



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.

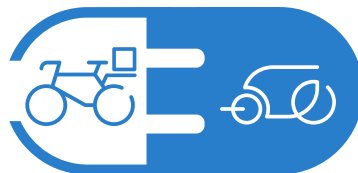
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

MiNuLa

Abschlussbericht



SteigtUM!

Institut für Elektrotechnik (IET)
Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung (IMKF)
Institut für Informatik (IFI)

Abschlussbericht

MiNuLa

Mikromobile, **N**utzerschnittstelle und induktives **L**adesystem

im Gesamtprojektvorhaben

SteigtUM

System elektrischer Kleinfahrzeuge zum privaten und **g**ewerblichen **T**ransport als ganzheitlicher Lösungsansatz **u**rbaner **M**obilitätsprobleme

Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

BMBF-Fördermaßnahme der Mensch-Technik-Interaktion im Förderschwerpunkt
„Individuelle und adaptive Technologien für eine vernetzte Mobilität“

Förderkennzeichen: 16SV8267

Projektleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jana Kertzscher

Autoren: Danilo Schicha, Yannik Höll, Johannes Paul Vogt, Jana Kertzscher,
Jim Gerschler, Jenny Köckritz, Ringo Nepp, Matthias Kröger,
Elias Wagner, Lennon Kulke, Bastian Pfleging

Freiberg, Dezember 2024

Inhalt

1	Kurzdarstellung.....	3
1.1	Ziele und Aufgaben.....	3
1.2	Voraussetzungen des Vorhabens	3
1.2.1	Zweiphasige Fördermaßnahme	4
1.2.2	Forschungsplattform Reallabor	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2	Eingehende Darstellung	7
2.1	Arbeitspaket A1 — Universalelektronik.....	7
2.1.1	Spezifikation	7
2.1.2	Technische Realisierung	9
2.1.3	Literatur.....	13
2.2	Arbeitspaket A2 — Kleinfahrzeuge.....	14
2.2.1	Marktrecherche und Konzeptübersicht	14
2.2.2	Design, Konstruktion, FEM-, Bewegungs- und Frequenz-Analyse, Festigkeitsbetrachtung, Komponentenauswahl, dynamische Untersuchung und Erprobung.....	16
2.2.3	Betriebsfestigkeitsauslegung für die Schweißkonstruktion des Rahmens des CityPed® ...	18
2.2.4	Mehrspurige Vorderachskonstruktion – Entwicklung und Forschung.....	20
2.2.5	Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung des Fahrverhaltens von Lastenräder	22
2.2.6	CityScooter.....	24
2.2.7	Testevent und praktische Erprobung der Lastposition	25
2.2.8	CityPed® Zulassung	27
2.2.9	CityPed® im Reallabor	29
2.3	Arbeitspaket B1 — Park- und Ladeinfrastruktur	30
2.3.1	Automatisierung des Lade- und Ausleihvorgangs	30
2.3.2	Induktives Ladesystem.....	32
2.3.3	Literatur.....	38
2.4	Arbeitspaket B2 — Smartphone-Interface.....	39
2.4.1	Spezifikation und Anforderungen an die zentrale Smartphone-App.....	39
2.4.2	Entwicklung der Apps zur Bedienung der Mikromobile und des Park- & Ladesystems....	40
2.4.3	Entwicklung der Nutzungsschnittstellen für die intermodale Nutzung und Buchung	48
2.4.4	Entwicklung des Human-Machine-Interfaces für die Community-Logistik.....	49
2.4.5	Fortlaufende UX- und Usability-Untersuchungen, Weiterentwicklung der App.....	49

2.4.6 Schnittstellenspezifikation zum Logistik- & Kommunikations-Backend	50
2.4.7 Literatur	50
2.5 Arbeitspaket C — Reallabor	51
2.5.1 Standortauswahl	51
2.5.2 Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsstationen.....	51
2.5.3 Nutzungsvereinbarung.....	52
2.5.4 Auswertung des Reallabors	52
2.5.5 Literatur	58
2.6 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	59
2.7 Bekanntgewordene technische Fortschritte Anderer während des Vorhabens	60
2.7.1 Kleinfahrzeuge	60
2.7.2 Park- und Ladeinfrastruktur	60
2.7.3 Smartphone-Interface	60
2.7.4 Literatur	61
2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	62
2.8.1 Institut für Elektrotechnik (IET).....	62
2.8.2 Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung (IMKF).....	63
2.8.3 Institut für Informatik (IFI)	65

1 Kurzdarstellung

Autorin: Jana Kertzsch

1.1 Ziele und Aufgaben

Das Gesamtprojektvorhaben (GPV) SteigtUM hat erforscht, wie ein stationsbasiertes Sharingsystem für den innerstädtischen Lastentransport aussehen muss, damit es von der Bevölkerung als Alternative zum Kfz angenommen und benutzt wird. Hierfür sollte eine mikromobile Fahrzeugfamilie bestehend aus CityPed®, CityScooter und CityTrunk entwickelt werden, die den Transport von leichten Lasten im urbanen Bereich automobilfrei möglich macht. Die Mikromobile sollten eine Alternative zu den marktüblichen schweren Lastenpedelecs darstellen, die überwiegend große Transportkapazitäten für den Lieferdienstsektor bereitstellen.

Das umweltfreundliche Konzept des Teilens der Mikromobile mit anderen Nutzern sollte durch eine niederschwellige Integrierbarkeit solcher Verkehrsträger in etablierte persönliche Verhaltensweisen und Geschäftsprozesse erreicht werden, insbesondere beim erforderlichen Ausleih- und Ladevorgang.

Neben der Nutzerakzeptanz ist die Akzeptanz von Städten und Gemeinden entscheidend für den Erfolg und die weite Verbreitung der Mikromobilität. Dies sollte durch ein gut gestaltetes, modulares und platz-effizientes Park- und Ladesystem genannt CityBoxen, realisiert werden.

Die Fahrzeugfamilie soll als Bindeglied zwischen öffentlichen Verkehrsmitteln intermodal funktionieren, um so Routen und Verbindungen zur Verfügung zu stellen, die bisher aufgrund der Taktung oder der räumlichen Trennung von Verkehrsmitteln nicht möglich waren.

Im Reallabor des Forschungsvorhabens sollte in der Interaktion mit den Nutzern untersucht werden, ob und wie gut das Sharingsystem genutzt wird und wie es gestaltet sein muss, damit es durch den Nutzerkreis besser angenommen wird.

Das Teilprojektvorhaben (TPV) MiNuLa der TUBAF hatte das Ziel, das oben beschriebene Gesamtsystem bestehend aus

- einem Sharingpool aus alltagstauglichen, flexiblen und einfach nutzbaren elektrischen Kleinfahrzeugen,
- einer dazu passenden Verleih- und Ladeinfrastruktur mit autonomer Aus- und Rückgabefunktion,
- der erforderlichen vernetzten Daten- und Dienstleistungsschnittstelle sowie
- der erforderlichen Nutzerschnittstelle in Form einer Handy-App

zu entwickeln, aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Dabei sollte die Entwicklung des Gesamtsystems in einem Reallabor in der Stadt Freiberg (Sa.) hinsichtlich Funktionalität, Flexibilität, Akzeptanz und Nutzerfreundlichkeit erprobt werden.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Die vom BMBF geschaffenen Voraussetzungen für das GPV SteigtUM und damit das TPV MiNuLa waren ausgezeichnet und gingen weit über die üblichen Voraussetzungen für ein Forschungsprojekt hinaus. Dafür gab es insbesondere zwei Gründe: die zweiphasige Fördermaßnahme sowie die Erweiterung des GPVs durch die neuartige Forschungsplattform Reallabor.

1.2.1 Zweiphasige Fördermaßnahme

Die zweiphasige Fördermaßnahme ermöglichte es, das GPV gründlich und sorgfältig vorzubereiten. So wurde in der vorgelagerten einjährigen Phase die komplexe Zielstellung für das GPV strukturiert, zur Bildung des Konsortiums Workshops mit möglichen Konsortialpartnern durchgeführt sowie das Forschungsvorhaben detailliert geplant. Die erste Phase wurde als Projekt ELEKTRON unter dem FKZ 16SV7939 an der Professur Elektrotechnik der TU Bergakademie Freiberg (TUBAF) vom BMBF gefördert.

1.2.2 Forschungsplattform Reallabor

Die Forschungsplattform Reallabor beförderte und beschleunigte die Lernkurve des TPV MiNuLa als ein Beispiel angewandter Forschung in den Ingenieurwissenschaften in unvergleichbarer Weise. Im Ergebnis entstanden nicht nur einzelne Prototypen oder Paperware, sondern ein sehr komplexes, technisches System, das darüber hinaus der potentiellen Nutzergruppe zum realen Nutzen zur Verfügung gestellt wurde und weiterhin werden soll.

Im Gegensatz dazu stellte das Reallabor SteigtUM aber auch eine große Herausforderung für die Projektabwicklung dar, da es in den öffentlichen städtischen Raum integriert wurde und eine intermodale Nutzung des Konsortialpartners VMS ermöglichte. Dafür waren zahlreiche Verhandlungen mit den unterschiedlichsten Stakeholdern z. B. zu Verkehrsflächen oder Erschließung mit den erforderlichen Medien erforderlich. Hinzu kam ein vorher unzureichend eingeschätzter, großer verwaltungstechnischer Aufwand z. B. zur Erarbeitung von Produktfreigabeproofungen oder Nutzungsbedingungen für die sichere Nutzbarkeit des Reallabors sowie die Bearbeitung der fünf Strafanzeigen.

Dennoch war und ist das Konzept des Reallabors eine zukunftsweisende Voraussetzung für die dynamische Entwicklung neuer technischer Systeme unter früher Einbeziehung der Nutzergruppen!

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Auf der Basis der Ziele wurde die Projektstruktur des GPV SteigtUM entwickelt, s. Abbildung 1.1. Man erkennt, dass die Arbeitspakete in die drei Arbeitsbereiche Mobile, Infrastruktur und Reallabor eingebettet sind, die wiederum von den Querschnittsfeldern „Mensch-Technik-Interaktion“ und „Ethische, rechtliche und soziale Implikationen (ELSI)“ überspannt werden.

Im TPV MiNuLa der TUBAF waren die Arbeitspakete

- **A1** Universalelektronik
- **A2** Kleinfahrzeuge (CityPed®, CityScooter, CityTrunk)
- **B1** Park- und Ladeinfrastruktur
- **B2** Smartphone-Interface

sowie die Planung und Durchführung des Reallabors (**C**) angesiedelt und wurden dort bearbeitet.

Dabei wurden die Arbeitspakete **A1**, **B1** und **C** von der Professur Elektrotechnik, das Arbeitspaket **A2** von der Professur Maschinenelemente und das Arbeitspaket **B2** von der Professur Ubiquitous Computing and Smart Systems der TUBAF bearbeitet.

Für einen reibungslosen Ablauf wurde ein detaillierter Projektablaufplan als Gantt-Diagramm über die gesamte Projektlaufzeit vom **01.12.2019 - 31.05.2023** erstellt und regelmäßig getrackt. Hierfür fanden an der TUBAF wöchentliche Meetings auf Arbeitsebene des TPV MiNuLa und ein monatlicher Steuerkreis mit allen Projektverantwortlichen des GPV SteigtUM statt.

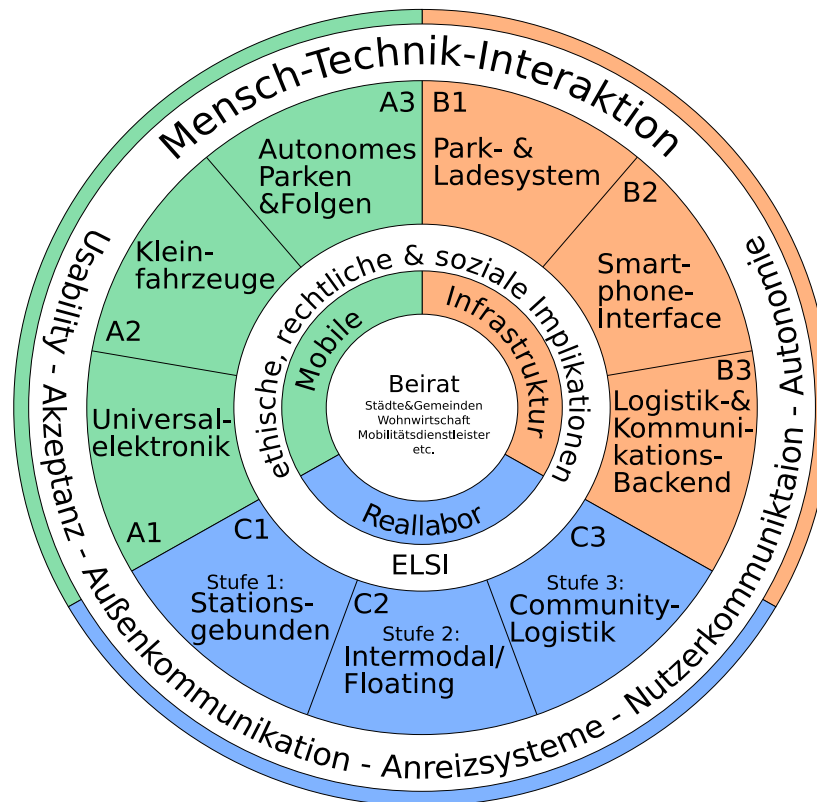


Abbildung 1.1: Struktur Forschungsverbundvorhaben SteigtUM

Das Forschungsvorhaben wurde gemäß dem Projektablaufplan realisiert, lediglich die folgenden drei Änderungen führten zu Abweichungen:

- Der geplante Floating-Betrieb im Rahmen des Reallabors C2 wurde durch die Stadt Freiberg (Sa.) nicht unterstützt und konnte deshalb nicht durchgeführt werden. Nach Voruntersuchungen der TU Chemnitz wurden die Community-Logistik-Ansätze vorzeitig verworfen. Die Reallaborphasen C2 und C3 waren nicht notwendig und entfielen.
- Das Aufgabenpaket A3 „Autonomes Parken & Folgen“ wurde nicht wie geplant durch das Fraunhofer IVI bearbeitet. Das Teilpaket „Autonomes Parken“ aus dem Aufgabenpaket A3 wurde deshalb 2020 in die Verantwortlichkeit des IET der TUBAF verschoben, der einzigen, fachlich in Frage kommende Struktureinheit im Rahmen des Konsortiums. Der eklatante Mangel an ingenieurwissenschaftlichen Forschungsnachwuchs auf dem Gebiet der elektrischen Antriebs- und Energiewandlungstechnik führte aber dazu, dass die zusätzliche Teilaufgabe Autonomes Einparken nur begonnen und nicht wie ursprünglich geplant fertiggestellt werden¹.
- Das Fraunhofer IVI hat im Ausgleich zur o. g. Aufgabenabgabe das ursprünglich am IMKF der TUBAF geplante Teilpaket CityTrunk aus dem Arbeitspaket Kleinfahrzeuge A2 übernommen.

¹ Über die gesamte Projektlaufzeit konnten nur 61% der bewilligten Projektstellen zur Realisierung der Arbeitspakete A1 und B1 besetzt werden, davon 30% der bewilligten Projektstellen mit für die Aufgaben qualifizierten Fachkräften.

Coronabedingt gab es bei der Projektbearbeitung Zeitverzögerungen durch

- den Lockdown zu Beginn des geplanten Reallabors,
- die Lieferschwierigkeiten vieler elektronischer Komponenten,
- die Lieferschwierigkeiten vieler Fahrradkomponenten sowie
- die Insolvenz der Metallbaufirma, die mit der Fertigung der CityBoxen beauftragt war.

Die Zeitverzögerungen konnten im Wesentlichen durch die Bewilligung einer kostenneutralen Verlängerung des Gesamtprojektvorhaben um ein Jahr auf die schlussendliche Projektlaufzeit **01.12.2019 - 31.05.2024** kompensiert werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand

Die im TPV verwendeten Konstruktionen, Schutzrechte und Verfahren sowie die verwendeten Quellen, z. B. Literatur, sind am Ende des jeweiligen Abschnittes zum Arbeitspaket in Kapitel 2 zu finden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben den **Konsortialpartnern** der TUBAF

- TU Chemnitz, Professuren für Allgemeine Psychologie I und für Arbeitspsychologie
- TU Braunschweig, Institut für Rechtswesen / Forschungsstelle Mobilitätsrecht
- Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden,
- apromace data systems GmbH, Freiberg,
- PROJEKTIONISTEN® GmbH, Hannover

spielte der **Projektbeirat** eine wichtige Rolle bei Erreichung der gesetzten Ziele. Er setzte sich aus Vertretern der Stadt Freiberg, der städtischen Wohnungsgesellschaft Freiberg (SWG), den Stadtwerken Freiberg und dem Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS) zusammen. Ziel des Beirats war es,

- Anforderungen an das Sharingsystem aus Sicht des Beirats zu formulieren,
- die Integration des Reallabors in den städtischen Bereich zu gewährleisten,
- die intermodale Nutzung der Mikromobile zu ermöglichen,
- Projektziele mit Zielen der verschiedenen Wohnquartiere in Freiberg zu verknüpfen.

Darüber hinaus trug der Projektbeirat dazu bei, den SteigtUM-Gedanken allgemein zu fördern sowie Feedback zur Verbesserung des Projektes zu liefern. Während der Projektlaufzeit wurden vier halbtägige Treffen des Projektbeirates an der TUBAF organisiert.

Weiterhin wurde die **Constin GmbH** mit der Gestaltung und dem Prototypenbau der Transportbox zur integrierten Aufnahme elektronischen Systeme des CityPed® beauftragt sowie die **Dr. Arnd Friedrich Unternehmensberatung** mit der Untersuchung zur möglichen Nachnutzung des Sharingsystems SteigtUM.

2 Eingehende Darstellung

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete des TPV, der während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt anderer sowie die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen dargestellt. **Alle Anhänge befinden sich in einem separaten Dokument.**

2.1 Arbeitspaket A1 — Universalelektronik

Autoren: Yannik Höll, Jana Kertzsch

Die Universalelektronik (UE) bezeichnet ein System aus Hardware und Software, welche die bidirektionale Kommunikation der unterschiedlichen Mikromobile zur CityBox und zur Handy-App realisiert.

2.1.1 Spezifikation

Grundsätzlich ist die UE universal in der mikromobilen Fahrzeugfamilie verwendbar. Die folgende Spezifikation beschreibt die notwendigen Systembestandteile für das CityPed®. Sie besteht aus zwei Komponenten, die erste Komponente ist direkt am Fahrzeug verbaut und wird im Folgenden als UE-Ped bezeichnet. Die zweite Komponente ist in den CityBoxen verbaut und wird deshalb als UE-Box bezeichnet.

2.1.1.1 Spezifikation UE-Ped

Der Controller des UE-Ped ist das zentrale Steuerelement für die Erfassung, Verarbeitung und Weiterleitung von analogen und digitalen Signalen innerhalb der Mikromobile zuständig ist. Dabei sind folgende Aufgaben zu lösen:

1. Empfangen der verschiedenen Signale, die für die Überwachung des CityPed® verantwortlich sind. Dazu gehören:
 - Signale des Batterie-Management-Systems (BMS): State-of-Charge (SoC), State-of-Health (SoH) und Akkutemperatur,
 - Signale der induktiven Ladeinfrastruktur: Temperatur an der Sekundärspule der Ladeelektronik des CityPed®,
 - Signale des CityPed®-Schlosses: Verriegelungszustand.
2. Verarbeiten und Speichern der erfassten Daten. Hierbei werden die Informationen analysiert und an andere Systeme weitergeleitet:
 - Messdaten (SoC, Akkuspannung, Lade- und Entladestrom, Batterie-Zustand) an UE-Box,
 - Verriegelungszustand des Schlosses an Handy-App.
3. Steuerung verschiedener Aktoren des CityPed®: Basierend auf den analysierten Sensordaten und Befehlen der Handy-App oder der UE-Box steuert die UE-Ped folgende Bauelemente:
 - induktive Ladeinfrastruktur,
 - Aktor des CityPed®-Schlosses.
4. Kommunikation mit den externen Subsystemen UE-Box und Smartphone-App über die beiden standardisierten Schnittstellen:
 - WLAN: Schnittstelle zur zentralen UE-Box,
 - Bluetooth: Schnittstelle zur Smartphone-App.
5. Kommunikation innerhalb der verschiedenen Komponenten (ECU-Antrieb, BMS, CityPed®-Schloss, Temperatursensor) am CityPed®,
6. Kommunikation mit den Fußgängern (Außenkommunikation)

Die detaillierte Darstellung der einzelnen Signalflüsse über die Schnittstellen des UE-Ped ist im Anhang A.A1.1 dargestellt.

Für die Kommunikation innerhalb der verschiedenen Komponenten am CityPed® wurde das CAN-Bus-Protokoll ausgewählt, weil es folgende Anforderungen erfüllt:

- Der Verkabelungsaufwand ist gering, weil Sensoren und Aktoren nicht einzeln mit dem Steuergerät verbunden werden müssen, sondern in Linientopologie ein gemeinsames Kabel nutzen.
- Die Datenintegrität wird erhöht, da Übertragungsfehler erkannt und korrigiert werden können.
- Einfache Erweiterung des Systems, da neue Geräte mit wenig Aufwand in das bestehende Netzwerk integriert werden können.

Anforderungen an die Außenkommunikation

Für das autonome Parken soll die UE-Ped sicherstellen, dass verschiedene Zustände und Fahrmodi des Fahrzeugs durch entsprechende optische und akustische Signale angezeigt werden. Mögliche Use-Cases für die Außenkommunikation des CityPed®, die berücksichtigt werden müssen, sind:

1. Nutzeraktionen:

- Fahrzeug ausleihen und zurückgeben: Durch die UE-Ped ausgelöst muss die Bereitschaft zur Nutzung, der jeweilige Status des Leihprozesses, sowie das erfolgreiche Beenden des Rückgabeprozesses signalisiert werden.
- Nachrichten und Bestätigungen: Die UE-Ped informiert die Handy-App über verriegelte oder entriegelte Zustände des CityPed®-Schlosses und bestätigt den Start oder das Ende des autonomen Fahrmodus.

2. Fahrzeugzustände:

- Autonomer Modus und Rückwärtsfahrt: Durch die UE-Ped ausgelöst soll der aktuelle Fahrmodus des CityPed® angezeigt werden, insbesondere beim Wechsel zwischen manuellem und autonomem Fahren.
- Hindernis- und Kollisionswarnung: Durch die UE-Ped ausgelöst sollen dem Nutzer und Fußgängern Hindernisse im Fahrweg und Kollisionen signalisiert werden.

Im Rahmen des Projektes untersuchten Kreißig et al. 2023 in [1] verschiedene Konzepte für die Außenkommunikation: Blinken, akustische Signale, ohne spezifische Kommunikation für ein autonom parkendes E-Cargo-Bike. Im Ergebnis erwiesen sich visuelle Signale als besonders effektiv, um den Nutzern zu signalisieren, was das Fahrzeug als nächstes tun wird. Akustische Signale können in bestimmten Situationen verstärkend hilfreich sein, insbesondere wenn visuelle Signale möglicherweise nicht ausreichend wahrgenommen werden.

Die UE-Ped soll eine Kombination aus akustischen und optischen Signalen realisieren.

- Auslösen optischer Signale: LEDs und Scheinwerfer werden verwendet, um verschiedene Systemzustände anzuzeigen. Ein dauerhaft leuchtendes rotes Licht weist dabei auf eine Fehlfunktion hin, während blinkende Lichter eine Warnung oder einen Statuswechsel signalisieren,
- Auslösen akustischer Signale: Lautsprecher an den CityPed® werden eingesetzt, um bei Kollisionen oder technischen Fehlern akustische Warnungen auszugeben.

Mit Hilfe der optischen und akustischen Signale können folgende Systemzustände durch die UE-Ped signalisiert werden:

- Vorwärts- und Rückwärtsfahren: Erkennbar durch unterschiedliche Lichtsignale und durch akustische Hinweise,
- Hindernisdetektion und Kollision: Signalisiert durch blinkende Lichter und akustische Warnsignale,

- Technische Fehler: Bei Hardware- oder Softwarefehlern werden spezifische Signale ausgesendet, um auf das Problem aufmerksam zu machen,
- Ein- und Ausparkprozesse: Der Ablauf und Fehler während der Ein- und Ausparkvorgänge werden durch Lichtsignale angezeigt.

2.1.1.2 UE-Box

Die UE-Box ist die zweite Komponente der UE und fest in die Elektronik der CityBoxen integriert. Sie bildet die Schnittstelle der CityPed® zu den CityBoxen sowie zum Backend. Zu ihren Aufgaben gehört:

1. Fahrzeug-Management:
 - speichert die Soll-Position der Fahrzeuge ab,
 - stellt Service-Funktionen für die manuelle Steuerung der Fahrzeuge bereit (z. B. Änderung des BMS-Zustands, Öffnen und Schließen des Schlosses),
 - automatisierte Kontrolle der Mikromobile für den Ladevorgang (Wechsel des BMS-Zustands).
2. Datenverarbeitung und Weiterleitung:
 - empfängt die Messdaten und die Fehlermeldungen der Mikromobile und leitet diese an die Ladesteuerung der CityBox weiter,
 - empfängt die Messdaten und die Fehlermeldungen der Ladesteuerung und sendet Befehle für Service-Funktionen an diese,
 - empfängt Befehle des Backends und verarbeitet diese,
 - sendet Befehle an die Mikromobile, welche die Automatisierung des Ladevorgangs realisieren,
 - speichert Messdaten für Forschungs- und Servicezwecke in einer lokalen Datenbank ab.
3. Administration:
 - bietet eine Nutzeroberfläche, welche die gesammelten Messwerte für Service-Mitarbeiter zusammengefasst anzeigt,
 - bietet die Möglichkeit des manuellen Eingreifens in den Ladeprozess und die manuelle Steuerung aller Aktoren z. B. der automatischen Tore der CityBox,
 - Auflistung sämtlicher aktiven Fehlermeldungen in der CityBox und in den Mikromobilen.
4. Fehlermanagement:
 - erfasst automatisiert Fehler, die während des Ladevorgangs auftreten,
 - sendet automatisiert Fehlerbenachrichtigungen an Service-Kräfte,
 - stellt eine redundante Verbindungskontrolle zu Backend und CityPed® sicher.

2.1.2 Technische Realisierung

Die oben genannten wesentlichen Anforderungen an die UE wurden, wie im Folgenden beschrieben, technisch realisiert. Die UE-Ped besteht aus einer selbstentwickelten Platine und einem auf ihr integrierten Einplatinencomputer. Die UE-Box hingegen ist ein Einplatinencomputer, der gemeinsam mit der Automatisierungshardware im Schaltschrank der CityBoxen, s. Abschnitt 2.3, unterbracht ist. Für beide Komponenten der UE wurde eine Software entwickelt, die auf den jeweiligen Einplatinencomputern der Komponenten läuft.

2.1.2.1 Die UE-Ped

Die Platine der UE-Ped, s. Abbildung 2.1.1, entstand am IET der TUBAF. Das Schaltungs- und das Platinenlayout wurde iterativ entwickelt. Der letzte Entwicklungsstand ist den Anhängen A.A1.2 und A.A1.3 dargestellt. Die Platine wurde bei einem externen Dienstleister gefertigt und im Institut bestückt, in Betrieb genommen und in einem Gehäuse verbaut.

Die Platine realisiert folgende Aufgaben:

- CAN-Bus-Kommunikation:
 - Verarbeitung des CAN-Busses zwischen Akku und Motorcontroller,
 - Anbindung des CAN-Busses mittels zweier externer CAN-Controller MCP2515, s. Datenblatt [2], und eines CAN-Transceiver TI ISO1042B, s. Datenblatt [3].
- Steuerung und Schnittstellen:
 - Anbindung der UART-Schnittstelle zur Ansteuerung des „I LOCK IT+“-Fahrrad-schlosses, s. Datenblatt [4]. Dieses Schloss wurde ausgewählt, da es sich ansteuern lässt, ohne auf eine separate App angewiesen zu sein,
 - Einbindung einer I²C-Echtzeituhr (DS1307) für Zeitfunktionen,
 - Einbindung des Push-Button-Signals des CityPed®.
- Sensorik:
 - Anschluss eines externen Temperatursensors (DS1820) per OneWire.
- Beleuchtungssteuerung:
 - Ein- und Abschalten der CityPed®-Beleuchtung durch Relais.
- Ladesystem-Steuerung:
 - Relais zur Freigabe des sekundärseitigen Ladesystems (Spannungsüberwachung und Gleichrichter).



