

Abschlussbericht

Labor für nachhaltige Energiesysteme Sustainable Energy Systems Lab (SES Lab)

Aktenzeichen:	AZ 37687
Berichtszeitraum:	01.01.2022 – 31.03.2025
Eingereicht:	30.06.2025
Verfasser:	Michael Penk, Stephan Baur
Institution:	Technische Universität München, Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme
Projektbeginn:	01.01.2022
Laufzeit:	39 Monate (kostenneutrale Verlängerung um 3 Monate)
Jahre:	3 Jahre + 3 Monate
Ort:	Garching bei München

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Bericht	5
Anlass und Zielsetzungen des Projekts.....	5
Laboraufbau, Experimentiermaterialien und Lehrkonzepte.....	7
1. <i>Haushaltslabor</i>	8
2. <i>Mobile Workshops</i>	11
Photovoltaik	11
Schritt für Schritt zur Kleinwasserkraftanlage (Peltonturbine).....	13
Grundlagen Mikrocontroller	14
Aufbau und Funktionsweise Wechselrichter	15
Simulation und Optimierung von Energiesystemen	16
Last- und Erzeugungsprofile spielerisch verstehen.....	16
3. <i>Internationalisierung</i>	17
Workshops und Veranstaltungen.....	19
1. <i>Haushaltslabor</i>	19
2. <i>Mobile Workshops</i>	21
Photovoltaik – Workshops und Lehrerfortbildungen.....	21
Schritt für Schritt zur Kleinwasserkraftanlage.....	22
Simulation und Optimierung von Energiesystemen	23
Last- und Erzeugerprofile spielerisch verstehen	24
3. <i>Internationalisierung</i>	25
Nepal – Workshop Photovoltaik	25
Nepal – Workshop Grundlagen Mikrocontroller	26
Thailand – Workshop Grundlagen Mikrocontroller	27
Senegal – Treffen mit einer Gruppe aus dem Senegal.....	27
Ukraine – Promotion of Energy Efficiency and Implementation of the EU Energy	28
Togo – Urbis Foundation Togo.....	28
Burkina Faso – Workshop Grundlagen Mikrocontroller und praxisnahe Lehre	28
Ghana – Workshop Photovoltaik und Erneuerbare Energien	29
4. <i>Laboreröffnung</i>	31
Diskussion.....	33
Fazit	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Gesamtkonzept	7
Abbildung 2: Übersicht Haushaltslabor	8
Abbildung 3: Verbrauchertyp 1	9
Abbildung 4: Verbrauchertyp 2 und 3	9
Abbildung 5: Wechselrichter, Batterie und HEMS im Haushaltslabor	10
Abbildung 6: Experiment Photovoltaik - Messung Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom	12
Abbildung 7: Experiment Photovoltaik - Betrieb einer LED mit Vorwiderstand	12
Abbildung 8: Experiment Photovoltaik - U-I-Kennlinie	12
Abbildung 9: Experiment Photovoltaik - variabler Verbraucher (Potentiometer)	12
Abbildung 10: Experiment Photovoltaik - CAD Konstruktion für Halterung eines PV-Moduls	12
Abbildung 11: Experiment Photovoltaik - Halterung mit einstellbarem Neigungswinkel	12
Abbildung 12: Experiment Photovoltaik - einfache Transportmöglichkeit mit Boxen und Rollbrett	13
Abbildung 13: Experiment Photovoltaik - Aufbewahrung der Materialien in übersichtlichen Boxen	13
Abbildung 14: Arduino-Starter-Kit	14
Abbildung 15: Platinen-Design für Workshop Wechselrichter	15
Abbildung 16: Mit LEGO-Bausteinen nachgestellte Last- und Erzeugerprofile	16
Abbildung 17: Aufzeichnung von Lastkurven	19
Abbildung 18: Berechnung von Energiemengen auf Grundlage von Messungen	19
Abbildung 19: Lehrerfortbildung - mobile PV-Experimente	21
Abbildung 20: Lehrerfortbildung - mobile PV-Experimente	21
Abbildung 21: Workshop Kleinwasserkraftanlage am Gymnasium Füssen	22
Abbildung 22: Workshop Kleinwasserkraftanlagen am Gymnasium Füssen	22
Abbildung 23: Workshop Simulation und Optimierung von Energiesystemen	23
Abbildung 24: Online-Tool zur Simulation und Optimierung von Energiesystemen	23
Abbildung 25: LEGO-Workshop zum Thema Last- und Erzeugerprofile	24
Abbildung 26: LEGO-Workshop zum Thema Last- und Erzeugerprofile	24
Abbildung 27: Mobile Workshops zum Thema Photovoltaik und Windkraft an der LBS in Nepal	25
Abbildung 28: Mobile Workshops zum Thema Photovoltaik und Windkraft	25
Abbildung 29: Workshop Grundlagen Mikrocontroller in Nepal	26
Abbildung 30: Workshop Grundlagen Mikrocontroller in Nepal	26
Abbildung 31: Treffen mit Gruppe Senegal	27
Abbildung 32: Treffen mit Gruppe Senegal	27
Abbildung 33: Experimente zum Thema Photovoltaik in Ghana	29
Abbildung 34: Experimente zum Thema Photovoltaik in Ghana	29
Abbildung 35: Experimente zum Thema Photovoltaik in Ghana	30
Abbildung 36: Experimente zum Thema Windkraft in Ghana	30
Abbildung 37: Laboreröffnung - Präsentation	31
Abbildung 38: Laboreröffnung - Haushaltslabor	31
Abbildung 39: Laboreröffnung - Verbraucheranalyse	32
Abbildung 40: Laboreröffnung - Erzeugeranalyse	32

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Labor für nachhaltige Energiesysteme“ bzw. „Sustainable Energy Systems Lab (SES Lab)“ wurde am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS) der Technischen Universität München (TUM) ein umfassendes Bildungs- und Experimentierangebot im Bereich nachhaltiger Energiesysteme mit einem hohen Praxis- und Alltagsbezug entwickelt und umgesetzt. Ziel war es, junge Menschen – insbesondere Schülerinnen, Schüler und Studierende – für wichtige und zentrale Themen der Energiewende wie Energieeffizienz, Energiesparen, Erneuerbare Energien und Sektorenkopplung zu sensibilisieren und sie aktiv in den Wissens- und Technologietransfer einzubeziehen.

Kern des Projekts bildeten drei sich ergänzende Säulen:

- (1) ein stationäres Haushaltslabor am Standort Garching mit realitätsnaher Infrastruktur zur experimentellen Analyse von Erzeugung, Verbrauch und Energiemanagement im häuslichen Kontext,
- (2) mobile Workshop-Formate für den Einsatz z. B. direkt an Schulen zu Themen wie Photovoltaik, Kleinwasserkraft, Mikrocontrollertechnik und Energiesystemsimulation und
- (3) internationale Kooperationsprojekte mit Partnerinstitutionen aus dem Bildungsbereich in Ländern des Globalen Südens.

Das stationäre Haushaltslabor wurde gemeinsam mit Studierenden geplant und aufgebaut und umfasst neben dezentraler Stromerzeugung (z. B. Photovoltaik-Freiflächenanlage mit Batteriespeicher) und einer Vielzahl realer und üblicher Verbraucher (z. B. Waschmaschine, Trockner, Kühlschrank, Elektroherd, Brauchwasserwärmepumpe) auch ein Home Energy Management System (HEMS). Mithilfe umfangreicher Messtechnik können Energieflüsse visualisiert und Lastprofile für eine detaillierte Analyse aufgezeichnet werden.

Die mobilen Workshops wurden didaktisch so aufbereitet, dass ein niederschwelliger und praxisnaher Zugang zu komplexen technischen Inhalten möglich ist. Alle Experimente der mobilen Workshops können in üblichen Klassenzimmern direkt an Schulen durchgeführt werden. Besonderer Wert wurde bei der Entwicklung auf die Modularität, die Kosteneffizienz und eine hohe Anpassungsfähigkeit der Experimente gelegt.

Im Rahmen der Internationalisierung fanden zahlreiche digitale und teilweise auch vor-Ort-Workshops u. a. in Nepal, Ghana, Burkina Faso und Thailand statt. Durch diese internationalen Kooperationsprojekte mit Partnerinstitutionen in Ländern des Globalen Südens konnten durch Wissens- und Technologietransfer auch dort Bildung zu nachhaltigen Energiesystemen bei Schülerinnen, Schüler und Studierenden gefördert werden. Zudem wurden Lehrkräfte und Dozenten geschult und Lehr- und Experimentiermaterialien zur Verfügung gestellt.

Das Projekt hat wirkungsvolle und übertragbare Konzepte für nationale wie internationale Bildungsarbeit im Bereich nachhaltiger Energiesysteme hervorgebracht und leistet somit einen bedeutenden Beitrag zur Qualifizierung junger Menschen und zur Umsetzung der Klimaschutzziele.

Bericht

Anlass und Zielsetzungen des Projekts

Anlass und Ausgangssituation:

Auf der internationalen Klimakonferenz im Jahr 2015 wurde das Pariser Klimaabkommen beschlossen. Alle beteiligten Staaten haben sich dazu verpflichtet, die Weltwirtschaft auf klimafreundliche Weise zu verändern. Gemeinsam wurden nationale Klimaschutzziele definiert. Hierzu zählt unter anderem, den weltweiten Temperaturanstieg auf mindestens unter 2 Grad Celsius zu begrenzen. Um diese Vorgaben zu erreichen, soll die Europäische Union (EU) bis 2050 und Deutschland bis 2045 klimaneutral sein. In der EU und in Deutschland sollen dazu bis 2050 bzw. 2045 nur noch unvermeidbare Treibhausgase ausgestoßen und diese wenigen Emissionen vollständig ausgeglichen werden.

Diese geplante Reduktion von CO₂-Emissionen führt zu gravierenden Veränderungen und Anpassungen der Energiesysteme. Zentrale Maßnahmen in diesem Bereich sind:

Ausbau von erneuerbaren Energien, Steigerung der Energieeffizienz, Einsparung von Energie, Kopplung der verschiedenen Sektoren und Einsatz von intelligenten Steuerungskomponenten.

Moderne Energiesysteme setzen einen neuen Blickwinkel auf die Erzeuger- und Verbraucherseite voraus. Beide Seiten können nicht mehr separiert betrachtet werden, sondern stellen eine komplexe Einheit dar. Die Umsetzung aller notwendigen Maßnahmen ist zudem ausschließlich als gesamtgesellschaftliches Projekt möglich und fordert somit die enge Zusammenarbeit und den intensiven Austausch zwischen Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Bevölkerung.

Aktuell zeigt sich unter anderem die Problematik, dass bei der Bevölkerung teilweise die Akzeptanz, die Motivation und das Wissen über die Notwendigkeit und die verschiedenen Optionen und deren Umsetzung fehlt. Um dieser Herausforderung zu begegnen und Hürden zu überwinden, sind neue, zusätzliche und innovative Methoden zur Informationsvermittlung und zum Wissenstransfer notwendig.

Als ein zentraler Schlüssel kann eine entsprechende Qualifikation bzw. Ausbildung von Kindern, Jugendlichen, Auszubildenden und Studierenden dienen. Gezielte, gut durchdachte und motivierende Bildungsmaßnahmen für die junge Bevölkerung im Bereich nachhaltiger Energiesysteme unterstützen die erfolgreiche Umsetzung der gesetzten Klimaschutzziele.

