24,10%	10,50%													24,51%	10,67%	185	95	62	32	31	17	16	8	185	95	62	32	31	16	16	8
	24,13%	10,77%	24,13%	10,77%													24,13%	10,77%	139	74	47	25	23	16	12	6	361	185	121	62	61	31	30	16
	43,83%	22,40%	41,61%	21,27%													42,47%	21,71%	102	50	34	17	17	18	9	4	244	121	82	41	41	20	20	10
	65,60%	16,64%															65,60%	16,64%	70	52	23	18	12	12	6	4	70	52	23	18	12	9	6	4
	23,98%	3,54%	23,55%	3,47%													23,72%	3,50%	155	101	52	34	26	18	13	9	296	171	100	58	50	29	25	14
	19,55%	5,30%	19,55%	5,30%													19,55%	5,30%	98	59	33	20	17	12	8	5	239	129	80	43	40	22	20	11
	67,98%	2,05%	67,98%	2,05%													67,98%	2,05%	211	214	71	72	36	30	18	18	211	214	71	72	36	36	18	18
	65,98%	19,84%	41,52%	12,50%													53,75%	16,17%	260	166	87	56	44	36	22	14	260	166	87	56	44	28	22	14
	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%													0,24%	0,24%	281	140	94	47	47	21	24	12	561	280	189	94	94	47	47	24
	47,27%	8,74%	47,27%	8,74%													47,27%	8,74%	282	192	95	64	47	33	24	16	282	192	95	64	47	32	24	16
																			4941	2749	1662	925	831	431	415	231	6758	3654	2273	1229	1137	615	568	307
Nord	66,56%	31,60%	69,93%	33,16%													42,47%	20,16%	21	8	7	3	4	1	2	1	97	50	33	17	16	8	8	4
	15,62%	10,62%															6,66%	4,53%	195	93	66	31	33	16	16	8	210	103	71	35	35	17	18	9
	23,70%	6,91%															9,65%	2,81%	181	99	61	33	30	17	15	8	205	106	69	36	34	18	17	9
	397	199	134	67	67	34	33	17	512	259	172	87	86	43	43	22			397	199	134	67	67	34	33	17	512	259	172	87	86	43	43	22

16.3 Städtebauliche Entwicklung

16.3.1 Masterplan

16.3.2 CoLiving Campus

Die Anlage hat 492 Seiten und ist dem digitalen Dokument zu entnehmen.

16.3.3 Kriterienkatalog

Die Anlage hat 65 Seiten und ist dem digitalen Dokument zu entnehmen.

16.3.4 Projektsammlung

Die Anlage hat 305 Seiten und ist dem digitalen Dokument zu entnehmen.