

Energiewende in Forschungszentren – Sektorkopplung, Dynamisierung, Dekarbonisierung und Digitalisierung

LEITFADEN
05

Forschungszentren stehen vor der Herausforderung, exzellente Forschung zu ermöglichen und gleichzeitig klimagerechte Infrastrukturen zu etablieren. Eine zentrale Strategie ist die Optimierung der vorhandenen Energiesysteme. Sie beinhaltet das Zusammenspiel von Energieversorgung, -verteilung, -speicherung und -nutzung. Die vorliegende Arbeitshilfe gibt Anregungen, wie komplexe Energiesysteme in Forschungszentren möglichst energieeffizient und klimagerecht gestaltet werden können. Neben zahlreichen praktischen Beispielen aus verschiedenen Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft werden insbesondere Aktivitäten und Erkenntnisse des Reallabors „Living Lab Energy Campus (LLEC)“ am Forschungszentrum Jülich dargestellt. Durch die Integration innovativer Ansätze aus der Energieforschung in den realen Betrieb wird hier das Energiesystem der Zukunft erprobt. Ziel der Arbeitshilfe ist es, die in den Forschungszentren verantwortlichen Akteure zu unterstützen, aus den vielfältigen Möglichkeiten eine individuelle auf die jeweiligen lokalen Rahmenbedingungen und Nutzerbedarfen abgestimmte Energiestrategie zu entwickeln, die mögliche Verknüpfungen zu blau-grünen Infrastrukturen berücksichtigt und idealerweise in eine übergreifende Campusmasterplanung eingebettet ist. Diese Aufgabe erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Architekten, Ingenieuren, Energiemanagern, Grünpflegern und Nachhaltigkeitskoordinatoren.

INHALT

1. Transformation der Energiesysteme - eine Herausforderung, viele Ansätze	3
2. Eigenständige Energieproduktion	3
3. Energierückgewinnung und -verteilung	6
4. Optimierung der Anlagentechnik und Betriebsprozesse	7
5. Energie speichern	10
6. Strategische Energiebeschaffung	13
7. Energie bereitstellen - E-Mobilität/Ladeinfrastrukturen	15
8. Blau-Grün-Rote Infrastrukturen	16
9. Perspektiven aus dem Living Lab Energy Campus	17
10. Schlussbemerkung	20

Anlage 1: Vollständige Bezeichnungen der Helmholtz-Zentren

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Energiewende in Forschungszentren – Sektorkopplung, Dynamisierung, Dekarbonisierung und Digitalisierung

Martin Wirtz, Stefan Kasselmann, *Forschungszentrum Jülich*, Michael Hinz, Christian Langfeld, *Helmholtz Kompetenznetzwerk Klimagerecht Bauen*

1. Transformation der Energiesysteme – eine Herausforderung, viele Ansätze

Die Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft betreiben häufig Großforschungsanlagen und besitzen in der Regel individuelle, energieintensive Forschungsinfrastrukturen. Sie stehen vor der Herausforderung, exzellente Forschung zu ermöglichen und gleichzeitig energieeffiziente und klimagerechte Energiesysteme zu etablieren. Die vorliegende Arbeitshilfe stellt Praxisbeispiele vor und gibt allgemeine Empfehlungen zur Gestaltung der Energiewende an Forschungszentren.

Die Durchführung bestimmter Transformationsmaßnahmen ist häufig mit einer erheblichen Planungs- und Umsetzungsdauer verbunden. Es ist damit zu rechnen, dass im laufenden Prozess neue technische und regulatorische Entwicklungen eintreten, durch welche eine anvisierte Vorgehensweise überholt oder im schlimmsten Falle sogar konterkariert werden kann. Es ist daher wichtig, sich gerade bei derart grundlegenden Transformationen in der technischen Infrastruktur auch mit der Frage zu befassen, in welche Richtung Energiesysteme sich insgesamt bewegen könnten.

Die Aktivitäten und Erkenntnisse des Reallabors „Living Lab Energy Campus“ (LLEC) am FZJ können hier Orientierung geben. Im LLEC werden innovative Ansätze aus der Energieforschung im laufenden Betrieb des Campus umgesetzt und miteinander vernetzt. Das Projekt vermittelt damit einen möglichst reali-

tätsnahen Eindruck über Chancen und Herausforderungen zukünftiger Energiesysteme in Forschungszentren. Im Fokus stehen die Themen Sektorkopplung, Dynamisierung, Dekarbonisierung und Digitalisierung. Aber auch an anderen Helmholtz-Zentren wurden bereits innovative Maßnahmen zur Energieversorgung umgesetzt oder sind in Planung.

2. Eigenständige Energieproduktion

Viele Helmholtz-Zentren erzeugen Teile ihres Energiebedarfs durch interne Energiezentralen und Anlagen. Folgende Technologien werden genutzt: Photovoltaik, Geothermie, Wärmepumpen und die Kopplung von Kraft, Wärme und Kälte. Windkraft wird derzeit nicht genutzt, da die räumlichen Voraussetzungen an den Standorten meist fehlen und Schwingungen durch Windenergieanlagen sensible Forschungsinfrastrukturen (u.a. Elektronenmikroskopie) stören können. Kleinere, dezentrale Anlagen könnten jedoch perspektivisch eine Option darstellen. Nachfolgend werden Initiativen und konkrete Beispiele für die eigenständige Energieproduktion vorgestellt.

Photovoltaik (PV)

Zahlreiche Helmholtz-Zentren haben PV-Anlagen mit bis zu 3.000 MW installiert. Zu ihnen zählen u.a. AWI, DLR, DZNE, Helmholtz Munich, HZI, KIT, MDC und UFZ. Das DLR plant, PV-Anlagen zur Eigenstromproduktion bis zur Höhe des jährlichen Eigenverbrauchs (80 GWh) zu installieren und diese Maßnahme mit 130 Mio. € zu finanzieren.¹ Aufgrund spezifischer

¹ <https://www.dlr.de/de/das-dlr/ueber-uns/nachhaltigkeit/gelebte-nachhaltigkeit-praxisbeispiele/elektrische-eigenversorgung-des-dlr-photovoltaikanlagen-an-gebaeuden-und-auf-freiflaechen>



Abb. 1: Das Reallabor für Bauintegrierte PV am HZB in Berlin²

Rahmenbedingungen erwies sich der Netzanschluss der PV-Anlagen häufig als große Herausforderung. Das HKB hat im HKB I Kompakt 05 Handlungsempfehlungen formuliert, die Hemmnisse bei der Inbetriebnahme von PV-Anlagen minimieren können.³

Am FZJ widmet sich ein interdisziplinäres Team aus Wissenschaftlern des Institute of Energy Materials and Devices - Photovoltaik (IMD-3) und des Fachbereichs Intelligent Campus (TB-X) der Erhöhung der Eigenstromproduktion mittels Photovoltaik. Das PV-Potenzial auf dem FZJ-Campus wird unter Berücksichtigung von Kriterien wie Flächengröße, Ausrichtung, Verschattung, Statik, darunterliegende Nutzung und sonstige Rahmenbedingungen (z.B. Arbeitsschutzzvorgaben für die Wartung) systematisch evaluiert. Darauf folgt, gemeinsam mit dem Geschäftsbereich Planen und Bauen eine Priorisierung der zu realisierenden Projekte. Eine Belegung von Dachflächen auf Bestandsgebäuden hat sich dabei als sehr komplex erwiesen, weshalb auch

innovativere Alternativen wie bifaziale PV, Solarcontainer, Floating-PV und Parkplatzüberdachung geprüft und ggf. initiiert werden.

Das DLR veröffentlichte 2024 eine Karte, die aktuelle Luftbilder und Geobasisdaten mithilfe maschinellen Lernens verarbeitet und auf diese Weise für rund 20 Millionen Gebäude in Deutschland Solarenergie-Potenziale ermittelt.⁴ Diese Daten können als erster Anhaltspunkt dienen, sollten aber aufgrund spezifischer lokaler Gegebenheiten überprüft werden.

Das HZB hat 2019 eine Beratungsstelle für Bauintegrierte PV (BAIP) gegründet. Sie ist eng mit der am HZB praktizierten Forschung und Entwicklung zu Photovoltaik verknüpft, die sich mit neuartigen Materialien, leistungsfähigen Bauelementen und Herstellungsprozessen beschäftigt. Neben einem großen Reallabor (Abb. 1) bietet das BAIP umfangreiche Beratungsleistungen an.⁵

² https://www.helmholtz-berlin.de/projects/pvcomb/forschen/living-lab-bipv/index_de.html

³ https://hkb.helmholtz.de/assets/klimagerechtes_bauen/Dokumente/Kompakt/HKB_Kompakt_05_Netzzanschluss_von_PV-Anlagen_in_Helmholtz-Zentren.pdf

⁴ <https://eosolar.dlr.de/#/home>

⁵ <https://www.baip-bipv.de/>

Wärmepumpen

In vielen Zentren werden im Zusammenhang mit Strategien zur Wärmeversorgung Wärmepumpen betrieben. Beispielsweise nutzt das HZDR eine Kombination aus Geothermie und Wärmepumpentechnologie. Mit 40 Erdsonden werden dort über entsprechende Wärmepumpen das Eingangsgebäude, das Betriebsrestaurant und das Hörsaalgebäude wärme- und kälteseitig versorgt. Das FZJ verwendet Wärmepumpen, um die Abwärme des Supercomputers JUWELS für die Wärmeversorgung mehrerer Gebäude zu nutzen (siehe Kapitel 8). Zukünftig ist eine Wärme-Kälte-Kopplung mittels Wärmepumpen geplant (siehe Box).