Die Klimaschutzziele können nur erreicht werden, indem die CO₂-Emissionen global reduziert werden. Somit ist entscheidend, dass auch die Energiesysteme in armen Ländern angepasst werden. Durch das Pariser Klimaabkommen haben sich die beteiligten Staaten verpflichtet ärmere Länder bei diesem Prozess zu unterstützen. Dies kann z. B. durch Wissens- und Technologietransfer erfolgen.

Zielsetzungen:

Zentrale Ziele des Projektes sind einerseits die Steigerung des Verständnisses bei Studierenden in den entsprechenden Fachbereichen und andererseits die Erweiterung des Wissens und der Erfahrungen bei Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften für die Themen Energiesparen, Energieeffizienz und

nachhaltige Energiesysteme. Besonderen Wert soll bei allen Vorhaben auf einen hohen Praxis- und Alltagsbezug gelegt werden, was in der Regel zu einer hohen Motivation bei den Beteiligten führt.

Besonders zielführend können integrative pädagogische Ansätze sein, indem zum Beispiel Teams aus Schülerinnen, Schülern, Studierenden und Wissenschaftlern gemeinsam an Projekten, Forschungsvorhaben und Lösungsstrategien arbeiten.

Für die Umsetzung der Ziele wird unter anderem ein **stationäres Labor (Haushaltslabor)** für nachhaltige Energiesysteme (SES Lab) am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS) an der Technischen Universität München (TUM) entwickelt und aufgebaut. Ein Freiflächenlabor mit realen Erzeugeranlagen soll die Möglichkeiten des Haushaltslabor ergänzen. Das zentrale stationäre Labor wird durch eine **mobile Ausstattung für Experimente (mobile Workshops)** ergänzt, um auch Workshops z. B. direkt in Schulen durchführen zu können.

Folgende inhaltlichen Schwerpunkte werden durch das Haushaltslabor und die mobilen Workshops abgedeckt:

- Erzeugerseite (z. B. Untersuchungen von PV-Anlagen)
- Verbraucherseite (z. B. Analyse von alltagstypischen Verbrauchern im Haushalt)
- Verknüpfung beider Bereiche (Energiemanagementsysteme)

Bei allen Experimenten und Workshops steht ein hoher Praxis- und Alltagsbezug im Vordergrund.

Mit Hilfe des Labors (stationäres Labor und mobile Ausstattung) werden diverse **Veranstaltungen** für Schülerinnen, Schüler und Studierende durchgeführt. Für Studierende werden durch das Labor zudem Forschungsprojekte z. B. im Rahmen einer Forschungspraxis, Bachelorarbeit oder Masterarbeit ermöglicht.

Durch gezielten Wissens- und Technologietransfer sollen schließlich auch Bildungseinrichtungen in Entwicklungsländern im Themenbereich nachhaltige Energiesysteme unterstützt werden. Im Rahmen dieser **Internationalisierung** z. B. durch **internationale Workshops** sollen über moderne digitale Möglichkeiten Teile des Labors bzw. ausgewählte mobile Workshops schrittweise für Schülerinnen und Schüler und Studierende in Entwicklungsländern als weitere Zielgruppe geöffnet werden. Zudem erfolgt ein Wissens- und Erfahrungsaustausch mit Lehrenden an verschiedenen Bildungseinrichtungen in Entwicklungsländern in z. B. den Bereichen moderne Lehre, Lehrkonzepte und Laborausstattungen.

Alle Ziele haben langfristig direkt oder indirekt einen Impact für die Umweltentlastung und führen zu einer Reduktion der CO₂-Emission. Kinder, Jugendliche und Studierende können ihre Erkenntnisse und Erfahrungen durch das Projekt direkt in ihren Alltag integrieren und zugleich agieren sie als Multiplikatoren und können ihr generiertes Wissen und die gewonnenen Erfahrungen im späteren Berufsleben bzw. im Alltag ihrer Familien- und Freundeskreise integrieren.

Laboraufbau, Experimentiermaterialien und Lehrkonzepte

Wie bei den Zielsetzungen erläutert werden durch das Gesamtprojekt folgende zentrale Inhalte mit einem hohen Praxis- und Alltagsbezug in der Regel experimentell beleuchtet: Energiesparen, Energieeffizienz und nachhaltige Energiesysteme. Um diese Inhalte den Teilnehmerinnen und Teilnehmer näher zu bringen, werden insbesondere folgende Schwerpunkte durch das Projekt abgedeckt: Erzeugerseite, Verbraucherseite und die Verknüpfung beider Bereiche.

Die Umsetzung des Gesamtprojekts, was als Labor für nachhaltige Energiesysteme bzw. Sustainable Energy System Lab (**SES Lab**) bezeichnet wird, basiert auf drei zentralen Säulen (siehe Abbildung 1).

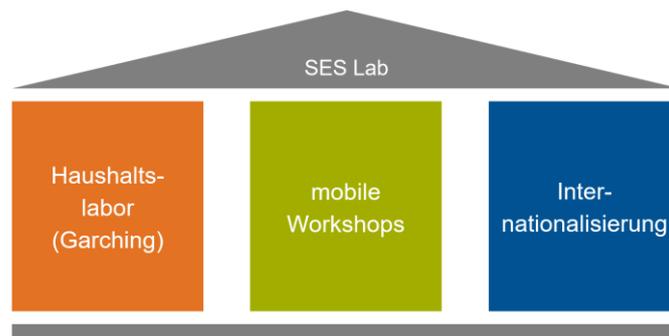


Abbildung 1: Übersicht Gesamtkonzept

Für das Projekt wurde ein stationäres Labor, das sogenannte **Haushaltslabor**, entwickelt und am Lehrstuhl für Erneuerbare und nachhaltige Energiesystem an der Technischen Universität München in Garching aufgebaut. Dieses Haushaltslabor bietet durch die umfangreiche Ausstattung eine Vielzahl von verschiedenen Möglichkeiten für unterschiedlichste Veranstaltungen. Das Haushaltslabor bildet ein reales Gesamtsystem aus Erzeugern und Verbrauchern ab.

Als Ergänzung zum Haushaltslabor wurde eine umfangreiche Ausstattung für Experimente und Workshops zusammengestellt, die sowohl in den Räumlichkeiten in Garching aber auch direkt z. B. an Schulen durchgeführt werden könne. Diese **mobilen Workshops** beleuchten in der Regel einzelne Themen wie z. B. die Analyse von Photovoltaikmodulen und sind so gestaltet, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer entweder allein oder in Kleingruppen experimentieren (Schülerexperimente).

Um auch der globalen Verantwortung gerecht zu werden, wurden insbesondere ein Teil der mobilen Workshops ausgewählt und so angepasst, dass diese an Bildungseinrichtungen in anderen Weltregionen insbesondere in Ländern des globalen Südens durchgeführt werden können. Im Rahmen der **Internationalisierung** wurden für verschiedene Bildungseinrichtungen in ärmeren Ländern die Experimentiermaterialien und Lehrkonzepte zur Verfügung gestellt, internationale Workshops durchgeführt und zudem Lehrkräfte und Dozenten in verschiedenen Themengebieten beraten.

In den folgenden drei Unterkapiteln wird detailliert beschrieben, was jeweils konkret im Rahmen der drei erwähnten Säulen entwickelt, aufgebaut und zusammengestellt wurde. Insbesondere werden die Hardware und auch die Lehrkonzepte und Lehrmaterialien erläutert. Im Kapitel „Workshops und Veranstaltungen“ werden schließlich die bereits im Rahmen des Gesamtprojektes durchgeführten zentralen und wesentlichen Veranstaltungen aufgelistet und beschrieben und dabei ebenfalls den drei Säulen zugeordnet.

1. Haushaltslabor

Der Aufbau des Labors (Haushaltslabor) in Garching war der zentrale Aufgabenschwerpunkt in der gesamten Projektlaufzeit. Mit Unterstützung zahlreicher Studierender, welche hier die Möglichkeit hatten, praktische und alltagsnahe Erfahrungen zu sammeln, wurde eine umfangreiche Infrastruktur geschaffen, welche es ermöglicht die Anforderungen aus dem Projektantrag zu erfüllen. Diese wurden erweitert und ergänzt, um z. B. auch die Anforderungen des neuen bayerischen Lehrplans (G9) im Fach Physik für die 11. Jahrgangsstufe abzudecken. In diesem Lehrplan ist unter anderem eine außerschulische Aktivität, wie der Besuch eines Schülerlabors, verpflichtend. Weiterhin flossen bei dem Laborkonzept persönliche Erfahrungen mit ein, welche in zahlreichen Workshops und Veranstaltungen gesammelt wurden.

Der Prozess der Umsetzung wurde bereits in den Zwischenberichten ausführlich geschildert. Daher soll es im Folgenden primär um den Ist-Zustand und eine Beschreibung der Laborräume zum Projektende gehen.

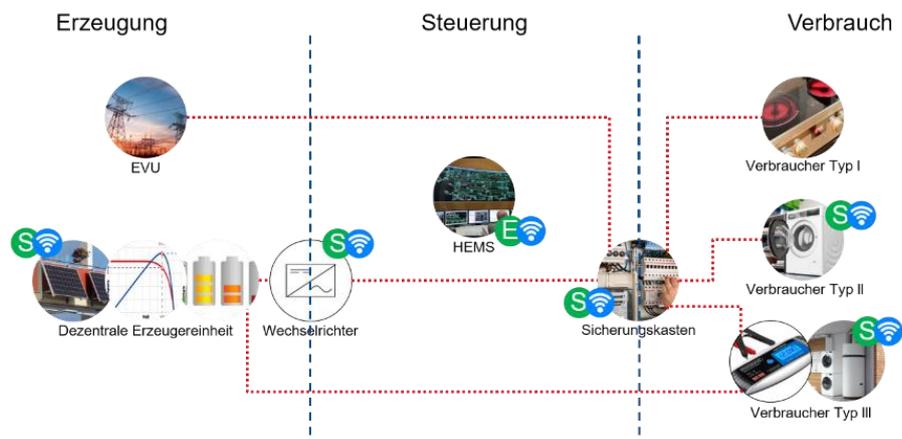


Abbildung 2: Übersicht Haushaltslabor

In Abbildung 2: Übersicht Haushaltslabor ist die schematische Darstellung des gesamten Haushaltslabors dargestellt. Zur Unterscheidung und besseren Übersicht wurde das Labor wie in der Projektskizze in verschiedene Bereiche unterteilt:

- **Erzeugung**
 - EVU (Energieversorgungsunternehmen) – Einspeisung aus dem öffentlichen Netz
 - dezentrale Erzeugereinheit
- **Steuerung**
 - HEMS (Home Energy Management System)
- **Verbrauch**
 - Verbraucher Typ 1
 - Verbraucher Typ 2
 - Verbraucher Typ 3
- **Schnittstellentechnologie**
 - Wechselrichter zwischen Erzeugung und Steuerung
 - Sicherungskasten zwischen Steuerung und Verbrauch

Im Zentrum des Versuchsaufbaus (Haushaltslabor) befindet sich ein Sicherungskasten (alternativ: Hausanschlusskasten), welcher über eine Netzeinspeisung an das öffentliche Stromnetz angeschlossen ist. Der Strombezug erfolgt über ein Energieversorgungsunternehmen (EVU), wodurch die benötigte Energiemenge in kWh entsprechend abgerechnet wird.