Abbildung 2.1.1: Platine der UE-Ped und Mikrocontroller

Die UE-Ped ist in einem spritzwassergeschützten Gehäuse untergebracht und auf der Sattelseite in die Transportbox des CityPed® integriert, s. Abbildung 2.1.2.



Abbildung 2.1.2: Sattelseitige Ansicht der Transportbox des CityPed®. Im rechten Bild ist in der geöffneten Transportbox links die UE-Ped und rechts der Motorcontroller (ECU) der Fa. Heinzmann zu erkennen

UE-Ped Einplatinencomputer und Betriebssystem

Für die Steuerung der Elektronikkomponenten wurde der Banana Pi M2 Zero, s. Datenblatt [5], ausgewählt. Dieser Einplatinencomputer hat den Vorteil, dass das Betriebssystem (OS) Aufgaben, wie das Herstellen und Aufrechterhalten der Bluetooth/WLAN-Verbindung oder das Scheduling von verschiedenen Prozessen, übernimmt. Das OS des Controllers ist die speziell für Einplatinencomputer angepasste Linux-Distribution Armbian.

Sensorik für das autonome Einparken

Die Arbeit von Zhang [6] untersucht die Sensorauswahl für ein autonom parkendes Lastenpedelec und wählt eine Kombination aus RTK-GNSS, LiDAR und IMU basierend auf Kriterien wie Genauigkeit, Kosten und Robustheit aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fusion dieser Sensoren eine präzise Lokalisierung und Navigation ermöglicht, wobei RTK-GNSS für hochgenaue Positionierung, LiDAR für Hinderniserkennung und Umgebungskartierung und die IMU zur Erfassung der Geschwindigkeit, Beschleunigung und Neigung des CityPed® eingesetzt werden soll.

In der Arbeit von Zheng [7] werden konkrete Sensoren basierend auf Kriterien der obengenannten Arbeit von Zhang experimentell untersucht und verglichen. Die getesteten Sensoren waren:

- RTK-GNSS: Das simpleRTK2B-StarterKit von ArduSimple, s. Datenblatt [8], basierend auf dem u-blox ZED-F9P Modul; es wurde ausgewählt, da es präzise Positionsdaten im Zentimeterbereich liefert und kompatibel mit GPS, Galileo, GLONASS und BeiDou ist. Darüber hinaus bietet es, bei klaren Wetterbedingungen, hohe Genauigkeit.
- LiDAR (YDLIDAR TG15): Dieser Sensor, s. Datenblatt [9], ermöglicht die Erkennung und Abbildung der Umgebung in hoher Auflösung. Er wurde zur Unterstützung der Navigation und Objekterkennung am Fahrzeugheck eingesetzt.
- IMU (WT901C): Diese Einheit, s. Datenblatt [10], kombiniert Drehratensensoren, Beschleunigungssensoren und Magnetometer.

Es wurde experimentell nachgewiesen, dass eine Sensorfusion aus LiDAR und GNSS für die Realisierung der geforderten Genauigkeit von $x=3\text{cm}$ des autonomen Parkens geeignet ist. Der IMU-Sensor hingegen wurde auf Grund einer zu großen Fehlerquote in den Tests ausgeschlossen.

2.1.2.2 UE-Box Betriebssystem und Mikrocontroller

Der Controller der UE-Box ist ein RaspberryPi 4 Model B mit 4 GB RAM, s. Datenblatt [11]. Dieser Einplatinencomputer bietet eine kompakte und leistungsstarke Plattform. Die Anpassbarkeit und breite

Unterstützung durch eine dedizierte Linux-Distribution ermöglichen eine effiziente und flexible Steuerung der UE-Box.

2.1.2.3 Schnittstelle UE-Ped und UE-Box

Die beiden Komponenten der Universalelektronik, die UE-Ped und die UE-Box, sind jeweils lokal mit einem WLAN verbunden, das an allen CityBoxen existiert. Dabei kommunizieren sie über ein selbstgewähltes Protokoll miteinander. Das Protokoll bietet die Möglichkeit einer bidirektionalen Kommunikation. So kann die UE-Box Befehle an die UE-Ped schicken und die UE-Ped kann Messwerte und Antworten auf Befehle an die UE-Box schicken. Eine genaue Auflistung aller Befehle ist in Anhang A.A1.4 aufgeführt.

2.1.2.4 Webinterface

Zur Administration der UE, dem Fehlermanagement sowie zur Visualisierung wichtiger Messwerte und Systemzustände wurde ein Webinterface erstellt. Es wird von der UE-Box lokal bereitgestellt. Auf der Website werden folgende Informationen visualisiert:

- Messwerte und Systemzustände des Ladesystems,
- aktuell verbundene CityPed® mit Messwerten,
- Zuordnung CityPed® Ladebox.

Zusätzlich stehen folgende Schaltflächen für die Administration des Systems bereit:

- Softwareupdate,
- Download der Log-Dateien,
- Auslesen und Quittieren der aktiven Fehler,
- Informationen über aktuelle Software aus der Versionsverwaltung (git),
- Manuelles verschieben der Räder in den Ladeboxen,
- Manuelles Öffnen und Schließen der Tore,
- Verschicken von Befehlen an Ladesystem und CityPed®, um manuell in den Ladeprozess einzugreifen.

2.1.2.5 Toolchain / Buildsystem für Softwareentwicklung

Die Softwareentwicklung für die UE erfolgte unter Verwendung einer selbstentwickelten Toolchain, die auf Docker basiert. Dieser Ansatz ermöglichte die Cross-Kompilierung von Anwendungen für ARM-Architektur der Mikrocontroller (RaspberryPi, Banana Pi) auf den Entwicklungsrechnern mit x86_64-Architektur. Die Verwendung von Docker erlaubte es, eine konsistente und reproduzierbare Entwicklungsumgebung bereitzustellen, welche unabhängig von der zugrunde liegenden Hardware des Entwicklungsrechners ist.

Als Buildsystem wurde Cargo eingesetzt, das eng mit der Programmiersprache Rust verknüpft ist. Cargo ermöglicht eine effiziente Verwaltung von Abhängigkeiten und unterstützt eine automatisierte Build-Pipeline, welche die Software in regelmäßigen Abständen kompiliert, testet und auf die Controller ausliefert.

Als Versionsverwaltungssoftware wurde git verwendet und Gitlab als Cloudspeicher für die Repositories. Die Updates der Software der CityBoxen erfolgte ebenfalls über Gitlab.

2.1.3 Literatur

- [1] Kreißig, I., Morgenstern, T., Krems, J.: (2023). Blinking, Beeping or Just Driving? Investigating Different Communication Concepts for an Autonomously Parking E-Cargo Bike from a User Perspective. In: Tared Ahram and Redha Taiar (eds) Human Interaction and Emerging Technologies (IHET-AI 2023): Artificial Intelligence and Future Applications. AHFE (2023) International Conference. AHFE Open Access, vol 70. AHFE International, USA. DOI: 10.54941/ahfe1002930
- [2] Microchip Technology Inc.: MCP2515 Stand-Alone CAN Controller with SPI Interface Data Sheet, Rev. J, 2019. [Online]. Verfügbar: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP2515-Stand-Alone-CAN-Controller-with-SPI-20001801J.pdf> [Zugegriffen: 3.12.2024].
- [3] Texas Instruments: ISO1042 Isolated CAN Transceiver With 70-V Bus Fault Protection and Flexible Data Rate, Rev. E, Jan. 2020. [Online]. Verfügbar: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso1042.pdf> [Zugegriffen: 3.12.2024].
- [4] I LOCK IT GmbH: Bedienungsanleitung I LOCK IT+, Version Januar 2024. [Online]. Verfügbar: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0655/9498/2667/files/bedienungsanleitung_ILOCKIT-Pro_1-0.pdf?v=1717051601 [Zugegriffen: 6.12.2023]
- [5] Banana Pi: Banana Pi BPI-M2 Zero, [Online]. Verfügbar: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/BANANAPI-ZERO-DATASHEET.pdf> [Zugegriffen: 6.12.2024].
- [6] E. Zhang: Sensorlösungen für ein autonom fahrendes Lastenpedelec: Lokalisierung und Umgebungserkennung, Masterarbeit, Institut für Elektrotechnik, TU Freiberg, 2021.
- [7] M. Zheng: Lokalisierung eines autonom parkenden Lastenpedelecs, Masterarbeit, Institut für Elektrotechnik, TU Freiberg, 2021.
- [8] ArduSimple: simpleRTK2B Basic Starter Kit Datasheet, Version 2024/11/07. [Online]. Verfügbar: https://www.ardusimple.com/wp-admin/admin-post.php?action=generate_product_pdf&product_id=1766 [Zugegriffen: 28.11.2024].
- [9] YDLIDAR: YDLIDAR TG15 Datasheet, Version 01.13.005200, 2020. [Online]. Verfügbar: <https://cdn.robotshop.com/media/y/ydl/rb-ydl-13/pdf/ydlidar-tg15-360-laser-scanner-datasheet.pdf> [Zugegriffen: 3.12.2024].
- [10] WitMotion Shenzhen Co., Ltd.: WT901C Digital Attitude Sensor - Specification, Version V1.0, 19. Okt. 2017. [Online]. Verfügbar: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/B1BjLwLnr9S.pdf> [Zugegriffen: 3.12.2024].
- [11] Raspberry Pi (Trading) Ltd.: Raspberry Pi 4 Model B Datasheet, Release 1.1, 12. März 2024. [Online]. Verfügbar: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf> [Zugegriffen: 3.12.2024].

2.2 Arbeitspaket A2 — Kleinfahrzeuge

Autoren: Matthias Kröger, Jim Gerschler, Jenny Köckritz, Ringo Nepp

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung, Konstruktion und dem Bau der CityPed® sowie der CityScooter. Folgende Unterkapitel wurden aus dem Projektablaufplan übernommen und beziehen sich somit insbesondere auf die Arbeitspakete A2.1, A2.2, A2.3, A2.5, A2.7 und C1.6.

2.2.1 Marktrecherche und Konzeptübersicht

Lastenpedelecs etablieren sich immer mehr in den Alltag unserer Gesellschaft und stellen einen vielversprechenden Beitrag zur Verkehrswende dar. Ein Lastenrad ist in gewisser Hinsicht immer ein spezielles Fortbewegungsmittel, welches konkret an die zu erfüllende Aufgabe – z. B. den Lastentransport von Einkäufen – angepasst und optimiert ist. Letztendlich resultieren aus den speziellen Anforderungen eine Vielzahl an unterschiedlichen Konzepten von Lastenrädern, welche sich mit immer neuen Herausforderungen fortsetzen lässt. Stark vereinfacht können Lastenräder anhand verschiedener technischer Merkmale kategorisiert werden. Im Folgenden werden einige dieser Merkmale beschrieben und deren Einflüsse auf bestimmte Eigenschaften näher erläutert, sowie weitere Merkmale zur Kategorisierung aufgezählt.

Die meisten am Markt befindlichen Lastenpedelecs nutzen hauptsächlich etablierte Bauelemente des üblichen Zweiradbereiches. Mit zunehmender Häufigkeit kommen angepasste Komponenten und Lösungen zum Einsatz, welche beispielsweise aus den Kraftfahrzeugbereich (Motorrad, PKW) abgeleitet werden.

Grundsätzlich wird in einspurige Fahrzeuge und mehrspurige Fahrzeuge unterschieden. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Räder und dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrrades und damit letztendlich auch dem Fahrzeuggewicht, welches im Wesentlichen auf die maximale Belastbarkeit eines einzelnen Laufrades zurückzuführen ist. Daraus wird ersichtlich, dass mit steigender Anzahl an Rädern auch höhere Belastungen aufgenommen werden können und beispielsweise mehrspurige Lastenräder vor allem im Schwerlast- oder Personentransport eingesetzt werden. Für einen stabilen Stand werden mindestens drei Aufstandspunkte benötigt, welche u. A. durch drei oder mehr Räder realisiert werden können. Weiterhin werden maßgeblich die Fahreigenschaften durch die Anzahl der Räder und der Spuren bestimmt. Während einspurige Zweiräder viele Gemeinsamkeiten mit normalen Fahrrädern und Motorrädern aufweisen, ergeben sich bei Drei- oder Vierrädern eher Eigenschaften, welche dem PKW zuzuordnen sind. Durch bestimmte technische Lösungen, wie zum Beispiel einer Neigetechnik lassen sich zweiradähnliche Fahreigenschaften realisieren. Im Laufe der Entwicklung wurde eine Mehrspurige Vorderachse immer wahrscheinlicher. Dadurch hätten alle CityPed® einen stabilen Stand, was insbesondere während der Nutzung autonomer Fahrfunktionen wichtig ist. Um Nutzerhemmnisse zu minimieren wurde ein Fahrverhalten des CityPed® angestrebt, welches mit dem eines konventionellen Fahrrades vergleichbar ist. Dies könnte durch die Implementierung einer Neigetechnik an der mehrspurigen Vorderachskonstruktion erreicht werden. Die Neigetechnik ist mittels Knopfdrucks ver- bzw. entriegelbar und gewährleistet die Modi „Fahrbetrieb“ und „Parkbetrieb“.

Weitere Merkmale zur Kategorisierung von Lastenpedelecs:

- Ladungsart (Güter, Personen)
- Variabilität (Modularität, Umbau für mehrere Funktionen)
- Anbaukonzepte zur Aufrüstung normaler Fahrräder zum Lastenrad
- Komfort und Sicherheit

Im Rahmen der Marktrecherche wurden neben den unterschiedlichen Lastenradkonzepten auch Übersichten zu speziellen technischen Lösungen erstellt:

- Rahmengeometrie, Kenngrößen für universelle Rahmengröße
- Rahmenform und Ergonomie
- Fahrzeugkomponenten wie Antrieb, Transmission, Bremsen, Laufradgröße und sonstige Komponenten
- Elektroantriebe

Neben wichtigen theoretischen Überlegungen ist die experimentelle Untersuchung von Lastenpedelecs unerlässlich, um einen Eindruck von wichtigen Eigenschaften wie Fahrverhalten und Handling, sowie Funktionalitäten zu erhalten. Für einen ersten Eindruck wurden zahlreiche Lastenräder auf einer Fahrradmesse Probe gefahren und hinsichtlich wichtiger projektbezogener Aspekte bewertet. Weiterhin fanden mehrere Besuche von verschiedenen Fahrradhändlern statt, um weitere Modelle zu testen. Für umfangreichere Untersuchungen wurden basierend auf den theoretischen Überlegungen und realen Fahreindrücken mehrere vielversprechende Konzepte ausgewählt und jeweils ein Modell, wie in Tabelle 2.2.1 dargestellt, beschafft oder geliehen.

Tabelle 2.2.1: Ausgewählte Dreiräder (orange) und Zweiräder (grün), *geliehen oder bereits im Projekt vorhanden

Modell	Besondere Merkmale
Chike	- Kompaktes Drei-Rad mit Neigetechnik und Shimano Mittelmotor - Hohes Transportvolumen, Last vorn über den Rädern - Achsschenkel-Lenkung mit Stoßdämpfung - elektronische (automatische) Nabenschaltung - universelle Rahmengröße, kleine Vorderräder (18")
TReGo	- 3-Rad mit Neigetechnik, Nachrüstlösung - Drehschemel-Lenkung
AddBike+	- 3-Rad mit Neigetechnik, Nachrüstlösung, - Radstand anpassbar auf Zuladung - Drehschemel-Lenkung
Victoria eTrekking	- Trekkingrad mit tiefem Einstieg (Wave Rahmen) für Nachrüstlösungen - Bosch Mittelmotor - Stufenlose Nabenschaltung
Douze G2	- Kompaktes teilbares Long-John-Konzept, geringes Transportvolumen - Innovativer Mittelmotor, Direktläufer, (Binova Flow) - Lenkung durch Seilzug
UrbanArrow*	- Long-John-Konzept - Hohes Transportvolumen - Lenkung über Gestänge
Swingtrike Shopster*	- Kompaktes, leichtes Zweirad - Besondere Lastposition vor dem Fahrer, sehr tief - Direkte Lenkung mit sehr flachem Lenkwinkel und kleinem Vorderrad
Yuba Spicy Curry*	- Kompaktes Long-Tail - Sehr großer niedriger Gepäckträger (kleines Hinterrad, großes Vorderrad) - Anpassbar auf verschiedene Lasten durch Modularität

2.2.2 Design, Konstruktion, FEM-, Bewegungs- und Frequenz-Analyse, Festigkeitsbetrachtung, Komponentenauswahl, dynamische Untersuchung und Erprobung

Auf Grundlage der aus der Marktrecherche gewonnenen Erkenntnisse ist, dass der Grundrahmen das CityPed® in Longtail-Bauweise mit Tiefeinstieg ausgeführt wurde. Ein anzustrebendes, möglichst geringes Gewicht des Rahmens bei gleichzeitiger Haltbarkeit und Robustheit wurde durch Anwendung rechnergestützter Topologieoptimierung (s. Abbildung 2.2.1 links) erreicht, ein Verfahren, welches die materialreduzierte und dennoch lastgerechte Gestaltung von Bauteilen ermöglicht.

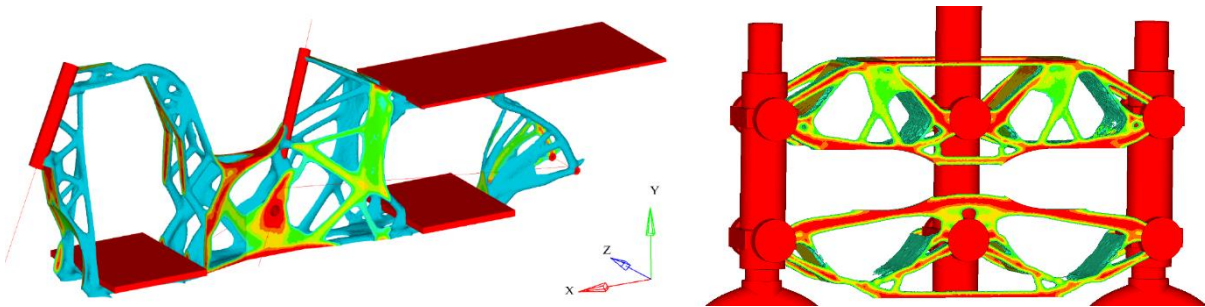


Abbildung 2.2.1 links: Topologieoptimierter Lastenradrahmen; rechts: Topologieoptimierte Vorderrad-Aufhängung
Eine ebenfalls topologieoptimierte mehrspurige Aufhängung der Vorderräder (s. Abbildung 2.2.1 rechts), basierend auf einer Parallelogrammstruktur, ermöglicht die Neigung des CityPed® um seine Kippachse und vermittelt das identische Fahrgefühl eines Einspurfahrzeugs. Die Neigungsfunktion des CityPed® ist mit Hilfe eines manuell zu bedienenden Rastbolzens in seiner Nulllage deaktivierbar, was zum Abstellen und für die Implementierung autonomer Fahrfunktionen erforderlich ist.

Den Konstruktionsprozess begleitend wurden die fahrdynamischen Eigenschaften sowohl auf eigens dafür konstruierten Prüfständen sowie in praktischen Fahrversuchen untersucht. Während ein speziell präpariertes Messfahrrad (s. Abbildung 2.2.2 links), ausgerüstet mit Kraft-, Beschleunigungs- und Lenkwinkelsensoren dem Erfassen subjektiver Fahreigenschaften dient, wird ein Flachbahnprüfstand (s. Abbildung 2.2.2 rechts) genutzt, um die mehrspurige Vorderachskonstruktion bzgl. ihres Aufschwingverhaltens im höheren Geschwindigkeitsbereich bis 60 km/h zu untersuchen. Mit Hilfe beider Vorgehensweisen wurden wertvolle Erkenntnisse erzielt, welche den Konstruktionsprozess beeinflussten und als Grundlage diverser Veröffentlichung dienten.



Abbildung 2.2.2 links: präpariertes Messfahrrad; rechts: Flachbahnprüfstand

Das final entwickelte Lastenpedelec setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

Vorderachse & Vorbau

Bereifung:	2x20 Zoll
Bremssystem:	2x mech. Scheibenbremse
Gabel:	2x Federgabel verstärkt
Neigetechnik:	eigenentwickelte und patentierte doppeltes Quertraversenpaar (gewichtsoptimiert)
Arretierung Neigetechnik:	Rastbolzen mit Herzkurvenbahn
Schutzblech:	Kunststoff
Lenksystem:	eigenentwickelte, bowdenzuggestützte Ackermann-Lenkung mit Kurven-Seilscheiben
Steuersatz:	1 ^{1/8} Zoll Gewindesteuersatz gedichtet
Hinterradbereifung:	20 Zoll
Bremssystem:	mech. Scheibenbremse
Schutzblech:	Metall

Rahmen & Rahmenanbauteile

Rahmen:	eigenentwickelter Cargo- Alurahmen; Longtail; Tiefeinstieg
Steuerkopfwinkel:	69°
Sattelstütze:	höhenverstellbar über Schnellspanner
Hintere Lastplattform:	72 l EPP Box; isolierend
Mittlere Lastplattform:	400mm x 300mm Plattform mit Automatikzurrurt
Beleuchtung:	12V LED 2x Frontlicht & 2x Rücklicht

Cockpit

Lenker:	Citygeometrie mit Kröpfung
Bremsgriff links:	Doppelzügig starr
Bremsgriff rechts:	Einfachzügig mit Schließkontakt
HMI:	Sigma Bordcomputer
Vorbau:	Höhen- und Neigungsverstellbar

Antrieb & Antriebsstrang

Motor:	Heinzmann Cargo Power System Heckmotor 250 W
Tretlager:	Autorq Momentenmessnabe
Akku:	SBS Unipower Light 48 V System
Schaltung:	7-Gang Kettenschaltung (1x7)
Kurbel & Pedale:	Standard 4-Kantaufnahme
Kettenführung:	eigenentwickelte Unterflurführung mit Umlenkungen

Sicherheit

Schloss:	Rahmenschloss mit App-Anbindung und Alarmfunktion
----------	---

Dabei sind neben den Standard-Fahrradbauteilen zahlreiche Bauteile in Eigenentwicklung entstanden. Insbesondere der Leichtbaurahmen, die patentierte Neigetechnik und Lenkung sowie die Kettenführung unterhalb der mittigen Lastplattform stellen innovative Lösungen für Lastenräder dar.

2.2.3 Betriebsfestigkeitsauslegung für die Schweißkonstruktion des Rahmens des CityPed®

Als Lastenräder für den Leihbetrieb müssen die CityPed® hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen. Bei einem sehr geringen angestrebten Rahmengewicht müssen vorgesehene Lasten bis zu 190 kg transportiert werden, es muss auch bei schlechten Witterungsbedingungen sicher gebremst und gelenkt werden können und auch bei Fehlfunktionen darf keine direkte Schädigung von Personen auftreten.

Diese hohen Sicherheitsanforderungen wurden bereits in der Entwicklungsphase bedacht. So wurde von jedem Entwicklungsstand ein Simulationsmodell mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) erstellt und die resultierenden für die Rahmenlastfälle aus der Lastenradprüfnorm DIN 79010:2020-2 berechnet. Die relevanten Lastfälle sind in Abbildung 2.2.3 schematisch dargestellt. Ein Lastenrad unterliegt vornehmlich zyklischen Lasten, daher ist auch nicht die statische Festigkeit für den Betrieb entscheidend, sondern die Betriebsfestigkeit. Das maximale Fahrergewicht wurde für diese Berechnungen auf 120 kg statt den vorgesehenen 90 kg angenommen, die Belastungen pro Lastplattform auf je 50 kg statt 30 kg für die obere und 20 kg für die untere Plattform.

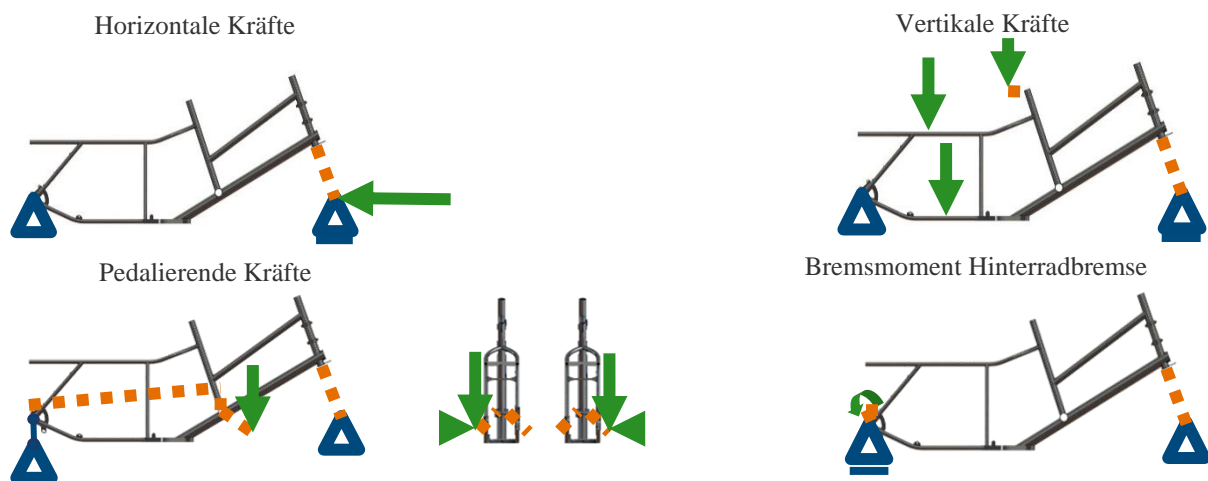


Abbildung 2.2.3: Schematische Darstellung der relevanten zyklischen Lastfälle für die Lastenrad-Rahmenprüfung, vgl. DIN 79010

Das Simulationsmodell des Lastenradrahmens wurde außerdem für eine Feinoptimierung der Wanddicken der Rohre für die finale Rahmenstruktur genutzt (Köckritz et al 2022, DVM). Die ständigen Festigkeitsnachweise mithilfe der FEM-Simulation und die verschiedenen Optimierungsschritte erlauben das, im Vergleich zur transportierten Last, sehr geringe Rahmengewicht von 4,2 kg (Vrignaud et.al. 2022 Crashworkshop).

Die Schweißnähte sind die kritischsten Bereiche in einem Fahrradrahmen. Daher sind die 52 Schweißnähte der finalen Rahmenkonstruktion vollständig modelliert, um insbesondere eine Lebensdaueranalyse unter den erwartbaren Belastungen zu ermöglichen. Eine genaue Lebensdauer vorhersage erfordert jedoch zyklische Materialdaten, die für die verwendete Aluminiumlegierung 7020 im geschweißten Zustand und unter mehraxialer Beanspruchung nicht vorhanden waren.

Es wurden verschiedene Methoden der Schweißnahtmodellierung auf ihre Anwendbarkeit und ihre Genauigkeit in der Vorhersage der erwartbaren Lebensdauer überprüft, beschrieben in (Fürstner et.al. 20121 ICSID, Köckritz et al 2023, Procedia Structural Integrity). So wurden von dem International Institute for Welding (IIW) empfohlene Methoden wie der „Hot-Spot-Stress“-Ansatz oder die „Effective-Notch“-Methode genauso überprüft wie programm-spezifische Methoden des gewählten kommerziellen Simulationsprogrammes. Für die Validierung der Simulationsergebnisse wurden Ermüdungs-

versuche mit geschweißten Aluminiumrohrstümpfen unter gleichphasig überlagerter Biegung und Torsion durchgeführt. Diese vereinfachten Prüflinge stellen damit die komplex beanspruchten Schweißnähte hinreichend dar, ohne, dass vollständige Lastenradrahmen zerstörend geprüft werden mussten. Es wurden zyklische Versuche mit konstanter Amplitude und gleichphasiger Überlagerung von Biegung und Torsion sowie ein Lastkollektiv überprüft. Das verwendete Lastkollektiv stammt dabei aus betriebsnahen Messfahrten mit voller Beladung.

Für die Materialparameter wurden Ermüdungsversuche mit konstanter Amplitude für reine Biegung und reine Torsion durchgeführt, die in dem Materialmodell für die mehraxial belasteten Schweißnähte je nach Spannungszustand überlagert werden. Zudem wurde der Effekt von Schweißnahtfehlern untersucht, die in komplexen Schweißkonstruktionen wie dem vorliegenden Lastenradrahmen in der Fertigung auftreten können.

