

Bachelorarbeit Maschinenbau

Planung und Aufbau eines modularen Batteriespeichersystems mit Stromnetzanschluss für Laboranwendungen

vorgelegt von **Bashar M.A. Aburajab**

Erstgutachter: Prof. Dr. E. Waffenschmidt (Technische Hochschule Köln)

Zweitgutachter: Prof. Dr. Ingo Stadler (Technische Hochschule Köln)

14. August 2025

Bachelorarbeit

Titel: Planung und Aufbau eines modularen Batteriespeichersystems mit Stromnetzanschluss für Laboranwendungen

Gutachter:

- Prof. Dr. E. Waffenschmidt (TH Köln)
- Prof. Dr. Ingo Stadler (TH Köln)

Zusammenfassung: Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein modulares Batteriespeichersystem mit Netzanschluss für Laboranwendungen geplant, konstruiert und aufgebaut. Ziel war die Entwicklung eines flexiblen 19-Zoll-Racks, das sowohl mechanisch stabil als auch für die Integration elektrischer Komponenten wie Wechselrichter, Batteriespeicher und Messtechnik geeignet ist. Die Konstruktion basierte auf einem Aluminiumprofilsystem (45 × 45 mm, Nut 10) und wurde mithilfe des Engineeringtools sowie SolidWorks umgesetzt. Insgesamt wurden drei identische Racks realisiert, wobei insbesondere die mechanische Gestaltung, die strukturelle Integration der Komponenten sowie die praxisgerechte Umsetzbarkeit im Vordergrund standen. Die Arbeit umfasst zudem ein detailliertes Verkabelungskonzept zur DC- und Kommunikationsverkabelung, das eine spätere Inbetriebnahme erleichtert. Die gesamte Umsetzung erfolgte in enger Abstimmung mit der Hochschulwerkstatt und liefert eine übertragbare Grundlage für zukünftige Laboraufbauten mit vergleichbaren Anforderungen.

Stichwörter: Modulares Batteriespeichersystem, 19 Zoll Rack, Aluminiumprofilsystem, Systemkonstruktion, Laboranwendung

Datum: 14.08.2025

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorgelegte Abschlussarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Köln, den 13.08.2025

Unterschrift

(Bashar M.A., Aburajab)

Abstract

As part of this bachelor's thesis, a modular battery storage system with grid connection for laboratory applications was planned, designed, and built. The objective was to develop a flexible 19-inch rack that is mechanically stable and suitable for the integration of electrical components such as inverters, battery storage units, and measurement equipment. The construction was based on an aluminum profile system (45 × 45 mm, slot 10) and was carried out using the item Engineeringtool and SolidWorks. In total, three identical racks were implemented, with a particular focus on mechanical design, structural integration of the components, and practical feasibility. The work also includes a detailed wiring concept for both DC and communication cabling, aimed at facilitating future commissioning. The entire implementation was carried out in close coordination with the university's workshop and provides a transferable foundation for future laboratory setups with similar requirements.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen sind, sofern nicht anders angegeben, eigene Aufnahmen bzw. eigene Darstellungen.

Abb. 3-1: Vorgehensmodell der Projektmethodik.	9
Abb. 3-2: Isometrische CAD-Darstellung des 19-Zoll-Racks.....	13
Abb. 3-3: Dreitafelprojektion des Racks mit Bemaßung (Vorder-, Seiten- und Draufsicht) ..	14
Abb. 3-4: 3D-Modell des vollständigen Racks mit eingebauten Komponenten (Screenshot aus SolidWorks)	15
Abb. 3-5: Wandhalterung zur vertikalen Montage des Wechselrichters (Victron MultiPlus-II)	15
Abb. 3-6: Rücksicht eines Victron Multiplus-II mit montierter Einrasthalterung	16
Abb. 3-7: Zuschnitt der Aluminiumprofile in der Werkstatt.	22
Abb. 3-8: Vorbereitung der Verbindungselemente und Vormontage auf der Werkbank.	22
Abb. 3-9: Konventioneller Aufbau des Grundgestells in aufrechter Position.	23
Abb. 3-10: Zusammenbau der Seitenrahmen mit definierten Einbaumaßen.	24
Abb. 3-11: Montage der Wechselrichter mit vormontierter Trägerstruktur und Victron-Wandhalterungen.	25
Abb. 3-12: Vorbereitung des Messgeräte Rahmens mit PVC-Leiste zur Justierung der Messgeräte	26
Abb. 3-13: Fertig gefräste Batteriehalterungen aus Aluminium mit Bohrungen und Langlöchern.	26
Abb. 3-14: Montage der Pylontech-Batterien auf unterster Ebene.....	27
Abb. 3-15: Befestigte Holzplatte auf der obersten Rackebene.....	27
Abb. 3-16: Verkabelungsschema eines Racks zur DC- und Kommunikationsverkabelung (VE.Bus, VE.Can, LAN)	30
Abb. 4-1: Drei vollständig montierte 19-Zoll-Racks im fertiggestellten Zustand. Jedes Rack enthält zwei Batteriespeicher (Pylontech US2000C), drei Wechselrichter (Victron MultiPlus-II)	32

Tabellenverzeichnis

Alle Tabellen sind, sofern nicht anders angegeben, eigene Darstellungen.

Tabelle 2-1: Vergleich mechanischer Bauformen von Batteriespeichern.....	4
Tabelle 2-2: Vergleich von Rahmenkonstruktionsarten.....	7
Tabelle 3-1: Übersicht der verwendeten Aluminiumprofilzuschnitte pro Rack	16
Tabelle 3-2: Übersicht der wichtigsten Verkabelungskomponenten.....	28
Tabelle 3-3: Kommunikationsverkabelung im System.....	29
Tabelle 3-4: DC-Verkabelung pro Rack.....	31

Formelverzeichnis

Formel 1: Gesamtgewichtskraft.....	18
Formel 2: Bemessungsnormalkraft.....	18
Formel 3: Schlankheit.....	18
Formel 4: Reduktionsfaktor	18
Formel 5: Knicktraglast.....	18
Formel 6: Sicherheitsgrad Knick.....	18
Formel 7: Maximales Biegemoment.....	19
Formel 8: Biegespannung	19
Formel 9: Durchbiegung bei Einzellast.....	19
Formel 10: Durchbiegung bei gleichmäßig verteilter Last	19
Formel 11: Dynamische Bemessungskraft.....	20
Formel 12: Bemessungslast je belasteter Rolle	20
Formel 13: Zulässige Traglast.....	20
Formel 14: Sicherheitsfaktor der Rolle	20
Formel 15: Vorspannkraft einer Schraube.....	21
Formel 16: Schlupftragfähigkeit einer Schraube	21
Formel 17: Schlupftragfähigkeit einer Winkelsatz	21
Formel 18: Umrechnung Kraft in maße	21

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AC	Wechselstrom (Alternating Current)
BMS	Batteriemanagementsystem (Battery Management System)
CAD	Rechnergestütztes Konstruieren (Computer-Aided Design)
DC	Gleichstrom (Direct Current)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC9	Eurocode 9 – Bemessung von Aluminiumtragwerken
GW	Gigawatt – Maßeinheit für Leistung, entspricht 10^9 Watt
LiFePO_4	Lithium-Eisenphosphat
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PVC	Polyvinylchlorid
SOC	Ladezustand (State of Charge)
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (German Association for Electrical, Electronic & Information Technologies)
Victron	Hersteller von Energieumwandlungs- und Speichertechnik

Symbolenverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Querschnittsfläche
A_s	mm^2	Spannungsquerschnitt- schraube
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
F_v	N	Vorspannkraft
$F_{s,Rd}$	N	Schlupftragfähigkeit einer- schraube
F_w	N	zulässige Kraft pro Winkel- satz
f_{ub}	MPa	Zugfestigkeit Schrauben- werkstoff
f_y	MPa	Streckgrenze
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
I	m^4	Flächenträgheitsmoment
K	-	Knicklängebeiwert
L	m	Stützenlänge / Bauteillänge
m	kg	Masse
μ	-	Reibbeiwert
N_{ed}	N	Bemessungsnormalkraft
φ_d	-	Stoßfaktor
λ	-	Schlankheit
χ	-	Reduktionsfaktor (Knick)
γ	-	Sicherheitsbeiwert

Inhaltsverzeichnis

Bachelorarbeit	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Abstract	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Formelverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolenverzeichnis	IX
Inhaltsverzeichnis	X
Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Elektrische Komponenten	3
2.1.1 Batteriespeichertechnologien	3
2.1.2 Wechselrichterprinzipien	5
2.1.3 Messgeräte	5
2.2 Mechanische Komponenten	6
2.2.1 19 Zoll Rackstruktur	6
2.2.2 Überblick zu mechanischen Beanspruchungen	7
3 Praktische Umsetzung	9
3.1 Methodik	9
3.2 Vorgehensweise	11
3.2.1 Komponenten	11
3.2.2 Konstruktion des Gesamtsystems	13
3.2.3 Mechanische Festigkeitsnachweise der Rackstruktur	17
3.2.4 Fertigung und Montage	22
3.2.5 Verkabelungskonzept	28
4 Ergebnisse	32
5 Zusammenfassung und Ausblick	35
6 Literaturverzeichnis	36

Einleitung

Die Energiewende stellt eine der zentralen gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Ziel ist die Umstellung der Energieversorgung von fossilen und nuklearen Brennstoffen auf erneuerbare Energien, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren und eine nachhaltige, zukunftsfähige Energieversorgung zu gewährleisten [1]. In Deutschland haben erneuerbare Energien im Jahr 2024 einen Anteil von rund 62,7 % an der Nettostromerzeugung erreicht [2], was den bisherigen Höchstwert darstellt und die Dynamik des Transformationsprozesses unterstreicht.

Photovoltaik- und Windkraftanlagen bilden die tragenden Säulen der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland. Laut aktuellen Auswertungen des Fraunhofer ISE [3]. erreichte die installierte Photovoltaikleistung bis Mitte 2025 einen neuen Höchstwert, während die Windenergie sowohl an Land als auch auf See ebenfalls weiter ausgebaut wurde. Parallel dazu weist das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [4] auf die wachsende Bedeutung von Energiespeichersystemen hin, die notwendig sind, um Erzeugungsschwankungen auszugleichen, die Netzstabilität zu sichern und den Eigenverbrauch zu optimieren.

Batteriespeicher spielen hierbei eine Schlüsselrolle: Sie ermöglichen es, überschüssigen Strom aus erneuerbaren Quellen zwischenspeichern und bei Bedarf bereitzustellen. Damit leisten sie nicht nur einen Beitrag zur Netzstabilität, sondern erhöhen auch die Effizienz dezentraler Energieversorgungssysteme [5].