Die angeschlossenen Verbraucher (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4) sind in drei Kategorien unterteilt:

- **Verbrauchertyp 1:** Nicht steuerbare Lasten, wie z. B. ein Elektroherd. Diese Geräte werden unabhängig von Strompreis oder Empfehlungen vom HEMS betrieben, weil ihre Nutzung unmittelbar notwendig ist.
- **Verbrauchertyp 2:** Bedingt steuerbare Verbraucher, wie etwa Wasch- oder Spülmaschinen. Diese lassen sich zeitlich flexibel betreiben, benötigen jedoch eine manuelle Vorbereitung (z. B. Befüllung mit Wasch- oder Spülmittel).
- **Verbrauchertyp 3:** Vollständig steuerbare Verbraucher, wie Wärmepumpen oder Batterieladegeräte. Diese Geräte können automatisiert abhängig von äußeren Bedingungen wie Strompreis oder Photovoltaikertrag betrieben werden.



Abbildung 3: Verbrauchertyp 1



Abbildung 4: Verbrauchertyp 2 und 3

Zusätzlich ist eine dezentrale Energieerzeugungseinheit in das System eingebunden – ein sogenanntes Balkonkraftwerk, bestehend aus einer kleinen Photovoltaikanlage (PV). Diese versorgt über einen Batterieladeregler eine angeschlossene Batterie, welche wiederum über einen Wechselrichter mit dem Sicherungskasten verbunden ist. Die Regelung dieses Systems verfolgt das Ziel, den Bezug vom öffentlichen Netz auf ein Minimum bzw. auf null zu reduzieren (Nulleinspeisung).

Alle Komponenten des Labors sind mit handelsüblicher und umfangreicher Messtechnik ausgestattet und über ein zentrales **Home Energy Management System (HEMS)** (siehe Abbildung 5) miteinander vernetzt. Dieses System überwacht und steuert die Verbraucher und Erzeuger und optimiert deren Zusammenspiel hinsichtlich Effizienz und Wirtschaftlichkeit. So kann beispielsweise die Wärmepumpe (Brauchwasserwärmepumpe) automatisch eingeschaltet werden, wenn ein PV-Überschuss vorhanden ist, oder die Batterie geladen werden, wenn besonders günstige Strompreise vorliegen. Alle Messdaten werden auf einem eingerichteten Server gespeichert und können übersichtlich z. B. an einem Bildschirm oder Tablet visualisiert werden. Mit diesen Möglichkeiten können sowohl Echtzeitdaten als auch Daten über längere Zeiträume dargestellt werden. Die Daten bzw. Lastkurven können dann ausgewertet, interpretiert oder für weitere Berechnungen verwendet werden.



Abbildung 5: Wechselrichter, Batterie und HEMS im Haushaltslabor

Das gesamte Labor wurde so konzipiert und aufgebaut, dass das System modular beliebig erweiterbar ist bzw. angepasst werden kann. Auf diese Art und Weise können z. B. in Zukunft ohne großen Aufwand weitere Verbraucher oder Erzeugereinheiten im System integriert werden.

2. Mobile Workshops

Das beschriebene zentrale stationäre Labor (Haushaltslabor) mit Freiflächenanlage in Garching wird durch eine mobile Ausstattung für Experimente (mobile Workshops) ergänzt. Diese mobilen Workshops können schließlich entweder in den Räumlichkeiten in Garching oder auch direkt an Schulen durchgeführt werden. Für einen Teil der mobilen Workshops wurden zudem Lehrmaterialien erstellt, damit die Workshops z. B. selbstständig von Lehrkräften ohne großen Aufwand an den Schulen umgesetzt werden können. Die Konzepte für die mobilen Workshops sind in der Regel so gestaltet, dass die Experimente von kleinen Schülergruppen selbstständig ausgeführt werden können, damit ein sehr schüleraktiver Unterrichtsstil ermöglicht wird. Bei der notwendigen Ausstattung für die Experimente wurde darauf geachtet, dass die Kosten und die Komplexität möglichst gering sind, damit eine Anschaffung von z. B. einem Klassensatz (z. B. 15 Experimentierkisten) realistisch ist. Konzepte, Lehrmaterialien und auch Materiallisten können so direkt an Schulen weitergegeben werden. Im Folgenden werden die erarbeiteten mobilen Workshops vorgestellt.

Photovoltaik

Für das Thema Photovoltaik wurde eine umfassende mobile Ausstattung entwickelt und in mehrfacher Ausführung zusammengestellt. Ergänzend dazu wurden didaktisch aufbereitete Lehrkonzepte und begleitende Unterrichtsmaterialien erstellt.

Im Zentrum aller Workshops steht das grundlegende Verständnis der Funktionsweise von Photovoltaikmodulen sowie deren praktische Anwendungen im Alltag. Die Angebote sind differenziert nach Altersstufen und Lernniveaus:

- Grundschule:
Spielerischer Zugang zur Photovoltaik durch einfache, anschauliche Experimente. Ziel ist es, Neugier und erstes technisches Verständnis zu fördern.
- Mittelstufe:
Einführung in technische Grundlagen von Photovoltaikmodulen wie Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom (siehe Abbildung 6). Ausführlich werden verschiedene Szenarien einer Verschattung der Module analysiert. Die Schülerinnen und Schüler lernen zudem die Wirkungsweise von Reihen- und Parallelschaltungen kennen und setzen PV-Module zur Versorgung einfacher Verbraucher wie Lampen (siehe Abbildung 7) oder Motoren ein. Auch die Möglichkeit der Energiespeicherung wird thematisiert. Als Energiespeicher werden passende Kondensatoren verwendet, damit ein rascher Lade- und Entladevorgang simuliert werden kann.
- Oberstufe:
Vertiefte Auseinandersetzung mit Photovoltaikmodulen durch Messung und Analyse charakteristischer U-I-Kennlinien (siehe Abbildung 8) sowie Bestimmung des Maximum Power Points (MPP). Zusätzlich werden äußere Einflussfaktoren wie Einstrahlungswinkel, Lichtintensität, Verschattung und Temperatur untersucht.

Zu jedem Workshop stehen ausführlich ausgearbeitete Arbeitsblätter zur Verfügung, die eine eigenständige oder kooperative Durchführung der Experimente ermöglichen.

Bei der Auswahl der Materialien wurde gezielt darauf geachtet, handelsübliche Komponenten zu verwenden – möglichst solche, die an Schulen ohnehin vorhanden sind. Gleichzeitig wurde auf

Kosteneffizienz geachtet, um eine realistische Ausstattung mit mehreren Experimentierkästen an Schulen zu ermöglichen.



Abbildung 6: Experiment Photovoltaik - Messung Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom

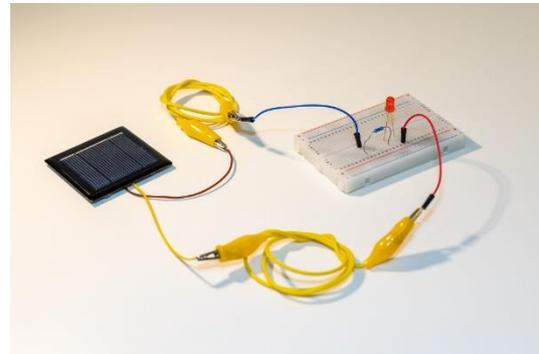


Abbildung 7: Experiment Photovoltaik - Betrieb einer LED mit Vorwiderstand

Spezielle Komponenten, wie beispielsweise eine Box mit variablen Verbrauchern (Potentiometer, siehe Abbildung 9) oder eine Halterung für Photovoltaikmodule (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) im Oberstufen-Workshop, wurden mithilfe von CAD konstruiert. Diese lassen sich kostengünstig und unkompliziert per 3D-Druck herstellen.



Abbildung 8: Experiment Photovoltaik - U-I-Kennlinie



Abbildung 9: Experiment Photovoltaik - variabler Verbraucher (Potentiometer)

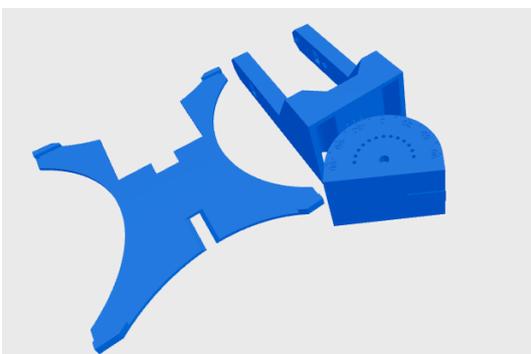


Abbildung 10: Experiment Photovoltaik - CAD Konstruktion für Halterung eines PV-Moduls



Abbildung 11: Experiment Photovoltaik - Halterung mit einstellbarem Neigungswinkel

Für maximale Mobilität und einfache Transportmöglichkeiten sind alle Komponenten für die Workshops zum Thema Photovoltaik in robusten Kunststoffboxen (siehe Abbildung 13) untergebracht. Die Materialien sind nach Jahrgangsstufen sortiert und jeweils in separate Boxen einsortiert. Durch dieses System ist ein unkompliziertes Handling gewährleistet – die Komponenten sind sicher, übersichtlich und griffbereit verstaut. Die Boxen lassen sich problemlos stapeln und mithilfe eines Rollbretts (siehe Abbildung 12) bequem und flexibel an den Einsatzort transportieren.



Abbildung 12: Experiment Photovoltaik - einfache Transportmöglichkeit mit Boxen und Rollbrett



Abbildung 13: Experiment Photovoltaik - Aufbewahrung der Materialien in übersichtlichen Boxen

Schritt für Schritt zur Kleinwasserkraftanlage (Peltonturbine)

Im Rahmen der mobilen Ausstattung bzw. mobilen Workshops wurde ein praxisnaher Aufbau zum Thema Kleinwasserkraftanlagen konzipiert und realisiert. Dieser Aufbau ist so gestaltet, dass die notwendigen Komponenten problemlos mit einem handelsüblichen PKW transportiert werden können. Dadurch eignet er sich ideal als mobiler Workshop – nicht nur am Standort Garching, sondern auch an verschiedenen Bildungseinrichtungen direkt vor Ort.

Der Workshop trägt den Titel „Schritt für Schritt zur Kleinwasserkraftanlage“. Herzstück des Systems ist eine funktionsfähige Peltonturbine mit Generator und angeschlossener Verbrauchereinheit. Die Turbine wird über eine Wasserpumpe (max. ca. 6 bar) betrieben und verfügt, je nach Betriebsart über eine oder zwei Düsen. Durch den geschlossenen Wasserkreislauf – bestehend aus Pumpe und Auffangbehälter – kann der Aufbau ohne besondere Infrastruktur, z. B. in einem Klassenzimmer, betrieben werden.

Zur Erfassung und Auswertung relevanter Daten ist das System mit verschiedenen Messsensoren und einer entsprechenden Datenerfassung ausgestattet. Die Messdaten werden übersichtlich z. B. an einem Bildschirm oder über einen Beamer visualisiert.