Mittels der ermittelten Materialparameter konnte eine gute Übereinstimmung der simulativen und experimentellen Ergebnisse für die Lastkollektive erreicht werden, wie im Diagramm in Abbildung 2.2.4 links erkennbar ist. Für die konstanten Amplituden ist sind die Ergebnisse der Lebensdaueranalyse konservativ im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen. Dabei können für die mehraxiale Belastung mit einem höheren Biegeanteil in Abbildung 2.2.5 links genauere Lebensdauervorhersagen getroffen werden als für den Lastfall mit einem höheren Torsionsanteil in Abbildung 2.2.5 rechts. Die gewählte Methode erzielte jedoch bessere Ergebnisse als andere Ansätze mit ähnlichem Modellierungsaufwand, wie zum Beispiel die Hot-Spot Methode. Zusammenfassend ist die Sicherheit unter Betriebsbedingungen gegeben, wie beispielhaft eine Detailansicht des kritischen Tretlagerbereichs in Abbildung 2.2.4 rechts zeigt. Die erfolgreiche Prüfung eines einzelnen Lastenradrahmens unter erweiterten DIN 79010 Lastfällen im Rahmen der Sicherheitsprüfung des CityPed® (s. Abschnitt 2.2.8 CityPed® Zulassung) untermauerte diese Einschätzung.

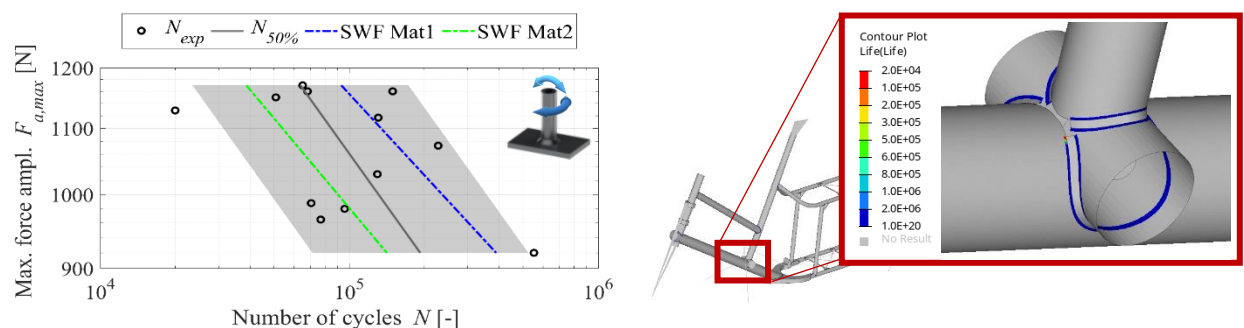


Abbildung 2.2.4: Ergebnisse der Schweißnahtlebensdauersimulation mit links Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse anhand geschweißter Prüflinge unter einem Lastkollektiv mit Materialdaten aus der Literatur (SWF Mat2) und eigens ermittelten Materialdaten (SWF Mat 1) und rechts Detailansicht des kritischen Tretlagerbereichs, aus (Köckritz et. al. 2023, PSI)

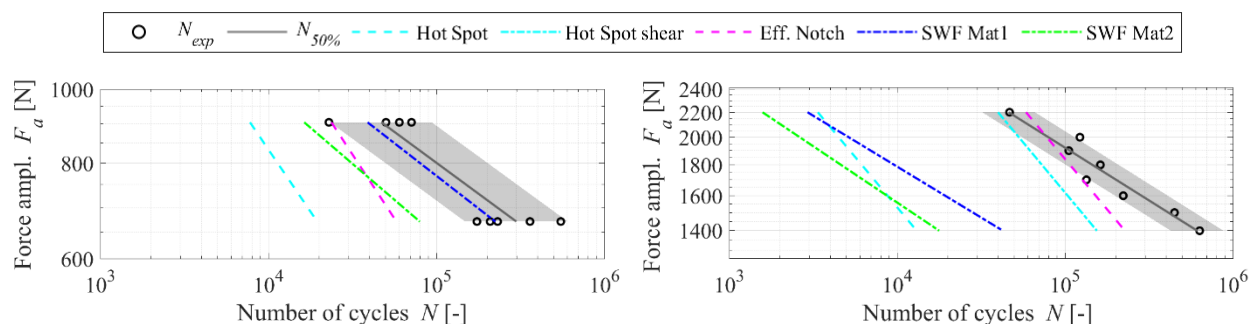


Abbildung 2.2.5: Vergleich der experimentellen Lebensdauer der Schweißnahtprüfung mit verschiedenen numerischen Ansätzen für multiaxiale Belastung mit gleichbleibender Amplitude für links vorwiegend Biegung und rechts vorwiegend Torsion

2.2.4 Mehrspurige Vorderachskonstruktion – Entwicklung und Forschung

Während starre dreirädrige Fahrzeuge einen stabilen Stand bieten und hervorragend geeignet für die Implementierung autonomer Fahrfunktionen sind, weisen diese ein eigentümliches Fahrverhalten auf, was wiederum negative Auswirkungen auf die Nutzerakzeptanz hervorruft. Aus diesen Gründen wurde sich zur Gestaltung des CityPed® für eine mehrspurige Vorderachskonstruktion entschieden. Diese bildet zusammen mit dem Hinterrad ein Standsicherheitsdreieck und gewährleistet den stabilen Stand während der Nutzung autonomer Fahrfunktionen. Um dennoch optimale Fahreigenschaften zu erreichen, kann eine Neigungsfunktion durch den Nutzer freigegeben werden, wodurch ein Fahrverhalten analog dem eines einspurigen, konventionellen Fahrrads erreicht wird. In Kombination mit der verbauten Bowdenzuglenkung, welche die Lenkmomente vom Lenkrohr auf beide Vorderräder überträgt, stellt diese Konstruktion eine technische Neuheit dar, weshalb ein Patentverfahren eröffnet wurde, welches sich aktuell in der Offenlegung der Patentschrift befindet.

Die Neigetechnik basiert auf einem Neigungsparallelogramm (s. Abbildung 2.2.6), welches aus insgesamt 4 Quertraversen (7), dem Steuerrohr des CityPed® (3) sowie den sekundären Steuerrohren (2.1) gebildet wird. Durch insgesamt zwölf Kugellager (6), jeweils sechs in der Ebene vor und sechs in der Ebene hinter dem Steuerrohr, ist die Konstruktion drehbar gelagert. Die drehbar innerhalb der sekundären Steuerrohre gelagerten Gabeln (2), welche der Führung der Laufräder (1) dienen, werden mit Hilfe von Bowdenzügen (8) gelenkt. Diese verbinden die starr mit den Gabelköpfen verbundenen Nehmerscheiben (9) mit der Geberscheibe (5), welche starr mit dem Lenkrohr (3.1) bzw. dem Lenker (4) verbunden ist. Beide Nehmerscheiben aus Gründen der funktionalen Redundanz zusätzlich mit einem Bowdenzug (10) verbunden.

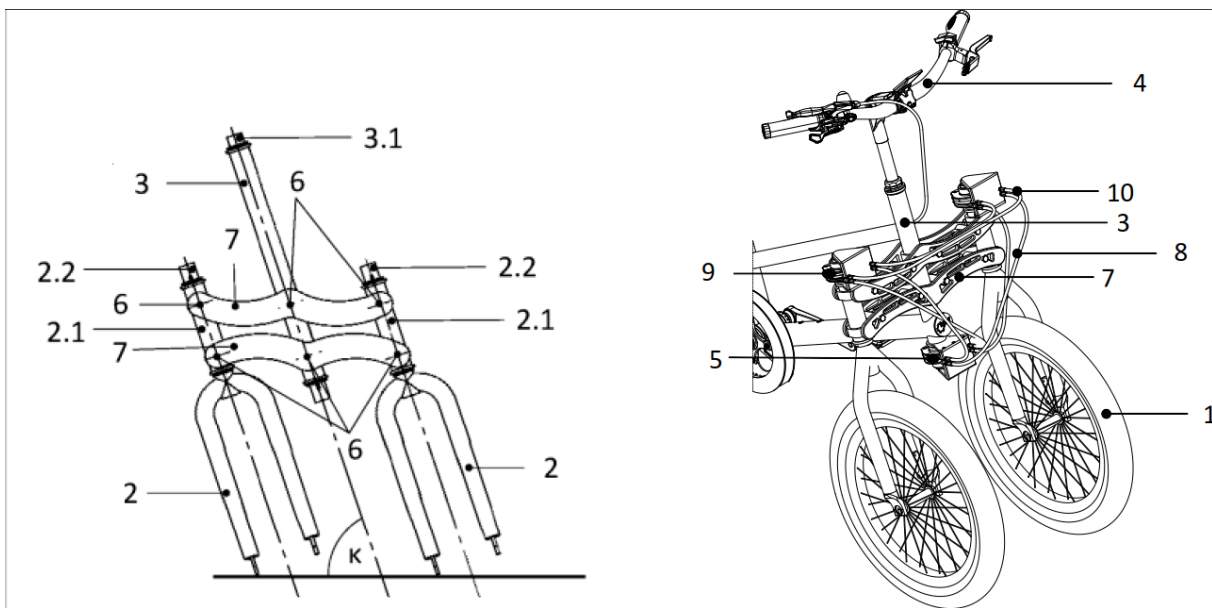


Abbildung 2.2.6: Konstruktive Umsetzung der Neigetechnik

Aufgrund der mehrspurigen Gestaltung der Vorderachse, welche bedingt, dass für eine korrekte Lenkgeometrie das Ackermanngesetz eingehalten wird, wird im Folgenden die Herleitung der korrekten Abrollgeometrie (s. Abbildung 2.2.7 rechts) der Nehmerscheiben, welche maßgeblich an den Lenkungeigenschaften beteiligt sind, beschrieben. Hierbei besagt das Ackermanngesetz, dass sich für eine schlupffreie Fahrt die Verlängerungen aller an der Spurführung beteiligten Achsen in einem Punkt, dem Momentanpol schneiden müssen (s. Abbildung 2.2.7 links).

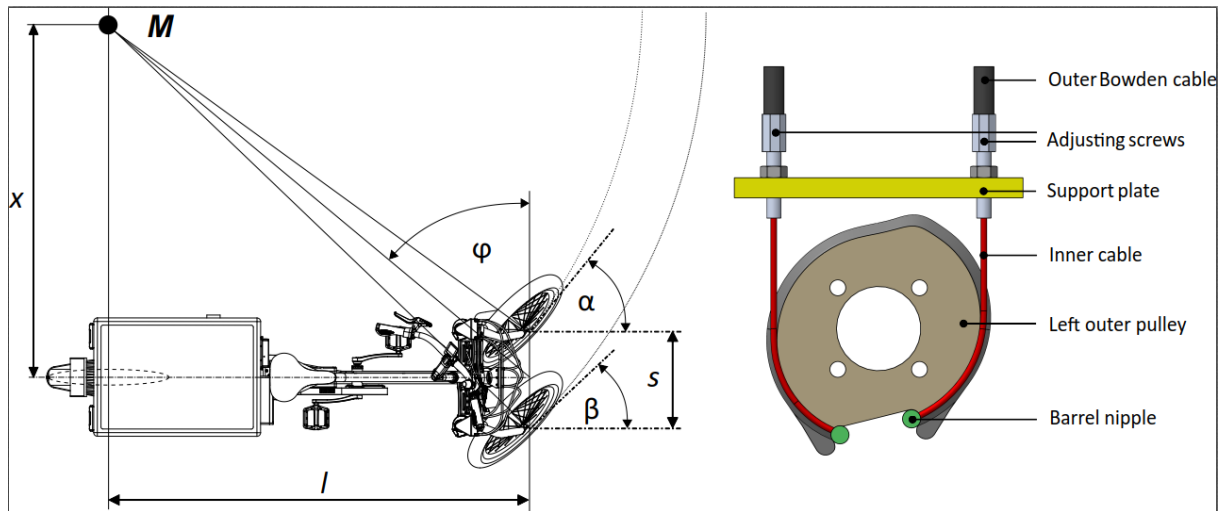


Abbildung 2.2.7: links Darstellung Ackermanngesetz & Lage Momentanpol; rechts Kurvenbahn Nehmerscheibe

Folglich gilt für einen Vorgabewinkel ϕ am Lenker, dass sich an den Vorderrädern die Lenkwinkel $\alpha > \beta$ einstellen müssen, was ein variables Übersetzungsverhältnis zwischen der Geber- und den Nehmerscheiben erfordert. Ausgehend von einer kreisrunden Abrollgeometrie der Geberscheibe mit dem Radius r_{in} , der Spurweite des CityPed® s und dem Radstand l gilt für die Abrollgeometrie r_{out} der Nehmerscheiben folgender Zusammenhang:

$$r_{out}(\varphi, s, l, r_{in}) = \frac{r_{in} (4l^2 - 4ls \cos(\varphi)\sin(\varphi) + s^2 \sin^2 \varphi)}{4l^2} \quad \text{für } \phi > 0$$

und

$$r_{out}(\varphi, s, l, r_{in}) = \frac{r_{in} (4l^2 + 4ls \cos(\varphi)\sin(\varphi) + s^2 \sin^2 \varphi)}{4l^2} \quad \text{für } \phi < 0.$$

Aufgrund der sich ergebenden komplexen Geometrie der Seilscheiben wurden diese additiv mittels 3D-Druck gefertigt. Mit Hilfe von Zugversuchen wurde die erforderliche Festigkeit des gesamten Lenksystems nach DIN 79010 nachgewiesen.

Weitere Untersuchungen beziehen sich auf das dynamische Verhalten der Vorderachskonstruktion im Fahrbetrieb, wofür ein Bandprüfstand (s. Abbildung 2.2.8) konstruiert und inkl. der erforderlichen Messtechnik in Betrieb genommen wurde. Forschungsschwerpunkt stellte die optimale Einstellung der Vorspur bzw. Nachspur der Vorderachse im Geschwindigkeitsbereich bis $v = 60 \text{ km/h}$ dar, um mit größtmöglicher Zuverlässigkeit ein Lenkungsflattern zu verhindern, dessen Auftreten die Fahrsicherheit mindert und zum Sturz des Fahrers führen kann. Durch die Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass eine neutrale Spureinstellung das Aufschwingen der Vorderachskonstruktion zuverlässig verhindert und einen sicheren Betrieb des CityPed® gewährleistet, wohingegen Abweichungen von einer neutralen Spureinstellung das Lenkungsflattern begünstigen. Folglich ist die Prüfung und Einstellung der korrekten Spur Bestandteil der regelmäßigen Wartung und gewährleistet den sicheren Betrieb des CityPed®.

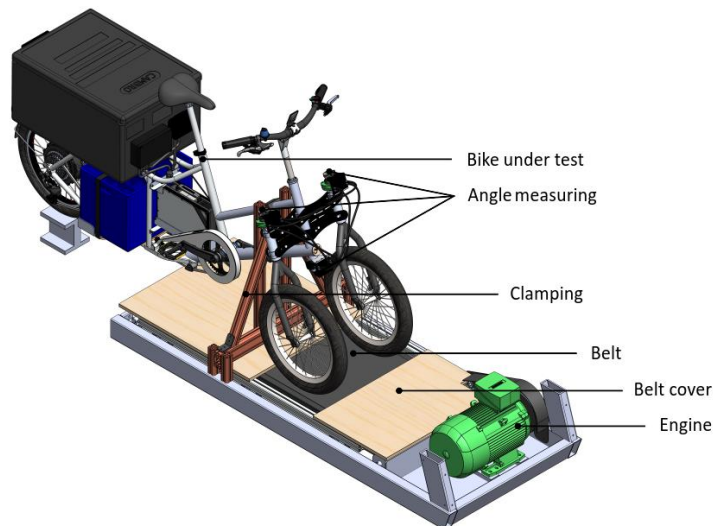


Abbildung 2.2.8: Bandprüfanlage zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Vorderachskonstruktion

2.2.5 Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung des Fahrverhaltens von Lastenrädern

Wie bereits in früheren Abschnitten genauer beschrieben, ist ein wichtiges Projektziel, Nutzerhemmnisse zu minimieren und eine hohe Fahrsicherheit im Betrieb zu gewährleisten. Das empfundene Fahrverhalten eines Lastenrades durch Testpersonen kann durch Testparcours oder Testfahrten und begleitende psychologische Studien evaluiert werden (Kreißig et. al. 2021). Dies ist jedoch mit aufwendiger Auswertung der Aussagen der Versuchspersonen verbunden und ein direkter Vergleich von Lastenrad-Modellen, die nicht im selben Versuchsablauf getestet wurden, ist schwierig. In diesem Abschnitt wird eine im Projektzeitraum entwickelte, neue Methode vorgestellt, die eine objektive Bewertung der Fahrsicherheit anhand von Messwerten erlaubt, die mit einfachen Sensoren im Fahrbetrieb aufgenommen werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden veröffentlicht in (Vrignaud et. al. 2024).

Für die Untersuchungen wurde ein Messfahrrad mit Kraftaufnehmern an den Kontaktpunkten einer Testperson mit dem Rad, also Sattel, Lenker und Pedale ausgestattet. Zusätzlich wurden Geschwindigkeitsaufnehmer an Vorderrad, Trittfrequenzmesser am Tretlager sowie ein Lenkwinkelaufnehmer am Steuerrohr verbaut. Das Messfahrrad ist in Abbildung 2.2.9 mit der Positionierung der Sensoren und der genutzten Lasten dargestellt. Der einzige Unterschied zum Serienrad besteht darin, dass diese Untersuchungen zunächst an der einspurigen Variante des CityPed® durchgeführt wurden.

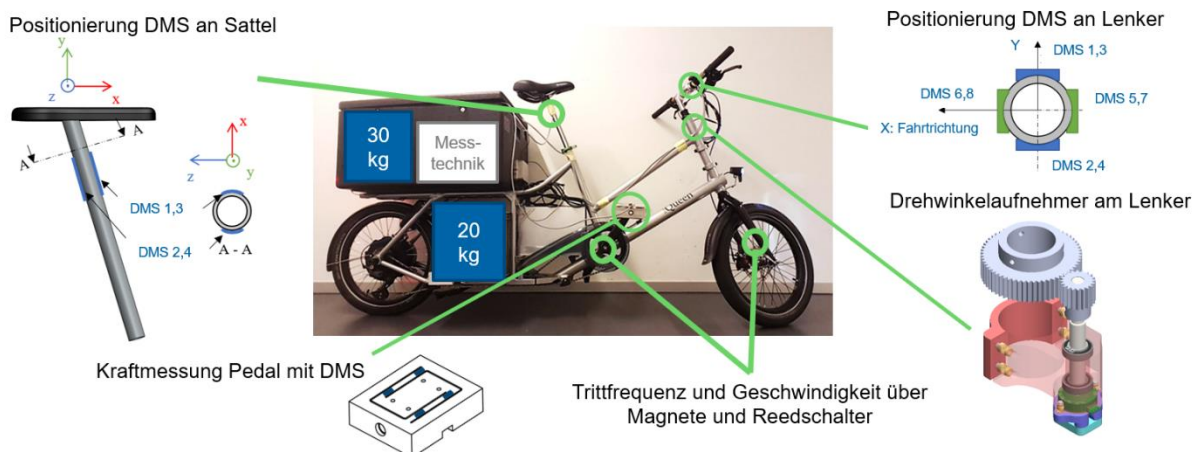


Abbildung 2.2.9: Messfahrrad mit DMS-Sensoren an Sattel, Lenker und Pedale sowie Trittfrequenz-, Geschwindigkeits- und Lenkwinkelmessung, nach (Vrignaud et. al. 2024)

Das Ziel war es, anhand aufgenommener Messdaten die Fahrsicherheit bewerten zu können. Außerdem sollte untersucht werden, ob Einflüsse von Zuladung, Fahrtrichtung sowie ähnlich sicherer, aber unterschiedlicher Testpersonen erkennbar sind. Daher wurden für die Messungen Testfahrten auf einem einfachen, ovalen Testparcours durchgeführt, der mehrmals durchfahren wurde. In der Hälfte der Runden erfolgte ein Stopp und ein erneutes Anfahren. Die Versuche wurden mit trainierten, sicher fahrenden Testpersonen sowie mit untrainierten, unsicheren Testpersonen unterschiedlicher Geschlechter und Körpergewichte durchgeführt. Jede Testperson absolvierte den Parcours voll-, halb- und nicht beladen in beide Fahrtrichtungen, also mit Links- und mit Rechtskurven.

Für die Auswertung werden zunächst die Verläufe der Kraftsensoren betrachtet. Dort zeigte sich besonders der Fahrereinfluss. Neben der gewohnten Gewichtsverteilung der einzelnen Testpersonen sind bei einem „aktiven“ Fahrer regelmäßige, deutlichere Kraftamplituden am Lenker erkennbar und bei einem weniger aktiven Fahrer nur leichte Kraftänderungen während des Lenkprozesses. Interessanter für die Fahrsicherheit sind jedoch nicht die Kraftsensoren, sondern die Lenkwinkel. Für die statistische Auswertung Messergebnisse wird, für eine solche Anwendung bisher nicht bekannt, das Rainflow-Verfahren angewandt (Clormann et al 1986), das sonst Anwendung in der Betriebsfestigkeit zur Ableitung von Lastkollektiven findet. Das Rainflow-Verfahren erlaubt eine Unterscheidung von Hauptlenkbewegungen, wie zum Beispiel dem Einlenken in einer Kurve, und während der Hauptlenkbewegungen stattfindenden überlagerten Schwingungen, wie zum Beispiel Zittern oder Korrekturbewegungen, s. Abbildung 2.2.10 links. In dieser Gruppierung wird nun die Auftretenshäufigkeit während einer Messung zugewiesen. Ein so abgeleitetes Diagramm einer Messung von der Amplitude einer gemessenen Lenkschwingung über dem Mittelwert einer Lenkschwingung und ihrer Auftretenshäufigkeit ist in Abbildung 2.2.10 rechts dargestellt. Eine Schwingung, die sehr häufig auftritt, erscheint im Diagramm Abbildung 2.2.10 rechts rot, während eine Schwingung, die eher selten auftritt, blau erscheint.

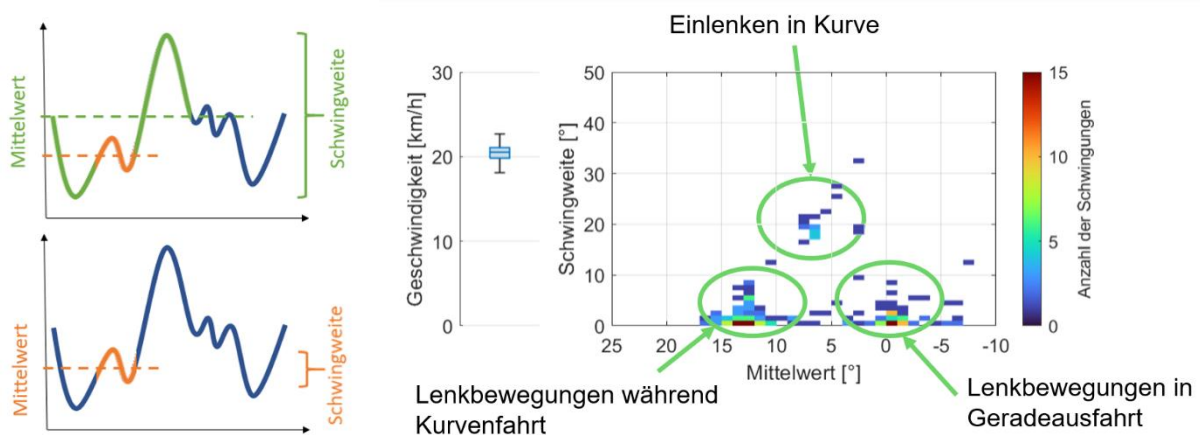


Abbildung 2.2.10: Rainflow-Verfahren für die Evaluierung des Lenkverhaltens mit a) Schematischer Darstellung von Schwingweite und Mittelwert von Haupt- und Nebenlenkbewegungen und b) resultierendes Diagramm mit Parcours-spezifischen Hauptbereichen

Die auf diese Weise aufgenommenen Diagramme konnten nun verglichen werden. So zeigt ein Vergleich einer erfahrenen Testperson (s. Abbildung 2.2.11 links) und einer unerfahrenen Testperson (s. Abbildung 2.2.11 rechts) für halbe Beladung, dass die unerfahrene Testperson auf derselben Teststrecke absolut mehr Lenkbewegungen durchgeführt hat und diese Lenkbewegungen deutlich mehr streuten. Die Streuung ist dabei durch die breiteren Bereiche besonders in Kurvenfahrt und Geradeausfahrt in Abbildung 2.2.11 rechts erkennbar. Sicherere Testpersonen zeigen ein kontrollierteres Fahrverhalten, was sich in weniger Lenkbewegungen absolut, einer geringeren Streuung und einer höheren Wiederholbarkeit in Abbildung 2.2.11 links zeigt.

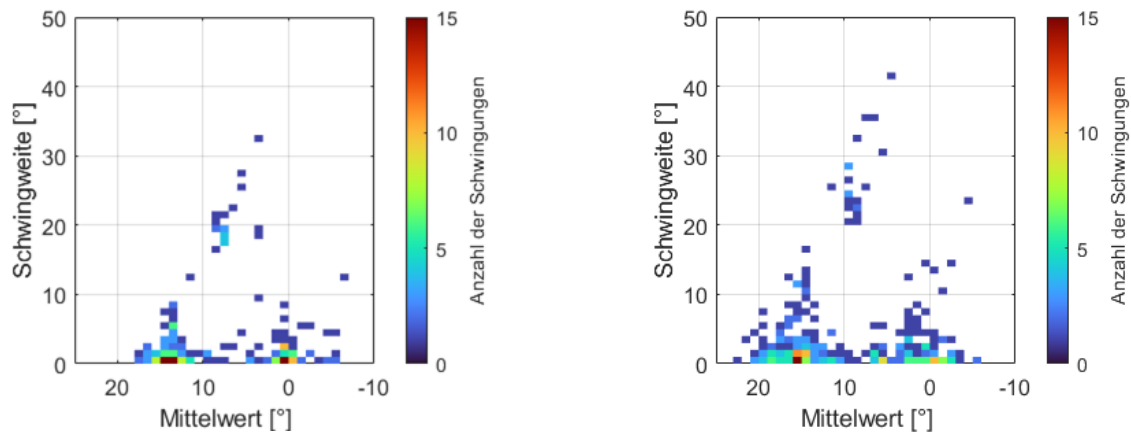


Abbildung 2.2.11: Beispielhafte Rainflow-Diagramme für halb beladenen Zustand bei Fahrt im Parcours mit Linkskurven bei links erfahrener Testperson und rechts unerfahrener Testperson

Der Einfluss von Zuladung kann durch die Methode ebenfalls nachgewiesen werden, wobei eine halbe Zuladung auf der unteren Lastplattform eher stabilisierend und eine volle Beladung etwas destabilisierend auf das Fahrverhalten wirkte. Nicht nachgewiesen werden konnte ein Einfluss der Fahrtrichtung.

Die Untersuchungen zeigen, dass die im Projekt MiNuLa entwickelte Methode in der Lage ist, auf einer einfachen Versuchstrecke in einem kurzen Messzeitraum Fahrunsicherheiten erkennbar zu machen. Eine solche Methode ist in der Literatur bisher nicht bekannt. Die Methode kann auf andere Lastenräder übertragen werden, dabei sollte aber ein ähnlicher Parcoursaufbau genutzt werden. Zukünftig sollte die Methode für eine quantitative Auswertung der Messdaten in eine vollständig automatisierte statistische Auswertung überführt werden.

2.2.6 CityScooter

Die Marktrecherche wurde ausschließlich online durchgeführt, wobei sowohl bereits herstellerseitig elektrifizierte, zugelassene Systeme als auch herkömmliche Tretroller bzgl. ihrer Eigenschaften untersucht wurden. Zum aktuellen Stand konnte kein Konzept am Markt ermittelt werden, welches alle Anforderungen in zufriedenstellendem Maß erfüllt, weshalb ein Versuchsmuster (Tretroller) beschafft wurde. Dieses wurde für die Ermittlung dynamischer wirkender Kräfte sowie als Versuchsmuster für die Elektrifizierung des Antriebes genutzt und zusätzlich mit einer Lastplattform ausgestattet. Für den Antrieb wurde ein vorkonfektioniertes Komplettsystem, bestehend aus einem Nabenmotor, Akku, Motorsteuergerät sowie einem HMI gewählt, durch dessen Einbau und Inbetriebnahme die erforderlichen Schnittstellen für eine spätere Neukonstruktion klar definiert werden konnten.