1.1 Ziel der Arbeit

Das zentrale Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Umsetzung eines mechanisch tragfähigen, mobilen und modularen Batteriespeichersystems auf Basis eines 19-Zoll-Racks, das für den Einsatz in einem universitären Laborumfeld geeignet ist. Im Fokus stand dabei die Planung eines Gesamtsystems, das sowohl in funktionaler als auch in konstruktiver Hinsicht den Anforderungen an Stabilität, Sicherheit, Mobilität und Erweiterbarkeit genügt. Dabei sollten sämtliche Komponenten einschließlich Wechselrichter, Batteriespeicher und unterstützender Infrastruktur in ein konsistentes mechanisches Konzept integriert und in einem eigenständig aufgebauten Prototyp umgesetzt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit gliedert sich in fünf Hauptkapitel:

- Kapitel 1 – Einleitung: Dieses Kapitel erläutert den Hintergrund, die Motivation sowie das übergeordnete Ziel der Arbeit und beschreibt den strukturellen Aufbau des Berichts.
- Kapitel 2 – Theoretische Grundlagen: Es werden grundlegende technische und normative Aspekte behandelt, die für das Verständnis des Systems relevant sind darunter die Funktion von Batteriespeichern, Wechselrichtern und einschlägige Normen.
- Kapitel 3 – Methodik und Vorgehensweise: In diesem zentralen Abschnitt wird detailliert beschrieben, wie die Umsetzung des Systems erfolgte von der Auswahl und Integration der Komponenten über die Konstruktion und Berechnung bis zur Fertigung und Montage.
- Kapitel 4 – Ergebnisse: Hier wird das erreichte Ergebnis in Bezug auf das geplante Gesamtsystem dokumentiert und reflektiert. Konstruktive Herausforderungen und deren Lösungen werden aufgezeigt.
- Kapitel 5 – Zusammenfassung und Ausblick: Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen des Systems gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Elektrische Komponenten

Beim Aufbau eines modularen Batteriespeichersystems, das an das Stromnetz angeschlossen werden soll, spielen mehrere elektrische Komponenten eine wichtige Rolle. Damit das System zuverlässig funktioniert, müssen diese gut aufeinander abgestimmt sein. Besonders wichtig sind dabei drei Dinge: die Wahl der richtigen Batterietechnologie, die Umwandlung des Stroms durch einen Wechselrichter und der Einsatz von Messgeräten, um das System im Labor genau beobachten und auswerten zu können.

2.1.1 Batteriespeichertechnologien

Batteriespeicher

Batteriespeicher sind elektrochemische Energiespeichersysteme, die elektrische Energie in chemischer Form speichern und bei Bedarf wieder in elektrische Energie umwandeln [6]. Sie bestehen aus einer oder mehreren Batteriezellen, die zu Modulen und Systemen verschaltet werden, um die gewünschte Spannung und Kapazität zu erreichen. Je nach eingesetzter Technologie unterscheiden sich Batteriespeicher hinsichtlich Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kosten.

Bauarten von Batteriespeichern

Je nach Bauart und chemischer Zusammensetzung lassen sich Batteriespeicher in verschiedene Kategorien einteilen. Dazu gehören unter anderem Blei-Säure-Batterien, Nickel-Cadmium-Batterien, Nickel-Metallhydrid-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien [7]. Jede dieser Technologien weist spezifische Vor- und Nachteile auf, die ihre Eignung für bestimmte Anwendungen beeinflussen.

Lithium-Ionen-Technologie

Lithium-Ionen-Batterien speichern elektrische Energie durch elektrochemische Prozesse, bei denen Lithium-Ionen zwischen zwei Elektroden hin- und herwandern. Diese Technologie zeichnet sich durch hohe Energiedichte, gute Effizienz und lange Lebensdauer aus [8].

Batteriespeicher übernehmen in modernen Energiesystemen eine zentrale Funktion: Sie ermöglichen die zeitliche Entkopplung von Energieerzeugung und Verbrauch, indem sie

elektrische Energie zwischenspeichern und bei Bedarf wieder abgeben. Dies ist insbesondere in Systemen mit fluktuierender Einspeisung etwa durch Photovoltaik oder Windkraft – von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus tragen Batteriespeicher zur Netzstabilisierung, Lastspitzenkappung und zur Erhöhung der Eigenverbrauchsquote bei. In Laborumgebungen unterstützen sie zudem den sicheren Betrieb von Versuchsanordnungen und ermöglichen simulationsnahe Szenarien.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Batteriespeicher in ein modulares, mobiles 19 Zoll Rack integriert, das auf Basis eines Aluminiumprofilsystems konstruiert wurde. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an die mechanische Bauform der Speicher: Neben Parametern wie Kapazität und Spannung sind insbesondere Montagefreundlichkeit, kompakte Abmessungen, Stabilität sowie Erschütterungsresistenz relevant. Die Mobilität des Racks erfordert zusätzlich, dass alle Komponenten fest im System verankert und auch unter Bewegung betriebssicher bleiben.

Auf dem Markt sind verschiedene Bauformen stationärer Batteriespeicher erhältlich, die sich hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, Befestigungsmöglichkeiten und Integrationsfähigkeit unterscheiden. Die folgende Übersicht stellt die gängigsten Ausführungen systematisch gegenüber:

Tabelle 2-1: Vergleich mechanischer Bauformen von Batteriespeichern

Bauform	Beschreibung	Befestigung	Eignung für Laborsystem
Rack-modul	Flache, stapelbare Einheiten im 19-Zoll-Format	Direktmontage über Schienen oder Halterungen im Rack	Sehr gut: Hohe Kompatibilität, platzsparend, leicht integrierbar,
Wandmontagegerät	Kompakte, stehende Einheiten mit Wandbefestigung	Befestigung an vertikalen Flächen	Begrenzt geeignet: zusätzliche Konstruktionen erforderlich
Tower-Design	Vertikal aufgestellte Module mit Bodenaufstellung	Bodenstehend, ggf. verschraubt	Gut – flexibel bei Systemgröße, eingeschränkt bei Mobilität
Freistehendes Bodenmodul	Großvolumige Systeme zur stationären Aufstellung	Aufstellfläche notwendig	Eingeschränkt – geeignet für stationäre, ortsfeste Anwendungen mit viel Platz

Für das im Projekt entwickelte System wurde gezielt eine Rackmodul Bauweise gewählt. Diese erlaubt eine mechanisch stabile, raumsparende und servicefreundliche Integration in die tragende Aluminiumstruktur. Der modulare Aufbau vereinfacht nicht nur die Montage, sondern begünstigt auch spätere Umbauten oder Erweiterungen im Sinne eines zukunftssicheren Designs.

2.1.2 Wechselrichterprinzipien

Der Wechselrichter stellt eine zentrale Komponente in Batteriespeichersystemen mit Netzan-schluss dar. Er wandelt den in der Batterie gespeicherten Gleichstrom (DC) in netzkonformen Wechselstrom (AC) um, sodass dieser entweder in das Stromnetz eingespeist oder für ange-schlossene Verbraucher im Labor genutzt werden kann [9]. Neben der reinen Spannungs-umwandlung übernimmt der Wechselrichter abhängig vom eingesetzten System weitere essenzielle Funktionen. Dazu zählen die Überwachung relevanter Netzparameter wie Span-nung und Frequenz, die Regelung der Blindleistung sowie der Schutz des Gesamtsystems durch integrierte Sicherheitsmechanismen wie den Netz- und Anlagenschutz. Darüber hinaus ist in vielen Fällen eine Kommunikation mit Messsystemen oder einer zentralen Steuerungs-einheit, beispielsweise über Smart Meter oder das Modbus-Protokoll, vorgesehen. Welche dieser Funktionen im konkreten Anwendungsfall erforderlich sind, hängt maßgeblich von der jeweiligen Netzstruktur, den betrieblichen Anforderungen und den vorgesehenen Einsatzbe-dingungen im Labor ab. Für den modularen Aufbau ist zudem von besonderer Bedeutung, dass der eingesetzte Wechselrichter mit verschiedenen Batteriespeichermodulen kompatibel ist und eine flexible Erweiterung des Systems ermöglicht.

2.1.3 Messgeräte

Messgeräte stellen einen essenziellen Bestandteil netzgebundener Batteriespeichersysteme dar. Sie ermöglichen die kontinuierliche Überwachung elektrischer Betriebsgrößen und liefern damit eine wichtige Grundlage für die Analyse, Steuerung und Absicherung des Gesamtsys-tems. Besonders in Laborumgebungen, in denen präzise Messdaten für Versuchsdurchfüh-rungen und Sicherheitsnachweise erforderlich sind, erfüllen sie eine zentrale Rolle.

Zu den typischen Aufgaben solcher Messgeräte zählen die Erfassung von Spannung, Strom, Wirkleistung, Blindleistung und Frequenz [10]. Darüber hinaus können sie Fehlerströme de-tekieren, Energieflüsse bilanzieren und Betriebsdaten zur Langzeitbeobachtung aufzeich-nen. Über digitale Schnittstellen beispielsweise Modbus, TCP/IP oder CAN lassen sich die erfassten Werte in externe Steuerungs- oder Überwachungssysteme einbinden.

In der vorliegenden Arbeit wurde besonderer Wert auf die mechanische Integration der Messgeräte in das Gesamtsystem gelegt. Die vorgesehene Positionierung im oberen Bereich des 19 Zoll Racks gewährleistet eine gute Zugänglichkeit, eine mögliche thermische Entkopplung sowie eine servicefreundliche Erweiterbarkeit. Die konstruktive Ausführung erlaubt eine stabile und präzise Befestigung der Einbaugeräte, ohne die Gesamtstabilität des Systems zu beeinträchtigen.

2.2 Mechanische Komponenten

Mechanische Komponenten bilden die strukturelle Grundlage technischer Systeme im Laborumfeld. Sie übernehmen nicht nur die Funktion der räumlichen Organisation von elektrischen und elektronischen Bauteilen, sondern stellen auch die Stabilität, Sicherheit und Wartbarkeit im praktischen Einsatz sicher. Besonders im Kontext modularer Batteriespeichersysteme ist die Wahl eines geeigneten Tragsystems entscheidend, um Anforderungen an Lastaufnahme, Flexibilität und Erweiterbarkeit zu erfüllen. In diesem Zusammenhang hat sich die 19 Zoll-Racktechnik als etablierter Standard durchgesetzt, der durch Aluminiumprofilsysteme ergänzt werden kann.

2.2.1 19 Zoll Rackstruktur

Die 19 Zoll Racktechnik ist ein international genormtes System zur Aufnahme von Geräten mit einer standardisierten Gehäusebreite von 19 Zoll (482,6 mm). Die vertikale Bauhöhe wird in sogenannten Höheneinheiten (HE) angegeben, wobei eine HE einer Höhe von 44,45 mm entspricht. Diese Normierung erlaubt eine flexible Bestückung des Racks mit unterschiedlichen Komponenten wie Netzteilen, Batteriemodulen, Wechselrichtern oder Messsystemen [11].

Im Laborumfeld bietet das 19 Zoll System mehrere Vorteile. Es ermöglicht eine modulare und skalierbare Integration von Geräten, die bei Bedarf erweitert oder ausgetauscht werden können. Durch die Standardisierung sind Komponenten verschiedener Hersteller untereinander kompatibel, was sowohl die Integration als auch die Beschaffung vereinfacht. Darüber hinaus unterstützt die strukturierte Anordnung der Bauteile eine übersichtliche Kabelführung und die Einhaltung sicherheitstechnischer Anforderungen [12], [13].