Ergänzend zum technischen Aufbau wurden zwei didaktische Konzepte entwickelt, die auf unterschiedliche Schulstufen zugeschnitten sind:

- Für die Mittelstufe liegt der Fokus auf dem Wirkungsgrad – inklusive der Kopplung mehrerer Wirkungsgrade.
- In der Oberstufe steht das Thema Induktion im Vordergrund – insbesondere im Zusammenhang mit Generatoren und Wechselspannung.

Durch den Workshop erhalten die Teilnehmenden ein anschauliches Verständnis für die Funktionsweise von Pelton-turbinen und Kleinwasserkraftanlagen sowie deren praktische Anwendung in der realen Welt.

Grundlagen Mikrocontroller

Das Arbeiten und Experimentieren mit Mikrocontrollern bietet Schülerinnen, Schülern und Studierenden einen praxisnahen und spannenden Zugang zur digitalen Welt, weil Software- und Hardwareprojekte in Kombination durchgeführt werden. Sie lernen nicht nur, wie moderne Technologien funktionieren, sondern können eigene kreative Projekte umsetzen. Dem Erfindungsgeist sind kaum Grenzen gesetzt und so lassen sich mit Mikrocontrollern sehr einfache Projekte (z. B. blinkende LED), aber auch sehr komplexe Vorhaben (z. B. smarte Messsysteme) umsetzen. Mikrocontroller machen Technik greifbar, fördern logisches Denken und zeigen insbesondere direkt sichtbare Erfolge. Das motiviert, weckt Neugier und vermittelt wichtige Kompetenzen in einer zunehmend digitalisierten Welt.

Der Einsatz von Mikrocontrollern ist auch im Bereich der Energietechnik äußerst sinnvoll, weil sie eine Schlüsselrolle in modernen, energieeffizienten Systemen spielen. Mikrocontroller können z. B. beim Überwachen von Spannungen und Strömen oder dem Steuern von Photovoltaikanlagen sinnvoll eingesetzt werden. Mithilfe von Mikrocontrollern lassen sich z. B. abstrakte Konzepte wie Energiemanagement, Automatisierung oder Smart Grids konkret erlebbar machen.

Aus den erläuterten Gründen wurde ein Workshop „Grundlagen Mikrocontroller“ erarbeitet, der einen einfachen Einstieg in das Thema Mikrocontroller bietet. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer müssen über keine Erfahrungen in dem Thema verfügen. Prinzipiell bieten sich verschiedene Mikrocontroller (z. B. Arduino, ESP oder Raspberry Pi) für einen derartigen Workshop an. Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass der Einstieg besonders gut und ohne große Hürden mit dem Arduino-Board funktioniert.

Für den Workshop wurde ein ausführliches Skript „Arduino Instruction – A handout for beginners“ mit einem Umfang von gut 50 Seiten (PDF-Dokument) erstellt. Ein einfaches Arduino-Starter-Kit (siehe Abbildung 14), das von verschiedenen Herstellern angeboten wird und in einem Preisbereich von etwa 10 bis 15 Euro liegt, stellt die Grundlage für den Workshop dar. Ein Laptop oder Computer pro Teilnehmerin bzw. Teilnehmer oder Gruppe wird vorausgesetzt.



Abbildung 14: Arduino-Starter-Kit

Bei dem Skript handelt es sich um eine sehr kleinschrittige Anleitung mit zahlreichen Abbildungen und Screenshots, damit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein wirklich einfacher Einstieg ermöglicht wird. Das Skript beinhaltet insgesamt 13 Einzelprojekte mit ausführlichen und kommentierten Lösungen für den notwendigen Programmcode. Aber auch die zentralen Grundlagen der Programmierung (Variablen, Bibliotheken, if-Abfragen, for-Schleife, usw.) werden behandelt. Die Einzelprojekte reichen von einfachen Aufbauten mit LEDs, über Licht- und Tonsignale bis hin zu Lichtsensoren und Datenerfassungen.

Mithilfe der ausführlichen Anleitung ist ein sehr selbstständiges Arbeiten möglich und so ist ein Input bzw. eine Unterstützung von außen ausschließlich bei Bedarf oder Problemen notwendig. Das notwendige Starter-Kit kann unproblematisch und kostengünstig mit zahlreichen zusätzlichen Hardwarekomponenten erweitert werden. Dies ermöglicht es, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer nach dem Grundlagenkurs sich selbstständig mit weiteren kreativen Projekten beschäftigen.

Aufbau und Funktionsweise Wechselrichter

Im Rahmen des Projekts wurde ein experimenteller Workshop zur Funktionsweise von Wechselrichtern entwickelt, der sich insbesondere für den Einsatz im schulischen Kontext (z. B. in der Oberstufe oder der 11. Jahrgangsstufe) eignet. Der Workshop wurde bereits mehrfach erfolgreich mit Studierenden durchgeführt und dabei kontinuierlich weiterentwickelt.

Ziel des Workshops ist es, das Prinzip der Stromumwandlung – von Gleichstrom zu Wechselstrom – praxisnah zu vermitteln und zu verstehen. Der aktuelle Aufbau basiert auf einem Breadboard, auf dem eine sogenannte H-Brücke realisiert wird. Herzstück dieses Aufbaus sind vier Transistoren, die in ihrer Schaltlogik das Verhalten eines einfachen Wechselrichters nachbilden.

Zur didaktischen Vereinfachung und Erhöhung der Praxistauglichkeit wird derzeit eine kompakt bestückte Platine entwickelt (siehe Abbildung 15). Diese reduziert die Komplexität des Aufbaus erheblich, minimiert potenzielle Fehlerquellen und erlaubt einen reibungslosen Ablauf der Experimente – auch im Schulunterricht. So kann der Fokus gezielt auf die physikalischen und technischen Zusammenhänge gelegt werden, ohne dass vertiefte elektrotechnische Vorkenntnisse notwendig sind.

Durch diesen modularen und robusten Aufbau wird der Workshop nicht nur im Hochschulkontext, sondern auch im schulischen Umfeld realisierbar und leistet einen wichtigen Beitrag zur praxisnahen Vermittlung von Energietechnik.

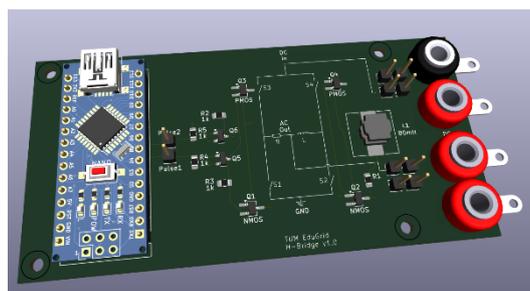


Abbildung 15: Platinen-Design für Workshop Wechselrichter

Simulation und Optimierung von Energiesystemen

Für den mobilen Workshop „Simulation und Optimierung von Energiesystemen“ wird als zentrale Komponente ein an der Technischen Universität München (TUM) entwickeltes Online-Tool verwendet.

Die Schülerinnen und Schüler können mit diesem Online-Tool selbstständig ein Energiesystem entwerfen, dessen Kapazitäten dimensionieren und unter Kostenaspekten optimieren. Dabei können komplexe Konzepte wie der Ausbauplan von Energieinfrastrukturen sowie die Kraftwerkseinsatzplanung (Unit Commitment) anschaulich und altersgerecht vermittelt werden.

Durch die interaktive Auseinandersetzung mit realitätsnahen Szenarien bekommen die Teilnehmenden nicht nur ein besseres Verständnis für technische und wirtschaftliche Zusammenhänge im Energiesektor, sondern auch einen Einblick in aktuelle Fragestellungen der Energiewende und Systemtransformation. Mithilfe des Workshops und des Online-Tools können sowohl das Interesse an energietechnischen Themen als auch das Bewusstsein für nachhaltige Zukunftsplanung gefördert werden.

Last- und Erzeugungsprofile spielerisch verstehen

Ziel bei der Entwicklung des Workshops „Last- und Erzeugerprofile spielerisch verstehen“ war es, ein Medium zum Wissenstransfer zu finden, welches allgemein bekannt und beliebt ist. Die Wahl dabei viel auf LEGO-Bausteine. Diese entsprechen im Rahmen des Workshops je nach Größe (Höhe) einem bestimmten Leistungswert und können so über die Tageszeit (24-Stunden Zeitachse) gestapelt und platziert werden. Dadurch ergeben sich die gewünschten individuellen Lastprofile und Erzeugungsprofile (siehe Abbildung 16).

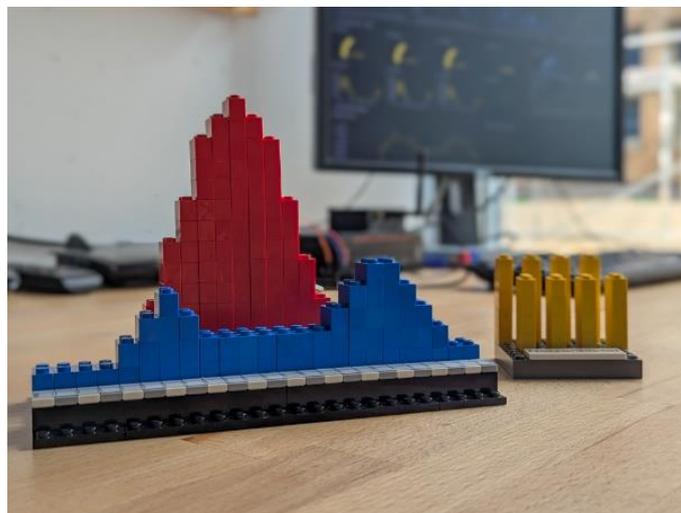


Abbildung 16: Mit LEGO-Bausteinen nachgestellte Last- und Erzeugerprofile

Der Workshop besteht aus drei Stationen. Diese Stationen bauen aufeinander auf und können somit nur in der vorgegebenen Reihenfolge bearbeitet werden. Dazu werden Gruppen von maximal drei Personen gebildet. Die Angaben-, Aufgaben- und Informationsblätter der einzelnen Stationen sind so gestaltet, dass der Workshop ohne Hilfe des Workshopleiters innerhalb der einzelnen Gruppen durchgeführt werden kann. Dies wird mithilfe von Zusatzinformationen, Lösungen und Erklärvideos,

welche über QR-Codes abrufbar sind, gewährleistet. Innerhalb der Stationen werden für die Bearbeitung von einzelnen oder mehreren Aufgaben Bearbeitungszeiträume vorgegeben, dies ermöglicht einen planbaren Ablauf des etwa zweistündigen Workshops. Vor dem Beginn der ersten Station erhalten die Workshopteilnehmenden eine kurze Einführung des Workshopleiters, welche das Interesse für die kommenden Aufgaben steigern soll. Diese Einführung kann zum Beispiel auf die aktuelle Bedeutung von erneuerbaren Energien mit dem Blick auf PV-Anlagen im eigenen Haushalt hinweisen. Es ist auch möglich die Einführung durch den jeweiligen Leiter so anzupassen, dass ein aktuelles Ereignis (z. B. Zeitungsartikel oder TV-Bericht) miteinbezogen wird. Nach Abschluss der dritten Station und somit am Ende des Workshops, werden die gelernten Inhalte noch einmal mit den teilnehmenden Personen in Form einer Reflexion besprochen und auf etwaige Fragen eingegangen. Der gesamte Workshop wird zudem durch eine PowerPoint-Präsentation begleitet. Dadurch können auch auftretende Fragen zu den Arbeitsaufträgen und Informationsblättern jederzeit beantwortet werden. Die Arbeitsblätter können auf der Präsentation dazu über Links vergrößert dargestellt werden. Den teilnehmenden Personen bietet die Präsentation zudem eine Orientierung des Workshopablaufes. So informiert ein digitaler Zeitgeber die Teilnehmerinnen und Teilnehmer, wie viel Zeit sie noch für die Bearbeitung der jeweiligen Aufgaben zur Verfügung haben.