Zusätzlich wurden zwei Roller für Testzwecke beschafft, um Dinge wie die Reifengröße und die Beladung genau zu untersuchen. Der Metz Moover besitzt relativ kleinere Räder und kann lediglich mit einer Lastplattform ausgestattet werden. Dafür kann er induktiv über eine Plattform geladen werden und besitzt ein gutes Preis Leistungsverhältnis. Der Urban Drivestyle der Firma Uni Boost aus Berlin besitzt größere Räder und eine größere Lastplattform unter dem Lenker und kann zusätzlich mit einem Gepäckträger ausgestattet werden. Leider ist die Firma nach dem Kauf des Textträgers insolvent gegangen und damit auch keine weitere Zusammenarbeit möglich gewesen. Die erfolgten Untersuchungen legen den Schluss nahe, für die Neukonstruktion des CityScooters deutlich größere Bereifung als marktüblich zu wählen (ca. 20 Zoll), welche durch eine Luftbereifung das Fahrgefühl auf unebenen Strecken (Kopfsteinpflaster in der Freiburger Innenstadt üblich) signifikant verbessern. Die Erprobung des Antriebes konnte dem heckseitig eingebauten Motor ein subjektiv besseres Fahrverhalten als dem Frontmotor attestieren.

Aufgrund der fehlenden Zulassungsmöglichkeit der TUBAF wurde ein am Markt existierender E-Roller gesucht. Über die Firma Innvelo wurde ein in der Entwicklung befindlicher E-Roller mit Heinzmannkomponenten gefunden, welcher zusammen mit dem Hersteller zu einem CityScooter weiterentwickelt wurde. So wurde aus einem E-Roller ein Lastenroller entwickelt. Der CityScooter verfügt über zwei Lastplattformen, eine unter dem Lenker für eine Getränkekiste und eine hinten über Hinterrad (s. Abbildung 2.2.12). Auf diesem Gepäckträger lässt sich problemlos eine Kiste installieren.

Nachdem die Einzelzulassung durch den Hersteller erfolgt ist, wurden vier Stück für das Reallabor gekauft und über die TUBAF versichert.



Abbildung 2.2.12: CityScooter mit zwei Lastplattformen

2.2.7 Testevent und praktische Erprobung der Lastposition

Bereits im frühen Projektverlauf wurde eine Nutzerstudie durchgeführt mit dem Ziel, verschiedenartige Lastenradkonzepte miteinander zu vergleichen sowie deren Vor- und Nachteile aus Nutzersicht zu evaluieren. Hierfür wurde ein Testparcours (s. Abbildung 2.2.14) installiert, welcher alltägliche Situationen realitätsnah abbildet und welcher durch die Probanden mit den unbeladenen sowie beladenen Lastenrädern befahren wurde. Die schnelle Fertigstellung eines ersten Prototyps des CityPed® ermöglichte hierbei eine frühzeitige Evaluierung des verfolgten Konzeptes, dessen positive Fahreigenschaften durch die Probanden bestätigt wurde. In nahezu allen untersuchten Kategorien erzielte das prototypische Konzept bessere Probandenbewertungen als die drei verglichenen, frei am Markt verfügbaren Konzepten, obwohl die gekauften Vergleichs-Lastenräder bereits durch zahlreiche Fahrversuche bei der Eurobike und bei Händlern als besonders gut eingeschätzt wurden.

Eine weitere Nutzerstudie befasste sich mit dem manuellen Parkvorgang des CityPed® in der CityBox. Mit Hilfe dieser Studie wurde die aus Nutzersicht optimale Ausgestaltung der CityBox erörtert sowie verschiedenartige optische wie haptische Feedbackvarianten beim Erreichen der Endlage des CityPed® evaluiert. Zu diesem Zeitpunkt stand bereits eine seriennahe Version des CityPed® zur Verfügung.

Ein wesentliches Merkmal der Entwicklung des gewählten Konzeptes ist die geteilte Lastposition hinter dem Fahrer. Dabei befinden sich ein Teil der Last tief zwischen Tretkurbel und Hinterrad und der andere Teil möglichst nah über dem Hinterrad. Daraus ergibt sich das Problem, dass der Antrieb des Hinterrades nicht mehr direkt über die Kette als kraftübertragendes Element erfolgen kann, sondern die Kette um

die untere Last herum gelenkt werden muss. Um dieses Problem und dessen Lösung zu untersuchen wurde ein Funktionsmuster für die experimentelle Erprobung der Lastpositionen gebaut.

Dabei wurde der Rahmen eines vorhandenen Diamantrades so umgebaut, dass der hintere Teil (Sitz- und Kettenstreben) entfernt und durch eine neue Rahmenstruktur ergänzt wurde. Abbildung 2.2.13 zeigt das Funktionsmuster in einer Seitenansicht. Bei der Konstruktion wurde auf möglichst einfache Fertigbarkeit geachtet und gewisse Standards aus der Fahrradtechnik beachtet, sodass standardmäßige Fahrradteile für den Aufbau verwendet werden konnten.

Die Fertigung erfolgte in der mechanischen Institutswerkstatt. Für die Untersuchung der Lastposition war es nicht erforderlich das Fahrrad zu motorisieren.

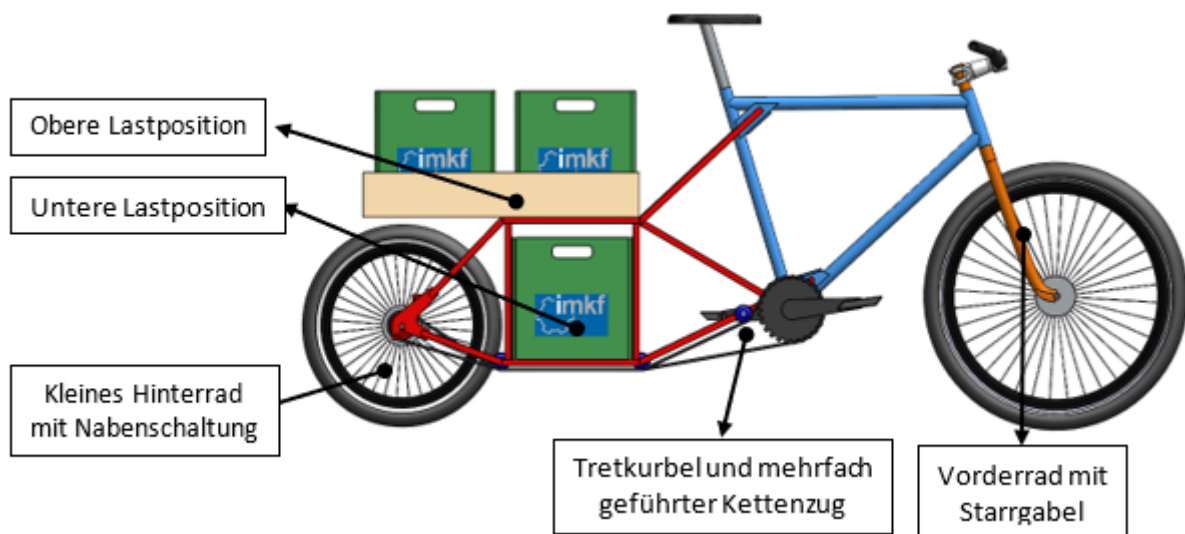


Abbildung 2.2.13: Funktionsmuster für die Untersuchung der Lastposition, blau: Hauptrahmen, rot: Entwickelte Rahmenstruktur

Einzelne Details mussten bis zur erwünschten Funktionsfähigkeit optimiert werden, sodass eine sichere Fahrt möglich ist. Die Fahreigenschaften sowie das Handling der Beladung und des Fahrzeuges im Stand und zu Fuß wurden intensiv untersucht und letztendlich über ein Testevent einem erweiterten Nutzerkreis zugänglich gemacht. Die Fahreigenschaften lassen sich sowohl in unbeladenem als auch beladenem Zustand als gewohnt und sicher beschreiben. Die Eingewöhnungszeit stellte sich stets als sehr kurz heraus, was für den Verleih von großer Bedeutung ist. Ursachen hierfür waren insbesondere die unveränderte Geometrie des vorderen Rahmens und eine direkte Lenkung. Der lange Radstand bewirkt ein ruhiges und stabiles Fahrverhalten. Das große Vorderrad und die Ballonbereifung, welche wie eine Luftfeder wirkt, lassen kleine Hindernisse gut überrollen und dämpfen kleine Schläge, wie zum Beispiel Kopfsteinpflaster mit gutem Ansprechverhalten. Der Wendekreis ist im Vergleich zu anderen Lastenrädern als gering einzuschätzen, was auf die vergleichsweise kompakte Bauweise und den großen Lenkeinschlagwinkel zurückzuführen ist. Unter Maximalbeladung wirken erhöhte aber unkritische Kippmomente aufgrund der hohen Lastposition. Die Umlenkung und Führung der Kette wurde für das Funktionsmuster einfach erweitert.

Die Weiterentwicklung zum ersten Prototyp orientierte sich an den Wünschen und Erfahrungen der Nutzer. Um eine möglichst objektive Einordnung der Fahreigenschaften von verschiedenen Lastenradkonzepten zu erreichen, wurde gemeinsam mit dem Institut für Psychologie der Technischen Universität Chemnitz (TUC) ein Testevent organisiert. Ausgewählt werden dafür vier der vorhandenen Lastenräder, die jeweils ein Lastenradkonzept repräsentieren (s. Tabelle 2.2.2).

Tabelle 2.2.2: Ausgewählte Lastenräder für das Testevent

Lastenrad	Anzahl Räder	Stellvertretend für Konzept
Douze	2	Longjohn
Chike	3	3-Rad mit Achsschenkel-Lenkung
Trego	3	3-Rad mit Drehschemel-Lenkung
Funktionsmuster	2	Longtail

Ziel war es, die Fahrsicherheit von den Konzepten, die Funktion von einzelnen Komponenten sowie das Handling beim Parken zu bewerten. Dafür wurde ein Testparcours entwickelt, der sowohl anspruchsloses Fahren mit weiten, geraden Strecken als auch schwierigere Fahrsituationen durch Unebenheiten, enge Gassen oder scharfe Kurven abbildet. Der Parcours ist in Abbildung 2.2.14 schematisch abgebildet. Die Versuchsplanung erfolgte in enger Kooperation mit den Mitarbeitern der TUC. Dabei wurde sowohl die unbeladene als auch die beladene Fahrt von den Versuchspersonen getestet. Außerdem mussten die Versuchspersonen die Lastenräder selbstständig ein- und ausparken.

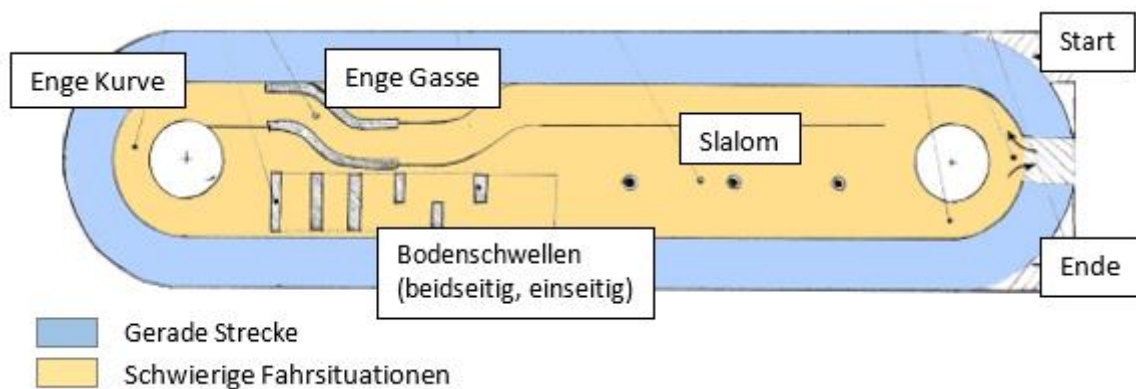


Abbildung 2.2.14: Schematischer Aufbau und Test-Parcours mit verschiedenen Fahrereignissen

Anschließend an jede Testfahrt erfolgte eine Befragung der Versuchspersonen. Die Nutzerbefragung und deren Auswertung erfolgte durch die Mitarbeiter der TUC. Das Fahrverhalten wurde von der Mehrzahl der Testpersonen sehr positiv wahrgenommen. Der Bekanntheitsgrad des Projektes wurde durch das Testevent erheblich erhöht. Die Medien berichteten im TV, Radio und der Zeitung.

2.2.8 CityPed® Zulassung

Die nach Norm 79010 geforderten Prüfung des Fahrradrahmens, der Gabeln, der Laufräder sowie der Lenkung der finalen Serienversion des CityPed® wurden durch Beauftragung des Zedler Instituts vorgenommen und erfolgreich bestanden (s. Abbildung 2.2.15). Weitere erforderliche Prüfungen bzgl. der Bremsleistung sowie des Fahrverhaltens der Vorderachskonstruktion wurden intern durchgeführt, bestanden und dokumentiert.

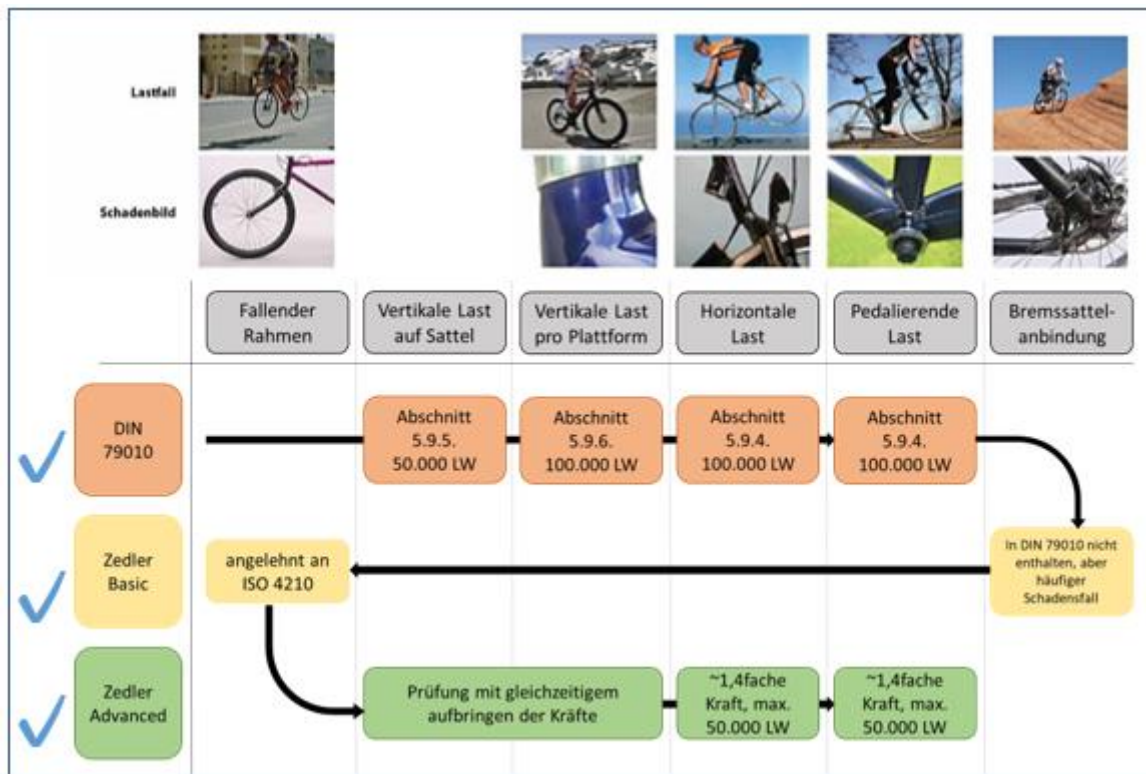


Abbildung 2.2.15: Lastenrad-Prüfungen durch das Zedler Institut

Laufende Anpassungen der Konstruktion beinhalteten beispielsweise die Untersuchung und Optimierung der Kettenführung, welche über mehrere Umlenkpunkte unter die mittige Lastaufnahme geführt ist. Mit Hilfe eines Prüfstandes (s. Abbildung 2.2.16 links) konnten sowohl die Geräuschemissionen reduziert als auch die Zuverlässigkeit des Schaltsystems verbessert werden, was dem Nutzerkomfort zugutekommt. Zugleich führten die umgesetzten Maßnahmen zu einer Verringerung des Verschleißes des Antriebsstranges.



Abbildung 2.2.16: links Prüfstand zur Untersuchung der Kettenumlenkung; rechts additiv gefertigte Kurvenseilrolle

Zeitsynchron wurde eine detaillierte Untersuchung des bowdenzuggestützten Lenksystems durchgeführt. Durch konstruktive Anpassungen ist es gelungen, unabhängig vom Kippwinkel des CityPed® und vom Lenkwinkel der Vorderräder, eine stets korrekte Lenkgeometrie zu erzielen, was als Ackermannlenkung unterschiedliche Lenkeinschläge beider Räder erfordert. Da diese Anpassungen eine komplexe Bauteilgeometrie der an der Lenkung beteiligten Kurven-Seilscheiben zur Folge haben (s. Abbildung 2.2.16 rechts), werden diese mittels additiver Fertigung im Filamentdruckverfahren hergestellt.

Detaillierte Untersuchungen am Zugprüfstand konnten dabei die erforderliche Festigkeit der additiv gefertigten Bauteile nachweisen.

2.2.9 CityPed® im Reallabor

Der zuverlässige Betrieb der CityPed® kann nur durch eine kontinuierliche, projektbegleitende Wartung gewährleistet werden. Äußere Umwelteinflüsse, bewusste oder unbewusste Fehlbedienung der CityPed® durch den Nutzer, Vandalismus und Verschleiß einzelner Komponenten können die Nutzbarkeit der CityPed® einschränken. Um dennoch eine größtmögliche Verfügbarkeit des Systems zu gewährleisten, werden die CityPed® turnusgemäßen Wartungen nach einem ausgearbeiteten Wartungsplan unterzogen. Während das kleine Wartungsintervall einen Monat beträgt und die Funktionssicherheit aller sicherheitsrelevanten Baugruppen gewährleistet, beinhaltet das jährliche Wartungsintervall eine Teilerlegung des CityPed® mit dem Ziel, die Robustheit der gesamten Konstruktion auch nach höheren Laufleistungen zu evaluieren. Zudem werden außerplanmäßige Reparaturarbeiten, welche auf Rückmeldungen der Nutzer basieren, zeitnah durchgeführt. Mit Hilfe dieser Maßnahmen kann die Ausfallzeit des Systems auf einem geringen Niveau gehalten werden.

2.3 Arbeitspaket B1 — Park- und Ladeinfrastruktur

Autoren: Danilo Schicha, Johannes Paul Vogt, Jana Kertzsch

Im GPV SteigtUM war ein autonomes Aus- und Rückgabesystem angedacht, welches den Nutzern die Möglichkeit bietet, das CityPed® in definierten Rückgabezonen abzustellen. Von dort aus soll es dann autonom zur nächsten Park- bzw. Lademöglichkeit fahren, um vollautomatisch aufgeladen zu werden.

Im TPV MiNuLa wurden hierfür im ersten Schritt modulare Fahrradgaragen spezifiziert, die sogenannten CityBoxen, s. Abbildung 2.3.1. Das Design dieser innovativen CityBoxen wurde vom Konsortialpartner Fraunhofer IVI entworfen und von der Metallbaufirma Brettschneider realisiert. In der dargestellten Anordnung der fünf Boxen bieten sie Platz für vier CityPed® (CityBox 2–5) und bis zu zwei CityScooter (CityBox1).



Abbildung 2.3.1: CityBox am Audimax. Vorderansicht (links) und Hinteransicht (rechts)

Die geschlossene Unterbringung der Fahrzeuge und des induktiven Ladesystems bietet optimalen Schutz vor Witterungseinflüssen, Vandalismus und Diebstahl. Darüber hinaus beherbergen die CityBoxen die notwendige technische Ausrüstung, die für die automatisierten Ausleih- und Ladeprozesse der Akkus erforderlich ist.

Der Zugang zu den Stellplätzen erfolgt über automatisch öffnende bzw. schließende elektrische Rolltore, beim Start der Ausleihe bzw. Rückgabe der Fahrzeuge.

Die CityBoxen werden elektronisch beleuchtet und überwacht. Hier sind insbesondere die Temperatur zur Einhaltung der Betriebsgrenzen der Akkus sowie der Schutz vor unfreiwillig eingeschlossenen Lebewesen zu nennen.

2.3.1 Automatisierung des Lade- und Ausleihvorgangs

Für die Kommunikationsaufgaben und die vielfältigen Automatisierungsaufgaben wie

- Steuerung der Rolltore,
- Steuerung des Ladevorgangs,
- Not-Aus und Sicherheitskonzept,
- Überwachung des Innenraums und
- Überwachung der Positionierung des CityPed®

kommt an allen drei Standorten eine industrielle speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zum Einsatz, s. Abbildung 2.3.2. Die ursprüngliche Lösung mittels Einplatinenrechner, die am Standort SWG zuerst realisiert war, führte zu massiven Problemen, so dass auch dort die Automatisierungshardware auf SPS-Technik umgestellt wurde. Diese Umrüstung ermöglichte es, den Sharingbetrieb an diesem Standort Ende April 2023 erfolgreich wieder aufzunehmen.

Neben der softwareseitig implementierten Logik und den Fehlerbehandlungs- sowie Abschalt-routinen, ist in den Schaltschränken sicherheitsrelevante Hardware verbaut, welche beispielsweise die Abschaltung im Not-Aus-Fall gewährleistet.

Der Schaltungsentwurf und die Dimensionierung der Schaltschrankgröße wurden mit der Software E-PLAN projektiert. Im Anhang A.B1.1 ist der Stromlaufplan der CityBox am Standort Audimax dargestellt. Durch eine systematisch einheitliche Strukturierung unterscheidet sich lediglich der Stromlaufplan am Standort SWG signifikant, da dort keine Rolltore für den Zugang vorhanden sind. Das Steuerungsprogramm für die SPS wurde mit der Software SIEMENS TIA Portal in der strukturierten Sprache SCL entwickelt, um eine zuverlässige und effiziente Steuerung der Systeme sicherzustellen.

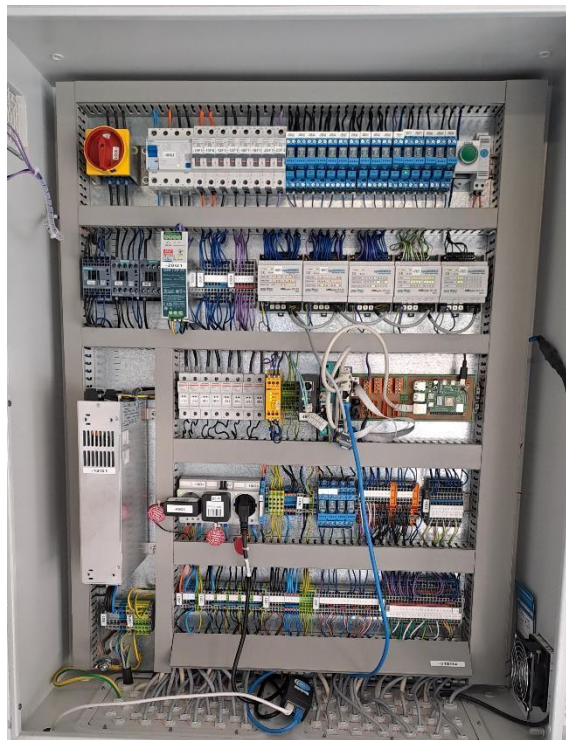


Abbildung 2.3.2 Schaltschrank der Citybox Bahnhof

Für die Kommunikation zu den induktiven Ladesystemen und zu einem Embedded-System, welches neben einer Internetverbindung auch die Anschaltung an das Reservierungs- und Buchungssystem (Backend) realisiert, werden CAN-Bus und Ethernet genutzt. Im Systemschaubild, s. Abbildung 2.3.3, ist die vollständige Kommunikationsinfrastruktur vereinfacht dargestellt.

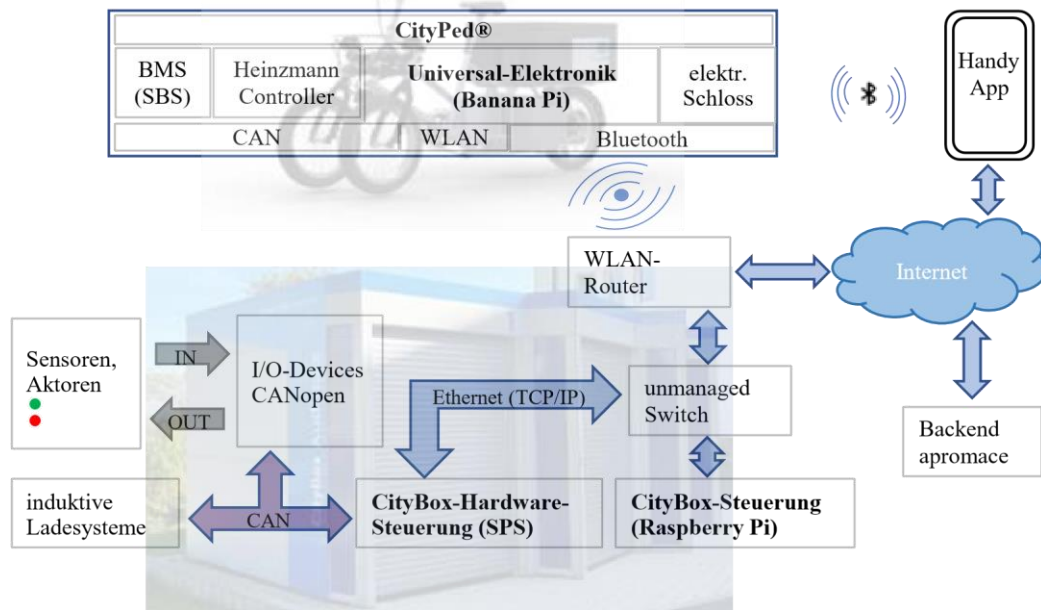


Abbildung 2.3.3: Kommunikationsinfrastruktur des Gesamtsystems

2.3.2 Induktives Ladesystem

Zum automatisierten Aufladen der CityPed® wurde ein stationäres induktives Energieübertragungssystem für die in Abschnitt 2.5.1 benannten Standorte entwickelt.

2.3.2.1 Prinzip und Spezifikation

Grundsätzlich besteht ein kontaktloses Ladesystem aus den Komponenten der ortsfesten Ladeinheit (Primärsystem) und den am Lastenpedelec integrierten Komponenten (Sekundärsystem). In Abbildung 2.3.4 ist das Systemschaubild der realisierten Ladefunktion dargestellt.

Die Erstellung der Spezifikation des Ladesystems erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die Eingangsgrößen, Ausgangsgrößen und die Randbedingungen festgelegt, um ausgehend davon mit Hilfe von analytischen und numerischen Berechnungsverfahren die Systemparameter zu bestimmen. Die Systemparameter der Zielkonfiguration sind in nachfolgender Tabelle 2.3.1 zusammengefasst.

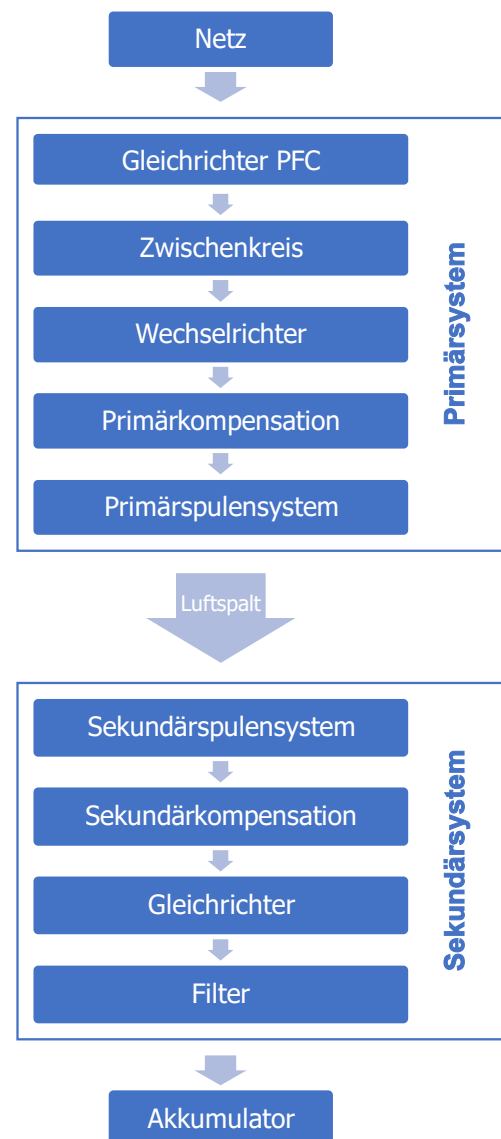


Abbildung 2.3.4: Systemschaubild der Systemkomponenten des induktiven Energieübertragungssystems

Tabelle 2.3.1: Systemspezifikation

Technische Daten	
Eingangsspannung Primärsystem	$\sim 230\text{ V}$
Zwischenkreisspannung	$= 400\text{ V}$
Ausgangsspannungsbereich Sekundärsystem	$= 42\text{ V} \dots 58,8\text{ V}$
Ladestrom	$= 6\text{ A}$
Betriebsfrequenz	86 kHz
Magnetischer Nennluftspalt	10 mm
Spulentopologie	Zirkularspule
Windungszahl Primärspulensystem	57
Windungszahl Sekundärspulensystem	11
Kompensationsanordnung	Reihe - Reihe

Die beiden Ausgangsgrößen Ladespannungsbereich und Ladestrom sind durch den im Lastenpedelec eingesetzten Unipower-Akku [1] der Firma Smart Battery Solutions festgelegt. Dementsprechend liegt die Entladeschlussspannung bei 42 V und die Ladeschlussspannung bei $58,8\text{ V}$. Der empfohlene Ladestrom beträgt 5 A . Die Akkuabschaltung durch das im Akku integrierte BMS erfolgt ab einem Ladestrom größer 12 A . Als Kompromiss aus Akkuehaltbarkeit und Ladezeitoptimierung wird der Ladestrom auf 6 A bemessen.