Für anwendungsspezifische Anpassungen kommen häufig Aluminiumprofilsysteme zum Einsatz. Diese ermöglichen den Aufbau maßgeschneiderter Rahmensysteme, die mit der 19 Zoll Technik kompatibel sind, aber zusätzliche mechanische Flexibilität und Stabilität bieten [14], [15]. Aufgrund ihrer modularen Bauweise, der lösbaren Verbindungen und der hohen Anpassungsfähigkeit eignen sich Aluminiumprofilsysteme besonders für Laborumgebungen, in denen eine offene Struktur, gute Zugänglichkeit und nachträgliche Modifikationen erforderlich sind [15].

Für die mechanische Grundstruktur des Systems standen verschiedene Konstruktionsansätze zur Auswahl. Die nachfolgende Übersicht vergleicht diese Optionen mit Blick auf

Material, Fertigung, Anpassungsfähigkeit und Eignung für den Laborbetrieb. bei der Auswahl des Tragsystems wurden verschiedene Konstruktionsvarianten betrachtet. Die nachfolgende Tabelle fasst typische Rahmenkonstruktionsarten zusammen und bewertet diese hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und Labor-Eignung.

Tabelle 2-2: Vergleich von Rahmenkonstruktionsarten

Konstruktionsart	Vorteile	Nachteile	Eignung für Labore
Aluminiumprofil (geschraubt, z. B. Nut 10, 45×45 mm)	Modular, leicht anpassbar, gute Verfügbarkeit von Zubehör, geringes Gewicht, kein Schweißen nötig	Begrenzte Tragfähigkeit im Vergleich zu Stahl, Verbindungen sind das schwächste Glied	Sehr gut – flexibel, leicht montierbar, mobil, optimal für prototypische und modulare Systeme
Aluminiumprofil (geschweißt)	Hohe Stabilität, formschlüssige Verbindung, keine Lockerung durch Vibration	Aufwändiger Herstellungsprozess, keine spätere Änderung möglich	Begrenzt – geeignet bei dauerhaft fester Struktur, kaum veränderbar
Stahlrahmen (geschraubt)	Hohe Festigkeit, standardisierte Stahlwinkelverbindungen möglich, industrietauglich	Hoher Material- und Gewichsfaktor, Korrosionsschutz nötig	Gut – bei stationärem Aufbau mit hoher Belastung, aber wenig Anpassungsbedarf
Stahlrahmen (geschweißt)	Sehr hohe Steifigkeit, dauerhaft belastbar, bewährt im Maschinenbau	Sehr aufwendig in Herstellung und Änderungen, schwer zu transportieren	Eingeschränkt – ideal bei sehr hohen mechanischen Anforderungen, unflexibel bei Änderungen
Standardisierte Gehäuse (z. B. Netzschrank)	Schnelle Integration, geprüftes System, normgerechte Abmessungen	Begrenzte Flexibilität, keine mechanische Anpassung möglich	Begrenzt – gut für standardisierte Geräte, ungeeignet für individuelle Anpassungen

2.2.2 Überblick zu mechanischen Beanspruchungen

Die Auslegung tragender Strukturen erfordert eine grundlegende Betrachtung mechanischer Beanspruchungen. Neben statischen Kräften etwa durch das Eigengewicht installierter Komponenten wirken in vielen Fällen auch dynamische Belastungen, beispielsweise infolge von Stößen, Schwingungen oder wechselnden Lastzuständen. Diese beeinflussen sowohl die Betriebssicherheit als auch die Dauerfestigkeit technischer Systeme [16].

Aluminiumprofilsysteme mit genormten Querschnitten und Nutgeometrien beispielsweise im Raster 45 × 45 mm mit Nut 10 haben sich im Maschinenbau und in Laboranwendungen als modulare Tragsysteme etabliert. Sie zeichnen sich durch ein günstiges Verhältnis von Gewicht zu Tragfähigkeit aus. Die mechanische Belastbarkeit hängt dabei nicht nur vom Profilquerschnitt oder der Einbaurichtung ab, sondern insbesondere von der Art, Anzahl und Qualität der eingesetzten Verbindungselemente. Fachliteratur und Herstellerangaben zeigen, dass diese häufig die strukturelle Begrenzung eines Systems darstellen [17], [14].

Für Schraubverbindungen wie M8-Schrauben gemäß DIN 912 gelten je nach Anwendungsfall unterschiedliche Anforderungen. In der technischen Mechanik wird empfohlen, Sicherheitsfaktoren in einem normativ festgelegten Bereich anzusetzen, um Unsicherheiten wie Toleranzen, variable Belastung oder Montageeinflüsse auszugleichen. Entsprechende Leitlinien bieten die VDI-Richtlinie 2230 sowie grundlegende Konstruktionsempfehlungen für Maschinenbauelemente [16], [18].

Bei mobil ausgeführten Aufbauten z. B. durch den Einsatz von Rollen treten zusätzlich horizontale Kräfte, Kippmomente und ungleichmäßige Lastverteilungen auf. Diese Beanspruchungen erfordern eine sorgfältige Betrachtung der Befestigungspunkte und Komponentenwahl, um sowohl Tragfähigkeit als auch Betriebssicherheit zu gewährleisten [14].

Eine zuverlässige Auslegung tragender Systeme setzt daher eine ganzheitliche Betrachtung von Profilwahl, Verbindungstechnik, Lastpfaden und Randbedingungen voraus. Die Kombination aus ingenieurwissenschaftlicher Fachliteratur, Konstruktionsrichtlinien und herstellereitiger Dokumentation bildet die Grundlage für belastbare, modulare Systemlösungen.

3 Praktische Umsetzung

3.1 Methodik

Die Umsetzung des Batteriespeichersystems erfolgte schrittweise und orientierte sich am in der VDI-Richtlinie 2221 [19] beschriebenen Vorgehensmodell für die Entwicklung technischer Produkte. Dieses strukturierte Modell diente als methodischer Leitfaden und wurde auf die spezifischen Anforderungen des Projekts übertragen.



Abb. 3-1: Vorgehensmodell der Projektmethodik.

Das in Abbildung 3-1 dargestellte Vorgehensmodell gliedert sich in sechs Phasen, die den Entwicklungsprozess von der Aufgabenklärung bis zur fertigen mechanischen Umsetzung abbilden.

Phase 1 – Aufgabenklärung und Anforderungsdefinition

In dieser Phase wurden die funktionalen, mechanischen und sicherheitstechnischen Anforderungen definiert. Ziel war die Entwicklung eines mobilen, modularen Batteriespeichersystems auf Basis eines 19-Zoll-Racks, das die Integration von Wechselrichtern, Batteriespeichern und Messtechnik erlaubt. Die Abstimmung mit dem betreuenden Professor und der Hochschulwerkstatt diente der Sicherstellung der Umsetzbarkeit mit den verfügbaren Ressourcen.

Phase 2 – Konzeptentwicklung

Auf Grundlage der definierten Anforderungen wurden erste Entwürfe des Racks im item Engineeringtool erstellt. Dabei fiel die Wahl auf ein Aluminiumprofilsystem (45×45 mm, Nut 10) aufgrund seiner Modularität, Stabilität und Verfügbarkeit. Erste Layoutvarianten ermöglichten die Prüfung der Bauraumanforderungen und der grundsätzlichen Komponentenplatzierung.

Phase 3 – Entwurfs- und Konstruktionsphase

Die detaillierte Konstruktion erfolgte in SolidWorks unter Einbindung von STEP-Dateien der Hauptkomponenten. Dadurch konnten Kollisionsprüfungen durchgeführt, Maße verifiziert und Montagekonzepte entwickelt werden. Aus dem 3D-Modell wurden technische Zeichnungen und Stücklisten abgeleitet, die als Grundlage für die Fertigung dienten.

Phase 4 – Berechnungen und Nachweise

Zur Absicherung der mechanischen Auslegung wurden Berechnungen zur Tragfähigkeit, Biege- und Knickstabilität der Aluminiumprofile sowie zur Festigkeit der Verbindungselemente durchgeführt.

Phase 5 – Fertigung und Montage

Die zugeschnittenen Profile und gefertigten Sonderteile (Batteriehalterungen, Holzplatte, Trägerstruktur) wurden in der Hochschulwerkstatt bereitgestellt. Die Montage des Racks erfolgte in einer optimierten Reihenfolge, um Passungenauigkeiten zu minimieren. Während des Aufbaus wurden kleinere Anpassungen vorgenommen, um die Maßhaltigkeit und Funktionsfähigkeit sicherzustellen.

Phase 6 – Abschluss und Dokumentation

Abschließend wurden alle Arbeitsschritte von der digitalen Konstruktion über die Fertigung bis zur Endmontage dokumentiert. Zusätzlich wurde ein strukturiertes Verkabelungskonzept erstellt, um die spätere elektrische Inbetriebnahme vorzubereiten.

3.2 Vorgehensweise

3.2.1 Komponenten

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere mechanische und elektrische Komponenten ausgewählt und in das Gesamtsystem integriert, um die Funktionsfähigkeit des modularen Batteriespeichersystems sicherzustellen. Während die zentralen elektrischen Bauteile – insbesondere die Batteriemodule, Wechselrichter und Messgeräte durch den betreuenden Professor vorgegeben waren, erfolgte die Auswahl der mechanischen Struktur sowie sämtlicher Verbindungselemente eigenständig, basierend auf den technischen Anforderungen und den Möglichkeiten der Hochschulwerkstatt.

Zur besseren Planung und Integration der Bauteile wurde das Rack in fünf Funktionsebenen unterteilt: Die beiden unteren Ebenen dienen der Aufnahme der Batteriespeicher, die mittlere Ebene ist für die drei Wechselrichter vorgesehen, und die beiden oberen Ebenen sind für die Installation der Messgeräte ausgelegt. Diese Einteilung erleichterte sowohl die CAD-Planung als auch die spätere Montage und sorgt für eine klare, übersichtliche Anordnung der Systemkomponenten.

Batteriespeicher

Als Energiespeicher wurden pro Rack zwei Module des Typs Pylontech US2000C (48 V, 2,4 kWh) eingesetzt [19]. Diese Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LiFePO_4) zeichnen sich durch hohe Zyklenfestigkeit und eine kompakte Bauform aus, was sie besonders für den Einsatz in modularen Racksystemen geeignet macht. Die mechanische Befestigung erfolgte über seitlich positionierte Aluminiumwinkelhalterungen, die speziell für diesen Zweck konstruiert und in der Hochschulwerkstatt gefertigt wurden. Jede Halterung wurde mit zwei M6-Schrauben und passenden Nutsteinen an den vertikalen Profilen befestigt. Zusätzlich wurden pro Halterung zwei weitere M6-Schrauben mit Sechskantmuttern verwendet, um das Batteriegehäuse von vorne zu fixieren. Diese Konstruktion gewährleistet eine sichere Fixierung mit insgesamt acht M6-Schrauben pro Batterie, wodurch eine hohe mechanische Stabilität und Vibrationsfestigkeit erreicht wird insbesondere bei mobiler Nutzung.