Insgesamt bietet der Workshop die Möglichkeit das facettenreiche Thema Last- und Erzeugungsprofile sehr greifbar und anschaulich zu beleuchten und zudem können im Rahmen des Workshops wertvolle und interessante Diskussionen innerhalb und zwischen den Gruppen entstehen.

3. Internationalisierung

Wie in den Zielsetzungen formuliert, soll das Gesamtprojekt auch Bildungseinrichtungen außerhalb Deutschlands – insbesondere in Ländern des globalen Südens – gezielt unterstützen. Diese Internationalisierung kann und wurde auf vielfältige Weise umgesetzt werden.

Ein naheliegender Ansatz ist die Bereitstellung ausgewählter mobiler Workshops für internationale Bildungseinrichtungen. Dies erfolgte z. B. durch die Weitergabe von Lehrkonzepten und Unterrichtsmaterialien in digitaler Form. Ergänzend ist eine Ausstattung mit Experimentiermaterialien oder eine Unterstützung bei deren Beschaffung erfolgt. Die Unterrichtsmaterialien wurden dafür auch in relevante Sprachen übersetzt.

Darüber hinaus ermöglichte die digitale Infrastruktur die Betreuung internationaler Workshops direkt aus Deutschland – etwa durch regelmäßige Videokonferenzen. Alternativ haben auch Reisen ins Ausland und Präsenzveranstaltungen vor Ort stattgefunden, was zusätzlich den Vorteil bietet, benötigtes Material direkt mitzuführen.

Besonders geeignet für eine internationale Umsetzung sind die Workshops zu den Themen Photovoltaik sowie Grundlagen der Mikrocontrollertechnik. Beide zeichnen sich durch geringe Materialkosten, eine überschaubare technische Komplexität und hohen Praxisbezug aus – ideale Voraussetzungen für einen breiten Einsatz im Globalen Süden.

Neben der Bereitstellung von Lehrmaterialien ist der direkte Erfahrungsaustausch mit Lehrkräften und Dozierenden vor Ort von zentraler Bedeutung. Ziel dabei war und ist ein nachhaltiger Wissenstransfer, der folgende Maßnahmen einschließt:

- Fortbildungsangebote und persönliche Begleitung für Lehrkräfte und Dozierende

- Beratung bei der Ausstattung und dem Aufbau von Laboren
- Unterstützung bei der Entwicklung neuer, praxisnaher Lehrkonzepte
- Mitwirkung bei der Gestaltung oder Anpassung von Lehrplänen

Im Zentrum all dieser Aktivitäten steht der Anspruch, eine hohe Anwendungsorientierung und Praxisnähe zu gewährleisten.

Workshops und Veranstaltungen

In diesem Kapitel werden alle wesentlichen im Projektzeitraum stattgefundenen Workshops und Veranstaltungen aufgelistet und kurz beschrieben. Neben dem Aufbau des zentralen Labors und der Entwicklung der mobilen Workshops war die Durchführung von Versuchen und Experimenten ein Hauptziel des Gesamtprojektes, um die Konzepte und Aufbauten mit Teilnehmerinnen und Teilnehmern zu testen und wertvolle Erfahrungen für eventuelle Optimierungen zu sammeln.

1. Haushaltslabor

Meilenstein – Generalprobe und Workshop im Haushaltslabor

Ein zentraler Meilenstein im Projektverlauf wurde mit der erfolgreichen Durchführung einer ersten Generalprobe im Rahmen eines Workshops in der Haushaltslaborumgebung erreicht (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18). An zwei aufeinanderfolgenden Tagen nahmen jeweils Physikklassen der 11. Jahrgangsstufe an der Erprobung teil. Die Schülerinnen und Schüler hatten dabei die Möglichkeit, aktiv zu experimentieren und die technische Infrastruktur eigenständig zu erkunden.

Ziel dieses Workshops war es, die Funktionsfähigkeit der Laborumgebung unter realen Einsatzbedingungen zu evaluieren und praktische Erkenntnisse über die Umsetzbarkeit zukünftiger Versuche und Experimente zu gewinnen. Neben der technischen Leistungsfähigkeit des Systems wurden insbesondere organisatorische Aspekte untersucht – insbesondere die optimale Gruppengröße für einen reibungslosen Ablauf. Im Verlauf der Generalprobe stellte sich heraus, dass eine Gruppengröße von 8 bis 10 Teilnehmenden sinnvoll und praktikabel ist.



Abbildung 17: Aufzeichnung von Lastkurven



Abbildung 18: Berechnung von Energiemengen auf Grundlage von Messungen

Öffentlichkeitsarbeit – Tag der offenen Tür an der Technischen Universität München

Am 03.10.2024 beteiligte sich das Projektteam am Tag der offenen Tür der Technischen Universität München auf dem Campus Garching. In diesem Rahmen wurde auch das Haushaltslabor für Besucherinnen und Besucher zugänglich gemacht. Projektmitarbeitende informierten vor Ort über den Aufbau und die Funktion der Laborinfrastruktur, gaben Einblicke in die Nutzung von Photovoltaikanlagen im Haushaltskontext und präsentierten praxisnahe Anwendungsbeispiele.

Ein besonderes Augenmerk galt dem sogenannten LEGO-Workshop für Last- und Erzeugerprofile. Mit Hilfe von LEGO-Bausteinen konnten Besucherinnen und Besucher spielerisch die Dimensionierung und

das Lastverhalten kleiner Energiesysteme nachvollziehen. Dieser niedrigschwellige Zugang erwies sich insbesondere für fachfremde Interessierte als effektives Mittel zur Vermittlung zentraler Konzepte im Bereich der dezentralen Energieversorgung und des Lastmanagements.

Die Veranstaltung stieß auf großes Interesse, insbesondere bei Personen ohne technischen Hintergrund. Das gezeigte Engagement unterstrich die Bedeutung von Wissenschaftskommunikation und ermöglichte einen erfolgreichen Austausch zwischen Forschung, Lehre und Öffentlichkeit.

Schulbesuch – Gymnasium Füssen

Vor einer finalen Erweiterung und Optimierung des Haushaltslabor besuchte eine 11. Klasse des Gymnasiums Füssen die Räumlichkeiten. Zentrales Ziel des Besuchs war die Erprobung eines neu strukturierten Ablaufs für die Unterrichtseinheit im Labor.

Der Workshop startete mit einer kompakten Version des LEGO-Workshops. Dieser diente als interaktiver Einstieg in zentrale Themen wie regenerative Energiequellen, Verbrauchsverhalten und Speichermöglichkeiten. Durch diesen didaktischen Ansatz konnte den Schülerinnen und Schülern anschaulich vermittelt werden, warum eine intelligente Steuerung von Energieverbrauchern und Speichersystemen essenziell für ein nachhaltiges Energiemanagement ist.

Im weiteren Verlauf der Einheit erfolgte eine geführte Begehung des Haushaltslabors. Dabei wurden exemplarische Verbraucher vorgestellt, typische Lastprofile analysiert sowie grundlegende Aspekte der Energie- und Elektrotechnik erläutert. Der Besuch lieferte wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des didaktischen Konzepts und trug zur Förderung des technischen Verständnisses der Teilnehmenden bei.

2. Mobile Workshops

Photovoltaik – Workshops und Lehrerfortbildungen

Im Verlauf der Projektlaufzeit wurden die mobilen Workshops zum Thema Photovoltaik mehrfach erprobt – sowohl an der Technischen Universität München mit Studierenden als auch an Schulen mit unterschiedlichen Jahrgangsstufen und verschiedenen Physiklehrkräften. Die dabei gewonnenen vielfältigen Erfahrungen flossen kontinuierlich in die Weiterentwicklung der Lehrkonzepte, Unterrichtsmaterialien und Experimentierausstattungen ein. Auf diese Weise konnten die Workshops fortlaufend verbessert und didaktisch sowie organisatorisch optimiert werden.

Ein besonderer Fokus lag dabei auf der sukzessiven Verbesserung der experimentellen Ausstattung. Ziel war es, die Durchführung der Experimente so zu gestalten, dass sie ohne größeren Aufwand an jeder Schule problemlos umsetzbar sind.

Ergänzend zu den eigentlichen Workshops wurden mehrere Lehrerfortbildungen angeboten. In diesen Schulungen erhielten die teilnehmenden Lehrkräfte eine umfassende Einführung in die Konzepte, Unterrichtsmaterialien und experimentellen Komponenten der Workshops (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Damit wurden sie in die Lage versetzt, die Inhalte eigenständig und mit minimalem Vorbereitungsaufwand in ihren eigenen Klassen umzusetzen.



Abbildung 19: Lehrerfortbildung - mobile PV-Experimente



Abbildung 20: Lehrerfortbildung - mobile PV-Experimente

Die Workshops sind besonders geeignet für den Einsatz im Physikunterricht der Mittel- und Oberstufe. Das Feedback der Lehrkräfte im Rahmen der Fortbildungen war durchweg sehr positiv. Einige von ihnen haben die Workshops bereits mit großem Erfolg in ihren Unterricht integriert.

Schritt für Schritt zur Kleinwasserkraftanlage

Der Workshop „Schritt für Schritt zur Kleinwasserkraftanlage“ wurde am 18.02.2022 in zwei 9. Klassen (etwa 60 Schülerinnen und Schüler) am Gymnasium Geretsried und am 23.05.2022 in insgesamt drei 9. Klassen (etwa 90 Schülerinnen und Schüler) am Gymnasium Füssen (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22) durchgeführt.



Abbildung 21: Workshop Kleinwasserkraftanlage am Gymnasium Füssen

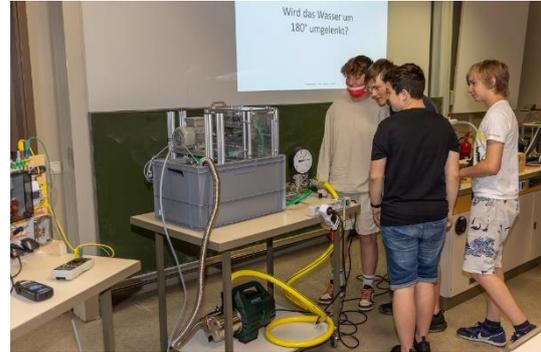


Abbildung 22: Workshop Kleinwasserkraftanlagen am Gymnasium Füssen

Die in den Veranstaltungen gesammelten Erfahrungen wurden in das Lehrkonzept eingearbeitet und somit das Konzept angepasst und weiter optimiert. Das bestehende Lehrkonzept lässt sich hervorragend in den Physikunterricht der 9. Jahrgangsstufe integrieren und der Workshop ist in zwei regulären Schulstunden (Doppelstunde) umsetzbar.