Die Eingangsgrößen des Ladesystems resultieren aus der maximalen Übertragungsleistung. An den Standorten Audimax und Bahnhof wurden jeweils vier Ladesektionen und am Standort SWG zwei Ladesektionen realisiert. Je Standort ist ein Gleichrichter, welcher für alle Ladesektionen die Zwischenkreisspannung bereitstellt, vorgesehen. Aus Gründen der Beschaffbarkeit und Sicherstellung der Einhaltung geltender EMV-Anforderungen wurde das CSP-3000-400 Schaltnetzteil [2] des Herstellers MEAN WELL mit einer Nennleistung von 3 kW und einer am Ausgang zur Verfügung stehenden Gleichspannung von 400 V ausgewählt. Damit kann ein Parallelbetrieb der verschiedenen Ladesektionen gewährleistet werden. Eingangsseitig wird der Gleichrichter einphasig an das Niederspannungsnetz angeschlossen und es steht eine Anschlussleistung von maximal $3,68\text{ kW}$ bei 16 A zur Verfügung.

Die Betriebsfrequenz des Wechselrichters wurde auf 86 kHz festgelegt und liegt damit innerhalb des Grundfrequenzbereichs von 79 kHz bis 90 kHz gemäß [3], [4]. Dies ermöglicht eine Frequenznachführung innerhalb der Grenzen und ist beispielsweise bei Positionierungsabweichungen erforderlich.

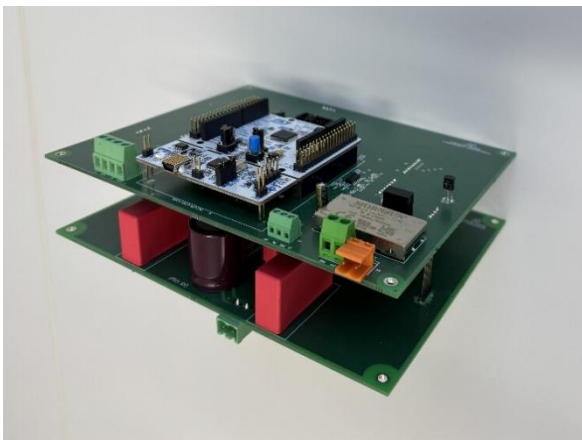
Aufgrund des Luftspaltes ist die magnetische Kopplung der Spulensysteme im Vergleich zum klassischen Transformator vermindert und führt zu einer verstärkten Aufnahme von Blindleistung. Für eine effiziente Energieübertragung ist eine primär- und sekundärseitige Blindleistungskompensation durch kapazitive Elemente erforderlich. Die Verschaltung der Kondensatoren erfolgt jeweils in Reihe zum Primär- und Sekundärspulensystem. Hierbei werden die kompensierten Spulensysteme als Resonanzübertrager bezeichnet. Die Reihen-Reihen-Kompensationstopologie ermöglicht bei primärseitig eingepprägter Spannung ein sekundärseitiges Stromquellenverhalten und ist demnach ideal zum Aufladen des eingesetzten Akkumulators im Konstantstrom-Ladeverfahren geeignet [5].

Die sekundärseitigen Wechselgrößen werden zum Aufladen des Akkumulators mittels passiven Brückengleichrichter gleichgerichtet und anschließend gefiltert.

2.3.2.2 Realisierung Wechselrichter Primärsystem

Die Ausführung der Wechselrichtertopologie kann als U-Topologie oder I-Topologie erfolgen. Im Allgemeinen sind die Schalt- und Leitverluste der U-Wechselrichtertopologie geringer [6], sodass diese Topologie favorisiert und als einphasige Vollbrückenschaltung realisiert wurde.

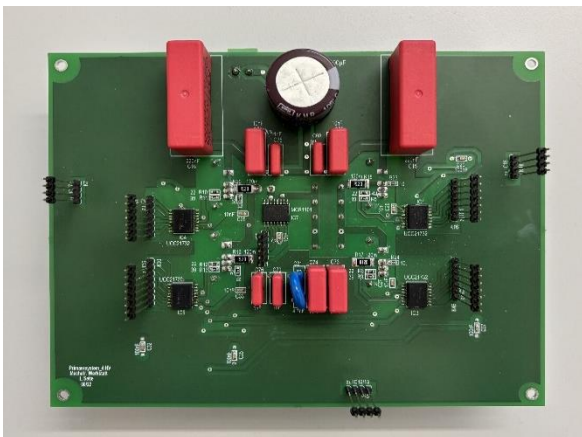
Der Wechselrichter, s. Abbildung 2.3.5, wurde am IET der TUBAF entwickelt. In Anhang A.B1.2 ist der Schaltplan zur Leistungsplatine und in Anhang A.B1.3 und zur Steuerplatine dargestellt. Der letzte Entwicklungsstand des Platinenlayouts ist im Anhang A.B1.4 für die Leistungsplatine und im Anhang A.B1.5 für die Steuerplatine dargestellt. Das Platinenlayout der Wechselrichterplatine wurde durch mehrere Redesigns optimiert. Die Fertigung der Platinen erfolgte durch einen externen Dienstleister. Die Platinenbestückung, die Inbetriebnahme und der Gehäuseeinbau erfolgte am IET.



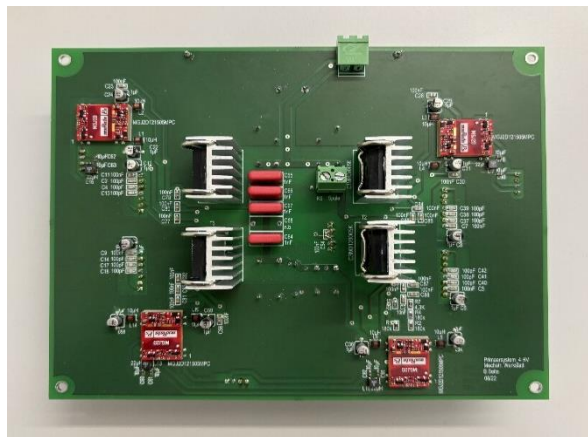
2.3.5a: Montierte Steuer- und Leistungsplatine



2.3.5b: Oberseite Steuerplatine



2.3.5c: Oberseite Leistungsplatine



2.3.5d: Unterseite Leistungsplatine

Abbildung 2.3.5: Wechselrichter

2.3.2.3 Realisierung Spulensysteme

Die Kleinserie der Spulensysteme, s. exemplarisch Abbildung 2.3.6, wurden am IET der TUBAF hergestellt und als runde Flachspulentopologie ausgeführt. Demnach konnte eine geringe Aufbauhöhe gewährleistet und die Komplexität des Wickelprozesses minimiert werden. Zur Reduzierung der Verluste durch Skin- und Proximity-Effekte wurde Kupfer-Hochfrequenzlitze als Wicklungsmaterial eingesetzt.

Entsprechend der Stromparameter wird für die Primärwicklung eine HF-Litze der Dimension 90 x 0,1 und für die Sekundärwicklung 300 x 0,1 vom Hersteller Rudolf Pack GmbH & Co. KG verwendet.

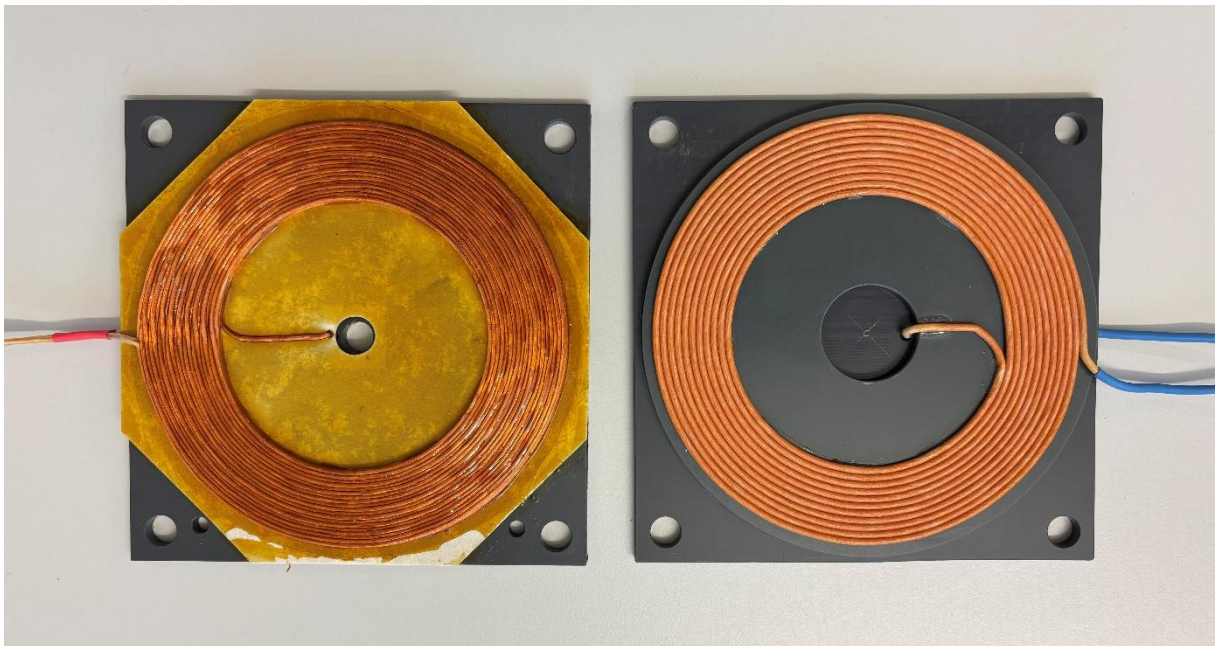


Abbildung 2.3.6: Primärspulensystem (links) und Sekundärspulensystem (rechts)

Die magnetische Flussführung im Primärspulensystem wurde durch den Ferritwerkstoff Manifer 198 [7] des Herstellers Tridelta Weichferrite optimiert. Der Primärspulenträgerrücken setzt sich aus vier Standardkreissegmenten [7] mit einem Durchmesser von 145 mm zusammen. Zur Gewichtsminimierung des CityPed® enthält das Sekundärspulensystem kein Ferrit. Der Sekundärspulenträgerrücken wurde mit äquivalentem Durchmesser aus PVC gefertigt. Die Auslegung der Zielkonfiguration erfolgte mithilfe des Software-Paketes Ansys Electronics Desktop, siehe [8]. Für den geforderten Batterieladestrom von 6 A + 3 % wurde die Windungszahlkonfiguration 57/11 ermittelt. Die Windungszahlkonfiguration resultiert aus einer nach folgenden Kriterien durchgeführten Optimierung:

- Minimierung des sekundärseitigen Spulenträgergewichtes (minimale Kupfermasse der Sekundärspule)
- Maximierung des Übertragungswirkungsgrades

Die Auslegung und Optimierung ist Gegenstand einer geplanten Dissertationsschrift, die 2025 veröffentlicht werden soll.

Als geeignete Montageposition des Sekundärsystems wurde die Heckseite der Transportbox des Lastenfahrrades definiert, s. Abbildung 2.3.7. Die lotrechte Spuleneinbauposition hat den Vorteil gegenüber marktüblichen Ladesystemen, dass Fremdkörpern oder größere Schmutzpartikel aufgrund der Gewichtskraft nach unten fallen und somit den Ladevorgang nicht negativ beeinflussen können.



Abbildung 2.3.7: Transportbox mit integriertem Sekundärsystem des induktiven Ladens, links geschlossen, rechts mit Spulensystem im Deckel

2.3.2.4 Realisierung Gleichrichter Sekundärsystem

Der am IET entwickelte Gleichrichter des Sekundärsystems ist in Abbildung 2.3.8 dargestellt. Die Gleichrichtung wird durch eine ungesteuerte Zweipuls-Brückenschaltung (B2U) realisiert, wobei ein nachgeschalteter Siebkondensator die Glättung der Ausgangsgrößen bewerkstelligt.

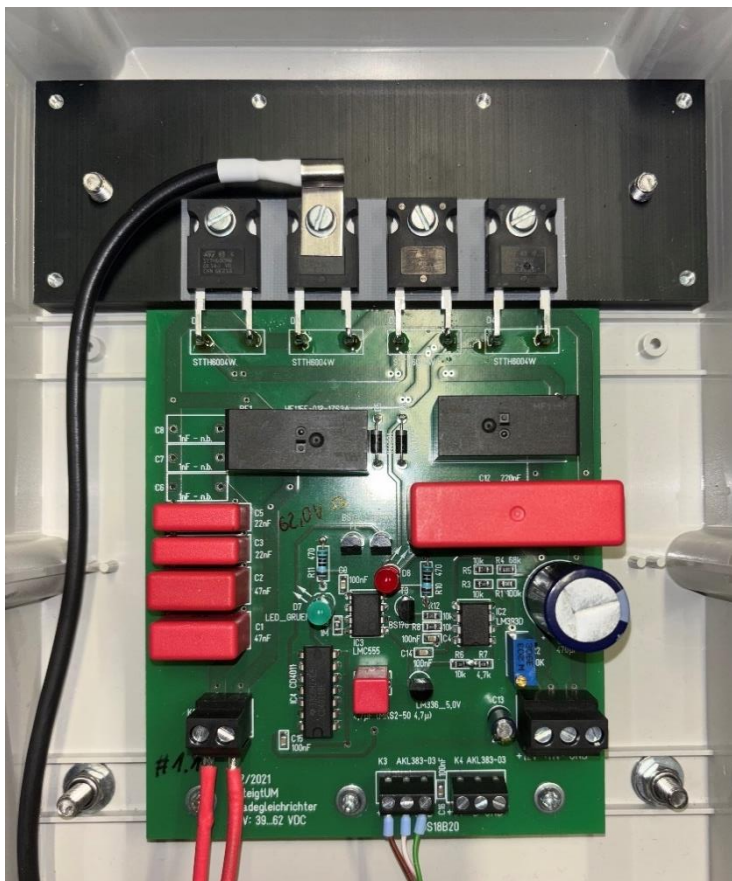


Abbildung 2.3.8: Gleichrichter

Der Schaltplan ist in Anhang A.B1.6 und das Platinenlayout in Anhang A.B1.7 dargestellt.

2.3.2.5 Ladevorgang

Unterhalb einer Klemmenspannung von $U = 58,8\text{V}$ werden die Akkus vollautomatisch geladen. Zum Starten des Ladevorganges wird das Lastenfahrrad rückwärts an das Primärsystem geparkt, sodass sich

Primär- und Sekundärspulensystem fluchtend gegenüberstehen, s. Abbildung 2.3.10. Zum genauen Parken der CityPed® ist auf dem Boden ein Spurführungssystem, s. Abbildung 2.3.9, aufgebracht. So können die CityPed® einfach rückwärts in die Ladestation eingeschoben und final durch einen Heckanschlag einschließlich seitlicher Führung positioniert werden. Dabei detektieren Endschalter die korrekte Parkposition.



Abbildung 2.3.9: Zwei Ladestationen am Standort SWG



Abbildung 2.3.10: Ladeposition CityPed®

2.3.2.6 Test und Feldversuch des induktiven Ladesystems

Zum Funktionstest und Nachweis der Energieübertragungseigenschaften wurde das Ladesystem als Prototyp im Labor, s. Abbildung 2.3.11, aufgebaut. Die messtechnische Datenerfassung erfolgte mit dem Präzisionsleistungsmessgerät LMG 500 der Firma ZES ZIMMER Electronic Systems. Das Messgerät verfügt über eine Bandbreite von DC bis 10 MHz und einer Abtastrate von maximal 3 MS/s. In Abbildung 2.3.12 sind die schaltungsgenauen Abtastpositionen der erfassten Messgrößen dargestellt.

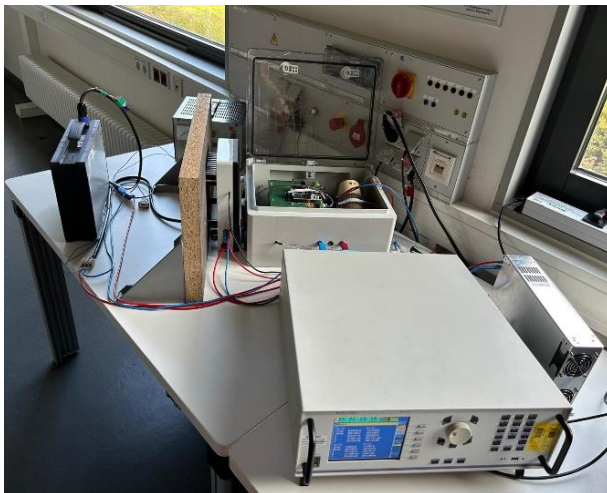


Abbildung 2.3.11: Messaufbau Prototypentest

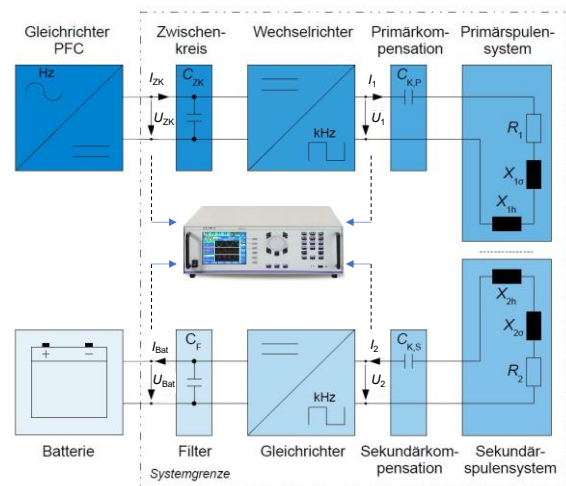


Abbildung 2.3.12: Messposition Strom- und Spannungsabtastung

Die Ergebnisse eines Akkuladevorganges sind in Abbildung 2.3.13 und 2.3.14 dokumentiert. Der Wirkungsgrad des Resonanzübertragers berechnet sich aus

$$\eta_{RÜ} = \frac{P_2}{P_1},$$

und der Gesamtwirkungsgrad nach

$$\eta_G = \frac{P_{\text{Bat}}}{P_{\text{ZK}}}.$$

Wie Abbildung 2.3.13 zeigt, wird durch die eingesetzte Kompensationstopologie ein Ladevorgang bei Konstantstrom gewährleistet. Unter Nennbedingungen wurde ein Wirkungsgrad von 90 % ermittelt.

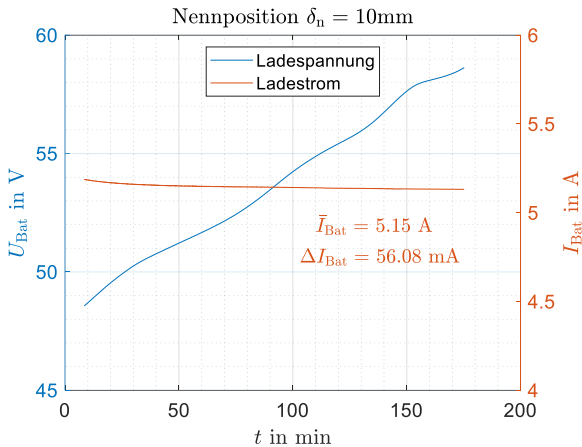


Abbildung 2.3.13: Akkuladekennlinien bei $U_{\text{ZK}} = 350 \text{ V}$

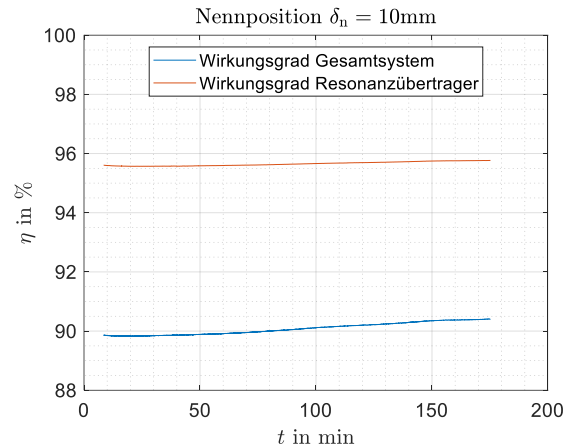


Abbildung 2.3.14: Wirkungsgradkennlinien bei $U_{\text{ZK}} = 350 \text{ V}$

Die für den Betrieb des Reallabors erforderliche EMV-Prüfung des CityPed®-Ladesystems erfolgte am VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut in Offenbach. In Anlage A.B1.8 sind die Ergebnisse dokumentiert. Im Rahmen des Reallabors ist der Betrieb des Prototypensystems zulässig.

2.3.3 Literatur

- [1] Datenblatt Akkumulator Smart Battery Solutions: Spezifikation Unipower light SteigtUM, streng vertraulich
- [2] Datenblatt Schaltnetzteil MEAN WELL CSP-3000 series: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=CSP-3000#1>, letzter Aufruf am 06.12.2024
- [3] DIN EN IEC 61980-3:2023-10 VDE 0122-10-3:2023-10 Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil 3: Besondere Anforderungen für die kontaktlosen Energieübertragungssysteme mit Magnetfeld (IEC 61980-3:2022); Deutsche Fassung EN IEC 61980-3:2022
- [4] ITUR-R SM.2110: Guidance on frequency ranges for operation of non-beam wireless power transmission for electric vehicles, 10/2019
- [5] M. Petersen: Übertrager und Leistungselektronik in induktiven Energieübertragungssystemen zur Ladung von Elektrofahrzeugen. Dissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2016.
- [6] S. H. Stier: IGBT-Schwingkreiswechselrichter hoher Leistung und hoher Frequenz in modularer Bauweise. Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [7] Datenblatt Produktkatalog Tridelta Weichferrite: https://www.tridelta-weichferrite.de/media/33/download/Katalog_TRIDELTA_Weichferrite.pdf, letzter Aufruf am 06.12.2024
- [8] J.P. Vogt; J. Kertzsch: Auslegung eines induktiven Energieübertragungssystems für Lastenpedelecs. In: 3. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik: Kolloquium im Rahmen des 72. BHT – Freiburger Universitätsforum 2021. 1. Auflage, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2021

2.4 Arbeitspaket B2 — Smartphone-Interface

Autoren: Elias Wagner, Lennon Kulke, Bastian Pflöging

Teilprojekt B2 befasst sich mit den interaktiven, digitalen Schnittstellen zum gesamten Verleihsystem. Kernelement bietet dabei die zentrale SteigtUM-App, die als „digitaler Schlüssel“ zum Bike-Sharing und intermodalen Mobilitätskonzept und für die Bereitstellung eines intuitiven und effizienten Nutzererlebnisses konzipiert ist. In den folgenden Abschnitten beschreiben wir die erzielten Ergebnisse der entsprechenden Unterarbeitspakete B2.1 bis B2.7 und (anteilig) B3.1.

Neben den Arbeiten an den Apps für das Verleihsystem entstanden weitere Nebenerkenntnisse durch Abschlussarbeiten, die im Kontext des Projektes betreut worden sind und in Abschnitt 2.8.3 aufgeführt sind. Thematisch befassten sich diese Arbeiten insbesondere mit der Frage, wie interaktive Systeme helfen können, das Mobilitäts Erlebnis von Kleinfahrzeugen wie Fahrrädern, Lastenrädern und e-Scootern zu verbessern bzw. wie digitale Systeme dazu beitragen können, die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen.

2.4.1 Spezifikation und Anforderungen an die zentrale Smartphone-App

Gemeinsam mit den Projektpartnern der TU Chemnitz wurden die Anforderungen an die Smartphone-App und deren Spezifikation in einem iterativen Prozess entwickelt und im weiteren Verlauf der Anwendungsentwicklung kontinuierlich angepasst, angelehnt unter anderem an den ISO9241:210-Prozess zur mensch-zentrierten Entwicklung [1].

Wesentliche Anforderungen an die zentrale Smartphone-App leiten sich einerseits aus den grundlegenden Anforderungen an interaktive Systeme im Hinblick auf Usability und User Experience ab [2-4], andererseits spezifische Anforderungen aus dem Projektkontext. Die grundlegenden Anforderungen umfassen hohe Benutzerfreundlichkeit, schnelle Erlernbarkeit und zufriedenstellende Interaktionen, die den Erfolg und die Akzeptanz des Dienstes fördern sollen. Die App-Entwicklung orientiert sich insbesondere an folgenden grundlegenden Usability-Zielen:

- **Effektivität:** Die App stellt sicher, dass Nutzer problemlos auf relevante Funktionen wie Reservierung, Buchung, Ausleihe, Parken und Rückgabe zugreifen können, um ihre Mobilitätsbedürfnisse zu erfüllen.
- **Effizienz:** Optimierte Prozesse minimieren den Zeitaufwand, indem Funktionen wie die Sofortbuchung, automatische Wahl eines geeigneten Zeitfensters für die Buchung und eine Schnittstelle zur intermodalen Buchung mittels ÖPNV-Apps in die App integriert sind.
- **Einfachheit der Nutzung:** Ein benutzerfreundliches Onboarding und intuitive Navigationsstrukturen sollen es auch neuen Nutzern ermöglichen, die App mühelos zu bedienen. Die einfache Erlernbarkeit steht dabei im Vordergrund, um die Hemmschwelle für die Nutzung niedrig zu halten. Die App orientiert sich an aktuellen Designprinzipien für Smartphone-Anwendungen.

Ein positiver Gesamteindruck ist entscheidend, um Nutzer langfristig an die App zu binden. Hierzu werden Methoden aus der Forschung im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion einbezogen, die auf der Einbeziehung von Nutzererfahrungen und -erwartungen basieren. Emotionale Faktoren, wie das Gefühl von Zuverlässigkeit und Kontrolle über den Verleihprozess, werden gezielt unterstützt, etwa durch die Möglichkeit zur Vorreservierung, Anzeige der Echtzeitverfügbarkeit von Fahrzeugen, und eine schrittweise Führung durch den Ausleih- und Rückgabeprozess.

Im Projektkontext soll die SteigtUM-App eine nahtlose Verbindung zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern (z. B. Fahrrad, E-Scooter, ÖPNV) bieten, um intermodale Reisen mit einem positiv

besetzten Erlebnis zu ermöglichen. Die Integration mit externen Ticket- und Routenplanungsservices ermöglicht eine vorausschauende Reiseplanung und Flexibilität, um auf unvorhergesehene Änderungen zu reagieren. Dies trägt zur Zufriedenheit der Nutzer bei, da sie die Mobilitätskette ohne Unterbrechungen oder zusätzliche Buchungsschritte durchlaufen können.

Abgrenzung zu anderen „Mobility-as-a-Service“- (MAAS) Plattformen und -Apps

Das SteigtUM-Projekt bietet ein flexibleres Verleihkonzept als andere Lastenrad-/Mikromobilitätsdienste, die oftmals nur eine Sofortausleihe (typische Dienste wie Call-a-Bike) oder eine stunden- bzw. tageweise Buchung erlauben. Zudem bietet SteigtUM unterschiedliche Fahrzeuge und eine intermodale Kombination, während andere MAAS-Plattformen oft nur die Verwendung eines Fahrzeugtyps ermöglichen. Durch einen großzügigen Vorreservierungszeitraum von bis zu zwei Tagen mit flexiblen Stornierungsmöglichkeiten bietet die SteigtUM-App Nutzenden Planbarkeit und Verlässlichkeit und ermöglicht eine faire Verteilung der Fahrzeuge auf alle Nutzer, trotz eines verhältnismäßig kleinen Fuhrparks. Die Echtzeit-Verfügbarkeitsanzeige hilft dabei, den Nutzenden Alternativen vorzuschlagen falls für ihren gewünschten Buchungszeitraum kein Fahrzeug zur Verfügung steht. Die App unterstützt die Buchung, Ausleihe und Benutzung von E-Lastenrädern und Lasten-E-Scootern und berücksichtigt dabei die besonderen Anforderungen des SteigtUM-Projekts. Das Nutzerinterface wurde mit diesem Wissen gestaltet und bietet so für Nutzer eine vertraute, vom Fahrzeugtyp unabhängige Nutzeroberfläche. Als zentrale Schnittstelle des SteigtUM-Projektes dient die App außerdem als Forschungsinstrument. Sie spielt den Nutzer gezielt Umfragen aus und unterstützt beim Sammeln von Nutzungsstatistiken.