Am GFZ wird derzeit die Wärmeversorgung von einer Gasheizung auf ein zweistufiges Wärmepumpensystem umgestellt. Statt mit 3.850 MWh Gas wird zukünftig mit 1.280 MWh Strom geheizt. Das DZNE plant für die Wärmeversorgung des Zentrums die Installation einer Hochtemperaturwärmepumpe. Das MDC strebt die Nutzung von Wärmepumpentechnologie zur Optimierung von RLT-Anlagen in einem großen Forschungsgebäude an (siehe Kapitel 4).

Geothermie

Auch Geothermie ist ein wichtiger Baustein für die Energie- und Wärmewende. Forschungsgruppen an GFZ, KIT und UFZ erforschen die technologischen Herausforderungen unterschiedlicher Nutzungsarten geothermischer Energie. Geothermie-Anlagen werden u.a. am HZDR und DZNE genutzt. Das HZDR betreibt eine Geothermie-Anlage mit 350 kW, die zur Wärme- und Kälteversorgung eines Gebäudekomplexes mit rund 5.000 m² Brutto-Grundfläche dient. Sie besteht aus 40 Sonden, die bis in eine Tiefe von 99 Metern reichen. Auf diese Weise konnte eine bergrechtliche Genehmigung vermieden werden, die ab einer Tiefe von 100 Metern erforderlich ist.⁶ Im Winter erfolgt die komplette Gebäudeheizung der zwei angeschlossenen großen Gebäude aus der Geothermie.⁷

FZJ – Wärme-Kälte-Kopplung mittels Wärmepumpe

Im Rahmen eines Energieaudits wurden mehrere Gebäude mit ganzjährigem Wärme- und Kältebedarf identifiziert. Diese werden aktuell durch separate Wärme- und Kältenetze bedient, sollen aber zukünftig zu einem Teil durch Wärme-Kälte-Kopplung mittels Wärmepumpe versorgt werden. Der zeitgleich auftretende Wärme- (ca. 200 kW) und Kältebedarf (ca. 100 kW) kann durch Wärme-Kälte Kopplung deutlich effizienter gedeckt werden, da beide „Seiten“ der Wärmepumpe Nutzenergie darstellen. In einer Variantenanalyse wurde eine Umsetzungsvariante identifiziert, für die Investitionskosten von ca. 600 T€ zu veranschlagen sind und die ein Return-on-Investment (ROI) von 25 % bzw. eine Amortisationsdauer von ca. 4 Jahren ermöglicht. Die Minderung der CO₂-Emissionen beträgt 324 t/a.

Kopplung von Kraft, Wärme und Kälte

Blockheizkraftwerke (BHKW) zeichnen sich durch einen hohen energetischen Gesamtwirkungsgrad von etwa 80-90 % aus, da durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auch die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme genutzt wird. In Forschungszentren werden neben Strom und Wärme häufig große Mengen an Kühlleistungen für Forschungsgebäude, Tierhäuser und Rechenzentren benötigt. Einige Zentren, wie das FZJ und das MDC nutzen einen Teil der durch BHKWs produzierten Wärme mittels Kraft-Wärme-Kältekopplung (KWKK), um mit Hilfe von Absorptionskältemaschinen Kälte zu erzeugen. Der darüber hinaus verbleibende Kältebedarf wird durch elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen gedeckt. Durch die Kopplung von Kraft, Wärme und Kälte (KWKK) konnten die

⁶ <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/b/bergrecht>

⁷ <https://www.hzdr.de/db/Cms?p0Id=59002&pNid=851&pLang=de>

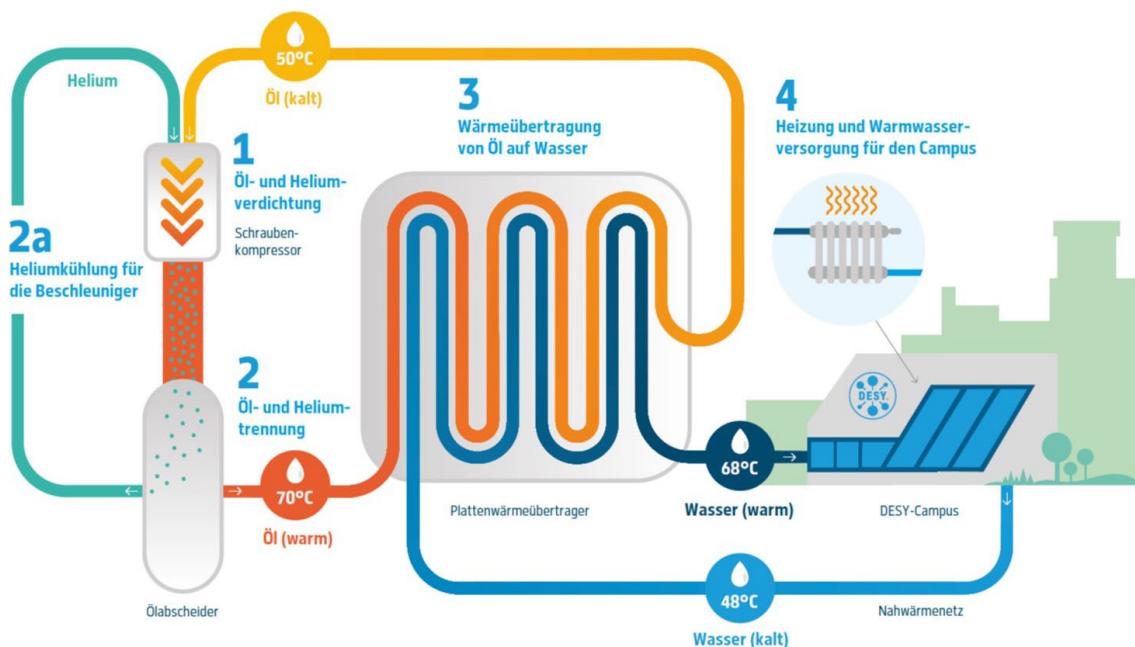


Abb. 2: DESY - Wärmeversorgung aus der Abwärme einer Kryogenik-Anlage (Quelle: DESY)

Zentren zwar ihre CO₂ Emissionen signifikant reduzieren. Gleichwohl stellt die KWKK auf dem Weg zu einer möglichst klimaneutralen Energieversorgung nur eine Übergangstechnologie dar.

Inzwischen wurden die alten BHKWs am MDC durch sogenannte „H2-ready“ BHKWs ersetzt, sodass eine Beimischung von Wasserstoff oder gar ein vollständiger Wechsel grundsätzlich möglich wäre. Allerdings ist eine Versorgung mit Wasserstoff für die meisten Zentren aktuell nicht absehbar.⁸ Mittelfristig strebt das MDC an, BHKWs durch einen Mix aus Energieeinsparmaßnahmen und Nutzung unterschiedlicher erneuerbarer Energiequellen (interne und externe) zu ersetzen.

3. Energierückgewinnung und -verteilung

Neben der Produktion regenerativer Energien sind die effiziente Energierückgewinnung und -verteilung zentrale Strategien zur Optimierung von Energiesystemen - insbesondere in Forschungszentren mit komplexen Infrastrukturen.

Energierückgewinnung

In Helmholtz-Zentren wird häufig die Rückgewinnung thermischer Energie genutzt, um benachbarte Gebäude mit Wärme zu versorgen. Quellen sind beispielsweise Rechenzentren (FZJ, GFZ, GSI), Raumlufttechnische (RLT-)Anlagen (HZI), Druckluft (AWI) oder Brüdendampf (DZNE).

Das DESY nutzt Abwärme, die bei der Kühlung des supraleitenden Teilchenbeschleunigers durch Helium entsteht. Die gewonnene Abwärme hat eine Temperatur von 55 bis 72 °C. Durch den Einbau zweier Wärmeüberträger, die das Kühlssystem der ölgekühlten Schraubenkompressoren mit dem Nahwärmenetz verbinden, lässt sich diese Abwärme für die Beheizung des gesamten DESY-Geländes nutzen (Abb. 2). Seit 2017 erfolgt die Wärmeversorgung durch eine Kombination aus der Abwärme der Kryogenik-Anlage und externer Fernwärme. 2024 konnten durch die Anlage 13 GWh Abwärme zum Heizen von Gebäuden auf dem Campus weiterverwendet werden. Das entspricht ungefähr zwei Dritteln des DESY-Gesamtbedarfs.

⁸ Im Rahmen des Living Lab Energy Campus (LLEC) am Forschungszentrum Jülich soll im Zuge der Wasserstoffforschung anfallender Wasserstoff saisonal gespeichert und in der Energiezentrale des Campus beigemischt werden (s. Abschnitt 8).

Im Forschungszentrum Jülich wurde 2025 der erste europäische Exascale-Supercomputer aufgebaut, welcher Wärme in einer Größenordnung von bis zu 20 MW produziert. Entsprechende Schnittstellen zur Abwärmenutzung sind bereits projektiert. Mit dem Projekt ExaHeat soll eine Abwärme-Zentrale errichtet werden, um zunächst 20 % (3,9 MWp) der Abwärme mittels innovativer Industriewärmepumpen von 41°C auf ca. 90°C anzuheben und in das Nahwärmenetz des Campus einzuspeisen. Dazu sind flankierende Umbau- und Sanierungsmaßnahmen am Netz und an ausgewählten Gebäuden notwendig. Bei konservativer Betrachtung wird die Einspeisung den Gas-Verbrauch um ca. 24 GWh reduzieren und spart damit unter Einbeziehung zusätzlicher Strombedarfe für die Abwärme-Zentrale jährlich etwa 5.000 t CO₂ ein. Mit einer Refinanzierung der Anlage ist in maximal sechs Jahren zu rechnen. Die Anlage wird zudem so gebaut, dass perspektivisch die vollständige Nutzung der Exascale-Abwärme für den gesamten Campus-Wärmebedarf und ggf. externe Nutzer möglich ist.