Simulation und Optimierung von Energiesystemen

Der Workshop „Simulation und Optimierung von Energiesystemen“ und insbesondere das entsprechende Online-Tool wurde im Herbst 2024 mit einer Schülergruppe (12. Jahrgangsstufe) am Gymnasium Geretsried durchgeführt und mit Erfolg getestet. Bei der Veranstaltung haben sich die Schülerinnen und Schüler intensiv mit dem Thema Energiesysteme und der Rolle des Energienetzes auseinandergesetzt. Die Schülerinnen und Schüler haben dabei ein grundlegendes Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Energieerzeugung, Energieverbrauch und Netzstabilität entwickelt – ein Thema von wachsender Bedeutung im Zuge der Energiewende.

Zu Beginn des Workshops standen insbesondere erneuerbare Energien und deren fluktuierender Charakter im Fokus (siehe Abbildung 23). Die Teilnehmenden lernten, warum es entscheidend ist, ein Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch zu wahren, und welche Herausforderungen sich dabei durch wetterabhängige Quellen wie Wind- und Solarenergie ergeben. Anhand praxisnaher Beispiele wurden mögliche Maßnahmen zur besseren Integration dieser Energien diskutiert, etwa die flexible Nutzung von Energie oder der Einsatz intelligenter Laststeuerung.



Abbildung 23: Workshop Simulation und Optimierung von Energiesystemen



Abbildung 24: Online-Tool zur Simulation und Optimierung von Energiesystemen

Nach dieser Hinführung zum Thema beschäftigten sich die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen mit dem bereitgestellten Online-Tool zur Simulation und Optimierung von Energiesystemen (siehe Abbildung 24). Die Schülerinnen und Schüler konnten damit Schritt für Schritt am Rechner selbstständig ein eigenes Energiesystem aufbauen. Mit dem Online-Tool wurden schließlich die entsprechenden Kapazitäten ausgelegt und unter Kostenaspekten optimiert. Sehr anschaulich und altersgerecht wurden dabei komplexe Themen wie der Ausbauplan von Energieinfrastrukturen sowie die Kraftwerkseinsatzplanung vermittelt. Mithilfe der interaktiven Auseinandersetzung mit praxisnahen und alltagsnahen Szenarien erhielten die Schülerinnen und Schüler ein besseres Verständnis für technische und wirtschaftliche Zusammenhänge im Energiesektor.

Last- und Erzeugerprofile spielerisch verstehen

Zur Validierung und Auswertung des im Rahmen einer Abschlussarbeit eines Lehramtsstudenten erstellten Workshops „Last- und Erzeugerprofile spielerisch verstehen“ (LEGO-Workshops) fand am Gymnasium Geretsried unter Leitung des Bacheloranden eine dreistündige Unterrichtseinheit statt.

Hier wurde, wie in Abbildung 25 und Abbildung 26 ersichtlich, fleißig mit LEGO-Bausteinen gespielt und parallel dazu intensiv diskutiert. Die Schülerinnen und Schüler haben innerhalb der vorgegebenen Zeit die Arbeitsaufträge des Workshops bearbeitet und sich konzentriert mit den verschiedenen Themen beschäftigt.

Bei der Durchführung zeigte sich, dass durch die Verwendung von LEGO-Bausteinen und der Zuordnung von Energiewerten repräsentiert durch die Bausteingröße ein hervorragender spielerischer Zugang zu komplexen Themen wie z. B. der Energieverbrauch unterschiedlicher Haushaltsgeräte gegeben war. Die Auswertung der Evaluierung in Form einer Umfrage bestätigte dies.

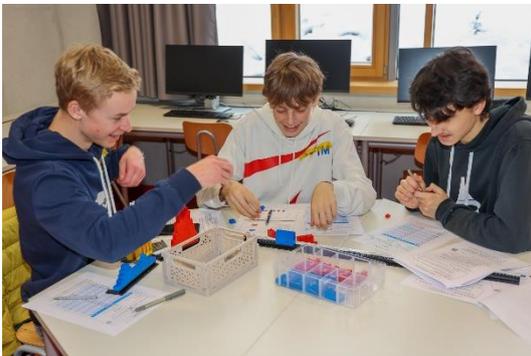


Abbildung 25: LEGO-Workshop zum Thema Last- und Erzeugerprofile



Abbildung 26: LEGO-Workshop zum Thema Last- und Erzeugerprofile

3. Internationalisierung

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über alle wesentlichen Veranstaltungen, welche im Rahmen des Projektes außerhalb Deutschlands stattgefunden haben. Aus verschiedenen Gründen wurde eine Vielzahl dieser Veranstaltungen über digitale Tools wie z. B. Videokonferenzen durchgeführt. Aus zeitlichen und organisatorischen Gründen wurden für Präsenzveranstaltungen vor Ort auch ehemalige Schülerinnen und Schüler und ein Team des Lehrstuhls für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme bei der Durchführung von Workshops mit einbezogen.

Nepal – Workshop Photovoltaik

Im Rahmen der Internationalisierung wurde im Herbst 2025 über mehrere Tage hinweg ein Teil des mobilen Workshops „Photovoltaik“ an der Lophelling Boarding School (LBS) im abgelegenen Manang-Tal in Nepal durchgeführt.

Die teilnehmenden Schulkinder, allesamt im Grundschulalter, setzten sich im Rahmen des Workshops mit grundlegenden Experimenten zur Funktionsweise von Photovoltaik- und Windkraftanlagen auseinander.

Drei ehemalige Schülerinnen und Schüler des Gymnasiums Geretsried engagierten sich nach ihrem Abitur mehrere Wochen lang an der LBS in Nepal. Vor ihrer Reise erhielten sie eine umfassende Einführung in die PV-Experimente und nahmen das benötigte Material mit vor Ort.



Abbildung 27: Mobile Workshops zum Thema Photovoltaik und Windkraft an der LBS in Nepal



Abbildung 28: Mobile Workshops zum Thema Photovoltaik und Windkraft

Die Schülerinnen und Schüler der LBS führten die Experimente mit großer Begeisterung und Aufmerksamkeit durch. Besonders faszinierend war es für sie, wenn Lampen leuchteten oder sich Propellermotoren in Bewegung setzten (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28).

Ein klarer Alltagsbezug war gegeben, da auch die LBS selbst über eine Photovoltaikanlage verfügt. Die Kinder lernten, worauf es bei der Nutzung einer solchen Anlage ankommt – etwa die Bedeutung eines Energiespeichers oder warum regelmäßige Reinigung für die Effizienz der Anlage entscheidend ist.

Auch die Lehrkräfte vor Ort wurden im Umgang mit den Workshop-Inhalten geschult, sodass die Experimente künftig eigenständig im Schulalltag wiederholt werden können.

Die gesamte Aktion trug nicht nur zur Förderung von technischem Verständnis bei, sondern ermöglichte auch einen bereichernden internationalen Austausch, von dem alle Beteiligten profitierten.

Nepal – Workshop Grundlagen Mikrocontroller

Im Spätsommer 2024 wurde einer Gruppe interessierter Schülerinnen, Schüler und Studierender in Kathmandu, Nepal, das erstellte PDF-Skript „Arduino Instruction“ sowie die notwendigen Hardwarekomponenten (Arduino-Starter-Kit und Zubehör) für den Workshop Grundlagen Mikrocontroller zur Verfügung gestellt. Die Teilnehmenden sind größtenteils aktuelle oder ehemalige Kinder des Kinderheims *Rangeen Home* in der Nähe von Kathmandu.

Mit großem Engagement und Eifer setzten sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Herbst 2024 über mehrere Wochen hinweg intensiv mit den Projekten und Experimenten aus dem Skript auseinander und arbeiteten Stück für Stück die gesamte Anleitung durch (siehe Abbildung 31 und Abbildung 30).



Abbildung 29: Workshop Grundlagen Mikrocontroller in Nepal



Abbildung 30: Workshop Grundlagen Mikrocontroller in Nepal

Die Gruppe bearbeitete die meisten Projekte weitgehend eigenständig. Bei auftretenden Schwierigkeiten und Problemen erfolgte eine digitale Unterstützung aus Deutschland – etwa durch E-Mail, Messenger oder Bildschirmübertragungen. Zusätzlich fanden regelmäßig kurze Videokonferenzen zum Erfahrungsaustausch statt.

Auf Grundlage der Rückmeldungen und Erfahrungen vor Ort wurde das Handout überarbeitet und optimiert, um zukünftige Workshops noch effektiver und praxisnäher zu gestalten.

Einige Teilnehmende widmen sich seit Abschluss des Workshops weiterhin intensiv dem Thema Mikrocontroller und entwickeln und realisieren selbstständig neue, teils komplexe Projekte. Auch bei diesen Folgeprojekten erhalten sie bei Bedarf weiterhin Unterstützung – beispielsweise in Form von kurzen Online-Besprechungen.

Thailand – Workshop Grundlagen Mikrocontroller

In Zusammenarbeit mit dem Goethe-Institut Thailand wurde ein 6-wöchiger Workshop „Grundlagen Mikrocontroller“ (Arduino) mit 25 Teilnehmenden durchgeführt. Ziel war es, die ausgewählten Schülerinnen und Schüler verschiedener Schulen, welche im ganzen Land verteilt sind Elektro- und Informationstechnische Grundelemente näherzubringen. Zusätzlich wurden die Lehrkräfte mit eingebunden, welche die Lehrinhalte übernehmen konnten, um in Zukunft den Workshop selbstständig durchführen zu können.

Die fest geplanten Termine wurden über die digitale Plattform Google Classroom organisiert und abgehalten. Zu Beginn jeder Woche wurde eine Unterrichtsstunde mithilfe einer Videokonferenz abgehalten, in der es darum ging, die notwendigen Grundlagen für die bevorstehende Wochenaufgabe zu besprechen. Diese Wochenaufgaben galt es entweder selbstständig oder bevorzugt in Kleingruppen zu bearbeiten und zu lösen. Über Google Classroom war es den Schülerinnen und Schülern möglich, sich in Foren zu organisieren und Lösungsansätze zu teilen, Fragen zu stellen und Erweiterungen zu präsentieren. Nach Abschluss der Gesamtveranstaltung wurde eine ausführliche Evaluierung durchgeführt sowie Zertifikate für die Teilnehmenden erstellt.

Senegal – Treffen mit einer Gruppe aus dem Senegal

Am 17.05.2022 wurde eine Gruppe von Dozenten und Dozentinnen von verschiedenen Bildungseinrichtungen aus dem Senegal am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme in Garching empfangen. Nach einer Kennenlernrunde fand ein intensiver Austausch zu den Themen Lehrkonzepte, Lehrmethoden, Lehrmaterialien und Laborausstattungen statt (siehe Abbildung 31 Abbildung 32).



Abbildung 31: Treffen mit Gruppe Senegal



Abbildung 32: Treffen mit Gruppe Senegal

Der Gruppe wurden zahlreiche Lehrmaterialien (speziell zum Thema Photovoltaik) zur Verfügung gestellt, die vor Ort eingesetzt werden können. Schwerpunkt lag bei einer praxisnahen und alltagsnahen Laborausstattung für den Lehrbetrieb.