2.4.2 Entwicklung der Apps zur Bedienung der Mikromobile und des Park- & Ladesystems

Ziel der Teilprojekte B2.2 und B2.3 war die Entwicklung der Nutzungsschnittstellen für die Mikromobile sowie das Park- und Ladesystem. Während die Entwicklung der Nutzungsschnittstellen auf zwei Teilprojekte (Mikromobile, Park- und Ladesystem) aufgeteilt war, ist das Ergebnis eine einheitliche App, die die verschiedenen Teilfunktionen integriert und damit die App zum zentralen Bedienelement des Verleihsystems macht. Neben einer parallel geführten Entwicklung der SteigtUM-Apps für Endanwender:innen sowohl für Android- und iOS-Telefone stellte sich früh heraus, dass auch eine Anwendung für die Betreuung des Gesamtsystems notwendig ist. Daher wurde eine zweite Android-App, die SteigtUM-Admin-App entwickelt, die den verschiedenen Akteuren die Verwaltung der einzelnen Funktionen und Systemkomponenten ermöglicht.

2.4.2.1 SteigtUM-App

Zur Nutzung der Mikromobile inklusive Infrastruktur wurde eine nutzerzentrierte, iterative Entwicklung zweier nativer Apps für iOS- und Android-Geräte durchgeführt, die als zentrale Schnittstelle für den Nutzer alle Funktionalitäten realisiert. Dies umfasst insbesondere die folgenden Use Cases, die im weiteren Text beschrieben werden: Buchung und Reservierung, Ausleihe, Parken, Rückgabe und Anwender:innen-Support. Um die aktuelle Nutzungssituation zu berücksichtigen, berücksichtigen die Apps die Einstellungen zum Hell-/Dunkel-Modus des Telefons, so dass das Interface der App entweder in hellen (z. B. Abbildung 2.4.1) oder in dunklen Farben (z. B. Abbildung 2.4.3) erscheint.

Use Case: Buchung / Reservierung

Mit der App als zentralen Schlüssel zum Verleihsystem können die Nutzenden verschiedene Fahrzeuge buchen. Wie in der Buchungsstrecke in Abbildung 2.4.1 dargestellt, wird die Buchung in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird dem Nutzenden die Möglichkeit geboten, den Typ des gewünschten Fahrzeugs zu wählen. Im Anschluss kann entschieden werden, ob die man das Fahrzeug sofort ausleihen oder für später reservieren möchte. Für eine bessere Planung und Übersicht besteht in beiden Fällen die

Möglichkeit, Daten zur Verfügbarkeit der Fahrzeuge an der gewählten CityBox (Ausleihstandort) einzusehen, welche vom Backend abgerufen werden. Für genauere Details zur Zeitplanung und Buchungslogik verweisen wir auf die Ausführungen des Projektpartners Apromace. Eine Reservierung ist bis zu zwei Tage in der Zukunft möglich, jede Buchung muss dabei vollständig im Zeitraum der Betriebszeiten von derzeit 07:00 bis 22:00 Uhr liegen. Nach Bestätigung der Eingabe wird dem Nutzenden eine zusammenfassende Übersicht angezeigt. Die bestehende Reservierung wird im Anschluss auf dem Kartenbildschirm angezeigt und kann von dort aktiviert (zum Verleihbeginn) oder storniert werden. Im Falle einer sofortigen Ausleihe kann diese im Anschluss sofort ausgeführt werden und die Entnahme des Fahrzeugs begonnen werden.

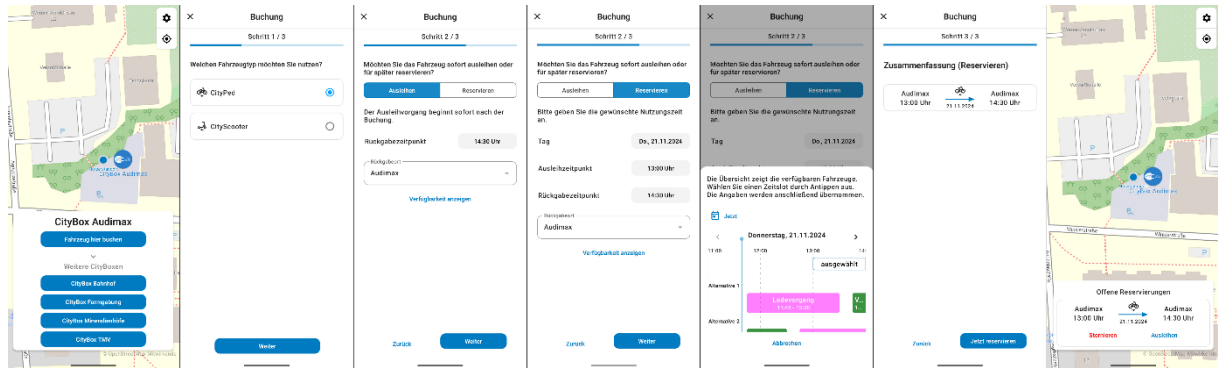


Abbildung 2.4.1: Darstellung der Buchungsschritte für eine erfolgreiche Reservierung, von links nach rechts: Wahl der CityBox, Wahl des Fahrzeugtyps, Formular zur Sofortausleihe, Formular zur Reservierung, Anzeige der Verfügbarkeit, Zusammenfassung der Buchung, Karte mit offener Reservierung

Use Case: Fahrzeugausgabe

Damit den Nutzenden ihr gebuchtes Fahrzeug ausgehändigt werden kann, wird dieser durch einen mehrschrittigen Prozess (s. Abbildung 2.4.2) geführt. Im ersten Schritt des Ausgabeprozesses wird durch den Nutzenden durch die App das Tor der entsprechenden Sektion der CityBox geöffnet. Ist dieses offen, kann die Sektion betreten werden und das Fahrzeug entnommen werden. Je nach Fahrzeugtyp unterscheidet sich der Prozess des Entnehmens aus der Sektion minimal. Alle notwendigen Schritte werden dem Nutzenden durch entsprechende Texte kommuniziert. Die Entnahme muss bestätigt werden. Das Tor der Sektion wird am Ende durch den Nutzenden wieder (automatisch) geschlossen.

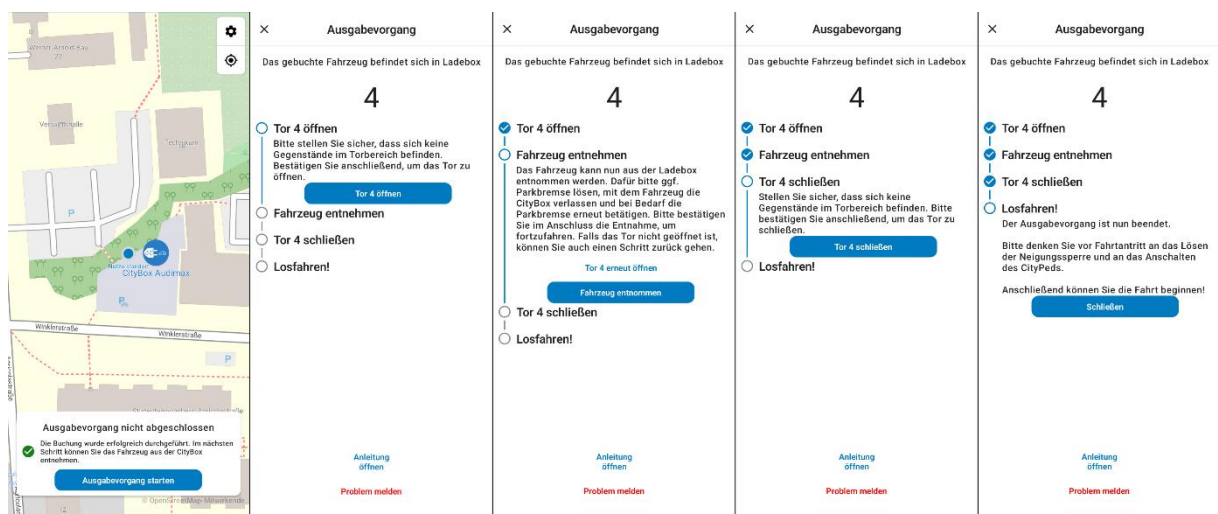


Abbildung 2.4.2: Darstellung der Ausleihschritte eines CityPed®, von links nach rechts: Starten des Ausgabeprozesses, Öffnen des Sektion-Tores, Bestätigung der Entnahme, Schließen des Tores, Abschließen des Ausgabeprozesses.

Use Case: Parken

Nutzenden können das ausgeliehene Fahrzeug unterwegs parken, um beispielsweise Einkäufe zu tätigen. Diese entsprechende Option wird bei laufender Ausleihe auf dem Kartenbildschirm angezeigt (s. Abbildung 2.4.3). Im Falle eines Parkvorganges verbindet sich das Mobilgerät mit dem Fahrzeug via Bluetooth Low Energy und dem Nutzenden wird die Kontrolle über das integrierte Speichenschloss gegeben, um dieses zu verriegeln. Zur Fortsetzung der Fahrt wird das Schloss in ähnlicher Form entriegelt. Da das Speichenschloss durch Ventil oder Speichen des Rades blockiert sein könnte, gibt die App die Möglichkeit das Schloss erneut zu öffnen oder zu schließen, unabhängig des detektierten Zustands des Schlosses.

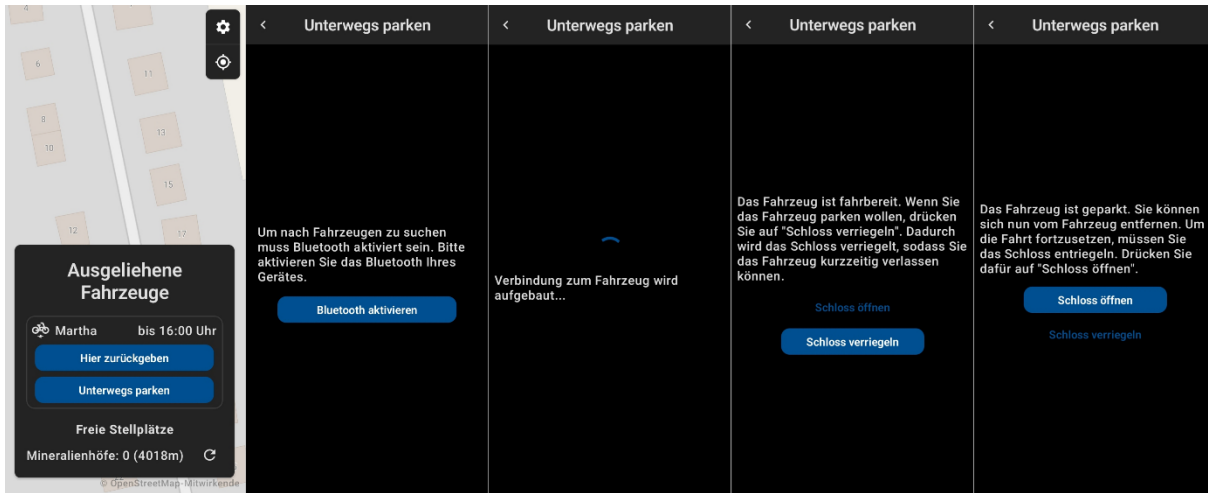


Abbildung 2.4.3: Darstellung der Steuerung des Speichenschlosses eines CityPed®, App im Dark-Mode, von links nach rechts: Darstellung der Ausleihe auf dem Kartenbildschirm, Aktivieren der Bluetooth-Funktion des Smartphones, Verbindungsaufbau mit dem Schloss, Schloss öffnen, Schloss geschlossen.

Use Case: Rückgabe

Eine Rückgabe des Fahrzeuges ist jederzeit möglich, sollte aber spätestens zum vorher angebenen Rückgabezeitpunkt erfolgen. Dies Rückgabe wird ebenfalls bei laufender Ausleihe über den Kartenbildschirm initialisiert. Dem Nutzenden wird vor Beginn des eigentlichen Rückgabevorganges eine kurze Zusammenfassung seiner Ausleihe angezeigt. Der Prozess der Rückgabe (s. Abbildung 2.4.4) gleicht dem Vorgang der Ausgabe in vielen Punkten. Dem Nutzenden wird auch hier der Ablauf mit ausführlichen Texten kommuniziert. Sobald das Fahrzeug erfolgreich abgestellt und das Tor wieder geschlossen ist, ist die Rückgabe erfolgreich abgeschlossen und die Ausleihe beendet.

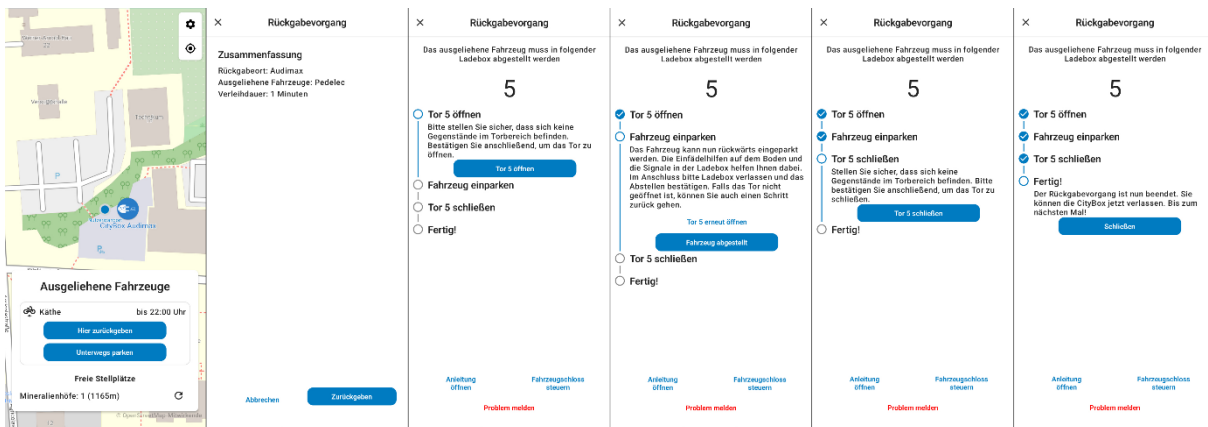


Abbildung 2.4.4: Darstellung des Rückgabevorgangs, von links nach rechts: Darstellung der Ausleihe auf dem Kartenbildschirm, Zusammenfassung der Ausleihe inkl. Initiierung der Rückgabe, Öffnen des Sektion-Tores, Bestätigung der korrekten Abstellung, Schließen des Tores, Beenden des Rückgabevorgangs.

2.4.2.2 Admin-App

Mit der Admin-App wurde die Verleihplattform um Funktionalitäten erweitert, welche die Administration des Systems durch dessen Betreiber ermöglicht. Die App bietet einen Zugriff auf relevante Informationen des Systems und erlaubt die Steuerung einzelner Komponenten des Systems direkt auf dem Smartphone. Unter Einbindung der am Betrieb des Systems beteiligten Projektpartner wurde ein Konzept entwickelt, um durch die Admin-App Zugriff auf die einzelnen Systemkomponenten zu erhalten und damit notwendige Aufgaben zu Wartung und Verwaltung möglichst reibungslos und vor Ort durchzuführen. In einem iterativen Prozess wurden Wünsche und Verbesserungen seitens der internen Nutzenden umgesetzt.

Abbildung 2.4.5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Funktionen der Admin-App: Die Admin-App umfasst einerseits Funktionen zum Fahrzeug-Service, bei welchem das Management aller Fahrzeuge im Vordergrund steht. Das Wartungspersonal besitzt damit die Möglichkeit, Informationen zu jedem Fahrzeug einzusehen, den Status zu aktualisieren, Fahrzeuge zur Wartung aus den Boxen zu entfernen und im Anschluss wieder in Betrieb zu nehmen. Ebenso ist eine Verwaltung der CityBoxen über die Admin-App möglich. So können detaillierte Informationen wie die momentanen Belegungen der Sektionen für jede Box abgerufen werden oder spezifische Befehle an die Boxen gesendet werden. Außerdem unterstützt die Admin-App die projekteigene Anwender-Hotline, die im Falle von Problemen vom Nutzenden kontaktiert werden kann. Dafür ist es den Mitarbeitenden möglich, Buchungsdetails der Nutzenden (unter Mitteilung der Nutzerkennung) einzusehen und eine erweiterte Kontrolle über die Systemkomponenten auszuüben, um das Problem möglichst schnell und auch aus der Ferne zu lösen.

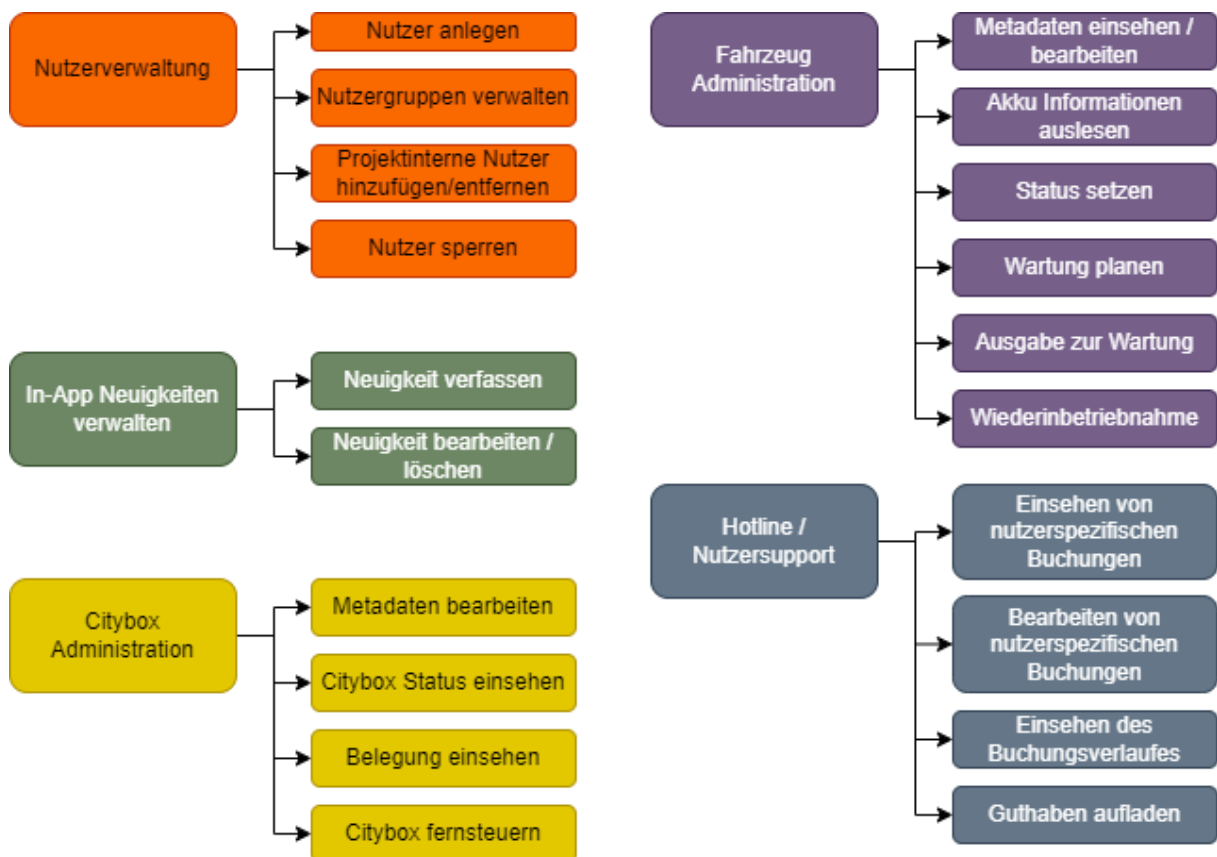


Abbildung 2.4.5: Funktionsübersicht der wesentlichen Funktionen der Admin-App.

Nutzerverwaltung

Die Admin-App wird von allen am Realbetrieb beteiligten Partnern verwendet. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Funktionen und somit die Notwendigkeit, unterschiedlichen Nutzergruppen einen unterschiedlichen Funktionsumfang zur Verfügung zu stellen. Eine Einschränkung der möglichen Aktionen eines Nutzers wird über die Zugehörigkeit zu einer Nutzergruppe erreicht. Die Admin-App stellt derzeit folgende Nutzergruppen bereit:

- **Super Administrator:** Verfügt über alle Rechte und ist in der Lage andere Nutzerkonten zu erstellen, bearbeiten und zu löschen.
- **Administrator:** Kann Fahrzeuge sowie CityBoxen administrieren und ist in der Lage Buchungen einzusehen, zu bearbeiten und zu stornieren.
- **Service CityBox (bzw. IET):** Kann Fahrzeuge sowie CityBoxen administrieren.
- **Service Fahrzeuge (bzw. IMKF):** Kann lediglich Fahrzeuge administrieren und damit verwandte Aktionen in der CityBox auslösen.
- **Hotline:** Kann sowohl Fahrzeug als auch CityBox fernsteuern, sowie nach Eingabe einer Nutzerkennung dessen aktuellen Buchungen und den groben Buchungsverlauf einsehen. Laufende Buchungen können außerdem storniert und der Rückgabevorgang ferngesteuert werden.

Die Nutzerverwaltung stellt die notwendigen Werkzeuge bereit, um Nutzer der Admin-App zu verwalten. So ist es möglich neue Nutzer anzulegen und einer Gruppe zuzuweisen. Bereits angelegte Nutzer können eingesehen, ihr Passwort überschrieben, ihre Gruppe neu zugewiesen und gelöscht werden. Um Nutzungsdaten von projekt-internen Nutzern besser herausfiltern zu können, besteht in der Nutzerverwaltung die Möglichkeit, Nutzer als projektintern zu registrieren. Über die Funktion „Gesperrte Nutzer“ können Nutzerkennungen für eine beliebige Zeit gesperrt werden und damit von Buchungen auszuschließen.

Neuigkeiten verwalten

Über diese Funktion (s. Abbildung 2.5.6) kann der In-App News-Feed bearbeitet werden. Die In-App Neuigkeiten sind für jeden Nutzer sichtbar. Über die Admin-App können neue Posts erstellt und bestehende bearbeitet sowie gelöscht werden. Während der Bearbeitung besteht die Möglichkeit eine Vorschau dieser Meldung anzuzeigen. Der News-Feed unterstützt Formatierungen mittels Markdown.

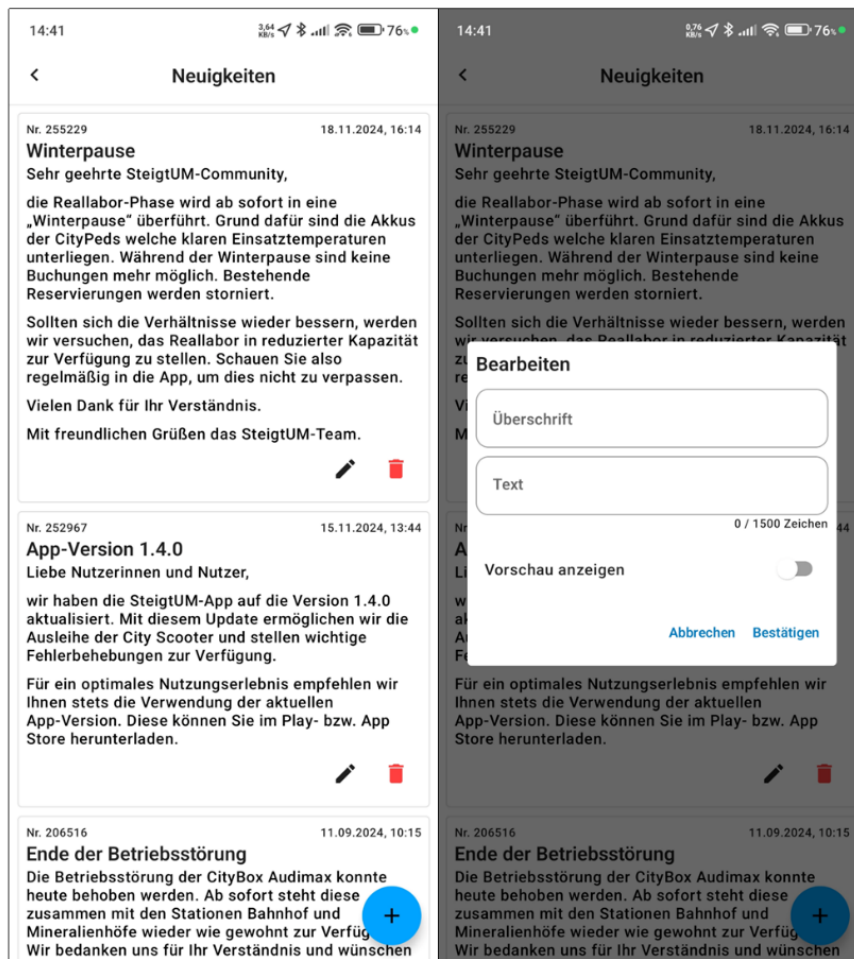


Abbildung 2.5.6: Darstellung der Neuigkeiten. Von links nach rechts: Liste aktueller Meldungen im News-Feed, Eingabemaske zur Erstellung einer neuen Neuigkeit.

Fahrzeug-Service

Über den Fahrzeug-Service (s. Abbildung 2.4.7) lassen sich alle im Backend hinterlegten Fahrzeuge auflisten. In dieser Liste werden Name, ID, aktueller Status, Anzahl der offenen Buchungen, der zuletzt übermittelte Ladestand, die zuletzt bekannte CityBox und die nächste CityBox sowie der Standort innerhalb der nächsten CityBox. Über die Anwahl eines Fahrzeuges werden dessen Optionen geöffnet. Nutzer der Gruppe Super Administrator und Administrator können außerdem neue Fahrzeuge anlegen. Die Fahrzeug Optionen bieten detailliertere Informationen zum Fahrzeug und dessen Buchungen. Außerdem stehen, je nach Nutzergruppe folgende administrative Funktionen zur Verfügung:

- Setzen des Status (Aktiv, Wartung, Deaktiviert)
- Geführte Ausgabe zur Wartung (ähnlich dem regulären Ausleihvorgang)
- Geführte Wiederinbetriebnahme (ähnlich dem regulären Rückgabevorgang)
- Fahrzeug umbenennen
- Fahrzeug verschieben
- Fahrzeug ausbuchen
- Wartung planen
- Fahrzeug löschen

Zudem werden aktuelle Buchungen des Fahrzeuges angezeigt. Je nach Nutzergruppe können diese außerdem auf ein anderes Fahrzeug umgebucht oder storniert werden.

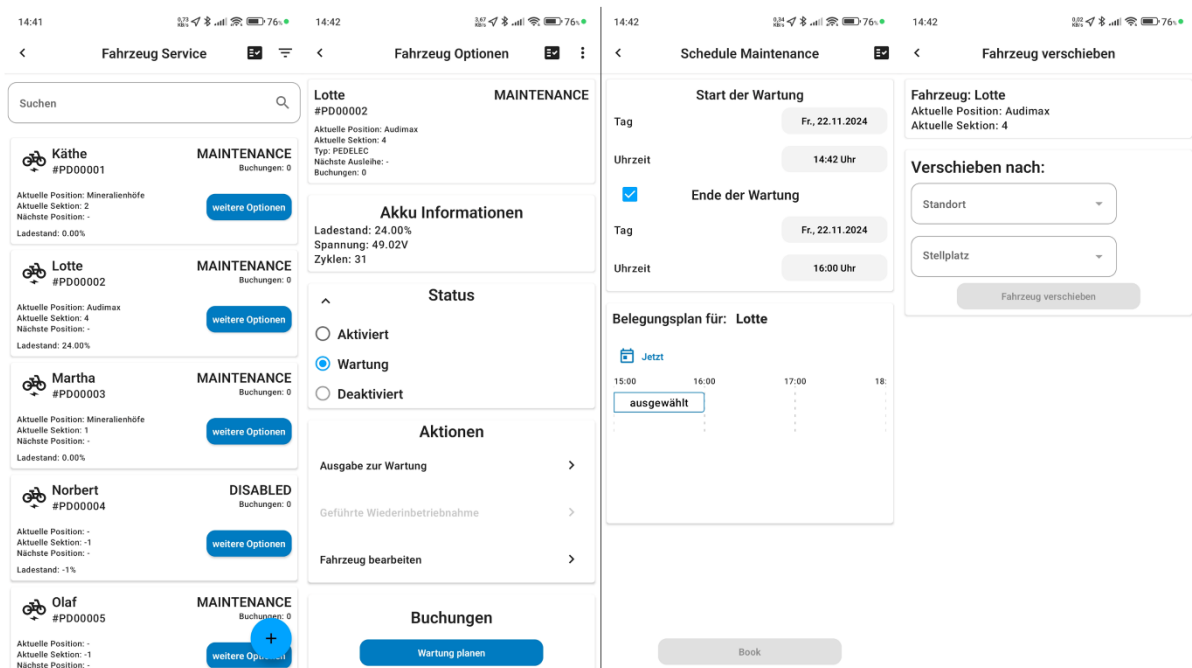


Abbildung 2.4.7: Darstellung der Fahrzeugverwaltung. Von links nach rechts: Liste aller Fahrzeuge, Fahrzeugdetails des CityPad® Lotte, Planung eines Wartungszeitraums, Änderung des Standortes des Fahrzeugs.