Energieverteilung

Optimierungspotenziale bei der Energieverteilung ergeben sich in erster Linie durch eine effektive Nutzung der Wärme. Die klimagerechte Transformation der Wärmeversorgung ist jedoch ein komplexer mehrstufiger Prozess, der die Zentren vor zahlreiche technische und organisatorische Herausforderungen stellt. Hierzu gehören die Analyse der spezifischen Ausgangsbedingungen (wie gewachsene Netze, Versorgungsverträge, Nutzerbedarfe) und die Integration von nicht stetig in gleicher Qualität zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energiequellen.

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen oder Abwärme ist häufig mit reduzierten Vorlauftemperaturen und einer Verringerung der übertragbaren Wärmeleistungen verbunden. Es bedarf einer leistungsfähigen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, um im Prozessverlauf

entstandene technische Übergangs- und Zwischenlösungen zu steuern und letztendlich eine zuverlässige und effiziente Wärmeversorgung sicherstellen. Um die Helmholtz-Zentren bei der Entwicklung individueller Planungskonzepte zu unterstützen, hat das HKB einen entsprechenden Leitfaden veröffentlicht.⁹

Das GFZ plant auf dem Campus Telegrafenberg die Etablierung eines kalten Nahwärmenetzes, welches als Wärmequelle die Abwärme eines Großrechners nutzen soll. Die Fertigstellung ist für Ende 2025 anvisiert.

Ein weiteres Beispiel für eine innovative Wärmeversorgung liefert der Reallaboransatz des LLEC. Hier wird die Abwärme des Supercomputers JUWELS genutzt, um mit Hilfe eines modellprädiktiven Regelungssystems umliegende Gebäude netzdienlich zu beheizen (siehe Kapitel 8).

4. Optimierung der Anlagentechnik und Betriebsprozesse

Betrachtet man den Energieverbrauch von Gebäuden, so zeigt sich häufig eine Diskrepanz zwischen den in der Planung anvisierten Zielgrößen und den in der Praxis tatsächlich ermittelten Messwerten – der sogenannte Performance Gap. Im Folgenden werden Ursachen und Methoden zur Erkennung von Performance Gaps beschrieben und ausgewählter Beispiele zur Optimierung von Anlagentechnik und Betriebsprozesse in Helmholtz-Zentren vorgestellt.

Ursachen für Performance Gaps

Die Ursachen von sogenannten Performance Gaps können im Wesentlichen in vier Gruppen kategorisiert werden¹⁰:

Ambient Gap: In der Planungsphase werden Klimadaten wie Außenlufttemperaturen, Solarstrahlungen, Wind, bzw. externe Verschattungen durch Bäume oder

⁹ <https://hkb.helmholtz.de/hkb-leitfaeden-1/>

¹⁰ https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Auer-2/publication/377625677_Robuste_nutzerfreundliche_und_kostenguenstige_TGA_in_Gebaeuden/links/65afe0f07fe0d83cb5629e09/Robuste-nutzerfreundliche-und-kostenguenstige-TGA-in-Gebaeuden.pdf

Nachbargebäude, angenommen, die von dem tatsächlich vorherrschenden Klima bzw. den realen Gegebenheiten am Standort abweichen.

Norm Gap: Bei der Berechnung von Normen bzw. Richtlinien werden pauschalierte Angaben bzw. vereinfachte Annahmen zur Dimensionierung von Komponenten bzw. Bauteilen herangezogen.

User/Usage Gap: Abweichendes bzw. unerwartetes Verhalten der Nutzer, z.B. veränderte Belegungsprofile oder Komfortansprüche im Betrieb.

Technical Gap: Unregelmäßigkeiten, Probleme und Betriebsfehler in Anlagen, u.a. Planungs- und Ausführungsfehler, Bedien- und Wartungsfehler sowie Hardware- und Softwarefehler in der Gebäudeautomation.

Performance Gaps erkennen und minimieren

Das Erkennen von Betriebsfehlern ist häufig nur schwer und mit großem Aufwand möglich. Folgende Methoden können hier genutzt werden:

- Fehlererkennungs- und Diagnosesoftware (FDD: Fault Detection and Diagnosis)
- Energieverbrauchskontrollen
- Aufzeichnungen der Gebäudeautomation / manuelle Vergleichsmessungen und Sollwertabgleiche
- Besichtigung und regelmäßige Kontrollen der Anlagen

Werden mögliche Betriebsfehler in der Anlagentechnik erkannt, kann im weiteren Verlauf eine Betriebsoptimierung erfolgen. Um Performance Gaps vorzubeugen, braucht es zunächst robuste und anwendungs-freundliche Gebäudetechnikkonzepte. Weiterhin ist eine differenzierte Erfassung von Energieverbräuchen und Anlagenzuständen notwendig, um Betriebsfehler zu identifizieren.

Optimierung der Anlagentechnik

Eine wesentliche Strategie auf dem Weg zu klimagerechten und energieeffizienten Infrastrukturen ist

die Erneuerung oder Sanierung alter Anlagentechnik. Hierzu gehören:

- Austausch der Beleuchtung, Umstellung auf LED
- Austausch oder Sanierung der Belüftungs-technik (AWI, DKFZ, Helmholtz Munich, HZI)
- Austausch oder energetische Sanierung diverser Pumpensysteme (AWI, GFZ, Helmholtz Munich, HZI, UFZ)
- Austausch von Gasheizungen durch Hybrid-systeme mit Wärmepumpen (GFZ)
- Nutzung der Kälteenergie einer Wärmepumpe für die Kühlung von Serverräumen durch Einbau eines zusätzlichen Ventils (DZNE)

Optimierung von RLT-Anlagen

Der hohe Energiebedarf von Forschungsgebäuden wird häufig durch den Betrieb von RLT-Anlagen verursacht. Der Energieverbrauch dieser Anlagen kann auf vielfältige Weise reduziert werden. So kann eine verbesserte Geometrie der Wärmeübertrager und Kanalnetze dazu beitragen, Verluste bei der durch Ventilatoren geregelten Verteilung der Luft zu minimieren. Maßgebliche Faktoren sind die Querschnittsfläche (und damit die Strömungsgeschwindigkeit) und die Form (rechteckig/rund). Darüber hinaus kann durch Druck-rückgewinnung Wärmeenergie aus der Abluft für das Vorwärmern der Zuluft genutzt werden. Letztlich ist angestrebt, die Leckluftrate zu minimieren. Insgesamt können hier Einsparpotenziale von bis zu 30 % realisiert werden.

Das MDC hat vorbereitend auf die bevorstehende Sanierung seines größten Forschungsgebäudes (Haus 31.1; Nutzfläche 10.700 m²) ein Konzept zur Optimierung der zugehörigen RLT-Anlagen erstellt, die aktuell 80 % des Gebäudeenergiebedarfs verursachen (siehe Kasten Seite 9).

Optimierung der Betriebsprozesse

Auch bei der Optimierung von Betriebsprozessen können erhebliche Energiesparpotenziale erzielt werden. Spätestens mit Einführung eines Energiemanagementsystems haben viele Zentren begonnen, ein differen-

MDC - Konzept für die Optimierung von RLT-Anlagen in Haus 31.1.

Die Optimierung der RLT-Anlagen gliedert sich in mehrere Schritte. Durch eine Neustrukturierung der Labore soll die Basis für eine zeitlich und räumlich flexible bzw. reduzierte Belüftung geschaffen werden. Mit Hilfe dynamischer Gebäude- und Anlagensimulationen werden energetische Nutzungsbedarfe und die mögliche Nutzung erneuerbarer Energiequellen analysiert. Die Regelung der Anlagen wird in einer Parameter- und Sensitivitätsstudie optimiert und alle Informationen in ein Gesamtkonzept integriert (siehe unten). Herzstück ist ein Kreislaufverbundsystem mit hocheffizienten Wärmetauschern. Kälte soll weitestgehend durch adiabatische Kühlung

bereitgestellt werden. Die Rückkühlwerke der am Standort vorhanden Kompressionskältemaschinen sollen möglichst lange zur Freikühlung genutzt werden. Wärmepumpen mit unterschiedlichen Quellen (Abluft, Außenluft, ggf. Erdkollektor) werden ebenfalls in diesen Kreislauf eingespeist. Dabei wird eine Doppelnutzung der Wärme- und Kälteseite einer Wärmepumpe angestrebt. Die notwendigen Wärmeübertrager sollen auf die verfügbaren Temperaturniveaus dimensioniert und mit regelbaren Bypässen versehen werden, um Druckverluste im Luftnetz zu minimieren.