Ukraine – Promotion of Energy Efficiency and Implementation of the EU Energy

Das Projekt "Promotion of Energy Efficiency and Implementation of the EU Energy" (Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit und Schweizer Regierung) hat das Ziel, verschiedene Bildungseinrichtungen (speziell Berufsschulen) in der Ukraine in den Themenbereichen „Nachhaltiges Bauen“ und „Nachhaltige Energiesysteme“ zu unterstützen. Dieses Projekt wurde unterstützt, indem z. B. der Workshop „Photovoltaik“ vorgestellt wurde und verschiedene Curricula im Rahmen eines "validation workshops" überarbeitet und angepasst wurden. Im Rahmen der Zusammenarbeit wurde zusätzlich an einem Webinar mit dem Titel „Energy Efficiency in Buildings“ in der Ukraine teilgenommen. In diesem zweitägigen Workshop stellten sich unterschiedliche Einrichtungen und Institutionen vor, welche die Schwerpunkte nachhaltiges Bauen und Energieeffizienz aufweisen. Hier wurde das Konzept der Vermittlung von praktischem Wissen als Grundlage zur Sensibilisierung von Energieverbräuchen dar- und vorgestellt.

Togo – Urbis Foundation Togo

Die Urbis Foundation hat sich zum Ziel gesetzt, die Nutzung von erneuerbaren Energien im Togo voranzutreiben und dadurch Umwelt und Klima zu schützen. Als gemeinnützige Organisation versuchen sie z. B. die Ausbildung von Photovoltaik-Fachkräften im Togo voranzutreiben. Hierzu fand am 21.09.2022 am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme in Garching ein Treffen statt, um Ideen auszutauschen und mögliche gemeinsame Projekte zu besprechen und auszuarbeiten. Leider kam es zu keiner intensiveren Zusammenarbeit. Der Grund hierfür war die Sprachbarriere, da innerhalb der Projektes Französisch gesprochen wird.

Burkina Faso – Workshop Grundlagen Mikrocontroller und praxisnahe Lehre

Im Herbst 2024 wurde dem Burkina Faso Institute of Technology (BIT) in Burkina Faso das PDF-Skript „Arduino Instruction“ sowie in mehrfacher Ausführung die benötigten Materialien – darunter Arduino-Starter-Kits und ergänzendes Zubehör – zur Verfügung gestellt.

Im Bachelorstudiengang Electrical Engineering, der unter Mitwirkung des Lehrstuhls für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme der Technischen Universität München entwickelt wurde, ist die Lehrveranstaltung Measurement and Control Technology with Microcontrollers im dritten Semester fest im Curriculum verankert. Diese beinhaltet eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Einsatz von Mikrocontrollern in Mess- und Steuerungstechnik.

Allerdings zeigte sich, dass sowohl Lehrende als auch Studierende bislang nur über geringe oder keine Vorkenntnisse im Umgang mit Mikrocontrollern verfügen. Eine gezielte Unterstützung in diesem Bereich ist daher besonders sinnvoll und notwendig.

Aus diesem Grund wurde das Institut mit der entsprechenden technischen Ausstattung für den Workshop Grundlagen Mikrocontroller versorgt. Geplant ist, dass die Studierenden im Verlauf des Jahres 2025 unter Anleitung der Dozierenden den Grundlagenkurs absolvieren – bei Bedarf mit begleitender Unterstützung aus Deutschland. Dieser Kurs dient als wichtige und solide Vorbereitung auf das oben genannte Praktikum im dritten Semester.

Im Anschluss wird das Praktikum Measurement and Control Technology with Microcontrollers durchgeführt. Zur Sicherstellung eines reibungslosen Ablaufs des Praktikums erhalten die Lehrkräfte

ergänzend Schulungen über digitale Medien. Darüber hinaus sind Videokonferenzen mit den Studierenden vorgesehen, um einen direkten fachlichen Austausch zu ermöglichen.

Neben dem Themenfeld Mikrocontroller wird das BIT auch in weiteren Bereichen der Lehre unterstützt – mit dem Ziel, die Lehrveranstaltungen praxisnäher und stärker an realen Anwendungsbezügen auszurichten.

Ghana – Workshop Photovoltaik und Erneuerbare Energien

Im Rahmen der Internationalisierung wurde ein mehrtägiger Workshop an der Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST) in Kumasi, Ghana, durchgeführt. Teilgenommen haben Schülerinnen und Schüler aus drei verschiedenen weiterführenden Schulen der Region. Ziel des Workshops war es, grundlegende Kenntnisse im Bereich der erneuerbaren Energien zu vermitteln – mit einem besonderen Fokus auf Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft.

Ein zentrales Element des Workshops waren mobile Experimentierstationen, die es den Teilnehmenden ermöglichten, selbstständig Experimente durchzuführen. Die Versuchssets wurden im Vorfeld im 3D-Druckverfahren hergestellt und vor Ort gemeinsam mit den Schulkindern aufgebaut. Dies förderte nicht nur das technische Verständnis, sondern auch das handwerkliche Geschick und die Teamarbeit.

Zu den behandelten Themen gehörte unter anderem die Analyse der elektrischen Charakteristik einer Solarzelle. Hierzu wurde im Wesentlichen der mobile Workshop Photovoltaik verwendet. Es wurden z. B. Strom-Spannungs-Kennlinien aufgenommen und grafisch dargestellt. Mithilfe von Multimetern und Oszilloskopen lernten die Schülerinnen und Schüler den praktischen Umgang mit Messtechnik und konnten die Leistungsfähigkeit der PV-Zellen unter verschiedenen Bedingungen analysieren (siehe Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35).



Abbildung 33: Experimente zum Thema Photovoltaik in Ghana



Abbildung 34: Experimente zum Thema Photovoltaik in Ghana

Ein weiteres Highlight war der Aufbau eines eigens entwickelten Generators in Kombination mit einer kleinen Pelton-Turbine. Die Experimente veranschaulichten den Einfluss verschiedener Fallhöhen auf die Ausgangsspannung und Frequenz des Generators. Auch der Bereich Windkraft wurde thematisiert: Durch den Einsatz unterschiedlich geformter Rotorblätter wurde der Effekt auf die Rotordrehzahl und damit auf die erzeugte Energie untersucht (siehe Abbildung 36).

Der Workshop ermöglichte es den Teilnehmenden, physikalische Zusammenhänge nicht nur theoretisch zu verstehen, sondern durch eigene Messungen und Experimente praktisch zu erleben. Das Projekt trug so wesentlich zur Förderung des naturwissenschaftlich-technischen Interesses und der Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler bei.



Abbildung 35: Experimente zum Thema Photovoltaik in Ghana



Abbildung 36: Experimente zum Thema Windkraft in Ghana

4. Laboreröffnung

Am 31.03.2025 fand die feierliche Eröffnungsveranstaltung des Labors für nachhaltige Energiesysteme und die Vorstellung der entwickelten Experimente und Workshops am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme in Garching statt.

Der geladene Personenkreis kam sowohl aus der Politik, der Wirtschaft und dem Bildungsbereich. Besonders erwähnenswert ist der Besuch von mehreren Schülerinnen und Schülern. Insgesamt wurde die Veranstaltung von etwa 30 Personen besucht.

Die Veranstaltung gliederte sich in folgende drei Teile:

- allgemeine Informationen zum Projekt und Laborübersicht
- Laborführung mit zwei Gruppen zu den Themen „Verbraucherseite“ und „Erzeugerseite und HEMS“
- mobile Workshops bzw. mobile Ausstattung

Da sich nach Eingang der Zu- und Absagen herausgestellt hat, dass sich der berufliche Hintergrund der Gäste vor allem auf den Bildungssektor konzentriert, wurden nach einem Impulsvortrag im ersten Teil der Veranstaltung (siehe Abbildung 37) insbesondere die Schnittmenge des Labors und der mobilen Workshops mit dem neuen Lehrplan für das Fach Physik und der damit einhergehenden Verpflichtung zum Besuch eines Schülerlabors thematisiert. Zudem wurden der Aufbau und die Möglichkeiten des Labors für die anschließende Laborführung anhand eines Schemas detailliert erläutert.



Abbildung 37: Laboreröffnung - Präsentation



Abbildung 38: Laboreröffnung - Haushaltslabor

Der zweite Teil der Veranstaltung wurde mit der Begehung der Freiflächenanlage gestartet. Hier wurden die Möglichkeiten für experimentelle Versuche an den installierten realen Photovoltaikanlagen aufgezeigt. Die eigentliche Laborführung begann mit der Aufteilung der Teilnehmenden in zwei Gruppen. Der ersten Gruppe wurden zunächst die experimentellen Möglichkeiten im Bereich der Verbraucherseite präsentiert (siehe Abbildung 39). Hier wurde auf unterschiedliche Methoden zur Bestimmung von physikalischen Größen wie Spannung, Strom und Leistung eingegangen. Anschließend wurden die so bestimmten Größen verschiedener Verbraucher anhand von vorab aufgezeichneten Lastkurven besprochen und deren Verhalten analysiert. Die zweite Gruppe startete mit der Erzeuger- und der Energiemanagementseite (siehe Abbildung 38 und Abbildung 40). Hier wurden insbesondere das Funktionsprinzip und die Verbaute Messtechnik des Labors und die Möglichkeiten des HEMS erklärt, sowie unterschiedliche Szenarien durchgespielt.

Der letzte Teil der Veranstaltung wurde genutzt, um den Besuchenden die entwickelte mobile Ausstattung (diverse mobile Workshops) vorzustellen. Vor allem die einfachen, kostengünstigen aber trotzdem hochwertigen und gut durchdachten Experimentieraufbauten stoßen auf großes Interesse und führten zu einem regen Austausch.



Abbildung 39: Laboreröffnung - Verbraucheranalyse



Abbildung 40: Laboreröffnung - Erzeugeranalyse

Diskussion

Im Rahmen des Projekts „Labor für nachhaltige Energiesysteme“ bzw. „Sustainable Energy Systems Lab (SES Lab)“ konnten fast alle verfolgten Ziele in allen drei Hauptbereichen (stationäres Haushaltslabor, mobile Workshops und Internationalisierung) erreicht werden und in vielen Bereichen sogar übertroffen werden.

Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Realisierung und Umsetzung eines technisch und didaktisch gut durchdachten **stationären Haushaltslabors** am Standort Garching, das nicht nur für studentische Forschungsarbeiten und Studierendengruppen genutzt werden kann, sondern auch für Schülergruppen der Mittel- und Oberstufe. Die didaktischen Konzepte sind dafür insbesondere für den aktuellen Physiklehrplan ausgerichtet. Der Praxisbezug, der Alltagsbezug, die Modularität und die Anschlussfähigkeit an aktuelle gesellschaftliche und bildungspolitische Entwicklungen haben sich als zentrale Stärken erwiesen. Der angestrebte modulare Aufbau des Labors wurde erfolgreich umgesetzt. Dadurch lässt sich das Labor mit geringem Aufwand erweitern und flexibel an unterschiedliche Anforderungen anpassen. Neben dem zentralen, stationären Haushaltslabor wurde in den Räumlichkeiten auch ein kompaktes Photovoltaik-Inselsystem mit Batteriespeicher und Wechselrichter installiert, das Experimente und Messungen zu einfachen dezentralen Energiesystemen ermöglicht.