CityBox-Verwaltung

Über die CityBox-Verwaltung (s. Abbildung 2.4.8) können alle im Backend registrierten CityBoxen angezeigt und verwaltet werden. In einer Liste wird der Name der CityBox, der aktuelle Status und die Sichtbarkeit für Ausleihkunden angezeigt. Außerdem wird die Anzahl der geparkten Fahrzeuge und die Anzahl der freien Ladeplätze angezeigt. Durch Anwahl der jeweiligen CityBox gelangt der Nutzer zu den CityBox-Optionen. Je nach Nutzergruppe stehen dort folgende Optionen zur Verfügung:

- Umbenennen der CityBox
- Anpassen der Standortinformationen
- Anpassen der Sichtbarkeit für reguläre Nutzer

Für jeden Stellplatz innerhalb der CityBox wird die aktuelle Belegung, der Status des Zugangstors, Informationen zum Status der SPS und Informationen des jeweils geparkten Fahrzeugs angezeigt. Diese umfassen unter anderem den BMS- und Speichenschloss-Status. Über einen Button „Weitere Informationen“ lässt sich eine Auflistung aller geplanten Belegungen der Sektion anzeigen. Für jede Sektion besteht die Möglichkeit der Fernsteuerung folgender Funktionen:

- Tor öffnen / schließen
- Speichenschloss öffnen / schließen
- BMS-Status ändern
- Vorkonfigurierte Befehle an die SPS senden
- Bearbeiten des Section Typs (Pedelec / Scooter)
- Aktivieren / Deaktivieren der Section

Das Anlegen weiterer CityBoxen ist innerhalb der App nicht vorgesehen.

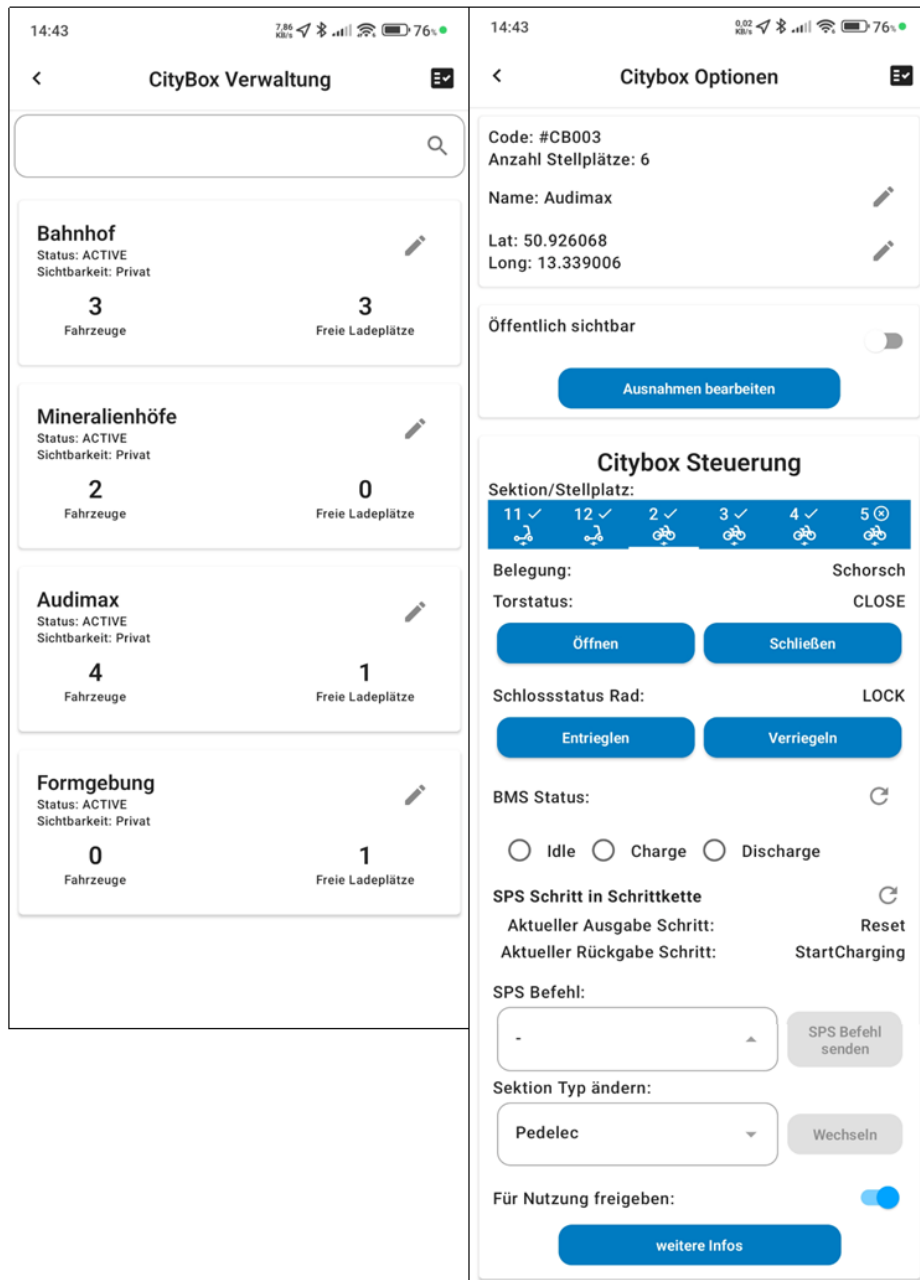


Abbildung 2.4.8: Darstellung der CityBox Verwaltung. Von links nach rechts: Liste aller CityBoxen, Verwaltung der CityBox „Audimax“.

Hotline

Über den Hotline-Bereich der Admin-App (s. Abbildung 2.4.9) kann nach Eingabe einer Nutzerkennung die aktuellen Buchungen des Nutzers eingesehen werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Buchung zu bearbeiten, den Rückgabevorgang fernzusteuern und die Buchung zu stornieren. Außerdem ist eine Einsicht in das Guthaben und einen vereinfachten Buchungsverlauf des Nutzers möglich. So können Hotline-Mitarbeitende Fragen zur Abrechnung klären und bei Bedarf Guthaben gutschreiben. Neben diesen nutzerspezifischen Aktionen lassen sich Funktionen zur CityBox-Verwaltung und zum Fahrzeugservice aus dem Hotline-Menü öffnen.

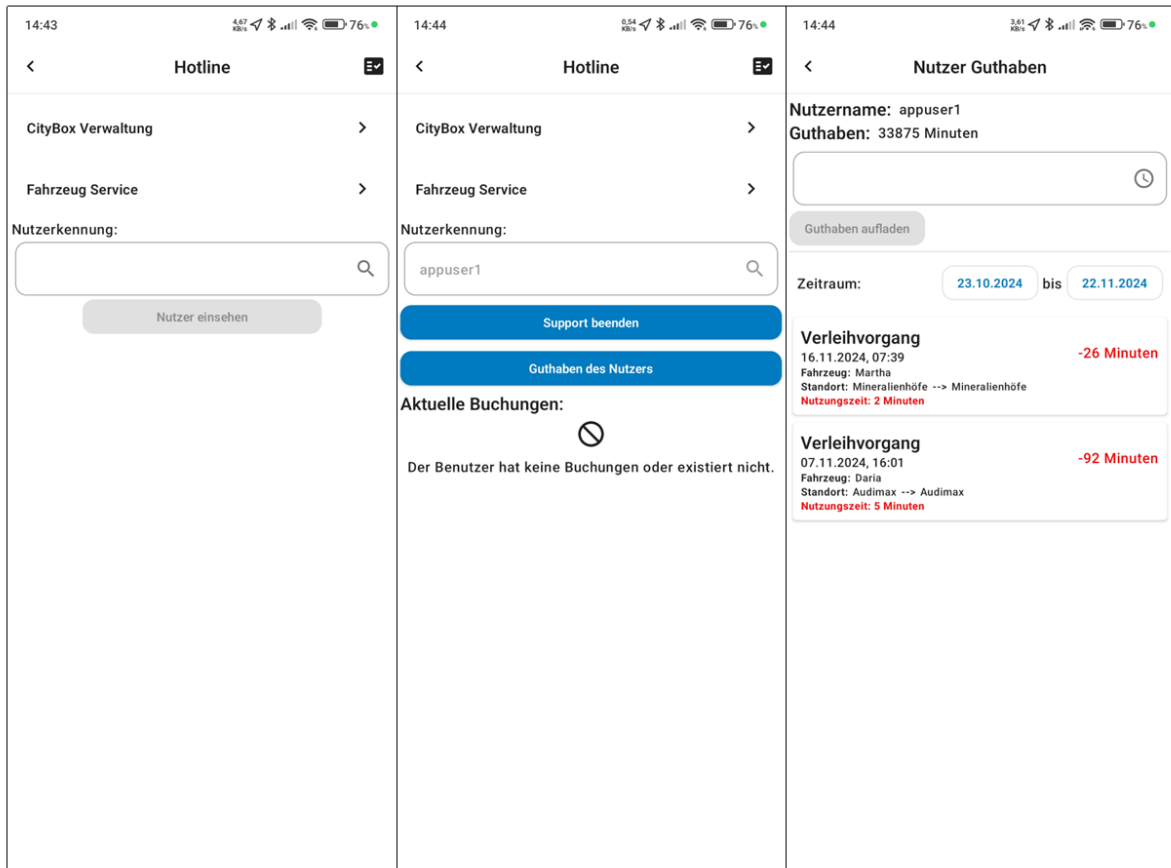


Abbildung 2.4.9: Darstellung des Hotline Bereichs. Von links nach rechts: Hotline Bereich ohne eingegebene Nutzerkennung, Hotline Bereich nach Eingabe einer Nutzerkennung (in diesem Fall ohne aktive Buchung), Vereinfachter Buchungsverlauf des Nutzers inkl. Der Möglichkeit Guthaben aufzuladen.

Zusätzliche Funktionen

Zusätzlich zu den genannten Funktionen besteht die Möglichkeit Freischaltcodes abzurufen, mit denen es Projektbeteiligten möglich ist, im Bedarfsfall (z. B. bei Buchungsproblemen) eine Umfrage der öffentlichen App einmalig zu überspringen. Dies ist notwendig, wenn eine Buchung fehlerhaft abgeschlossen wurde oder es anderweitig nicht zur Fahrt gekommen ist. Zudem können projektinterne Nutzende sich mit einem Code freischalten, um dauerhaft von den Befragungen ausgeschlossen zu werden.

2.4.3 Entwicklung der Nutzungsschnittstellen für die intermodale Nutzung und Buchung

Zur Realisierung der intermodalen Verknüpfung des SteigtUM-Systems mit dem ÖPNV-Angebot ist ein Hauptanwendungsfall die Verknüpfung von Bike-Sharing und ÖPNV-Nutzung. Um ggfs. eine Kombination mit verschiedenen Planungs-Apps, eine Trennung der Buchungs- und Zahlungsprozesse und eine separate Nutzung der Ausleihfunktionen zu ermöglichen, wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern entschieden, für die intermodale Anbindung in der SteigtUM-App eine Schnittstelle bereitzustellen, welche die Integration in andere Mobilitäts- und ÖPNV-Apps ermöglicht. Diese Integration wurde mit der SteigtUM-Routing-App demonstriert, die vom Projektpartner Projektionisten GmbH umgesetzt wurde. Nutzer haben so die Möglichkeit die Buchung von ÖPNV-Tickets zusammen mit SteigtUM Fahrzeugen nahtlos durchzuführen.

Die Umsetzung der Schnittstelle erfolgte mittels Deeplink-Verknüpfung der beiden Apps für Mikromobilbuchungen (SteigtUM-App) und ÖPNV-Auskünfte und -Buchungen (SteigtUM-Routing-App) wie

in Abbildung 2.4.10 dargestellt. Eine Deeplink-Verknüpfung ist eine gängige Methode Nutzende aus einer App A nahtlos in eine andere App B zu leiten. Dabei ruft App A eine plattformspezifische URI (Uniform Resource Identifier) auf wodurch die App B geöffnet wird. Zusätzliche Parameter innerhalb der URI dienen dem Informationsaustausch zwischen den Apps und ermöglichen App B individuelle Inhalte dem Nutzer anzuzeigen. Hat der Nutzer App B noch nicht installiert, so wird er automatisch zum entsprechenden Store-Eintrag geleitet.

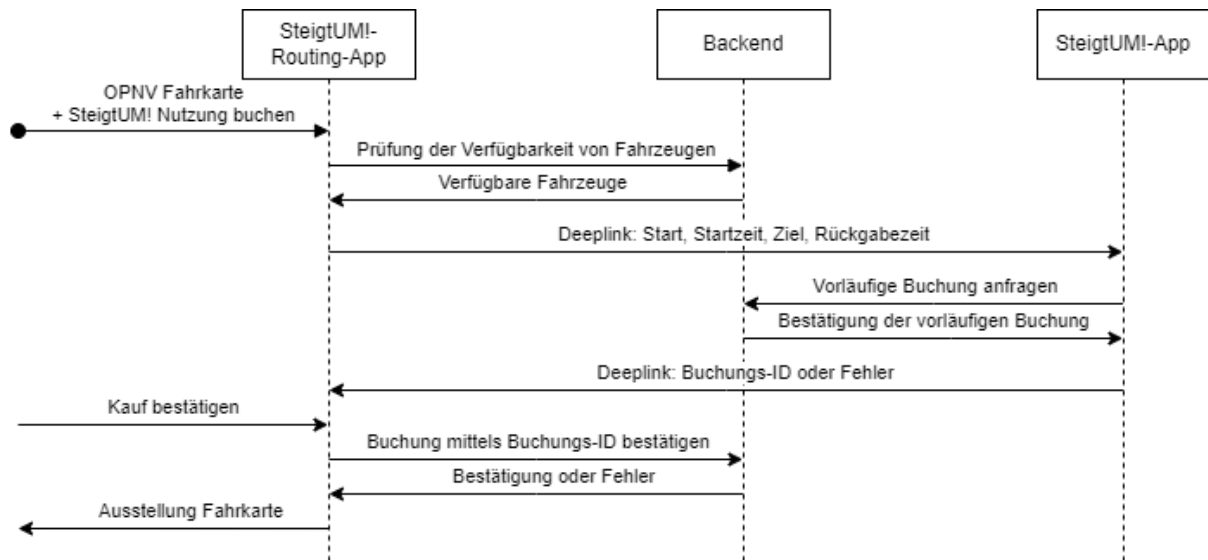


Abbildung 2.4.10: Darstellung des Intermodalen Buchungsprozess mittels Deeplink am Beispiel der SteigtUM-Routing-App.

Im konkreten Fall einer intermodalen Reiseplanung beginnt der Nutzer seine Planung in der ÖPNV-App, die dann z. B. eine Route inklusive Teilstrecke auf einem CityPed® anzeigt. Nach einer Auswahl der Verbindung zur Buchung prüft die ÖPNV-App die Verfügbarkeit von SteigtUM-Fahrzeugen mittels Abfrage des SteigtUM-Backends und initiiert die Mikromobil-Buchung über die SteigtUM-App mittels Deeplink. Durch den Deeplink werden Informationen über die Buchung an die SteigtUM-App übermittelt, die daraufhin in den Vordergrund kommt – mit vorausgefüllten Daten zur Reservierung. Die eigentliche Reservierung des Fahrzeugs erfolgt dann über die SteigtUM-App. Wurde eine Reservierung erstellt erfolgt über einen weiteren Deeplink ein automatischer Rücksprung zur ÖPNV-App. Dort muss er innerhalb von 10 Minuten die Fahrkartenbuchung finalisieren. Die ÖPNV-App bestätigt dem SteigtUM-Backend eine erfolgreiche Fahrkartenbuchung und fixiert damit die bis dahin vorläufige Reservierung des Mikromobils.

2.4.4 Entwicklung des Human-Machine-Interfaces für die Community-Logistik

Die von der Professur Sozialpsychologie der TU Chemnitz aufgestellten Varianten einer möglichen Community-Logistik wurden von selbiger in Interviews untersucht. Im Ergebnis dieser Untersuchung konnte trotz positiver Grundeinstellung gegenüber dem Konzept kein grundlegender Bedarf in Freiberg eruiert werden. Deshalb fanden keine Untersuchungen konkreter Implementierungen hierzu im Real-labor statt.

2.4.5 Fortlaufende UX- und Usability-Untersuchungen, Weiterentwicklung der App

Um fortlaufende Usability-Evaluierungen zu ermöglichen, wurden In-App-Umfragen in die SteigtUM-App integriert. Sowohl rund um den ersten Verleihprozess sowie regelmäßig nach Beendigung einer Fahrt konnten damit durch die Projektpartner (TUC) fortlaufend Umfragen durchgeführt werden.

Basierend auf einer kontinuierlichen Auswertung und entsprechendem Feedback durch die Projektpartner und einen Austausch mit den Kolleg:innen (inkl. heuristischer Evaluierungen) wurde die App in Iterationen mehrfach angepasst, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Seit der Öffnung des Reallabors erfolgte eine kontinuierliche Weiterentwicklung der App. Diese umfasste Fehlerbehebungen bezüglich der App-Funktionalitäten sowie Iterationen von Anpassungen und Funktionalitäten basierend auf Nutzerfeedback, sowie Feedback der Projektpartner. Des Weiteren erfolgte die Anpassung der App an Aktualisierungen der CityBoxen, Fahrzeuge und Backend. Die Ergebnisse dieser Arbeiten waren zahlreiche Updates der SteigtUM-App, die in den App-Store (iOS-Geräte) und bei Google Play (Android-Geräte) veröffentlicht worden sind.

2.4.6 Schnittstellenspezifikation zum Logistik- & Kommunikations-Backend

Die gesamte Ausleih-Logistik und Kommunikation für das SteigtUM-System wird durch ein Backend-System realisiert, das beim Projektpartner apromace entstanden ist. Für eine reibungslose Kommunikation zwischen App und Backend wurden als Teil des Aufgabenpakets B3.1 die Anforderungen an das System gemeinsam zwischen der TUBAF und apromace in Form von Schnittstellendokumenten definiert und kontinuierlich an die aktuellen Gegebenheiten angepasst, die sich durch Fortschritte im Projekt ergeben haben. Die konkrete Implementierung war dabei Aufgabe des Projektpartners.

2.4.7 Literatur

[1] DIN EN ISO 9241-210. Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2019); Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2019

[2] DIN EN ISO 9241-11. Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO 9241-11:2018); Deutsche Fassung EN ISO 9241-11:2018

[3] A. J. Dix, J. Finlay, G.D. Abowd, R. Beale. Human-computer interaction. 2003. Pearson Education, S. 260ff.

[4] B. Shneiderman, C. Plaisant, M. Cohen, S. Jacobs, N. Elmqvist, N. Diakopoulos: Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction. 2016. Pearson.

2.5 Arbeitspaket C — Reallabor

Autoren: Danilo Schicha, Yannik Höll, Jana Kertzsch

2.5.1 Standortauswahl

Im Fokus der Standortauswahl für die Verleih- und Ladeinfrastruktur stand ein gezieltes Mobilitätsangebot für Studierende und Mitarbeitende der TUBAF sowie für Mieterinnen und Mieter der SWG. Um die Bedürfnisse dieser Zielgruppen optimal zu bedienen wurden Standorte ausgewählt, die eine maximale Erreichbarkeit und eine hohe Nutzung im Reallabor sicherstellen. Das wurde erreicht, indem typische Wege für das Erreichen öffentlicher Verkehrsmittel, universitätsinterne Wege, wie der Gang zu Vorlesungen oder typische Einkaufswege analysiert wurden.

Im Ergebnis kristallisierten sich für die Universitätsmitglieder der Vorplatz des Auditorium Maximum (Audimax), der sich in unmittelbarer Nähe zu Studierendenwohnheimen befindet, sowie der Bahnhof, Verkehrsknotenpunkt in Freiberg, als Wunschstandort heraus. Für die Mieterinnen und Mieter der SWG waren es eine schon vorhandene Fahrradgarage in ihrem Wohngebiet und der Bahnhof.

Als im Oktober 2019 die Stadt Freiberg das Bahnhofsgebäude zurückkaufte, erschien zudem die Errichtung einer der CityBoxen in Bahnhofsnähe möglich. Gespräche, SteigtUM in das mit der Renovierung des Bahnhofsgebäudes einhergehende Projekte „Fahrradparken am Bahnhof“ zu integrieren, verliefen erfolgreich und so wurde das Reallabor SteigtUM an drei Standorten in Freiberg errichtet:

- Bahnhofsvorplatz der Stadt Freiberg,
- Audimax und
- Fahrradgarage einer SWG-Immobilie.

In Abbildung 2.5.1 sind die drei Standorte des Reallabors in der Stadt Freiberg dargestellt.



Abbildung 2.5.1: Standorte der CityBoxen: 1 Bahnhof, 2 Audimax, 3 SWG

2.5.2 Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsstationen

An den Standorten Audimax und Bahnhof wurde ein modularer Verbund aus versetzt zueinanderstehenden Fahrradgaragen errichtet, den sogenannten CityBoxen, s. Abbildung 2.3.1. Für den Standort SWG wurde eine abweichende, konstruktiv vereinfachte Lösung gewählt. Hier wurde die CityBox in eine bereits bestehende, überdachte Fahrradgarage integriert. Diese vereinfachte Bauweise reduziert den

technischen Aufwand, da beispielsweise auf Rolltore, zusätzliche Beleuchtung und Personenerkennung verzichtet werden kann. Es besteht keine Gefahr, dass ein Nutzender in der Box eingeschlossen wird.

Die Inbetriebnahmen der Ausleihen dieser Standorte erfolgten hinsichtlich der Standorte und Fahrzeuge gestaffelt:

CityPed®:

- April 2022 für die SWG,
- September 2023 für das Audimax,
- Oktober 2023 für den Bahnhof.

Die bidirektionale Ausleihe aller Standorte ist mit der Software-Version der Handy-App seit April 2024 möglich.

CityScooter (bidirektional):

- November 2024 für das Audimax,
- November 2024 für den Bahnhof.

Die Ausleihe am Standort der SWG ist aus Platzmangel in der Verleihstation nicht möglich.

2.5.3 Nutzungsvereinbarung

Die Nutzung des SteigtUM Reallabors ist auf Angehörige der TUBAF und Mieter der SWG begrenzt. Das hat u.a. sicherheitsrelevante Gründe. Alle Komponenten des Sharingsystems SteigtUM sind Versuchsträger und keine serienreifen Produkte. Zur Teilnahme am Leihprozess ist eine Authentifizierung notwendig. Sie wird für Universitätsangehörige durch eine Shibboleth-Authentifizierung² gegenüber dem zentralen Anmeldeserver der TUBAF realisiert. Für SWG-Mieter ist ein manueller Prozess vorgesehen, um individuelle Zugangsdaten erhalten zu können.

Für die Nutzung selbst wurde vom Justizariat der TUBAF eine Nutzungsvereinbarung, s. Anhang A.C.1, erstellt, die vor der Teilnahme am Ausleihprozess vom Nutzer bestätigt werden muss.

2.5.4 Auswertung des Reallabors

Das Reallabor steht den Nutzern von März bis November, täglich von 6–22 Uhr zur Verfügung. Die Spezifikation der Akkus lässt Ladevorgänge erst ab einer Temperatur von 5 °C zu.

2.5.4.1 Nutzungsverhalten

Primäre Forschungsfrage des GPV SteigtUM war, ob und wie das Sharingsystem SteigtUM als alternative Transportmöglichkeit von den Menschen angenommen wurde und wird. Die folgenden Diagramme stellen ausgewählte Daten des Nutzerkreises dar.

Im Jahr 2023 gab es in Summe 602 Ausleihvorgänge. Diese Zahl erhöhte sich im Jahr 2024 sehr stark, es gab 1546 Ausleihvorgänge. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass in 2024 direkt zu Beginn des Ausleihzeitraums von März bis November alle drei Stationen vollständig funktionsfähig für die bidirektionale Ausleihe geöffnet waren. Das MiNuLa-Konsortium hat sich, nicht zuletzt auf Grund dieser erfolgsversprechenden Zahlen, entschlossen, das Reallabor mindestens bis zum Ende des Sommersemesters 2025 aus eigener Kraft fortzuführen.

² <https://tu-freiberg.de/urz/service-portfolio/sicherheit/shibboleth-nutzer-authentifizierung>, letzter Zugriff: 30.11.2024

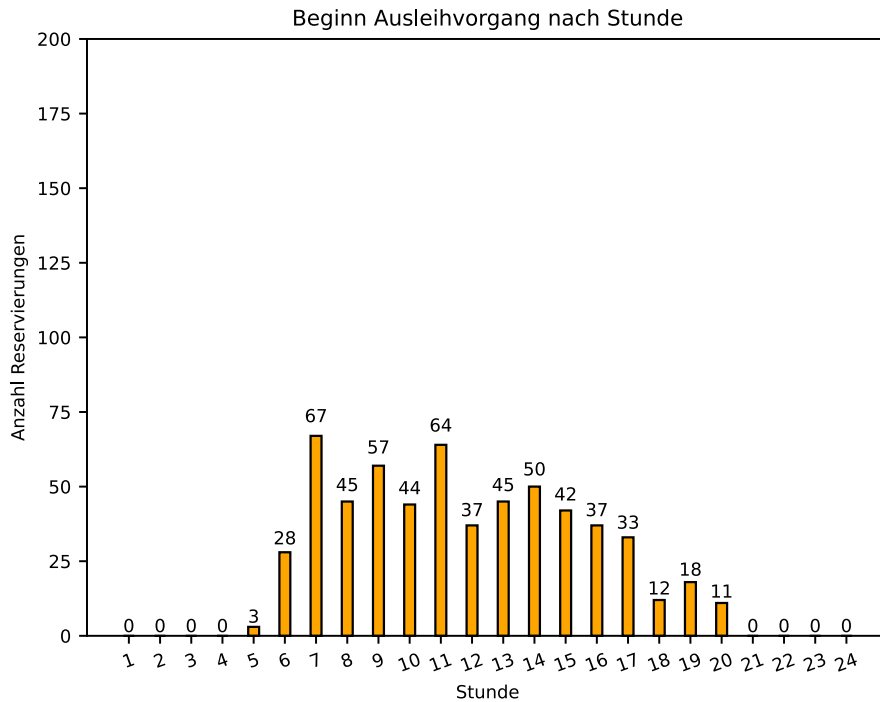


Abbildung 2.5.2: Anzahl Ausleihvorgänge nach Uhrzeit 2023

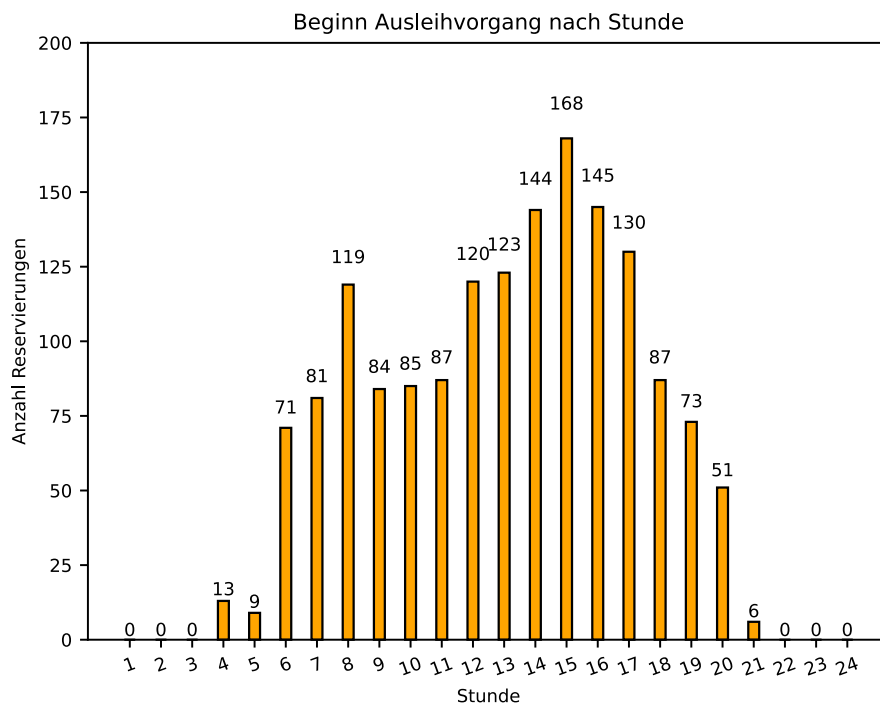


Abbildung 2.5.3: Anzahl Ausleihvorgänge nach Uhrzeit 2024

Die Diagramme in Abbildungen 2.5.2 und 2.5.3 zeigen die Häufigkeit des Beginns der Ausleihe nach Uhrzeiten in den Jahren 2023 und 2024. Im Jahr 2023 sind besonders drei Peaks um 7, 9 und 11 Uhr auffällig. Diese können mit den Vorlesungszeiten am Audimax korrelieren, da sie typischerweise mit dem Beginn oder Ende von Vorlesungen zusammenfallen. Diese Auffälligkeit gibt es in 2024 nicht. Zudem ist in beiden Jahren zu erkennen, dass es eine starke Nutzung in den Nachmittagsstunden gibt. Das deutet darauf hin, dass Nutzer die Fahrräder vermehrt für Erledigungen, Besorgungen oder die Heimfahrt nach Vorlesungen einsetzen.