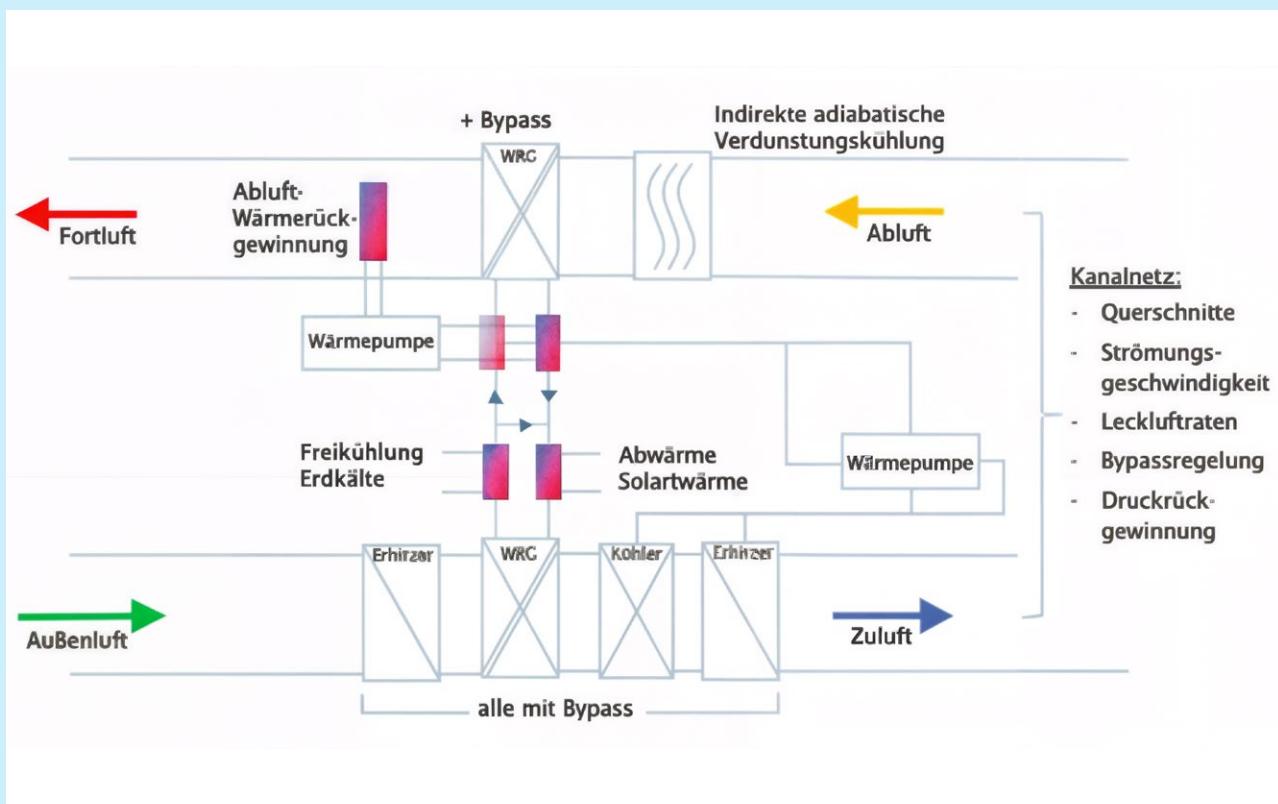


Abb. 3: Beispielhafte schematische Darstellung eines Renewable Ready RLT-Anlagenkonzepts

ziertes Zählermanagement aufzubauen (u.a. DESY, FZJ, GFZ, HZI, KIT, UFZ). Neben dem Monitoring gibt es zahlreiche konkrete Energiesparmaßnahmen aus einzelnen Zentren:

- Reduktion des Dampfdrucks in Dampfkesselanlagen - das HZI plant eine auf die spezifischen Anforderungen der Nutzer abgestimmte Druckreduktion.
- Nutzung freier Kühlung - das DESY fokussiert auf freie Kühlung und plant u.a. Wärme-Systemtemperaturen kontinuierlich zu minimieren und die Versorgungssysteme zu dezentralisieren. Auch das DZNE nutzt die Kälteenergie der Außenluft für die interne Kälteversorgung.
- Dezentralisierung der Warmwasserversorgung bzw. Verzicht auf warmes Wasser (AWI, UFZ)
- Dezentralisierung der Wärmeversorgung - u.a. durch Einsatz lokaler Wärmepumpen (DLR, Köln)
- Reduktion des Wärmeverbrauchs durch intensive Optimierung von Heizkurven und Betriebszeiten (DLR, Braunschweig)
- Neuauslegung von Fernwärmeübergabestationen zur Reduktion der Fernwärmennetztemperaturen (Helmholtz Munich)
- Nutzerangepasste Reduktion und zeitlich flexible Regulierung der Belüftung von Laboren (u.a. DKFZ, GFZ, Helmholtz Munich, MDC)
- Erhöhung der Temperatur von Ultratiefkühlschränken von -80 °C auf -70 °C (u.a. GEOMAR, MDC)
- Reduktion der Nahwärme-Vorlauftemperaturen und Optimierung der Hydraulik (FZJ)

5. Energie speichern

Im Kontext einer zunehmend volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen sollten Speicher als zusätzliche Säule eines effizienten Energiesystems betrachtet werden, da sie eine zeitliche Verschiebung der Energienutzung ermöglichen. Das Angebot an Energiespeichern hat sich in den letzten Jahren sehr dynamisch entwickelt.

Technologisch können Speicher in verschiedene Kategorien eingeteilt werden: elektrische Speicher (z.B. Kondensatoren), mechanische Speicher (z.B. Schwungradspeicher, Pumpspeicher), elektrochemische Speicher (z.B. Batterien) chemische Energiespeicher (Wasserstoff oder andere synthetische Gase) sowie thermische Energiespeicher zur Wärmespeicherung (z.B. Aquiferspeicher, Salzspeicher; Eisspeicher). Aufgrund des differenzierten Angebots sollte zunächst die Anwendung betrachtet und dann die hierzu passende Technologie ausgewählt werden.

Energiespeicher als Forschungsobjekt in Helmholtz-Zentren

In der Helmholtz-Gemeinschaft werden verschiedene Energiespeicher erforscht:

Aquiferspeicher

Am KIT beschäftigt sich die Arbeitsgruppe von Prof. Philipp Blum mit der Frage, wie thermische Aquiferspeicher, die Wärme und Kälte in bodennahen wasserführenden Gesteinsschichten speichern, für klimafreundliches Heizen und Kühlen von Gebäuden genutzt werden können. Eine Analyse zeigt, dass 50 % des Untergrunds in Deutschland hierfür geeignet ist (Abb. 4).

Das FZJ hat das Fraunhofer IEG mit einer Vorstudie zur Machbarkeit eines Aquiferspeichers beauftragt. Dieser soll die ungenutzte Abwärme, die im Sommer durch den Exascale-Computer Jupiter entsteht, für die Nutzung im Winter speichern. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rahmenbedingungen - hoher Energiebedarf auf dem Campus, großes Abwärme-Potenzial des Rechenzentrums sowie vorhandene fachliche Expertise - geeignet sind, offene Fragen dieser Technologie weiter zu untersuchen. Zudem zeigt die Studie, dass auch die lokalen Bedingungen sowohl geologisch als auch energie- und umwelttechnisch hierfür sehr günstig sind. Die weitere Untersuchung der Machbarkeit wird somit empfohlen, ist aktuell aber noch nicht beschlossen.

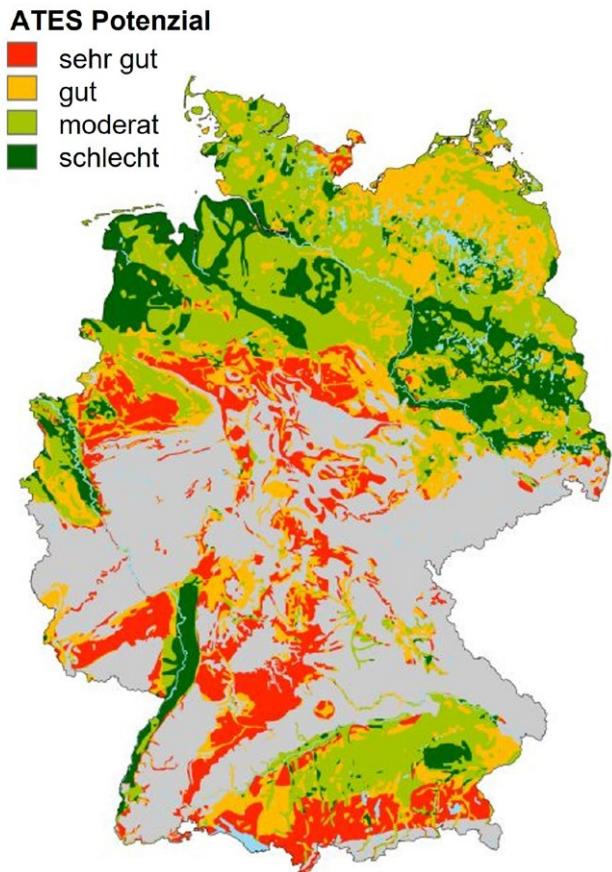


Abb. 4: Potenziale für Aquiferwärmespeicher (ATES = Aquifer Thermal Energy Storage) in Deutschland. Mit blauen Punkten sind die Standorte der Helmholtz-Zentren dargestellt (Quelle: Ruben Stemmle, KIT)

Salzspeicher

Am DLR-Standort Stuttgart wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts eine Carnot-Batterie in Betrieb genommen.¹¹ Das Herzstück der Carnot-Batterie ist ein Latentwärmespeicher, der mit rund zwei Kubikmetern Nitratsalzen gefüllt ist. Eine Hochtemperatur-Wärmepumpe erhitzt mit dem zu speichernden Strom das Salz auf 150 °C und bringt es zum Schmelzen, sodass die Bindungen der Salzkristalle aufgehoben werden. Je nach Salz können Latentwärmespeicher dadurch rund doppelt so viel Energie aufnehmen wie

Wärmespeicher ohne Schmelzvorgang. Die typische Speicherzeit von Carnot-Batterien liegt zwischen einigen Stunden und Tagen. Zum Entladen des Speichers überträgt ein zweiter Kreislauf die Wärme auf eine Wärmekraftmaschine, die eine Turbine mit Generator antreibt. Der klimaneutral erzeugte Strom kann wieder ins Netz eingespeist werden. Am Standort Köln wurde eine Testanlage für Wärmespeicherung in Salzsämlzen (TESIS) errichtet.¹² Sie ist die erste Großforschungsanlage für Flüssigsalzspeicher und -technologie in Deutschland und dient der Weiterentwicklung dieser Technologie.