Wechselrichter

Für die Umwandlung von Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom kamen pro Rack drei Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 Wechselrichter zum Einsatz [21]. Neben der Spannungsumwandlung ermöglichen diese Geräte auch die Kommunikation mit anderen Systemkomponenten über die proprietäre Schnittstelle VE.Bus. Die Montage erfolgte mithilfe der originalen Victron-Wandhalterungen, die ein werkzeugloses Einrasten der Geräte ermöglichen. Diese Halterungen wurden in eine eigens konstruierte Trägerstruktur integriert, bestehend aus vier vertikal montierten Profilen (Länge 530 mm) und vier Querprofilen (Länge 188 mm). Die Befestigung der Halterungen an den Querprofilen erfolgte jeweils mit drei M6-Schrauben und Nutsteinen, wodurch eine stabile, gleichzeitig aber demontierbare Verbindung entstand.

Messgeräte

Für die Systemüberwachung und Analyse wurden Einbaumessgeräte vorgesehen, die im oberen Bereich des Racks installiert werden sollten [10]. Die Montage erfolgte in Aluminiumprofilführungen mit 14,5 mm Nuttiefe. Da sich in der Praxis zeigte, dass der ursprünglich gewählte Abstand von 300 mm zwischen den Führungsschienen zu einer leichten Passungenauigkeit führte, wurde dieser auf 285 mm reduziert. Zusätzlich wurde zur Justierung und als Auflagefläche eine 5 mm starke PVC Leiste am unteren Profil befestigt, um einen spielfreien Sitz der Geräte zu gewährleisten.

Zusatzkomponenten und Mobilität

Zur Erhöhung der Funktionalität wurde im oberen Bereich des Racks eine 9 mm starke Holzplatte als zusätzliche Ablagefläche montiert. Diese wurde passgenau auf die Innenmaße zugeschnitten und mit acht M4 Schrauben sowie Nutsteinen befestigt. Die Mobilität des Systems wird durch vier verstellbare FM-60 Heberollen gewährleistet [22], die jeweils bis zu 250 kg Traglast aufnehmen können. Die Montage erfolgte an den unteren Enden der 1000 mm langen Vertikalprofile, wobei ein zentrales Befestigungsgewinde und zwei seitliche Arretierungsschrauben zum Einsatz kamen.

Verbindungselemente

Die gesamte Aluminiumstruktur wurde mit insgesamt 82 Winkeln 45 B-Typ, Nut 10 [23], 164 Hammerschrauben B-Typ, Nut 10 (M8×25) [24] sowie 164 Bundmuttern M8 [25] verschraubt. Diese Verbindungselemente gewährleisten eine form- und kraftschlüssige Verbindung der Profile in allen Ebenen und erlauben gleichzeitig eine flexible Justierung während der Montage. Für spezifische Befestigungsaufgaben, wie an den Batteriehalterungen, dem Wechselrichterträger oder der Holzplatte, kamen zusätzlich M6 bzw. M4 Schrauben in Kombination mit passenden Nutsteinen und Muttern zum Einsatz.

3.2.2 Konstruktion des Gesamtsystems

Die Konstruktion des modularen 19-Zoll-Racks wurde vollständig in 3D modelliert, um eine präzise räumliche Planung und eine reibungslose Montage sicherzustellen. Für die Grundplanung kam das item Engineeringtool zum Einsatz, während die detaillierte Ausarbeitung und Integration aller Systemkomponenten in SolidWorks erfolgte.

Das Design basiert auf dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Ebenenkonzept: Die beiden unteren Ebenen dienen der Aufnahme der Batteriespeicher, die mittlere Ebene trägt die drei Wechselrichter, und die beiden oberen Ebenen sind für Messgeräte sowie eine zusätzliche Ablagefläche vorgesehen. Diese Aufteilung gewährleistet eine klare Trennung der Funktionsbereiche, eine optimierte Schwerpunktlage sowie eine günstige thermische Strömung innerhalb des Racks.

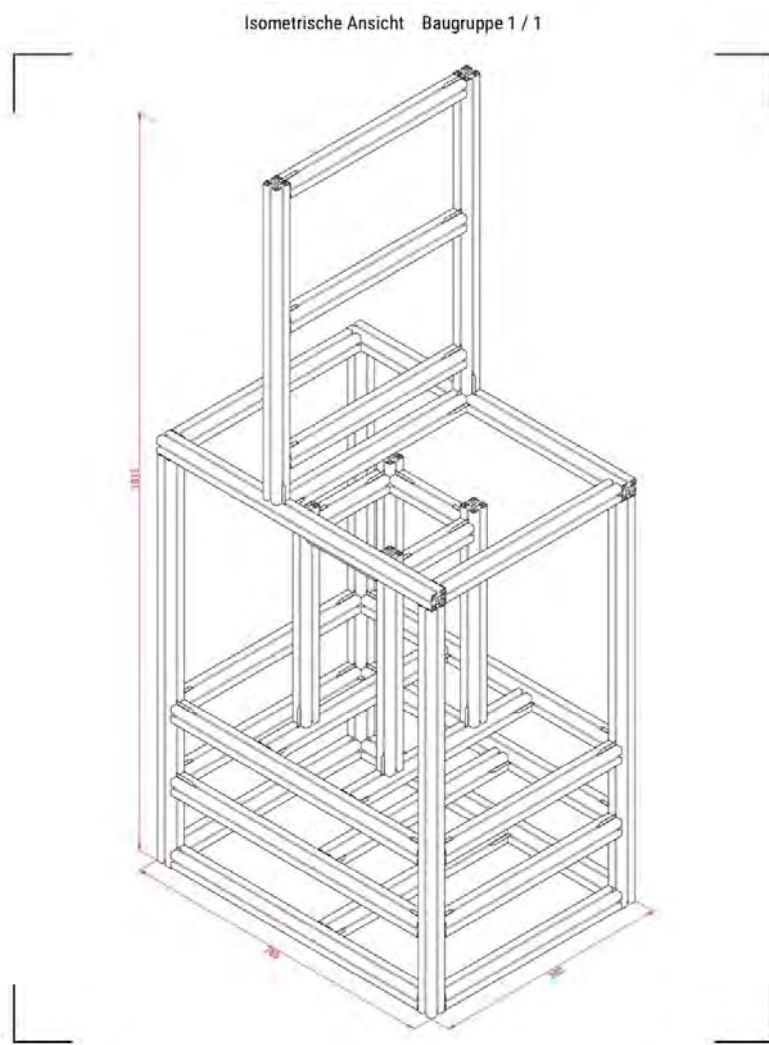


Abb. 3-2: Isometrische CAD-Darstellung des 19-Zoll-Racks

Eine detaillierte Dreitafelprojektion mit Bemaßung ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

Dreitafelprojektion Baugruppe 1 / 1

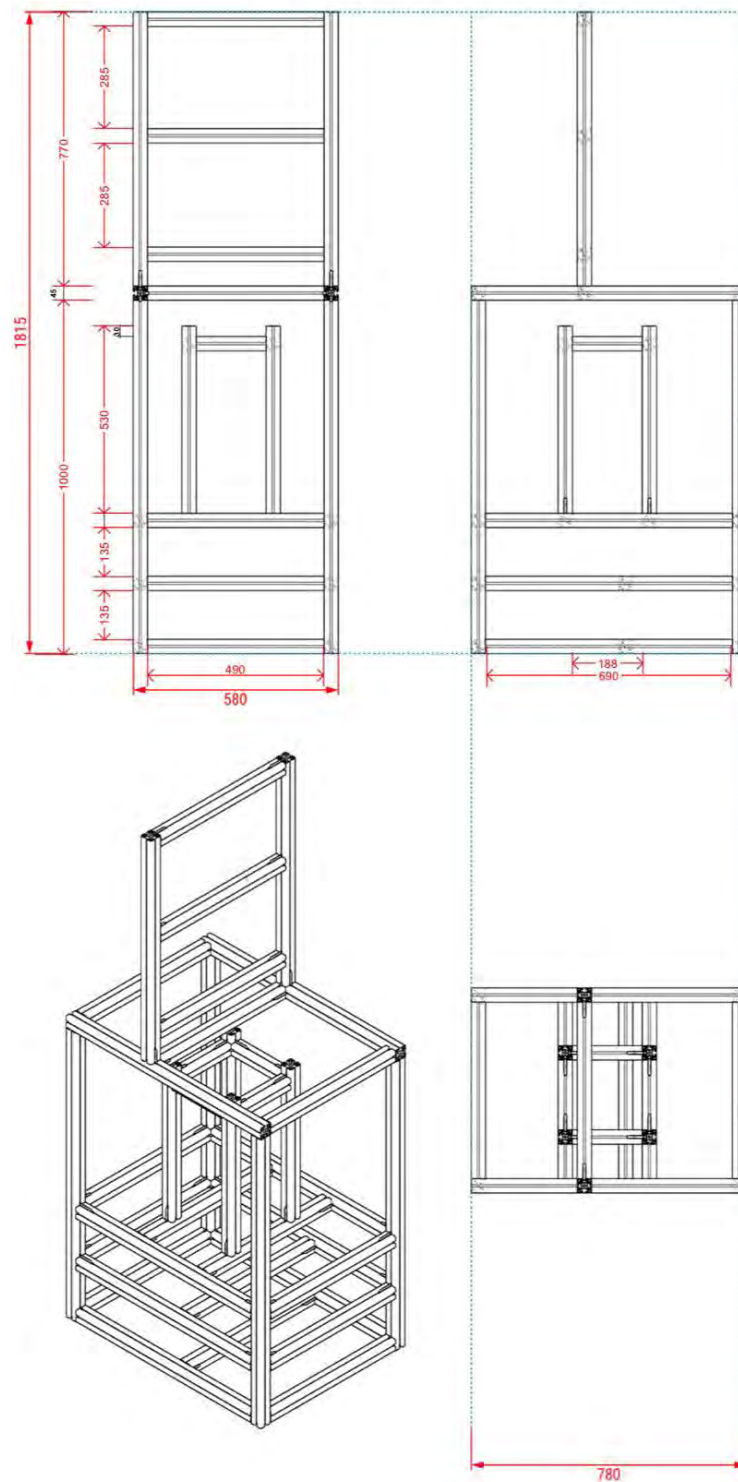


Abb. 3-3: Dreitafelprojektion des Racks mit Bemaßung (Vorder-, Seiten- und Draufsicht)

Die finale 3D-Konstruktion mit sämtlichen Hauptkomponenten ist in Abbildung 3-4 visualisiert.