Eine Herausforderung stellte zunächst die geplante großflächige PV-Freiflächenanlage dar. Der ursprünglich vorgesehene Standort konnte aufgrund eines Neubauprojekts nicht genutzt werden. Deshalb wurde das ursprüngliche Konzept angepasst: Statt der ursprünglich größeren Anlage wurde eine kleinere PV-Anlage mit vier Modulen und einem zugehörigen Schaltschrank an einem alternativen Standort installiert. Diese kompaktere Lösung ermöglicht dennoch sämtliche vorgesehenen Versuche im Außenbereich und wird als sinnvoller und praxisnaher Kompromiss bewertet.

Der geplante Fernzugriff auf Laborfunktionen, insbesondere auf Messdaten, konnte bislang noch nicht vollständig realisiert werden. Alle Messdaten werden jedoch zentral gespeichert und können innerhalb des internen Netzwerks von verschiedenen digitalen Endgeräten aus visualisiert und ausgewertet werden. Auch private Geräte von Schülerinnen und Schülern lassen sich problemlos in das bestehende System integrieren. Ein umfassender Fernzugriff ist aufgrund strenger Sicherheitsvorgaben derzeit noch nicht möglich, soll jedoch in naher Zukunft umgesetzt werden und zusätzliche Nutzungsmöglichkeiten eröffnen.

Die verschiedenen **mobilen Workshops** konnten planmäßig und sogar in einem größeren Umfang als ursprünglich vorgesehen entwickelt und umgesetzt werden. In der praktischen Anwendung haben sich diese Workshops als besonders wertvoll, wirkungsvoll und zukunftsorientiert erwiesen. Sie ermöglichen flexible Bildungsangebote mit großer Reichweite und lassen sich mit geringem organisatorischem Aufwand problemlos in den Schulalltag integrieren.

Zahlreiche Rückmeldungen sowie das starke Interesse seitens der Lehrkräfte, Schülerinnen und Schüler unterstreichen die hohe didaktische Qualität und den motivierenden Charakter der Workshop-Formate. Damit wurde ein zentrales Ziel des Projekts – die niederschwellige und anschauliche Vermittlung komplexer technischer Inhalte im Bereich der Energietechnik – in besonderem Maße erreicht.

Wie geplant konnten z. B. mehrere der mobilen Workshops erfolgreich für kooperative Projekte mit Bildungseinrichtungen in Ländern des Globalen Südens im Rahmen der angestrebten **internationalen Maßnahmen (Internationalisierung)** eingesetzt werden. Ein zentrales Projektziel – die Bereitstellung möglichst vieler entwickelter Inhalte und Konzepte für Bildungseinrichtungen in Entwicklungsländern –

wurde somit erreicht. Neben zahlreichen Workshops für Schülerinnen, Schüler und Studierende wurden auch Lehrkräfte sowie Dozenten und Dozentinnen, insbesondere im Bereich praxisnaher und alltagsbezogener Experimente gezielt geschult und weitergebildet.

Aus organisatorischen und zeitlichen Gründen konnte jedoch ein Teil der ursprünglich geplanten Präsenzveranstaltungen in Ländern des Globalen Südens nicht wie vorgesehen umgesetzt werden. Infolgedessen wurde die Strategie angepasst: Die entstandenen Defizite bei Vor-Ort-Terminen wurden durch die konsequente Umstellung auf digitale Formate mehr als ausgeglichen. Zahlreiche Workshops, Schulungen und Austauschprogramme wurden erfolgreich online – etwa über Videokonferenzen – durchgeführt.

Dank des bestehenden Netzwerks und umfangreicher Kontakte gelang auch der Versand der erforderlichen Experimentiermaterialien in die jeweiligen Länder reibungslos. In Kombination mit einer intensiven Betreuung über digitale Formate aus Deutschland konnten die Workshops erfolgreich durchgeführt werden. Diese methodische Vorgehensweise hat sich als äußerst wirksam erwiesen und bietet auch für zukünftige Projekte großes Potenzial.

Darüber hinaus konnten durch den reduzierten Reiseaufwand Ressourcen geschont und Reisekosten eingespart werden. Die angepasste und effiziente Methodik hat somit wesentlich zur angestrebten Nachhaltigkeit beigetragen. Die hohe Akzeptanz bei den Beteiligten vor Ort in den Ländern des Globalen Südens bestätigt diesen Ansatz.

Es ist anzumerken, dass sich dieser digitale Ansatz insbesondere bei etablierten Partnerschaften bewährt hat. Bei neuen Kooperationspartnern erscheint hingegen ein persönlicher Austausch zu Projektbeginn sowie eine enge Abstimmung sinnvoll.

Ergänzend zu den Onlineformaten wurden in Nepal und Ghana – wie ursprünglich vorgesehen – erfolgreich Präsenzveranstaltungen vor Ort durchgeführt.

Es sei erwähnt, dass sich mit einigen der ursprünglich vorgesehenen Kooperationspartner – darunter die Kathmandu University in Nepal und die St. Rupert Mayer High School in Simbabwe – keine intensive Zusammenarbeit entwickelt hat. Erfreulicherweise konnten jedoch im Verlauf des Projekts neue Partnerschaften mit Bildungseinrichtungen in Thailand, Senegal, der Ukraine und Ghana aufgebaut und schrittweise intensiviert werden.

Solche Verschiebungen in der Kooperationsstruktur sind erfahrungsgemäß nicht ungewöhnlich. Eine hohe Flexibilität in diesem Bereich erweist sich als sinnvoll und notwendig, um Ressourcen effizient einzusetzen und eine enge Zusammenarbeit mit besonders engagierten und vielversprechenden Partnerinstitutionen zu ermöglichen.

Insgesamt belegt das Projekt eine ausgeprägte Fähigkeit, sich flexibel an externe und unvorhersehbare Herausforderungen anzupassen. Strategische Änderungen – insbesondere der Wechsel von Präsenz- zu Onlineformaten, der Aufbau neuer, vielversprechender Kooperationspartnerschaften sowie die verstärkte Nutzung mobiler Komponenten – erwiesen sich nicht nur als notwendig, sondern auch als ausgesprochen vorteilhaft. Die gesammelten Erfahrungen verdeutlichen, wie entscheidend eine flexibel gestaltete Projektarchitektur für den nachhaltigen Erfolg ist.

Fazit

Die im Projekt gewählte Vorgehensweise mit einer Kombination aus stationärem Labor, mobilen Workshops und internationalen Kooperationen für Bildungsmaßnahmen im Themenbereich nachhaltige Energiesysteme hat sich insgesamt als äußerst wirkungsvoll und zielführend erwiesen. Beispielsweise der modulare Aufbau, das hohe Anpassungs- und Erweiterungspotential, der starke Praxis- und Alltagsbezug sowie die konsequente Ausrichtung auf aktuelle bildungspolitische Anforderungen und Lehrpläne führten zu einer durchwegs hohen Akzeptanz bei allen Zielgruppen.

Insbesondere die vielfältige mobile Workshop-Ausstattung ermöglicht einen niederschweligen Zugang zu relevanten Themen und wurde bereits von zahlreichen Bildungseinrichtungen erfolgreich eingesetzt. Die Rückmeldungen aus Schulen und von Lehrkräften bestätigen die hohe Praxisnähe und didaktische Qualität der Materialien.

Die Verwendung von einfachen und kostengünstigen Komponenten für die Experimente im Rahmen der mobilen Workshops wurde äußerst positiv bewertet. Durch diesen Ansatz sind die Beschaffung und Umsetzung an zahlreichen Schulen realistisch und zudem wird dadurch auch der Einsatz in Bildungseinrichtungen in Ländern des Globalen Südens ermöglicht.

Perspektivisch können Schulen eigenständig mit Hilfe von bereitgestellten Materiallisten und Lehrunterlagen die Workshops durchführen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Workshops ein hohes Maß an selbstständigem und entdeckendem Lernen fördern.

Auch wenn einige ursprünglich geplante Maßnahmen – etwa der Aufbau einer größeren Freiflächenanlage – aufgrund nichtvorhersehbarer baulicher Einschränkungen nicht wie vorgesehen umgesetzt werden konnten, wurden funktionale Alternativen realisiert. Die ursprünglich angedachten Lehrvideos für Schulen in Entwicklungsländern konnten aus zeitlichen Gründen nicht mehr umgesetzt werden. Dennoch fanden im Rahmen der Internationalisierung zahlreiche Workshops, Weiterbildungen und Betreuungsformate mit Lehrkräften und Schülergruppen aus verschiedenen Ländern statt – teils digital, teils vor Ort. Die verschiedenen Veranstaltungen erwiesen sich als sehr wertvoll, praxisnah und nachhaltig.

Die verstärkte Nutzung digitaler Formate im Rahmen der Internationalisierung hat neue, langfristig nutzbare Wege des Wissenstransfers eröffnet, die sich als wertvoll für zukünftige internationale Bildungsk Kooperationen erweisen.

Die enge Zusammenarbeit mit Partnerinstitutionen in Ländern des Globalen Südens – einschließlich des Transfers von Lehrmaterialien und Experimentierkonzepten sowie der Ausbildung von Multiplikatorinnen und Multiplikatoren vor Ort – leistet einen bedeutenden Beitrag zur globalen Bildungsarbeit im Kontext der Energiewende. Die bisherigen Erfahrungen zeigen zudem, dass die sorgfältige Auswahl der Partnerinstitutionen entscheidend für den erfolgreichen Verlauf solcher Kooperationen ist.

Die zentralen Zielsetzungen des Projekts blieben über die gesamte Laufzeit hinweg grundsätzlich konsistent und realistisch. Grundlegende Änderungen in den verschiedenen Bereichen waren nicht erforderlich. Vielmehr wurden die Erfahrungen aus der Praxis genutzt, um die Zielerreichung durch gezielte Schwerpunktsetzungen weiter zu optimieren.

Sinnvolle zukünftige Anpassungen betreffen insbesondere:

- die Weiterentwicklung und Ausweitung der mobilen Workshops, etwa durch zusätzliche Module bzw. Workshops, Lehrerfortbildungen und den verstärkten Einsatz kostengünstiger z. B. 3D-druckbarer Komponenten;
- die gezielte Auswahl und Betreuung internationaler Partnerinstitutionen, um langfristige und stabile Kooperationen sicherzustellen;
- den weiteren Ausbau digitaler Zugangsformate, insbesondere zur Ergänzung der Präsenzformate im internationalen Kontext und für die breitere Nutzung von Labormessdaten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die im Projekt entwickelten Konzepte, Infrastrukturen und Lehrmaterialien bilden eine solide Grundlage für die dauerhafte Integration nachhaltiger Energiethemen in schulische und universitäre Bildungskontexte – sowohl national als auch international. Die erzielten Ergebnisse machen deutlich, dass innovative, praxisnahe und partizipative Bildungsformate ein wirksames Mittel sind, um die nächste Generation für die Herausforderungen und Chancen einer nachhaltigen Energiezukunft zu sensibilisieren und zu befähigen.