Wasserstoffspeicherung

Am FZJ wird die saisonale Wasserstoffspeicherung in einer organischen Trägerflüssigkeit – dem LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) erprobt (siehe Kapitel 8).

Batteriespeicher

Die Forschung und Entwicklung innovativer elektrischer Energiespeichersysteme wird u.a. am FZJ (siehe Kapitel 8) und in verschiedenen Instituten des KIT betrieben. Im Rahmen eines umfassenden, interdisziplinären Ansatzes, der die gesamte Wertschöpfungskette abdeckt, werden industriell anwendbare, kosteneffiziente Lösungen für die Energiespeicherung entwickelt.

Batteriespeicher – Stand der Technik

Batteriegrößspeicher (BESS) erreichen aktuell Leistungen von 100 kWh bis 3.300 MWh.¹³ Ihre Lebensdauer hängt insbesondere von der Batterietechnologie, der Nutzung und den Umgebungsbedingungen ab. Die meisten modernen Lithium-Ionen-Speicher haben eine Lebensdauer von 5.000 bis 10.000 Ladezyklen. Im Allgemeinen können Lithium-Ionen-Batterien, die in vielen Industriespeichern verwendet werden, eine Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren erreichen.¹⁴ Neuste Entwicklungen deuten an, dass zukünftig mit Redox-Flow Bat-

¹¹ <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/04/mit-salz-dunkelflauten-und-lastspitzen-ueberbruecken>

¹² <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur/grossforschungsanlagen/testanlage-fuer-waermespeicherung-in-salzsämlzen-tesis-store>

¹³ <https://www.mortenson.com/projects/edwards-sanborn-solar-plus-storage>

¹⁴ <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/speicher/batteriespeicher.html>



Abb. 5: Hochenergie-Batteriesystem (Tesla-Megapack) auf dem Campus des FZJ (Quelle FZJ)

terien auch 20.000 Ladezyklen möglich sind.¹⁵ Damit würde sich die Lebensdauer entsprechend verlängern.

Bei der Errichtung und Inbetriebnahme von Batteriespeichern sind spezifische Aufstellbedingungen und der zugehörige rechtliche Rahmen zu beachten. So kann es erforderlich sein, den Speicher in einem elektrischen Betriebsraum zu errichten. In der Regel unterliegen Batteriespeicher dem Baurecht und erfordern eine Baugenehmigung.

Darüber hinaus sind Anforderungen hinsichtlich Lärmbelastung, Kühlung, Brandschutz und Wasserschutz zu berücksichtigen. Diese Aspekte stellten das FZJ vor große Herausforderungen, als dort Batterien zu Forschungszwecken installiert wurden (Abb. 5). Inzwischen können Batterien allerdings als schlüsselfertige Projektierung, einschließlich aller notwendigen Komponenten und Dienstleistungen eingekauft werden. Die Kosten belaufen sich aktuell auf etwa 250 bis 350 €/kWh.¹⁶

Vorteile von Batteriespeichern

Der Einsatz von Batteriespeichern kann für Forschungszentren u.a. folgende Vorteile bringen:

1. Kosten für Energiebeschaffung reduzieren

Batterien können dazu beitragen, die Kosten für den Strombezug zu senken, da sie eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch ermöglichen (Einspeisung in Niedrigpreisphasen; Nutzung in Hochpreisphasen). Zudem kann die Nutzung des selbsterzeugten Stroms an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden.

2. Netzentgelte optimieren

Batteriespeicher können dazu beitragen, hohe Lastspitzen zu senken („Peak-Shaving“), indem der Strom in dieser Zeit nicht aus dem Netz, sondern aus dem Batteriespeicher entnommen wird. Die Reduktion der Lastspitze führt zur Reduktion der Netzentgelte.

¹⁵ <https://www.bdew.de/verband/magazin-2050/die-chemie-muss-stimmen/>

¹⁶ <https://www.interconnector.de/energieblog/batterievermarktung/kostenaufstellung-wie-viel-kostet-ein-batteriespeicher/>

3. Atypische Netznutzung mit Batteriespeicher umsetzen

Um sich für die atypische Netznutzung zu qualifizieren, muss der Stromverbrauch in bestimmten Zeitfenstern vom allgemeinen Netzlastverlauf abweichen. Batteriespeicher können - je nach Größe und Verbrauchverhalten - die erforderliche Verschiebung der Lastaufnahme realisieren und so dabei helfen, die Kriterien zu erfüllen.

4. Energiehandel

An- und Verkauf von Strom mit dem Ziel der Gewinnmaximierung. Hier ist zu klären, ob solche Geschäftsmodelle für öffentlich finanzierte Forschungszentren formal möglich sind.

5. Ersatzstrom und unterbrechungsfreie Stromversorgung

Stromspeicher können bei Stromausfällen einspringen und die Versorgung sicherstellen.

6. Ladeinfrastruktur

Speicher können als Leistungserbringer für Schnellladung mit kleinem Netzanschluss zur Nutzung des eigenen PV-Stroms u.a. für die eigene Fahrzeugflotte eingesetzt werden.

Idealerweise werden Speicher gleichzeitig für mehrere Aufgaben genutzt („Multi-Use“), wie z. B. die Teilnahme an Strommärkten, Lastspitzenkappung, Bereitstellung von Systemdienstleistungen für das Netz oder die Teilnahme an virtuellen Kraftwerken. Das FZJ hat eine Kostenanalyse der aktuell am Standort genutzten Batteriespeicher vorgenommen (siehe Kasten unten).

6. Strategische Energiebeschaffung

Im Rahmen der Energiewende gewinnt die strategische Energiebeschaffung eine immer größere Bedeutung. Im Fokus steht eine intelligente, sichere und kosten-

FZJ - Berechnung von Kostensparnis durch Einsatz vorhandener Batteriespeicher

Das Team von André Xhonneux (FZJ) hat für die im LLEC errichteten Batteriespeicher eine hypothetische Kostensparnis für das Jahr 2023 berechnet. Dabei wurden eine Reihe von Annahmen getroffen, u.a. eine perfekte Vorhersage für die Elektrizitätspreise innerhalb der nächsten 24 Stunden, Be-/Entladeeffizienz von 95 %, keine Verluste in der Batterie oder Selbstentladung und die Elektrizitätskosten des Forschungszentrums

mit und ohne Einsatz dieser Speicher verglichen. Insgesamt hätten sich dieser Berechnung zufolge ca. 82 T€ an Energiekosten einsparen lassen, davon 13 T€ mit dem Riello-System und 69 T€ mit dem Tesla Megapacks. Inwieweit sich die theoretisch berechneten Einsparungen im alltäglichen Betrieb realisieren lassen, ist nicht sicher, da rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen noch zu klären sind.

Batterie	Leistung	Leistung	Ladestand
Tesla Megapack	2,6 MWh	595 kW	0-100 %
Riello	525 kWh	1.500 kW	30-100 % (USV)

günstige Beschaffung erneuerbarer Energien. Neben der klassischen Versorgung mit längerfristigen Stromverträgen wurden in den letzten Jahren eine Reihe neuer Möglichkeiten angeboten.

Tranchenmodell

Die Energiebeschaffung erfolgt in mehreren Teilmen gen (Tranchen) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dies ermöglicht eine Streuung des Preisrisikos und eröffnet die Chance, von günstigen Marktpreisen zu profitieren. Gleichzeitig bleibt eine gewisse Planungssicherheit erhalten.

Day-Ahead-Handel

Beim Day-Ahead-Markt wird Energie für den nächsten Tag gehandelt. Anbieter und Käufer geben Gebote für den Strompreis und die Menge ab, und die Börse ermittelt dann den Marktpreis. Dieser Preis wird für jede Stunde des folgenden Tages festgelegt, basierend auf Angebot und Nachfrage. 2025 wurde der Day-Ahead-Markt auf einen 15-Minuten Takt umgestellt. Kunden können von niedrigen Preisen profitieren, unterliegen aber auch dem Risiko größerer Preisschwankungen.

Power-Purchase Agreement (PPA)

PPAs sind im Grundsatz technologienutral, werden aktuell aber – in erster Linie – als langfristige Stromkaufvereinbarung mit Betreibern von erneuerbaren Energien Anlagen (EE-Anlagen) definiert. Es gibt unterschiedliche Arten von PPAs¹⁷:

- Beim On-site PPA stellt der Kunde dem Dienstleister Platz auf seinem eigenen Gelände für die Stromerzeugung zur Verfügung, z.B. Dachbereiche oder Freiflächen.
- Bei Off-site PPA wird der Strom nicht vor Ort erzeugt, sondern über das öffentliche Netz geliefert.
- Das Sleeved PPA ist ein Off-site PPA, bei dem ein Energiedienstleister als Vermittler zwischen Erzeuger und Verbraucher fungiert und verschiedene Prozesse übernimmt, u.a. die Bilanzkreisführung, die Verknüpfung verschiedener Produzenten

zu einem Anlagenportfolio oder die Erstellung von Einspeiseprognosen.