Abb. 3-4: 3D-Modell des vollständigen Racks mit eingebauten Komponenten (Screenshot aus SolidWorks)

Für die Aufnahme der Wechselrichter wurde ein Trägersystem entworfen, das eine vertikale Anordnung aller drei Geräte auf derselben Ebene ermöglicht. Hierzu wurden vier vertikale Aluminiumprofile mit einer Länge von 530 mm mittig im Rack positioniert. Zwischen diesen sind vier Querprofile à 188 mm montiert, die als Halterahmen für die originalen Victron Wandhalterungen dienen und ein werkzeugloses Einrasten der Geräte ermöglichen (siehe Abbildungen 5 und 6).



Abb. 3-5: Wandhalterung zur vertikalen Montage des Wechselrichters (Victron MultiPlus-II)



Abb. 3-6: Rückansicht eines Victron Multiplus-II mit montierter Einrasthalterung

Für die Aluminiumstruktur kamen insgesamt sieben unterschiedliche Profilzuschnitte aus 45 × 45 mm-B-Typ-Profilen mit Nut 10 zum Einsatz [26].

Tabelle 3-1: Übersicht der verwendeten Aluminiumprofilzuschnitte pro Rack

Profilbezeichnung	Länge [mm]	Anzahl Pro Rack	Gesamtlänge [mm]
Vertikalprofil	1000	4	4000
Querprofil	490	16	7840
Längsprofil	690	6	4140
Längsprofil	780	2	1560
Vertikalprofil	770	2	1540
Vertikalprofil	530	4	2120
Querprofil	188	4	752
Gesamt		38	21952

Die Basis des Racks bildet ein Rahmen aus vier vertikal angeordneten Aluminiumprofilen mit einer Länge von jeweils 1000 mm. An der Vorder und Rückseite verbinden insgesamt 13 Querprofile (Länge 490 mm) die vertikalen Stützen und verleihen der Konstruktion ihre strukturelle Steifigkeit. Die seitliche Aussteifung erfolgt über sechs Längsprofile mit einer Länge von jeweils 690 mm, die zwischen den vertikalen Profilen an den Seiten montiert sind. Zusätzlich wurden zwei Längsprofile mit einer Länge von 780 mm auf der Oberseite des Rahmens befestigt, die jeweils eine seitliche Begrenzung des Racks bilden.

Auf dieser Grundstruktur wurden zwei weitere vertikale Aluminiumprofile mit einer Länge von 770 mm installiert, die parallel zu den vorderen Stützen angeordnet sind und um 300 mm nach innen versetzt wurden. Zwischen diesen beiden Profilen wurden drei Querprofile mit einer Länge von 490 mm eingesetzt, um einen stabilen Einbaurahmen für die oberen Funktionsebenen zu schaffen.

Die Befestigung der Batteriespeicher erfolgte über eigens entwickelte Winkelhalterungen aus Aluminium. Zur funktionalen Erweiterung des Systems wurde im oberen Bereich des Racks eine zusätzliche Ablagefläche in Form einer 9 mm Holzplatte konstruiert. Diese wurde auf das Innenmaß der obersten Ebene angepasst

Insgesamt wurden 38 Aluminiumprofile verarbeitet, mit einer Gesamtlängenzuschnittlänge von 21 952 mm – ein Indikator für die konstruktive Komplexität und den hohen Detaillierungsgrad des Systems.

3.2.3 Mechanische Festigkeitsnachweise der Rackstruktur

Ziel der folgenden Nachweise ist die Absicherung der mechanischen Tragfähigkeit der Hauptbauteile des aufgebauten Racks (vertikale Stützen, Querprofile unter den Wechselrichtern, Transportrollen). Die Bemessung erfolgt konservativ nach den Methoden für Aluminiumtragwerke gemäß DIN EN 1999-1-1 (Eurocode 9) [27]. Querschnitts- und Werkstoffkennwerte stammen aus den Herstellerangaben zum verwendeten Profil 45×45L, B-Typ, Nut 10 sowie zu den Rollen FM-60 [26], [22]; Angaben zu Verbindungselementen sind der Bestellliste entnommen [23].

1) Knicknachweis der vier vertikalen Stützen ($L = 1000 \text{ mm}$)

Gegeben / Annahmen:

Profil: 45×45L, B-Typ, Nut 10

$$A = 5,70 \text{ cm}^2 = 5,70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I = 11 \text{ cm}^4 = 1,10 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Werkstoff: $E = 69.000 \text{ MPa}$, $f_y = 190 \text{ MPa}$

Stützenlänge: $L = 1,0 \text{ m}$

Lagerung: gelenkig–gelenkig ($K = 1,0$)

Teilsicherheitsbeiwert: $\gamma_{M1} = 1,10$

Lastansatz (Beanspruchung pro Stütze):

Gesamtmasse konservativ:

$$m_{ges} = 160 \text{ kg} \quad G = m_{ges} \cdot g = 160 \cdot 9,81 = 1.570 \text{ N} \quad [17]$$

Formel 1: Gesamtgewichtskraft

Gleichmäßige Verteilung auf 4 Stützen, Stoßfaktor $\varphi_d = 2,0$:

$$N_{Ed} = (G/4) \cdot \varphi_d = (1.570/4) \cdot 2,0 \approx 0,785 \text{ kN} \quad [17]$$

Formel 2: Bemessungsnormalkraft

Schlankheit und χ -Faktor (EC9-Methode):

$$i = \sqrt{I/A} = \sqrt{(1,10 \cdot 10^{-7} / 5,70 \cdot 10^{-4})} \approx 0,0139 \text{ m} \quad [27]$$

$$\lambda = L_k / i = 1,0 / 0,0139 \approx 72$$

Formel 3: Schlankheit

$$\lambda_{_1} = \pi \sqrt{(E/f_y)} = \pi \sqrt{(69.000 / 190)} \approx 59,9$$

$$\tilde{\lambda} = \lambda / \lambda_{_1} = 72 / 59,9 \approx 1,20$$

$$\alpha = 0,49$$

$$\varphi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\tilde{\lambda} - 0,2) + \tilde{\lambda}^2] \approx 1,465 \quad [27]$$

$$\chi = 1 / (\varphi + \sqrt{(\varphi^2 - \tilde{\lambda}^2)}) \approx 0,434$$

Formel 4: Reduktionsfaktor

Tragfähigkeit:

$$N_{b,Rd} = (\chi \cdot A \cdot f_y) / \gamma_{M1} = (0,434 \cdot 5,70 \cdot 10^{-4} \cdot 190 \cdot 10^6) / 1,10 \approx 42,7 \text{ kN} \quad [27]$$

Formel 5: Knicktraglast

Sicherheitsgrad:

$$SF = N_{b,Rd} / N_{Ed} = 42,7 / 0,785 \approx 54,4 \quad [27]$$

Formel 6: Sicherheitsgrad Knick

2) Biegebemessung der Querprofile (L = 188 mm)

Gegeben / Annahmen:

Länge: L = 0,188 m

Last je Wechselrichter: $F \approx 19 \text{ kg} \cdot 9,81 \approx 186 \text{ N}$

Lagerung: einfach gelagert

$$W = 4,80 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, I = 1,10 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4, E = 69 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$M_{\text{max}} = (F \cdot L) / 4 = (186 \cdot 0,188) / 4 \approx 8,74 \text{ Nm [17]}$$

Formel 7: Maximales Biegemoment

$$\sigma_b = M_{\text{max}} / W = 8,74 / 4,80 \cdot 10^{-6} \approx 1,82 \text{ MPa}$$

Formel 8: Biegespannung

$$\delta_P = (F \cdot L^3) / (48 \cdot E \cdot I) \approx 0,0034 \text{ mm [16], [13]}$$

Formel 9: Durchbiegung bei Einzellast

$$\delta_q = (5 \cdot q \cdot L^4) / (384 \cdot E \cdot I) \approx 0,00003 \text{ mm [17]}$$

Formel 10: Durchbiegung bei gleichmäßig verteilter Last

$$\delta_{\text{ges}} \approx 0,0034 \text{ mm} \ll L/500 = 0,376 \text{ mm [17]}$$

3) Tragfähigkeitsnachweis der Transportrollen (FM-60)

Gegeben / Annahmen:

Zul. Tragfähigkeit je Rolle laut Hersteller: 250 kg $\approx$ 2,45 kN

Worst-Case-Annahme: 90 % der Gesamtlast liegen auf 3 Rollen (ungleichmäßige Lastverteilung)

Stoßfaktor $\varphi_d = 2,0$ (Stoßbelastung beim Verfahren)

Gesamtmasse des Racks $m_{\text{ges}} = 160 \text{ kg}$

Gegeben:

Gesamtmasse $m_{\text{ges}} = 160 \text{ kg}$

Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Stoßfaktor $\varphi_d = 2,0$

Worst Case: 90 Prozent der Last liegen auf 3 Rollen

Zulaessige Masse je Rolle $m_{\text{Rd_Roll}} = 250 \text{ kg}$ (Herstellerangabe)

Berechnung der Gesamtgewichtskraft:

$$G = m_{ges} * g [17]$$
$$G = 160 * 9,81 = 1569,6 \text{ N } (\approx 1,57 \text{ kN})$$

Dynamische Bemessungskraft:

$$G_d = \phi_{i_d} * G [17]$$

Formel 11: Dynamische Bemessungskraft

$$G_d = 2,0 * 1569,6 = 3139,2 \text{ N } (\approx 3,14 \text{ kN})$$

Worst Case: 90 Prozent der dynamischen Last auf 3 Rollen:

$$N_{sum_3} = 0,9 * G_d$$
$$N_{sum_3} = 0,9 * 3139,2 = 2825,3 \text{ N } (\approx 2,83 \text{ kN})$$

Bemessungslast je belasteter Rolle (3 Rollen tragen):

$$N_{Ed_Roll} = N_{sum_3} / 3$$

Formel 12: Bemessungslast je belasteter Rolle

$$N_{Ed_Roll} = 2825,3 / 3 = 941,8 \text{ N } (\approx 0,942 \text{ kN})$$

Zulässige Traglast einer Rolle als Kraft: [22]

$$N_{Rd_Roll} = m_{Rd_Roll} * g$$

Formel 13: Zulässige Traglast

$$N_{Rd_Roll} = 250 * 9,81 = 2452,5 \text{ N } (\approx 2,45 \text{ kN})$$

Sicherheitsfaktor je Rolle:

$$SF_{Roll} = N_{Rd_Roll} / N_{Ed_Roll} [17]$$

Formel 14: Sicherheitsfaktor der Rolle

$$SF_{Roll} = 2452,5 / 941,8 \approx 2,60$$

Optional: vierte Rolle (restliche 10 Prozent der Last):

$$N_{Ed_Roll_4} = 0,1 * G_d = 0,1 * 3139,2 = 313,9 \text{ N } (\approx 0,314 \text{ kN})$$

Bewertung: Deutlich kleiner als 2,45 kN, daher unkritisch.

Fazit: Im ungünstigsten Lastfall (90 Prozent auf 3 Rollen, Stossfaktor 2,0) ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von etwa 2,6. Die FM-60-Rollen sind damit deutlich ausreichend.

4) Tragfähigkeit eines Winkelsatzes (45 B-Typ, Nut 10; 2×M8)

Die Abschätzung basiert auf einem Winkelsatz bestehend aus zwei M8-Schrauben (Festigkeitsklasse 8.8) mit definierter Vorspannung. Die Bauteile entsprechen dem Winkel 45 B-Typ Nut 10 und den passenden Befestigungselementen (Hammerschraube M8×25, Nutstein B-Typ Nut 10, Bundmutter M8) gemäß Bestellliste.

Vorspannkraft pro Schraube (Faustformel):

$$F_{p,C} \approx 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s [17]$$

Formel 15: Vorspannkraft einer Schraube

mit $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$, $A_s(\text{M8}) = 36,6 \text{ mm}^2$

$$F_{p,C} \approx 20,5 \text{ kN}$$

Schlupftragfähigkeit pro Schraube:

$$F_{slip,1} = (\mu \cdot F_{p,C}) / \gamma \approx (0,15 \cdot 20,5) / 1,25 \approx 2,46 \text{ kN} [17]$$

Formel 16: Schlupftragfähigkeit einer Schraube

Für zwei Schrauben im Winkelsatz:

$$F_{slip,Winkel} \approx 2 \cdot 2,46 \approx 4,9 \text{ kN} [17]$$

Formel 17: Schlupftragfähigkeit einer Winkelsatz

Umgerechnet in zulässige Masse (Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$):

$$m \approx F / g \approx 4,9 \text{ kN} / 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 500 \text{ kg} [17]$$

Formel 18: Umrechnung Kraft in Maße

Hinweis: Die angegebene Tragfähigkeit gilt bei definierter Vorspannung der Schrauben, einem Reibwert von $\mu \approx 0,15$ sowie einem Sicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,25$. Ohne definierte Vorspannung (z. B. lediglich handfest angezogen) sollte konservativ von einer Tragfähigkeit von etwa 100–200 kg pro Winkelsatz ausgegangen werden, abhängig von der Tragfähigkeit der T-Nut und der Lochleibung im Winkel.

3.2.4 Fertigung und Montage

Die Fertigung und Montage des Gesamtsystems erfolgten in enger Abstimmung mit der Hochschulwerkstatt. Nach Abschluss der CAD-Planung und der Erstellung der Zuschnittliste wurden sämtliche Aluminiumprofile entsprechend den definierten Maßen zugeschnitten.



Abb. 3-7: Zuschnitt der Aluminiumprofile in der Werkstatt.

An den unteren Enden der vier vertikalen 1000 mm-Profile wurden zusätzlich Gewinde eingebracht, um die spätere Befestigung der Transportrollen zu ermöglichen.

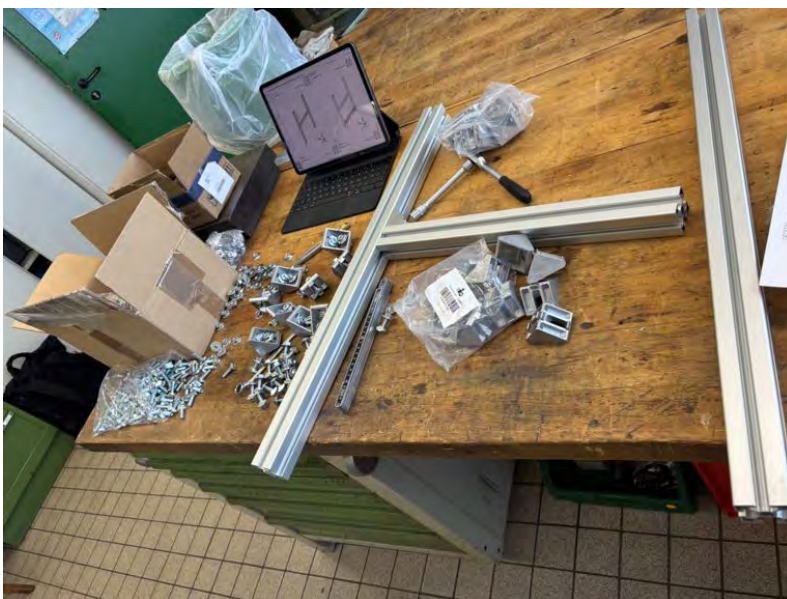


Abb. 3-8: Vorbereitung der Verbindungselemente und Vormontage auf der Werkbank.

Der erste Rackaufbau wurde konventionell begonnen, indem die vier Vertikalprofile mit den Quer- und Längsträgern im aufgebauten Zustand verschraubt wurden.



Abb. 3-9: Konventioneller Aufbau des Grundgestells in aufrechter Position.

Aufgrund von Toleranzen im Zuschnitt und der engen Passung der Verbindungselemente erforderte dieser Aufbau jedoch einen hohen Korrekturaufwand teils mussten Profile mit einem Gummihammer nachjustiert werden.

Daraus resultierte eine optimierte Montagelogik für die weiteren Racks: Zunächst wurde jeweils eine seitliche Rahmenstruktur separat vormontiert. Diese bestand aus zwei 1000 mm langen Vertikalprofilen, drei dazwischenliegenden 690 mm Profilen sowie einem oberen 780 mm Querträger.



Abb. 3-10: Zusammenbau der Seitenrahmen mit definierten Einbaumaßen.

Dabei wurde auf die korrekte Position der unteren Gewinde für die Transportrollen geachtet. Nach Fertigstellung beider Seitenrahmen wurden diese liegend mit insgesamt 13 vorbereiteten Querprofilen à 490 mm verbunden und anschließend zu einem dreidimensionalen Grundgerüst zusammengeführt. Diese Bauweise erlaubte eine exakte Ausrichtung und reduzierte den Montageaufwand erheblich.

Die Wechselrichter wurden auf der dritten Ebene des Racks installiert. Hierzu wurde der im Konstruktionskapitel beschriebene Trägerkasten aus vier vertikal montierten 530 mm-Profilen und vier dazwischenliegenden 188 mm Profilen realisiert.



Abb. 3-11: Montage der Wechselrichter mit vormontierter Trägerstruktur und Victron-Wandhalterungen.

Die originalen Wandhalterungen von Victron konnten daran montiert werden und ermöglichen ein werkzeugfreies Einrasten der Geräte bei gleichzeitig hoher Stabilität.

Die Messgeräterahmen (Ebene 4 und 5) wurden vorab auf der Werkbank vorbereitet. Zwei 770 mm lange Vertikalprofile wurden mit jeweils drei Querträgern à 490 mm verbunden. Die ursprünglich geplante vertikale Distanz von 300 mm zwischen den Querträgern erwies sich als unzureichend, da die Nut Tiefe der Aluminiumprofile (ca. 14,5 mm) nicht berücksichtigt worden war. Zur Anpassung wurde der Abstand auf 285 mm reduziert, zusätzlich wurde am unteren Profil eine 5 mm starke PVC-Leiste befestigt, um eine spielfreie Passung der Messgeräte zu gewährleisten.

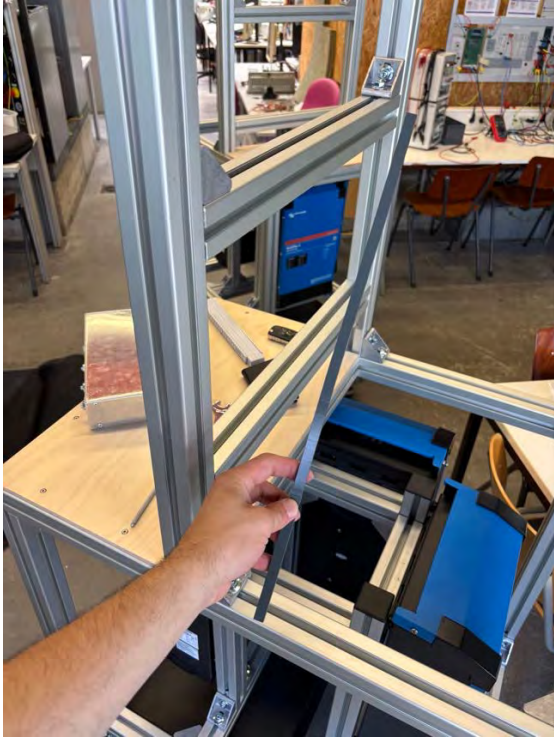


Abb. 3-12: Vorbereitung des Messgeräterahmens mit PVC-Leiste zur Justierung der Messgeräte

Die seitliche Befestigung der Batteriespeicher erfolgte mithilfe speziell entwickelter Haltewinkel.



Abb. 3-13: Fertig gefräste Batteriehalterungen aus Aluminium mit Bohrungen und Langlöchern.

Pro Batterie wurden zwei dieser Winkel mit jeweils zwei M6 Schrauben und Nutsteinen am Rack montiert. Die Batterie selbst wurde mit acht M6-Schrauben samt Muttern durch die Halterungen fixiert. Diese Verschraubung gewährleistet eine zuverlässige Arretierung und minimiert potenzielle Relativbewegungen im Betrieb.



Abb. 3-14: Montage der Pylontech-Batterien auf unterster Ebene.

Eine 9 mm Holzplatte wurde auf der obersten Funktionsebene montiert, um eine zusätzliche Ablagefläche zu schaffen. Die Befestigung erfolgte mit acht M4 Schrauben und Nutsteinen. Die Integration dieser Platte basierte auf einem Wunsch des betreuenden Professors und bietet eine universell nutzbare Oberfläche, z. B. für Prüfaufbauten oder Werkzeuge.



Abb. 3-15: Befestigte Holzplatte auf der obersten Rackebene.

Abschließend wurden die vier Transportrollen mit den vorbereiteten Gewindebohrungen an der Rack-Unterseite verschraubt. Diese ermöglichen eine flexible Positionierung des Systems innerhalb des Labors und erleichtern spätere Wartungs- und Umrüstarbeiten.

3.2.5 Verkabelungskonzept

Für den sicheren Betrieb des modularen Batteriespeichersystems war neben der mechanischen Konstruktion auch die Ausarbeitung eines durchdachten Verkabelungskonzepts erforderlich. Ziel war es, eine klare, nachvollziehbare und technisch sichere Verbindung der Energie- und Kommunikationskomponenten innerhalb eines Racks zu gewährleisten. Im Fokus standen dabei die DC-Verkabelung zwischen Batteriespeichern, Wechselrichtern und dem zentralen Verteilmodul sowie die strukturierte Anbindung der Kommunikationsschnittstellen.

Die DC-Hauptverkabelung erfolgt über einen zentralen Victron Lynx Distributor, der als Sammelschiene, Sicherungseinheit und Überwachungskomponente fungiert. Pro Rack werden jeweils drei Wechselrichter über separate DC-Zuleitungen mit dem Lynx Distributor verbunden. Dabei kommen pro Gerät ein rotes und ein schwarzes Batteriekabel (25 mm² Querschnitt) mit vormontierten M8-Ringkabelschuhen zum Einsatz. Die Verbindung zwischen den beiden Batteriespeichern und dem Lynx Distributor erfolgt über ein herstellerspezifisches Kabelset von Pylontech mit passenden Ringkabelschuhen und geprüfter Stromtragfähigkeit [28], [29].