Status Quo der Energiebeschaffung in Helmholtz Zentren

In Helmholtz-Zentren ist die Art der Energiebeschaffung aktuell noch sehr heterogen. Während einige Zentren ihre Energie auf klassische Weise beschaffen, nutzt die Mehrzahl der Zentren unterschiedliche Tranchenmodelle (u.a. DESY, DLR, DKFZ, DZNE, Helmholtz Munich, HZI). Die Nutzung von PPAs wurde und wird in verschiedenen Zentren anvisiert (u.a. GFZ, KIT), erfolgreiche Vertragsabschlüsse sind bisher jedoch nicht erfolgt. Einige Zentren (u.a. FZJ, GFZ, HZDR, KIT, MDC) nutzen auch die Möglichkeit, einen Teil ihrer Bedarfe im Day-Ahead-Handel zu beziehen. Nachfolgend einige Beispiele:

- Das GFZ bezieht seit 2023 seine Bedarfe für den sogenannten „Baseload“ über ein Tranchenmodell. Die Differenz zwischen Baseload und tatsächlichem Lastgang wird über den Day-Ahead-Handel beschafft. Die Ausführung erfolgt durch einen externen Energieanbieter, der eine Dienstleistungs pauschale je MWh erhält. Die Prüfung der Abrechnung erfolgt intern.
- Das MDC führt seit Mai 2025 einen Modellversuch durch und koppelt die interne Stromerzeugung durch zwei BHKWs mit der Strombeschaffung mittels Day-Ahead-Handel. Abhängig vom Wärmebedarf werden die BHKWs aktuell montags bis freitags von 17 bis 9 Uhr genutzt. In der restlichen Zeit wird Strom am Spotmarkt eingekauft. Mittelfristiges Ziel ist eine dynamische und automatische Regulierung beider Bezugsquellen und eine Reduktion der CO₂-Emissionen durch den Erdgasverbrauch der BHKWs.
- Aufgrund der Energiekrise und mangelnder Angebote war das FZJ erstmals gezwungen, Alternativen zu Festpreisverträgen für seinen Strom- und Gasbedarf zu suchen. Seitdem werden die Bedarfe über Spotmarkt- und Terminprodukte gedeckt.

¹⁷ <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/power-purchase-agreement-ppa>

Portfoliomanagement

Portfoliomanagement ist eine systematische und zielgerichtete Steuerung der Energiebeschaffung. Es umfasst eine Analyse von Beschaffungs- und Vermarktungsmöglichkeiten, die Auswahl geeigneter Produkte und Zeitpunkte sowie eine Steuerung von Risiken und Kosten. Die Einführung eines Portfoliomanagements empfiehlt sich bei Unternehmen und Organisationen mit sehr hohem ($> 5 \text{ GWh/a}$)¹⁸ und variablen Energiebedarf. Beispielsweise plant die Fraunhofer Gesellschaft (Strombedarf ca. 240 GWh/a) die Einführung eines solchen Systems. Vorteile sind u.a. eine schnelle Reaktion auf Nachfrageänderungen und Preisschwankungen im Markt, eine Reduktion möglicher Risiken sowie die schrittweise Erhöhung der ökologischen Qualität bei der Strombeschaffung. Die Einführung eines Portfoliomanagements erfordert zusätzliches Personal und internen Kompetenzaufbau. In der Regel werden die zusätzlichen Personalkosten allerdings durch die zu erwartenden Einsparpotenziale kompensiert. Neben dem Aufbau eines internen Portfoliomanagements besteht auch die Möglichkeit, externe Dienstleister zu beauftragen.

Resümee

Die hier beschriebenen Optionen und Anwendungsbilder zeigen, dass die Energiebeschaffung zukünftig nicht mehr als untergeordnete Aufgabe anzusehen ist, sondern prioritätär behandelt werden sollte. Die Optimierung der Energiebeschaffung kann einen signifikanten Beitrag zur klimagerechten Energiewende in Forschungszentren leisten. In der Regel empfiehlt es sich hier, zunächst die Expertise externer Dienstleister hinzuzuziehen.

7. Energie bereitstellen – E-Mobilität/ Ladeinfrastrukturen

Die Einrichtungen der öffentlichen Hand, damit auch außeruniversitäre Forschungsorganisationen, sind durch das Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-



LamA-Projekt der Fraunhofer Gesellschaft

- Institute bauen Ladeinfrastruktur auf und stellen Strom zum Einkaufspreis zur Verfügung.
- Der Vertrieb des Stroms erfolgt über einen Dienstleister gegen eine Gebühr.
- Die Beschäftigten zahlen den Einkaufspreis + Dienstleistergebühr.
- Dienstleister zahlt den Einkaufspreis an die Institute zurück. Strom wird also nur weitergereicht.

Zwei Preismodelle für regelmäßige und gelegentliche Nutzer (26 bzw. 29 Cent/kWh)

Gesetz (GEIG) verpflichtet, ab 2025 Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zu errichten.¹⁹ Bei Bestandsgebäuden mit mehr als 20 Stellplätzen muss mindestens einen Ladepunkt errichtet werden. Bei Neubauten oder größeren Renovierungen von Gebäuden mit mehr als sechs Stellplätzen ist mindestens ein Ladepunkt und eine Leitungsinfrastruktur für jeden dritten Stellplatz zu schaffen.

Einige Helmholtz-Zentren haben bereits Ladesäulen errichtet. Dabei ist die Etablierung eines Betreiberkonzepts, das eine attraktive Preisgestaltung ermöglicht und mit den Regeln der öffentlichen Hand konform ist, eine besondere Herausforderung. Die Fraunhofer Gesellschaft hat mit dem LamA-Projekt ein Betriebskonzept entwickelt, das explizit für Mitarbeitende geschaffen wurde und auf die spezifischen rechtlichen Rahmenbedingungen angepasst wurde.²⁰

¹⁸ VEA Webinar 2025: VEA Tranchen und Portfoliomanagement

¹⁹ <https://www.gesetze-im-internet.de/geig/>

²⁰ <https://www.lama.zone/>



Abb. 6: Beispiel für ein Solargründach, bei dem die Begrünung unter den PV-Modulen verläuft. Quelle BuGG

8. Blau-Grün-Rote Infrastrukturen

Neben den verschiedenen Optionen zur Optimierung der Energiesysteme sind auch die vielfältigen Interaktionen mit blau-grünen Infrastrukturen zu beachten.

Verschattung und Gebäudebegrünung als potentielle Energiesparmaßnahme

Forschungszentren stehen vor der Aufgabe, auf die durch Klimawandel bedingte Zunahme von Hitze-stress zu reagieren. Dabei ist zu untersuchen, ob Zentren zukünftig Energieressourcen für die Klimatisierung von Büros etc. investieren müssen oder ob die notwendige Kühlung alternativ durch Verdunstungsflächen und Verschattung erreicht werden kann. Studien zeigen, dass Dach- und Fassadenbegrünung im Sommer die gefühlte Temperatur signifikant senkt, im Winter den Wärmeverlust reduziert und so insgesamt Energiekosten spart. Zudem fördert sie die Aufenthaltsqualität. Studien zur Wirtschaftlichkeit zeigen, dass die Herstellungskosten

eines Gründaches nur einen minimalen Teil der gesamten Baukosten ausmachen. Daneben sind Betriebskosten und Energieeinspareffekte gegeneinander abzuwägen.^{21,22} Das DESY und die Umweltbehörde der Stadt Hamburg haben mit der Gebäudebegrünung der Forschungshalle 36 ein Pilotprojekt umgesetzt, um den Nutzen von Fassadenbegrünung für Gebäude und das Gebäudeumfeld zu demonstrieren.²³ Die Kühlleffekte der Begrünung werden in einem Projekt mit der TU Berlin ausgewertet.

Leistungssteigerung von PV-Anlagen durch Gründächer

Extensive Dachbegrünung fördert die Leistung von PV-Anlagen, da sie die Temperatur der einzelnen Module durch Verdunstungskühlung absenkt und somit zu einer höheren Leistung führt. Studien zeigen eine Leistungssteigerung von etwa 4-6 %. Es empfiehlt sich, beide Systeme gemeinsam zu planen und zu installieren, um sie optimal aufeinander abzustimmen.²⁴

²¹ <https://www.energie-experten.ch/de/wohnen/detail/begruente-fassaden-kuehlen-gebaeude-und-umgebung.html>

²² https://www.gebaeudegruen.info/wp-content/uploads/2025/01/BuGG-Fachinfo-Positive_Wirkungen_Gebaeudebegruenung_20230604.pdf

²³ <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/energie/energielotsen/gebaedebegruenung-desy-forschungshalle-290834>

²⁴ https://www.gebaeudegruen.info/wp-content/uploads/2025/03/Fachhilfe_BuGG_GeWeGe_20241113-1_sehr_klein.pdf

Interaktion von Bäumen mit Energie- und Medienverteilnetze

Forschungszentren sind häufig durch hochverdichtete Räume mit komplexen unterirdischen Versorgungssystemen gekennzeichnet. Im Erdboden teilen sich Kanäle, Gas-, Wasser- und Fernwärmeleitungen sowie Kabel für Strom und Telekommunikation den Raum. Doch auch Bäume und andere Pflanzen benötigen Raum für ein gesundes Wurzel- und Pflanzenwachstum. Hier kann es ggf. zu Konfliktsituationen mit dem vorhandenen Baumbestand oder geplanten Baumbepflanzungen kommen. Um Leitungen zu schützen und ein gesundes Baumwachstum zu ermöglichen, gibt es eine Reihe von aktiven und passiven Maßnahmen. Insbesondere bei Neupflanzungen sollten aktive Schutzmaßnahmen angewendet werden: Durch Pflanzgruben, Wurzelgräben, Bodenbelüftung und Trennelemente kann das Wachstum von Wurzeln in definierten Bereichen außerhalb der Leitungszone gefördert werden. Passive Schutzmaßnahmen sind sowohl bei Neubau, als auch bei Erneuerung der Leitungen anzuwenden. Zur Auswahl stehen u.a. wurzelfeste Rohrverbindungen, porenarne Verfüllstoffe, der Einbau von Schutzrohren um die Leitung oder das Verlegen von Platten und Folien in den Leitungsgraben.²⁵ Umgekehrt kann durch poreureiche Böden das Wurzelwachstum auf die gewünschten Bereiche konzentriert werden. Die Arbeitsgemeinschaft Fernwärme hat die Interaktion zwischen Bäumen/ Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen untersucht und kommt zu dem Ergebnis, dass die Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen keinen erkennbaren Einfluss auf das Wurzelwachstum von Bäumen hat. Umgekehrt ist bei einer fachgerecht ausgeführten Fernwärmeleitung kein Wurzeleinwuchs zu erwarten.²⁶

Hinweis zu HKB Leitfaden 06: Klimaangepasste Campusentwicklung – Wasser- und Vegetationsmanagement

Aktuell arbeitet das HKB gemeinsam mit Nachhaltigkeitskoordinatoren des GFZ und des HZI sowie mit

dem Team von Roland Müller an einem Leitfaden zur Entwicklung klimaangepasster Campusinfrastrukturen. Die Veröffentlichung ist für Q1 2026 geplant.