Die Absicherung der Strompfade geschieht innerhalb des Lynx Distributors mittels MEGA-Sicherungen (125 A, 80 V), die direkt in die vorgesehenen Steckplätze eingesetzt werden. Diese Maßnahme entspricht den sicherheitstechnischen Anforderungen im Niederspannungsbereich für Gleichstromsysteme dieser Leistungsklasse [28]

Eine Übersicht der in diesem Zusammenhang eingesetzten Komponenten ist in Tabelle 3-2 zusammengefasst:

Tabelle 3-2: Übersicht der wichtigsten Verkabelungskomponenten

Komponente	Hersteller	Funktion	Bemerkung
Victron Lynx Distributor	Victron Energy	DC-Verteiler & Sicherungsträger	Zentraler DC-Knotenpunkt
MEGA-Sicherung 125 A	Victron / kompatibel	Leitungsschutz	Pro Wechselrichter separat
Anschlusskabel 25 mm ²	Diverse	Verbindung Lynx ⇌ Wechselrichter	Mit M8-Ringkabelschuhen vormontiert

Pylontech Verbindungskabel	Pylontech	Batterie ⇄ Lynx Distributor	Herstellerspezifisches Set
Pylontech Verbindungskabel	Pylontech	Batterie ⇄ Batterie	Herstellerspezifisches Set

Die Kommunikationsverkabelung erfolgt über standardisierte digitale Schnittstellen. Jeder Wechselrichter ist über die proprietäre VE.Bus Verbindung mit dem Kommunikationsmodul Victron Cerbo GX verbunden, das als zentrale Steuer- und Überwachungseinheit fungiert [30]. Der Cerbo GX koordiniert die Datenflüsse zwischen Wechselrichtern, Messsystemen und optionalem Fernzugriff.

Für die externe Anbindung an ein Netzwerk kann der Cerbo GX über LAN direkt mit einem Internetrouter verbunden werden. Optional lässt sich ein TP-Link 5-Port-Gigabit-Switch integrieren, um mehrere Ethernet basierte Komponenten strukturiert miteinander zu vernetzen.

Tabelle 3-3 zeigt die Übersicht über die relevanten Kommunikationsverbindungen:

Tabelle 3-3: Kommunikationsverkabelung im System

Verbindungstyp	Komponente	Zielsystem	Schnittstelle
VE.Bus	Wechselrichter	Cerbo GX	RJ45
LAN	Cerbo GX	Internetrouter	RJ45
LAN (optional)	TP-Link Switch	Netzwerkkomponenten	RJ45

Für die DC-Verbindungen ist eine saubere Kabelführung und eine eindeutige Zuordnung der Leitungen von zentraler Bedeutung. Um die Übersichtlichkeit und Wartungsfreundlichkeit zu erhöhen, wurde im Projektverlauf ein schematischer Verkabelungsplan entwickelt, der alle Strompfade sowie Kommunikationsleitungen visuell abbildet. Dieser ist in Abbildung 3-16 dargestellt.

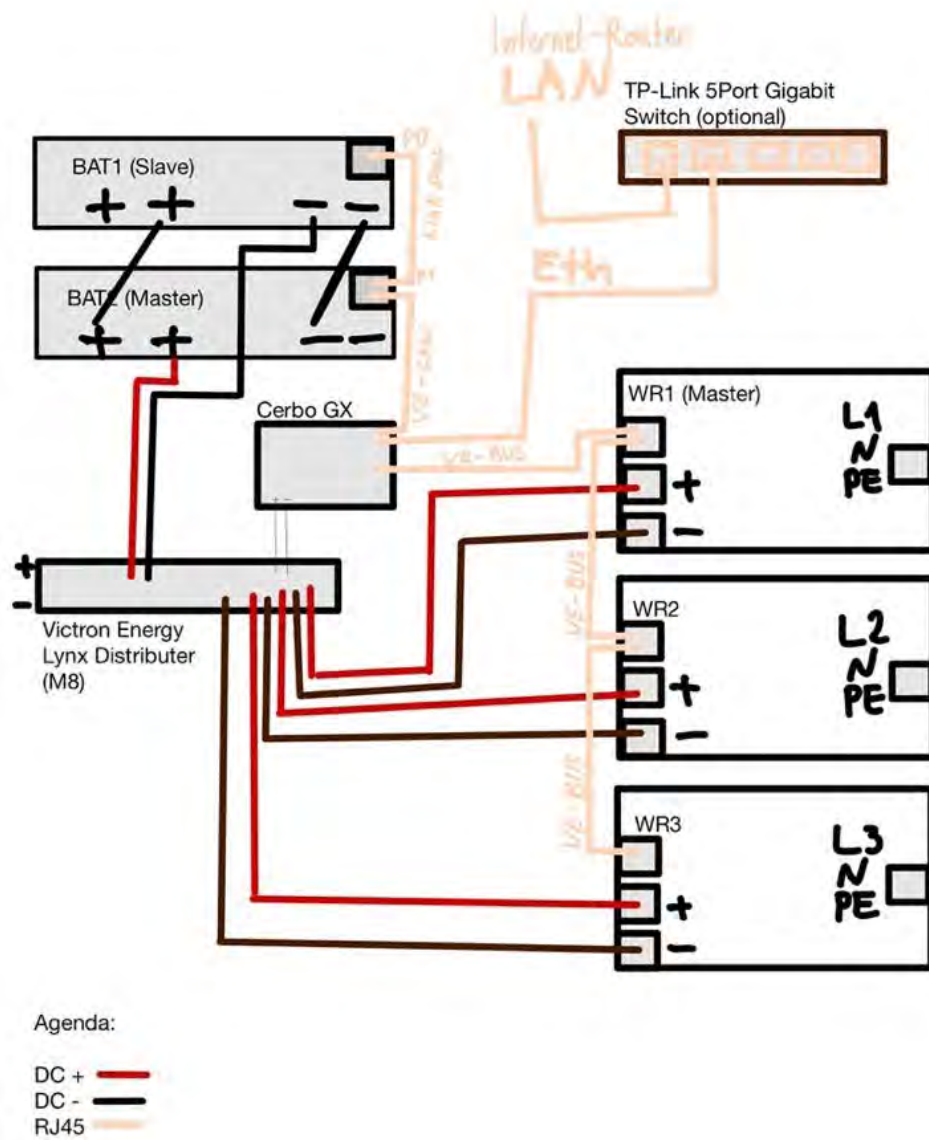


Abb. 3-16: Verkabelungsschema eines Racks zur DC- und Kommunikationsverkabelung (VE.Bus, VE.Can, LAN)

Darüber hinaus wurden alle relevanten DC-Verbindungen nochmals in tabellarischer Form aufbereitet, um eine strukturierte Nachverfolgbarkeit zu gewährleisten.

Tabelle 3-4: DC-Verkabelung pro Rack

Von	Nach	Kabeltyp
Batterie 1	Batterie 2	Pylontech Kabel Schwarz
Batterie 1	Batterie 2	Pylontech Kabel Rot
Batterie 1	Lynx Distributor	Pylontech Kabel Schwarz
Batterie 2	Lynx Distributor	Pylontech Kabel Rot
Lynx Distributor	Wechselrichter 1	25 mm ² DC-Kabel (rot/schwarz)
Lynx Distributor	Wechselrichter 2	25 mm ² DC-Kabel (rot/schwarz)
Lynx Distributor	Wechselrichter 3	25 mm ² DC-Kabel (rot/schwarz)

Mit diesem strukturierten Verkabelungskonzept ist die elektrische Systemintegration vorbereitet und eine spätere Inbetriebnahme der Anlage im Laborbetrieb kann auf Basis dieses Konzepts sicher erfolgen.

4 Ergebnisse

Nach Abschluss der Planungs-, Konstruktions- und Montageschritte konnten insgesamt drei identische, voll funktionsfähige 19-Zoll-Racks erfolgreich aufgebaut werden. Jedes System wurde präzise gemäß den zuvor erarbeiteten CAD-Daten montiert und erfüllt sämtliche Anforderungen in Bezug auf Modularität, mechanische Stabilität, Mobilität und die Integration von Energie- und Messtechnikkomponenten.

Abbildung 4-1 zeigt die drei fertiggestellten Racks im einsatzbereiten Zustand, inklusive der integrierten Wechselrichter vom Typ Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 [21] und Batteriespeicher vom Typ Pylontech US2000C [20].



Abb. 4-1: Drei vollständig montierte 19-Zoll-Racks im fertiggestellten Zustand. Jedes Rack enthält zwei Batteriespeicher (Pylontech US2000C), drei Wechselrichter (Victron MultiPlus-II) .

Die in SolidWorks modellierten 38 Aluminiumprofile pro Rack wurden anhand der erstellten Zuschnittlisten in der Hochschulwerkstatt gefertigt und ließen sich passgenau verschrauben. Die Eigenkonstruktionen – bestehend aus vier Batteriehalterungen, einem Trägerrahmen für

drei Wechselrichter und einer Holzplatte pro Rack – konnten ohne Nachbearbeitung montiert werden. Auch die elektrische Hauptkomponentenintegration verlief planmäßig: Die beiden Batteriespeicher (Pylontech US2000C) sowie die drei Wechselrichter (Victron MultiPlus-II) wurden exakt an den vorgesehenen Positionen befestigt. Die Transportrollen an der Unterseite gewährleisteten die nötige Mobilität für den Laboreinsatz.

Die praktische Umsetzung bestätigte die hohe Konstruktionsgenauigkeit der vorangegangenen Planungsphase: Alle Baugruppen ließen sich ohne relevante geometrische Anpassungen zusammenfügen. Geringfügige Fertigungstoleranzen im Zuschnitt konnten durch die Flexibilität des Nut-10-Verbindungssystems ausgeglichen werden. Insbesondere die Wechselrichterhalterungen und Batterieaufnahmen bewährten sich durch ihre mechanische Robustheit und einfache Handhabung während der Montage.

Die Einbaumessgeräte waren zum Zeitpunkt der Dokumentation noch nicht verbaut, da deren Gehäuse durch die Werkstatt noch gefertigt werden muss. Zur Überprüfung der Passgenauigkeit wurde ein Testgerät mit vergleichbaren Abmessungen eingesetzt, das sich spielfrei in die vorgesehene Führung einsetzen ließ. Damit konnte die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des Messgeräteaufbaus bestätigt werden.

Im Bereich der Batterieverkabelung zeigte sich eine konstruktive Herausforderung: Ursprünglich war ein vertikaler Abstand von 46 mm zwischen der oberen Batteriekante und dem darüberliegenden Querprofil vorgesehen. In Kombination mit der Profilhöhe von 45 mm ergab sich jedoch eine effektive Distanz von 91 mm, was für die mitgelieferten Verbindungskabel unzureichend war. Dieses Problem wurde pragmatisch gelöst, indem der Abstand auf 20 mm anstatt 46 mm reduziert und die Batterieposition entsprechend angepasst wurde – eine Maßnahme, die dank des modularen Aufbaus ohne zusätzliche Bauteile umsetzbar war.

Auch organisatorisch waren Herausforderungen zu bewältigen. So konnten die Aluminiumprofile und Verbindungselemente aus logistischen Gründen nicht vollständig in einem Bestellvorgang beschafft werden. Dies führte zu einer schrittweisen Anpassung der Montageplanung. Besonders beim Aufbau des ersten Racks zeigten sich Passprobleme aufgrund kleiner Toleranzen im Zuschnitt, die durch vorsichtiges Nachjustieren mit einem Gummihammer gelöst wurden. Diese Erfahrungen flossen in eine optimierte Montagereihenfolge für die beiden folgenden Racks ein, wodurch der Zeitaufwand pro Rack signifikant reduziert werden konnte.

Insgesamt kann die praktische Umsetzung als erfolgreich und zielführend bewertet werden. Die konstruktiven und funktionalen Zielsetzungen wurden vollständig erreicht. Das System steht als funktionsfähiger Prototyp für zukünftige Laboranwendungen zur Verfügung und

bildet eine belastbare Grundlage für den weiteren Aufbau von netzgekoppelten Batteriespeichersystemen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein modular aufgebautes Batteriespeichersystem mit Netzanschluss für Laboranwendungen geplant, konstruiert und umgesetzt. Ziel war die Entwicklung eines mechanisch stabilen, flexibel erweiterbaren 19-Zoll-Racks, das die sichere Integration von Batteriespeichern, Wechselrichtern und Messtechnikkomponenten ermöglicht. Der Schwerpunkt lag insbesondere auf der mechanischen Auslegung, der modularen Profilstruktur sowie der praxisgerechten Montierbarkeit im Hochschulkontext.

Die Konstruktionsphase erfolgte unter Einsatz von SolidWorks sowie des item Engineering-tools. Die gesamte Rackstruktur wurde vollständig dreidimensional modelliert. Dabei kamen vorhandene STEP-Dateien der Hauptkomponenten zum Einsatz, um ein präzises Einbaulayout zu entwickeln. Auf Basis der CAD-Daten wurden die Aluminiumprofile in der Hochschulwerkstatt gemäß Zuschnittliste gefertigt und die Racks anschließend eigenständig montiert. Die erfolgreiche Umsetzung zeigte, dass sich die digitale Planung nahtlos in die praktische Umsetzung übertragen ließ. Ergänzend wurde ein strukturiertes Verkabelungskonzept entwickelt, das die spätere elektrische Systemintegration vorbereitet.

Neben den fachlichen Aspekten ermöglichte die Projektarbeit auch eine bedeutende persönliche Weiterentwicklung. Die bereits vorhandenen Kenntnisse im Umgang mit CAD-Software insbesondere SolidWorks – konnten gezielt erweitert und vertieft werden. Zudem wurde erstmals die Anwendung webbasierter Planungstools wie dem item Engineeringtool praxisnah erlernt und erfolgreich in den Konstruktionsprozess integriert. Besonders lehrreich war die Möglichkeit, die entworfenen Strukturen nicht nur digital zu modellieren, sondern auch real zu fertigen, zu montieren und im Anwendungskontext zu evaluieren. Der enge Austausch mit der Hochschulwerkstatt und die eigenverantwortliche Umsetzung förderten dabei sowohl technische als auch organisatorische Kompetenzen.

Für zukünftige Arbeiten bietet die vorliegende Bachelorarbeit eine belastbare Grundlage: Die aufgebauten Racks lassen sich um eine vollständige elektrische Integration ergänzen und durch geeignete Softwarelösungen um Funktionen wie Monitoring und Steuerung erweitern. Auch mechanisch bietet das Konzept aufgrund seiner modularen Struktur ein hohes Potenzial zur Anpassung etwa durch alternative Baugrößen oder zusätzliche Funktionsebenen für weiterführende Anwendungen im Bereich der Energietechnik.

6 Literaturverzeichnis

- [1] E. Waffenschmidt, „100 % Erneuerbare Energien – Technische und wirtschaftliche Machbarkeit,“ 27.02.2025. [Online]. Available: <http://www.100pro-erneuerbare.com>. [Zugriff am 15. Mai 2025].
- [2] P. D. B. Burger, „Nettostromerzeugung 2024: Rekordanteil erneuerbarer Energien von ca. 62,7 %,“ 02. Jan 2025. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2025/oeffentliche-stromerzeugung-2024-deutscher-strommix-so-sauber-wie-nie..> [Zugriff am 03. Juli 2025].
- [3] D. H. Wirth, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland,“ 16. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland..> [Zugriff am 07. Juli 2025].
- [4] P. D. A. Löschel, „Statusupdate zum Stand der Energiewende,“ 03. März 2025. [Online]. Available: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/statusupdate-zum-stand-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=8. [Zugriff am 04. Juli 2025].
- [5] „Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2024,“ 07. Jan 2025. [Online]. Available: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/die-energiewende-in-deutschland-stand-der-dinge-2024/>. [Zugriff am 26. Mai 2025].
- [6] M. A. Chaaban, „<https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/895>,“ [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/895>. [Zugriff am 22. Juli 2025].
- [7] „BU-205: Types of Lithium-ion,“ 08. Dez 2023. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion#google_vignette. [Zugriff am 21. Mai 2025].
- [8] „Lithium-Batterien und Lithium-Ionen-Akkus,“ 24. Okt 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/elektrogeraete/lithium-batterien-lithium-ionen-akkus#so-gehen-sie-richtig-mit-lithium-batterien-und-akkus-um>. [Zugriff am 11. Aug 2025].
- [9] S. S. T. AG, „Solar-Wechselrichter - Grundwissen für die Planung von PV-Anlagen,“ [Online]. Available: <https://www.sma.de/partner/expertenwissen/solar-wechselrichter-grundwissen-fuer-die-planung-von-pv-anlagen>. [Zugriff am 06. Aug 2025].

- [1 C. Electronic, „PQ Plus UMD 98RCM – Digitales Einbaumessgerät,“ [Online]. Available:
0] <https://www.conrad.de/de/p/pq-plus-umd-98rcm-digitales-einbaumessgeraet-2143162>.
[Zugriff am 20 Mai 2025].
- [1 B. R. AG, „Aluminiumprofil-Baukasten,“ [Online]. Available:
1] <https://www.boschrexroth.com/de/de/produkte/industrielle-loesungen/montagetechnik/aluminiumprofil-baukasten/>. [Zugriff am 03 Aug 2025].
- [1 T. i. M. B. K. System. [Online]. Available: <https://de.item24.com/en/theme-world/building-kit-system/>. [Zugriff am 09 Aug 2025].
- [1 B. R. AG, „Technische Daten Aluminium-Profiltechnik,“ [Online]. Available:
3] https://airlinemedia.airlinehyd.com/Literature/Manufacturer_Catalogs/Bosch%20Rexroth/AluminumFraming_Sec19_Tech_Data.pdf. [Zugriff am 13 Juni 2025].
- [1 D. I. f. N. e. DIN EN 60297- 3- 100 V., „Mechanical structures for electronic equipment –
4] Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series – Part 3-100: Basic dimensions of front panels, subracks, chassis, racks and cabinets,“ Beuth Verlag, Berlin, September 2009.
- [1 I. E. C. (IEC 60297-3-101:2004), „Mechanical structures for electronic equipment –
5] Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series – Part 3-101: Subracks and associated plug-in units,“ International Electrotechnical Commission, Genf, 2004.
- [1 n. E. C. (IEC 61557-12:2018), „Elektrische Sicherheit in
6] Niederspannungsverteilungssystemen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen – Teil 12: Energiemess- und Überwachungsgeräte (PMD),“ International Electrotechnical Commission, Genf, 2018.
- [1 H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek und C. Spura, Roloff/Matek – Maschinenelemente:
7] Normung · Berechnung · Gestaltung (ISBN 978-3-658-26279-2, 978-3-658-26280-8), Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [1 V. D. I. e. V. (VDI 2230 Blatt 1:2015-11), „Systematische Berechnung
8] hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubenverbindungen,“ Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, 2015.
- [1 V. D. I. (VDI), „Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der
9] Produktentwicklung,“ Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, November 2019 .

- [2 B.-T. Solarenergie, „Pylontech US2000C 2,4 kWh 48 V LiFePO4 Lithium-Batterie,“
0] [Online]. Available: <https://www.bau-tech.shop/batterie/lithium/lithium-48v/pylontech-us2000c-2-4kwh-0-mwst-48v-lifepo4-lithium-batterie1>. [Zugriff am 20 Mai 2025].
- [2 Verkauf-Bochum, „Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32,“ [Online]. Available:
1] <https://verkauf-bochum.de/products/multiplus-ii-48-3000-35-32?variant=44568667029771>. [Zugriff am 20 Mai 2025].
- [2 M. GmbH, „Heberolle FM-60,“ [Online]. Available:
2] <https://www.motedis.com/de/Heberolle-FM-60>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [2 M. GmbH, „Winkel 45 B-Typ Nut 10,“ [Online]. Available:
3] <https://www.motedis.com/de/Winkel-45-B-Typ-Nut-10>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [2 M. GmbH, „Hammerschraube B-Type Nut 10 M8×25, verstemmt,“ [Online]. Available:
4] <https://www.motedis.com/de/Hammerschraube-B-Type-Nut-10-M8x25-verstemmt>. [Zugriff am 06 Juni 2025].
- [2 M. GmbH, „Bundmutter M8,“ [Online]. Available:
5] <https://www.motedis.com/de/Bundmutter-M8>. [Zugriff am 06 Juni 2025].
- [2 M. GmbH, „Aluprofil 45×45 L, B-Typ, Nut 10,“ [Online]. Available:
6] <https://www.motedis.com/de/Aluprofil-45x45L-B-Typ-Nut-10>. [Zugriff am 23 Mai 2025].
- [2 D. –. D. I. f. N. e. V., „DIN EN 1999-1-1:2014-03 – Eurocode 9: Bemessung und
7] Konstruktion von Aluminiumtragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln,“ Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- [2 V. E. B.V., „Lynx Distributor – Installation Manual,“ [Online]. Available:
8] https://www.victronenergy.com/upload/documents/Lynx_Distributor/24531-Lynx_Distributor_Manual-pdf-en.pdf. [Zugriff am 17 Juli 2025].
- [2 L. Pylon Technologies Co., „US2000C – Benutzerhandbuch,“ [Online]. Available:
9] <https://www. effekta.com/download/us2000c-anleitung/?wpdmdl=>. [Zugriff am 01 Juni 2025].
- [3 V. E. B.V., „Cerbo GX / Venus GX / GX Touch Manual,“ [Online]. Available:
0] https://www.victronenergy.com/upload/documents/Cerbo_GX/140558-CCGX__Venus_GX__Cerbo_GX__Cerbo-S_GX_Manual__non-CCGX_3_50_-pdf-en.pdf. [Zugriff am 17 Juli 2025].

TH Köln
Gustav-Heinemann-Ufer 54
50968 Köln
www.th-koeln.de