9. Perspektiven aus dem Living Lab Energy Campus

Durch die Kombination aus einer breit aufgestellten Energieforschung und einer Campusinfrastruktur im Quartiersmaßstab – 1,7 km² Fläche, mehr als 200 Gebäude, ca. 7.000 Nutzer – ist das FZJ prädestiniert für ein Reallabor wie das „Living Lab Energy Campus“ (LLEC), bei dem die innovativen Ansätze aus der Energieforschung in den realen Betrieb des Zentrums integriert und miteinander vernetzt werden. Die Vernetzung erfolgt durch lernfähige und vorausschauende Regelungsstrategien in den Bereichen Wärme, Strom, chemische Energiespeicher und Mobilität.

Innerhalb des Projektverbundes wurden und werden dafür verschiedene Energie-Demonstratoren auf dem Campus des FZJ installiert (Abb. 7). Ziel ist die Schaffung eines intelligenten Energiesystems, das die Themen Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Benutzerkomfort gleichermaßen integriert. Die Reallabor-Forschung wird dabei durch begleitende Maßnahmen im Umbau der Infrastruktur und im Betrieb, durch eine intensive Nutzereinbindung sowie durch ein Netz aus externen Partnern unterstützt. Dies erlaubt einen ganzheitlichen, realitätsnahen Ausblick auf ein mögliches Energiesystem der Zukunft.

Stromproduktion

Hinsichtlich der Stromproduktion mit erneuerbaren Energien adressiert das LLEC das Problem der Flächenknappheit. Daher werden im Bereich der Photovoltaik nicht nur Flächen mit Freiflächen-Anlagen belegt, sondern auch innovative Dach-PV-Anlagen (PV-Pergola über Dachterrasse, PV-Oberlicht) sowie eine Fassaden-PV-Anlage genutzt. Ein kleiner

²⁵ <https://www.ikt.de/blog/rohre-vor-wurzeln-schuetzen-und-wurzeln-vor-rohren/#:~:text=Ist%20der%20Baum%20schon%20da%20wenn%20eine,darf%20also%20gerne%20etwas%20gro%C3%9Fz%C3%BCgiger%20gew%C3%A4hlt%20werden.>

²⁶ https://www.dbu.de/app/uploads/dbu_media-231213_FW-Vegetation2_DBU-Workshop_Grossbaeume.pdf

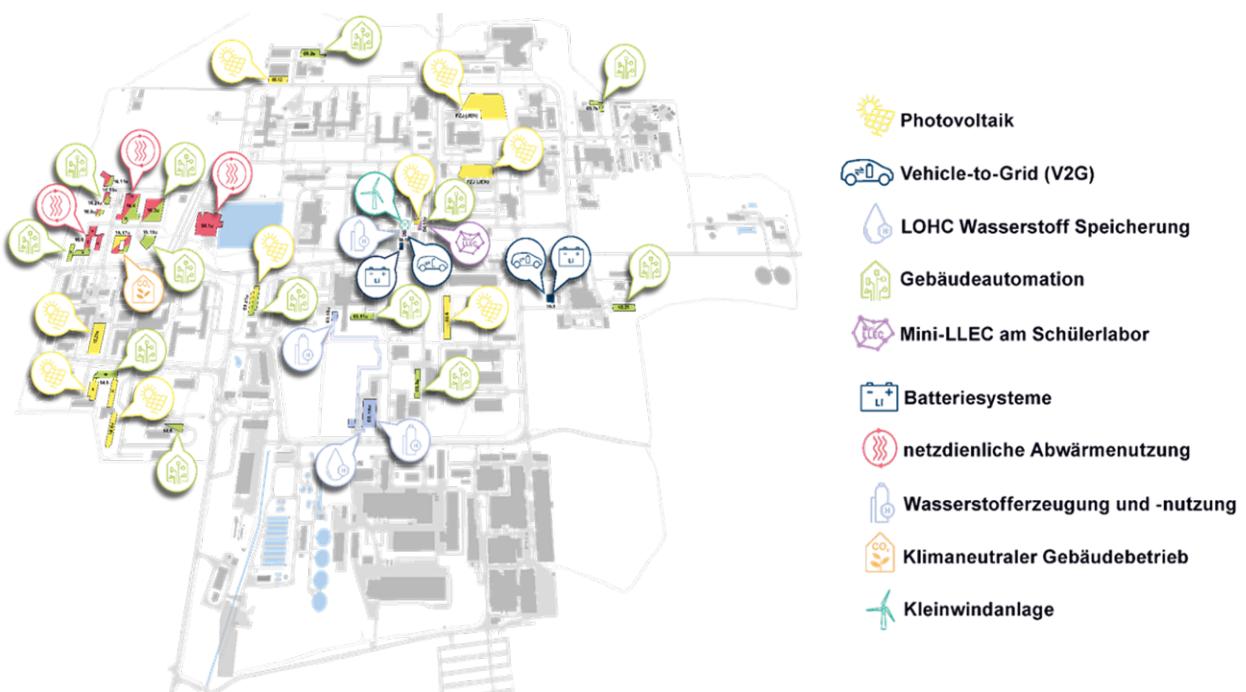


Abb. 7: Lageplan des Campus mit LLEC-Demonstratoren (Quelle: FZJ)

„Solar Walkway“ erprobt zudem Gehweg-integrierbare PV-Module. Außerdem wurde eine Kleinwindenergieanlage errichtet, um eine bilanzielle Autarkie des Schülerlabors zu ermöglichen und die Komponente Windenergie datentechnisch im System abzubilden. Diese Forschungsanlagen decken jedoch nur einen geringen Teil des Gesamtstrombedarfes am FZJ ab.

Lithium-Ionen-Batteriespeicher

Um auf die volatilen Ertragsprofile der Erneuerbaren zu reagieren und das Netz bei auftretenden Lastspitzen zu stabilisieren, wurden im LLEC zwei Lithium-Ionen-Batteriespeicher integriert: Das Hochenergiesystem „Tesla Megapack“ wird für den Ausgleich kleinerer Schwankungen und zur Speicherung größerer Energiemengen genutzt, die mit begrenzter Leistung abgerufen werden können. Das Hochleistungssystem von Riello erfüllt den Zweck des „Peak-Shavings“ und der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV).

Bidirektionales Laden - „Vehicle-to-Grid“

Das FZJ erprobt auf dem Campus in Jülich außerdem die Nutzung der Batterien von Elektrofahrzeugen im Zuge des bidirektionalen Ladens (Abb. 8): E-Autos mit „Vehicle-to-Grid“ (V2G) Technologie können mit ihrer Batterie sowohl Strom laden als auch wieder ins Netz zurückspiesen und machen diese damit zu potenziellen Speichern für das Stromnetz.²⁷ International gibt es bereits einige Fahrzeuge, die bidirektionales Laden technisch umsetzen können. Im LLEC werden, u.a. Modelle von Nissan und Honda eingesetzt und Ladesäulen von Nex2 sowie EVTEC genutzt. Weitere Hersteller haben angekündigt, in den kommenden Monaten entsprechende Modelle auf den Markt zu bringen. Auch für die Ladeinfrastruktur gibt es immer mehr Hersteller, die bidirektionale Ladelösungen entwickeln und anbieten, u.a. - KOSTAL oder Ambibox. Als Standard für Kommunikationsschnittstellen gilt ISO-Standard 15118-20. Die Nutzung der Technologie ist in Deutschland aktuell noch nicht möglich, da notwendige gesetzliche Regeln noch ausstehen.

²⁷ <https://blog.iao.fraunhofer.de/bidirektionales-laden-gamechanger-unseres-energiesystems/>



Abb. 8: Elektrofahrzeuge vor uni- und bidirektionalen Ladesäulen auf dem FZJ Campus (Quelle FZJ)

Wasserstoffspeicherung

Wasserstoffspeicherung bietet u.a. die Möglichkeit, Energie saisonal zu speichern, und kann deshalb zu einem wichtigen Baustein eines künftigen Energiesystems werden. Am FZJ wird im Rahmen eines Forschungsprojekts für eine effizientere Wasserstoffproduktion regelmäßig Wasserstoff hergestellt. Dieser soll für den Betrieb der Energiezentrale genutzt werden. Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass eine H₂-Beimischung in Höhe von 10 % im Betrieb des ansonsten Erdgas-basierten Systems ohne technische Umbauten möglich ist. Beiträge aus der Wasserstoffsicherheitsforschung im Rahmen des LLEC liefern außerdem Informationen zur Positionierung von Sensoren zur Leckage-Detektion und standardisieren passive Sicherheitssysteme (katalytische Rekombinatoren).

Eine langfristige Speicherung des Wasserstoffs kann durch Bindung an flüssige organische Trägermaterialien wie LOHC („Liquid Organic Hydrogen Carrier“) realisiert werden. Die chemische Bindung ermöglicht

eine druckfreie Speicherung bei Umgebungstemperaturen in Tanks.²⁸ Mithilfe eines LOHC-One-Reaktors, der im LLEC erstmals in einer Leistungsklasse von 300 kW(H₂) zum Einsatz kommt, lässt sich Wasserstoff ein- und ausspeichern. Im LLEC-Kontext wird der Reaktor so positioniert, dass die Abwärme der Blockheizkraftwerke der Energiezentrale für die Ausspeicherung des Wasserstoffs aus dem LOHC genutzt werden kann.

Um regulieren zu können, wann Strom ein- oder ausgespeichert oder mittels Elektrolyse Wasserstoff produziert und für den Winter gelagert werden kann, wurde im Rahmen des LLEC eine Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)-Plattform etabliert, die vom Institute of Climate and Energy Systems (Energiesystemtechnik, ICE-1) entwickelt wurde. Die verschiedenen Anlagen sind mittels eines modellprädiktiven Regelalgorithmen verbunden. Weitere Informationen wie Wetterprognosen oder Raumbelegungsdaten können ebenfalls verarbeitet und für Optimierungszwecke genutzt werden.²⁹

²⁸ Geißelbrecht, M. (2021). Aktueller Stand LOHC-Wasserstoffspeicher. Jülich Blogs: Living Lab Energy Campus: <https://go.fzj.de/aktueller-stand-lohc-wasserstoffspeicher>

²⁹ Mork, M., Xhonneux, A. & Müller, D. (2020). Hierarchical Model Predictive Control for complex building energy systems. Bauphysik, Vol. 42 (6), S. 306-314. <https://doi.org/10.1002/bapi.202000031>

Mork, M., Xhonneux, A. & Müller, D. (2022). Nonlinear Distributed Model Predictive Control for multi-zone building energy systems. Energy and Buildings, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112066>

Abwärmenutzung

Das FZJ nutzt die Abwärme des Supercomputers JU-WELS, um umliegende Gebäude mit Hilfe eines Niedertemperurnetzes zu beheizen (Abb. 7). Wasser wird zunächst durch den Supercomputer auf rund 45 °C erwärmt. Im weiteren Verlauf wird die Temperatur je nach Gebäude durch Wärmepumpen auf ca. 70 °C erhöht. Die Auslegung des Netzes erfolgte durch entsprechende Simulationen. Auch dieses Wärmenetz wird über die IKT-Plattform gesteuert, die die Nutzung von Wärme und Strom im Gesamtsystem optimiert.³⁰ Beispielsweise kann in Zeiten größerer PV-Erträge das Heizsystem selbst durch kurzfristige Anhebung der Vorlauftemperaturen als Pufferspeicher genutzt werden. Außerdem können mit Hilfe der vorgesehenen modellprädiktiven Regelung Lastspitzen im Stromnetz vorausschauend gepuffert werden. Auch Temperaturveränderungen aufgrund des Umgebungswetters können antizipiert und für die optimale Abwärmenutzung berücksichtigt werden. Die Fertigstellung erfolgt im Winter 2025/2026.

Kognitive Gebäude

Auf dem FZJ Campus wurden 14 Bestandsgebäude zu so genannten kognitiven Gebäuden umfunktioniert. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich des Energiesystems, in dem sie eingebettet sind, „bewusst“ sind. Sie wurden mit Sensoren und Aktoren ausgestattet, die für den Energiebedarf des Gebäudes relevante Informationen (u.a. Präsenz von Personen, Fensteröffnung, CO₂-Gehalt der Luft, Temperatur auf Raumebene) liefern bzw. einen Eingriff in die Beleuchtung und Beheizung des Gebäudes bis auf die Raumebene erlauben. Die Informationen werden in die IKT-Plattform eingespeist, mit Informationen des umgebenden Energiesystems abgeglichen und mit Hilfe einer modellprädiktiven Regelung ge-

steuert. Die modellprädiktive Regelung ist so programmiert, dass sie nicht nur auf die aktuelle Situation reagiert, sondern mithilfe von Simulationen und Erfahrungswerten auch vorausschauend wirkt. Insbesondere angesichts der in der Wärmebereitstellung gegebenen Trägheit lassen sich signifikante Einsparungen erreichen. Aufgrund der zunehmenden Sektorkopplung sind auch bei der Stromversorgung Effizienzsteigerungen zu erwarten.³¹ Weitere Effizienzgewinne entstehen durch die Nutzereinbindung. Individuelle Nutzer können beispielsweise einen Zielkorridor für die gewünschte Raumtemperatur festlegen, innerhalb dessen die Regelung die Gebäude netzdienlich regeln kann. In einem Gamification-Ansatz sammeln sie auf diese Weise Punkte, die sie dann als Guthaben in einem Planspiel einsetzen können. Insgesamt konnten in einem ersten Beobachtungszeitraum Einsparungen von knapp 19 % erzielt werden. Da Untergrenzen für den Temperaturbereich festgelegt werden, wird einem Optimieren auf Kosten des Komforts oder gar der eigenen Gesundheit vorgebeugt.

Während die bisher eingerichteten kognitiven Gebäude Bestandbauten sind, soll nun auch in einem Neubau (geplante Fertigstellung Q2/2026) durch den kombinierten Einsatz der in den Teilprojekten erprobten Technologien (versch. PV-Technologien, Abwärmenutzung, Sensorik/Aktorik) ein klimaneutraler Betrieb möglich werden.³²

10. Schlussbemerkung

Der vorliegende Leitfaden zeigt, dass eine ressourceneoptimierte und klimafreundliche Energieversorgung von Forschungszentren in der Regel eine Kombination unterschiedlicher Ansätze erfordert.

³⁰ Xhonneux, A. HPC-Abwärmenutzung zur Gebäudeheizung – Baustart des Niedertemperurnetzes. Jülich Blogs: Living Lab Energy Campus: <https://go.fzj.de/hcp-abwaermenutzung-zur-gebaeudeheizung>

³¹ Xhonneux, A. (2020a). Die LLEC-Informations- und Kommunikationsplatt-form. Jülich Blogs: Living Lab Energy Campus. <https://go.fzj.de/die-llec-informations-und-kommunikationsplattform>

³² Xhonneux, A. (2022). Verbesserung der Energieeffizienz und des Komforts in Räumen durch Nutzerbeteiligung und innovative Automatisierungslösungen. Jülich Blogs: Living Lab Energy Campus. <https://go.fzj.de/nutzerbeteiligung-und-innovative-automatisierungsloesungen> ; Hoffmann, S. (2022). Klimaneutraler Verwaltungsneubau G16.17. Jülich Blogs: Living Lab Energy Campus. <https://go.fzj.de/klimaneutraler-verwaltungsneubau-g16-17>

Folgende Themen sind dabei zu berücksichtigen:

- Produktion regenerativer Energien
- Energierückgewinnung und -verteilung
- Optimierung der Anlagentechnik und Betriebsprozesse
- Ausnutzung von Speichermöglichkeiten
- Strategische Energiebeschaffung
- Verknüpfung mit Maßnahmen zur Entwicklung blau-grüner Infrastrukturen

Ein zentrales Element ist die intelligente Vernetzung der klassischen Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Häufig handelt es sich hier um sehr dynamische Prozesse, da Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sektoren stattfinden oder eine Reaktion auf aktuelle Entwicklungen notwendig ist. Die zeitnahe oder vorausschauende Regulation eines solchen komplexen Systems ist nur mit Hilfe digitaler Instrumente zu leisten. Im LLEC wird dieser Ansatz besonders ausgereizt, da alle Informationen auf einer Plattform zusammenlaufen und gleichzeitig in den kognitiven Gebäuden bis auf die Raumbene eingegriffen werden kann. Damit auch andere Helmholtz-Zentren von den Erfahrungen des LLEC profitieren können, ist sowohl eine Weiterentwicklung der Plattform hin zu einer nicht-wissenschaftlich geprägten Anwendung als auch ein intensiver Wissenstransfer aus dem LLEC erforderlich.

Neben den konkreten technischen Herausforderungen vor Ort sind auch regulatorische Hürden zu beachten und zu bewältigen. Außerdem gilt es, die in vielen Bereichen sehr dynamische Technologieentwicklung regelmäßig zu beobachten, um ggf. auf Neuerungen reagieren zu können.

Die erfolgreiche Umsetzung dieser komplexen Aufgabe erfordert eine langfristige strategische Planung, interdisziplinäre Zusammenarbeit aller relevanten Akteure und eine gut strukturierte Steuerung der Teilprojekte. ■

Impressum

Herausgeber

Helmholtz Kompetenznetzwerk Klimagerecht Bauen
c/o Max Delbrück Center in Berlin-Buch

Robert-Rössle-Str. 10, 13125 Berlin

Telefon: +49 (0) 30 94 06-21 61

E-Mail: hkb@mdc-berlin.de

Webadresse: www.hkb.helmholtz.de

Einzelheiten zur inhaltlichen und rechtlichen

Verantwortlichkeit finden Sie auf:

www.hkb.helmholtz.de

Stand

19/11/2025