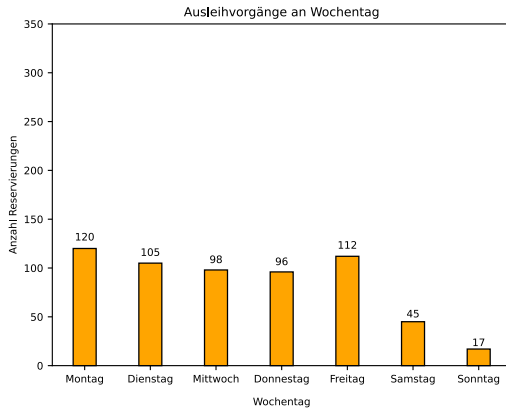


Abbildung 2.5.4: Anzahl Ausleihvorgänge nach Wochentag 2023

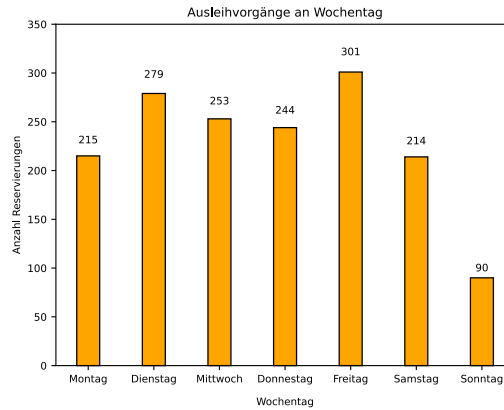


Abbildung 2.5.5: Anzahl Ausleihvorgänge nach Wochentag 2024

Die Abbildungen 2.5.4 und 2.5.5 zeigen die Ausleihfrequenz aufgeschlüsselt nach Wochentag für beide Jahre. Hier ist zu erkennen, dass es vor allem Ausleihen an Werktagen gibt. Das könnte daran liegen, dass viele Studenten über das Wochenende nach Hause fahren und Geschäfte am Sonnabendnachmittag und am Sonntag geschlossen sind. Auch ist eine starke Nutzung an Freitagen beobachtbar. Es handelt sich möglicherweise um Pendler, die mit dem Zug weiterreisen im Sinne der intermodalen Nutzung.

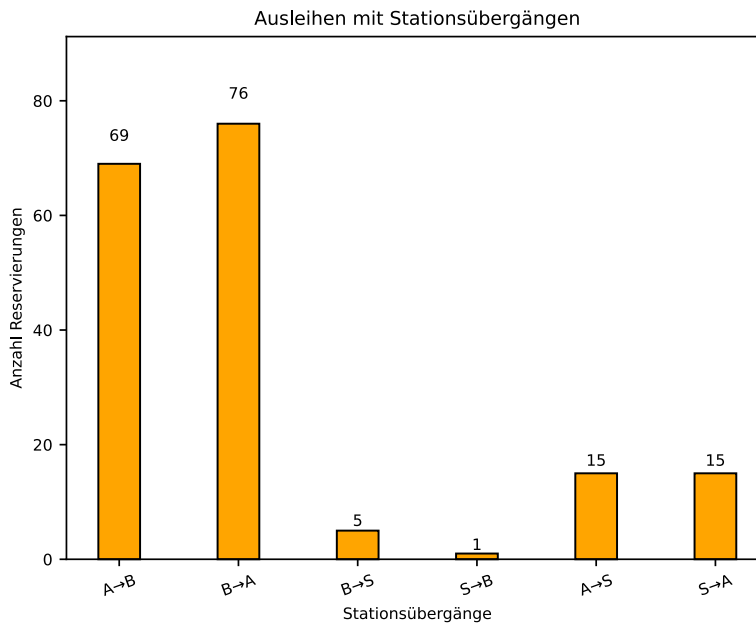


Abbildung 2.5.6: Anzahl Kreuzausleihen 2023 und 2024

Die Abbildung 2.5.6 zeigt die Kreuzausleihen, also Leihvorgänge zwischen den Stationen. Hier kristallisieren sich drei Gruppen heraus:

- viele Ausleihen: Audimax–Bahnhof (A→B) bzw. Bahnhof–Audimax (B→A),
- wenige Ausleihen: Audimax–SWG (A→S) bzw. SWG–Audimax (S→A),
- sehr wenige Ausleihen: Bahnhof–SWG (B→S) bzw. SWG–Bahnhof (S→B).

Demzufolge haben die Nutzer die Route Campus TUBAF (Audimax) – Bahnhof Freiberg in beide Richtungen mit dem Projekt SteigtUM umweltfreundlich erschlossen.

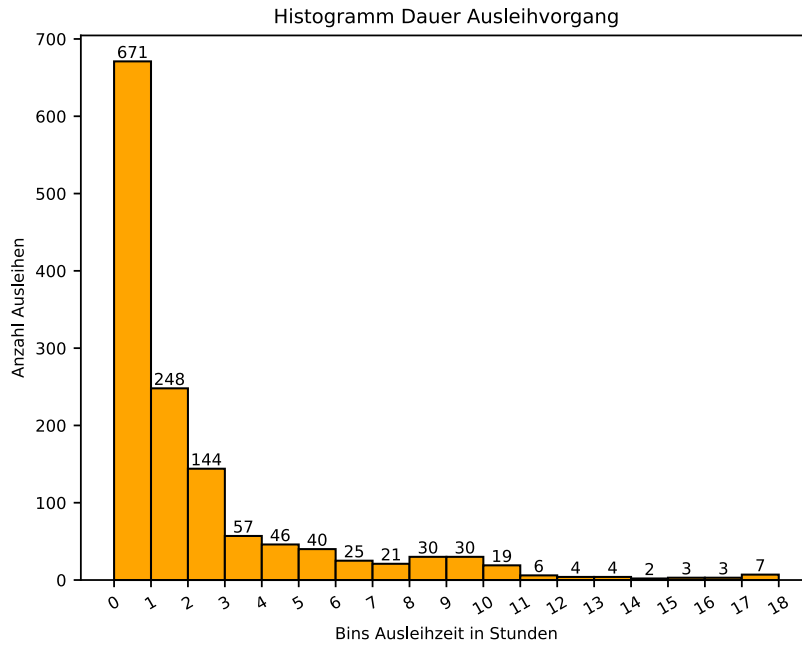


Abbildung 2.5.7: Anzahl der Ausleihvorgänge 2023 und 2024

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Berechnung der Rentabilität des Sharingsystems ist die Nutzungsdauer und die sich daraus ergebende mögliche Anzahl der Ausleihen pro Tag. In Abbildung 2.5.7 ist das Histogramm der Dauer aller Ausleihvorgänge für beide Jahre dargestellt. Man sieht gut, dass die meisten Ausleihen kürzer als eine Stunde sind. In Abbildung 2.5.8 wurde deshalb eine genauere Aufschlüsselung der ersten 5 Stunden erstellt (andere Skalierung y-Achse beachten).

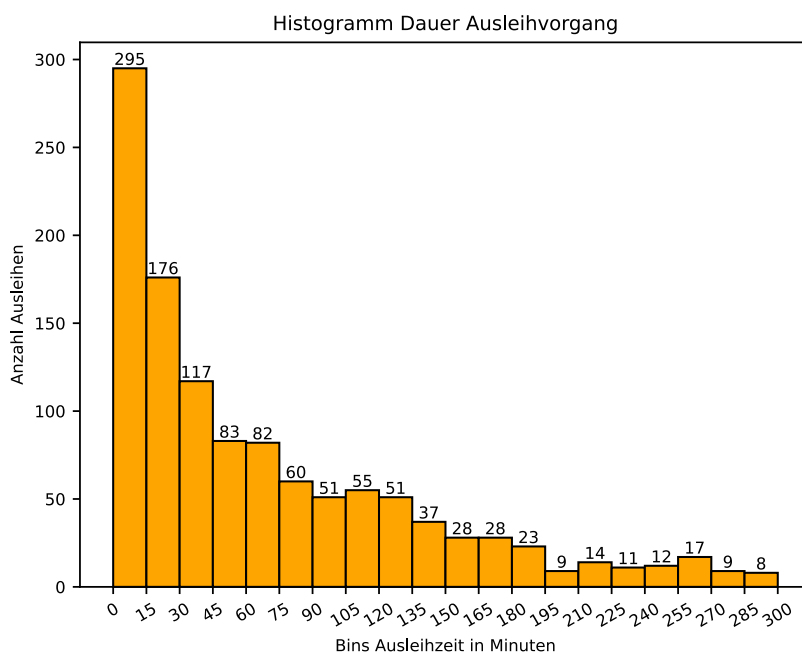


Abbildung 2.5.8: Anzahl der Ausleihvorgänge bis fünf Stunden

2.5.4.2 Technische Erfolgsquote

Während der kompletten Reallaborphase wurden die technischen Systeme und ihr Zusammenspiel permanent optimiert. Hierfür wurde eine monatliche und jährliche Erfolgsquote definiert und regelmäßig ausgewertet. Die jährlichen Erfolgsquoten $E^{(k)}$ und die monatlichen Erfolgsquoten $E_i^{(k)}$ werden berechnet durch

$$E_i^{(k)} = \frac{B_i^{(k)}}{A_i^{(k)}} \cdot 100\%, \quad i \in \{1, \dots, 12\}, \quad k \in \{2023, 2024\},$$

$$E^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{12} B_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^{12} A_i^{(k)}} \cdot 100\%,$$

wobei $A_i^{(k)}$ die Anzahl aller gestarteten Ausleihen ist und $B_i^{(k)}$ die Anzahl der erfolgreichen Ausleihen im Monat i für das Jahr k sind ($i=1, \dots, 12$ steht dabei für die Monate Januar bis Dezember).

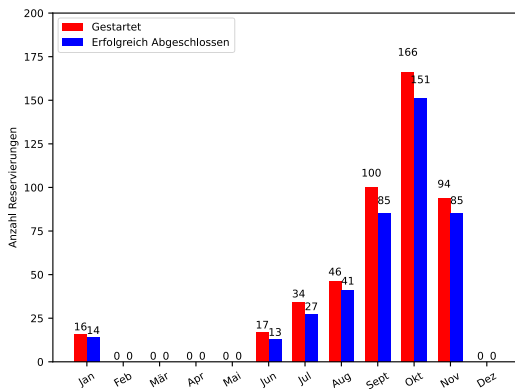


Abbildung 2.5.9: Gestartete und erfolgreich abgeschlossene Ausleihen 2023

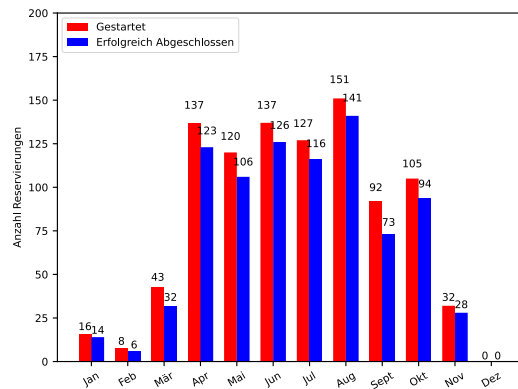


Abbildung 2.5.10: Gestartete und erfolgreich abgeschlossene Ausleihen 2024

Die Abbildungen 2.5.9 und 2.5.10 stellen gestartete und erfolgreich abgeschlossene Ausleihen dar. Es ist zu erkennen, dass das System einen hohen Automatisierungsgrad besitzt, da fast alle gestarteten Ausleihen auch erfolgreich ohne das Eingreifen eines Administrators abgeschlossen werden konnten.

$E_i^{(k)}$	k = 2023	k = 2024
i = 1 (Januar)	87,50 %	87,50 %
i = 2 (Februar)	–	75,00 %
i = 3 (März)	–	74,42 %
i = 4 (April)	–	89,78 %
i = 5 (Mai)	–	88,33 %
i = 6 (Juni)	76,47 %	91,97 %
i = 7 (Juli)	79,41 %	91,43 %
i = 8 (August)	89,13 %	93,38 %
i = 9 (September)	85,00 %	79,35 %
i = 10 (Oktober)	90,96 %	89,52 %
i = 11 (November)	90,43 %	87,50 %
i = 12 (Dezember)	–	–

Die jährlichen Mittel der monatlichen Erfolgsquoten $E_i^{(k)}$ betragen

- $E^{2023} = 87,95 \%$,
- $E^{2024} = 88,74 \%$.

Es sind keine signifikanten Unterschiede in den beiden Jahren erkennbar.

Beispielhaft für die Auswertung der Antriebsstrangdaten des CityPed® soll die Auswertung des Ladezustandes am Ende eines Leihvorganges gezeigt werden.

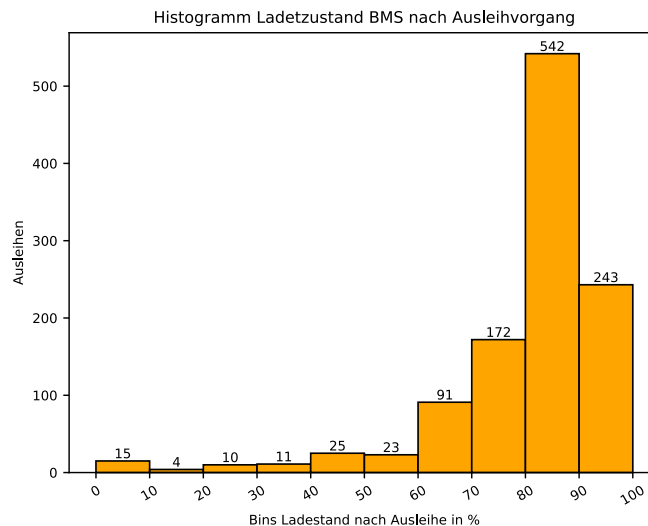


Abbildung 2.5.10: Ladestand der CityPed®-Batterie nach dem Ausleihvorgang

Abbildung 2.5.10 zeigt ein Histogramm des Ladestands der Batterien der CityPed® direkt nach der erfolgreichen Rückgabe eines CityPed®. Es ist zu erkennen, dass nach der Mehrheit der Ausleihen der Ladestand noch größer 60% ist. Daraus folgt, dass der Energiegehalt der Akkus für die Fahrten der Nutzer ausreichend bemessen ist, möglicherweise sogar überdimensioniert. Ein kleinerer Akku bringt neben Kostenersparnis direkte Masseinsparung.

Für die Bewertung der Rentabilität des Ausleihsystems ist die Nutzungsdauer eines CityPed® pro Woche von großer Bedeutung, da in der Regel die Nutzungsdauer die finanziellen Einnahmen generiert. In [1] wurde ermittelt, dass in anderen Ausleihsystemen Leihdauern von sieben Stunden pro Rad und Woche über eine jährliche Nutzung von 40 Wochen möglich sind. Das entspricht pro CityPed® 280 Ausleihstunden in einem Jahr.

Die Einzelauswertung der verschiedenen CityPed® ergab dabei sehr unterschiedliche Leihdauern:

Name CityPed®	Ausleihdauer/Jahr
Ringo	201 h
Petra	341 h
Schorsch	272 h
Olaf	277 h
Lotte	161 h
Käthe	74 h
Martha	339 h
Ursula	236 h

Die Spitzenreiter Petra und Martha liegen mit 341 h bzw. 339 h über den erreichbaren Ausleihstunden der anderen Sharingsysteme. Das Ausleihsystem SteigtUM erreichte in 2024 1901 Ausleihstunden mit den acht zur Verfügung gestellten CityPed®.

2.5.5 Literatur

[1] A. Friedrichs: SteigtUM: Analyse, Konzeption und Umsetzungsstrategien, unveröffentlichte Studie; 2024

2.6 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit der Inbetriebnahme des kompletten Fuhrparks an den drei Standorten der Stadt Freiberg wurde ein zusätzliches umweltfreundliches Mobilitätsangebot der Universität für Universitätsangehörige und Mieterinnen und Mieter der SWG geschaffen. Dieses Angebot wird in einer erstaunlichen Höhe wahrgenommen, s. Abschnitt 2.5 Reallabor. Dieses System soll auch nach Projektende bis Ende Sommersemester 2025 in Eigenregie von den MiNuLa-Professuren weiter betrieben werden. So kann das Nutzerverhalten auf der einen Seite und die realisierten technischen Entwicklungen (CityBoxen, CityPeds®, CityScooter, Handy-App, induktives Ladesystem) auf der anderen Seite weiter untersucht werden. Vorstellbar ist außerdem die Integration von SteigtUM in das Klimaschutzkonzept der TUBAF. Zur weiteren Verwertbarkeit des GPV SteigtUM wurden die am Markt befindlichen Betreibermodelle analysiert [1]. Es gibt drei möglichen Betreibermodelle

- kostenloses Modell,
- kostenpflichtiges Modell und
- hybrides Modell.

Die Studie leitet für SteigtUM keine eindeutige Empfehlung ab, sondern empfiehlt die eruierten Ansätze einer Kalkulation zu unterziehen, anschließend zu bewerten und das geeignetste Modell umzusetzen.

Auf dieses Ergebnis aufbauend wurde eine weitere Studie mit Marktrecherche erstellt, die ausgehend von möglichen Betreibermodellen die Rentabilität von SteigtUM analysierte [2].

Dabei wurden die realen Kosten des laufenden Projektes umfassend analysiert. Diese Analyse umfasste die Recherche marktüblicher Preise sowie die Analyse und Verwendung von Preisen und Kosten aus anderen Sharingprojekten. Zusätzlich wurden die Einnahmen des Projektes detailliert betrachtet und kalkuliert. Die zentralen Erkenntnisse der Studie waren:

- Nur die Kombination von Einnahmen aus dem Verleih der Lastenräder an Privatpersonen, an gewerbliche Kunden sowie aus kommunalen Zuschüssen und Sponsoring ermöglicht es, die finanzielle Stabilität und Nachhaltigkeit des SteigtUM-Projektes zu sichern.
- Trotz dieser Einnahmen übersteigen die aktuellen laufenden Kosten des Projektes die Erträge, insbesondere die Personalkosten und die laufenden Kosten für IT. Obwohl die Anschaffungskosten der bestehenden Räder und Garagen in der Analyse nicht berücksichtigt wurden, zeigt sich dennoch eine Unterdeckung. Dies verdeutlicht, dass das aktuelle Ausleihkonzept nicht wirtschaftlich tragfähig ist.
- Es bedarf weiterer Optimierungen und Kosteneinsparungen, um die Wirtschaftlichkeit des SteigtUM-Projektes langfristig sicherzustellen. Es wird vorgeschlagen, die hohen Investitionskosten für neue Lastenräder und Garagen durch kommunale Zuschüsse oder kostengünstige Vermietung durch die Stadt zu unterstützen.
- Eine überregionale Ausweitung des Projekts ist aufgrund hoher Fixkosten und logistischer Komplexität aktuell nicht sinnvoll.
- Eine dauerhafte städtische Subvention und Fokussierung auf ein regionales Angebot werden empfohlen, um die finanzielle Stabilität und Attraktivität des Projektes zu gewährleisten.

Literatur

[1] A. Friedrichs: Marktanalyse Sharing-Konzepte für nachhaltige Mobilität, unveröffentlichte Studie; 2024

[2] A. Friedrichs: SteigtUM: Analyse, Konzeption und Umsetzungsstrategien, unveröffentlichte Studie; 2024

2.7 Bekanntgewordene technische Fortschritte Anderer während des Vorhabens

2.7.1 Kleinfahrzeuge

Durch verschiedene Marktrecherchen zum Thema Neigetechnik an Lastenfahrräder konnte festgestellt werden, dass zu Beginn der Projektlaufzeit weniger Fahrräder bzw. Lastenfahrräder mit Neigetechnik am Markt zur Verfügung standen als es jetzt der Fall ist. Die Neigetechnik der zwei Vorderräder ist dafür verantwortlich, dass die Lenkbewegungen und somit die Eingewöhnungszeit fast wie bei einem normalen Fahrrad sind. Auf diese Weise wird das Fahren mit dem CityPed® zu einem einzigartigen Fahrerlebnis.

2.7.2 Park- und Ladeinfrastruktur

In der Marktanalyse [2] wurden am Ende der Projektlaufzeit erneut die am Markt etablierten und gescheiterten Sharing-Systeme recherchiert. Ein System elektrischer Kleinfahrzeuge mit einer vollständig geschlossenen, begehbaren Umhausung, den damit einhergehenden Diebstahl-, Vandalismus- und Witterungsschutz nicht ausgeliehener Fahrzeuge, wie dies mit CityBoxen im Reallabor mit dem geschaffenen komplexen Automatisierungsgrad der Ausleih- und Rückgabeprozesse im GPV SteigtUM realisiert ist, wurde dabei nicht gefunden. Ebenso ergab diese Studie, dass es kein Sharingsystem am Markt existiert(e), das eine derartige Variation ausleihbarer Fahrzeuge in Kombination der bereits angeführten Eigenschaften zur Verfügung stellt.

Im Laufe des SteigtUM-Projektes wurden die in nachfolgender Tabelle 2.7.1 zusammengefassten vergleichbaren induktiven E-Bike Ladesysteme bekannt.

Tabelle 2.7.1 Vergleichssysteme

Anbieter	Herkunftsland
TILER	Niederlande
ONE POINTECH	China
OMNI	China
Voltraware	Taiwan
WiPowerOne	Korea

Die Anbieter in Tabelle 2.7.1 bieten Lösungen von eigenständigen Systemen über teilintegrierte bis hin zu vollständig integrierten Ladesystemen an. Sie adressieren sowohl Privatanutzer als auch geschäftliche Anwendungen wie Lieferdienste und Sharingplattformen und zeigen die Entwicklung des induktiven Ladens als zunehmend wichtige Komponente für nachhaltige städtische Mobilitätskonzepte [1]. Im Vergleich dazu bietet das im SteigtUM-Projekt entwickelte Ladesystem ein in Hinblick auf die Gewichtsreduzierung der sekundärseitigen Ladekomponenten optimiertes System. Trotz des Verzichts auf Ferrit in den Sekundärspulensystemen zur Gewichtsminimierung kann ein deutlich besserer Wirkungsgrad von über 90 % gewährleistet werden. Darüber hinaus wird der Ladevorgang durch die Einbindung in die Ausleihinfrastruktur vollständig automatisiert durchgeführt und bietet dem Nutzer ein Höchstmaß an Benutzerkomfort.

2.7.3 Smartphone-Interface

Wie bereits zuvor erwähnt, existiert inzwischen eine Vielzahl an Sharing-Systemen am Markt, sowohl national als auch international. Smartphone-Apps sind dabei meist das Herzstück moderner Mikromobilitätsdienste. Sie bieten die primäre Schnittstelle zwischen Nutzer und Anbieter, ermöglichen

Buchungen, Bezahlungen, Navigation und oft auch weiterführende Services wie Abonnements oder vereinzelt die Integration in multimodale Mobilitätskonzepte. Neue Funktionen in diesem Bereich sind u.a. der Einsatz von Augmented-Reality-Konzepten, um ein korrektes Abstellen von Fahrzeugen zu unterstützen [3] sowie In-App-Module für Sicherheitstests (z. B. gegen Trunkenheit am Steuer) und Sicherheits-Tutorials (z. B. [4]). Im Bereich der multimodalen Verknüpfung von (Mikro-)Mobilitätsdiensten und ÖPNV-Angeboten wurden während der Projektlaufzeit verschiedene Dienste neu geschaffen wie z. B. Jelbi in Berlin [5]. Einen Überblick über Handlungsempfehlungen gibt eine Broschüre des VCD [6], die Webseite zu Mobilität des VCD gibt dazu einen Überblick über „Good Practice-Beispiele“ [7].

2.7.4 Literatur

- [1] A. Friedrichs, SteigtUM: Analyse, Konzeption und Umsetzungsstrategien, unveröffentlichte Studie; 2024
- [2] A. Friedrichs, Marktanalyse Sharing-Konzepte für nachhaltige Mobilität, unveröffentlichte Studie; 2024
- [3] Bolt, Lime pilots Google's augmented reality technology to improve e-bike and e-scooter parking. 2022. <https://www.li.me/blog/lime-pilots-googles-augmented-reality-technology-to-improve-e-bike-and-e-scooter-parking>, Letzter Zugriff: 05.12.2024
- [4] VOI Tap the helmets: Voi introduces world's first Reaction Test for e-scooters to discourage drunk riding, 2020. <https://www.voi.com/blog/voi-reaction-test>. Letzter Zugriff 05.12.2024
- [5] Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) – AöR: Wissenswertes zu Jelbi, <https://www.jelbi.de/wissenswertes/>, ohne Datum. Letzter Zugriff 05.12.2024.
- [6] P. Kosok, K. Täubert (VCD): Multimodal unterwegs – Handlungsempfehlungen zur Umsetzung multimodaler Verkehrsangebote; 2017. https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Themen/Multimodalitaet/Multimodal_unterwegs_-_Digitale_Infomappe_VCD.pdf
- [7] VCD Deutschland. Good Practice-Beispiele; ohne Datum; <https://www.vcd.org/themen/multimodalitaet/good-practice-beispiele/>, letzter Zugriff 05.12.2024

2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Geplante Veröffentlichungen

Alle Projektpartner SteigtUM: Praktische Erfahrungen und Beobachtungen aus dem Betrieb eines Mikromobilitäts-Verleihdienstes im Rahmen eines Reallabors in Deutschland. (in Vorbereitung)

2.8.1 Institut für Elektrotechnik (IET)

Veröffentlichungen

J. P. Vogt, J. Kertzscher: Induktives Ladesystem für den Einsatz in autonomen Verleihstationen. In: 2. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik: Kolloquium im Rahmen des 70. BHT – Freiburger Universitätsforum 2019. 1. Auflage. Freiberg: Hrsg. Kertzscher, Jana. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

J. P. Vogt, J. Kertzscher: Berührungsloses Laden eines Lastenpedelecs. In: TAE Symposium Elektromagnetismus Tagungshandbuch 2021. Hrsg. Ulm, Jürgen. Technische Akademie Esslingen.

J. P. Vogt, J. Kertzscher: Auslegung eines induktiven Energieübertragungssystems für Lastenpedelecs. In: 3. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik: Kolloquium im Rahmen des 72. BHT – Freiburger Universitätsforum 2021. 1. Auflage. Freiberg: Hrsg. Kertzscher, Jana. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

X. Qiu, J. Kertzscher: Untersuchungen einer Pfadfolgeregelung für Lastenpedelecs. In: 3. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik: Kolloquium im Rahmen des 72. BHT – Freiburger Universitätsforum 2021. 1. Auflage. Freiberg: Hrsg. Kertzscher, Jana. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Geplante Veröffentlichungen

J. P. Vogt: Entwicklung und Konzeption eines induktiven Energieübertragungssystems. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2025.

Studentische Arbeiten

E. Bombach: Traktionskonzept für Lastenfahrrad, Masterarbeit 2014.

J. P. Vogt: Drahtlose Energieübertragung für direktes Antriebskonzept -Literaturrecherche-, Studienarbeit 2015.

N. Zhang, X. Zhu und J. Zhao: Experimentelle Untersuchung eines Lastenpedelecs zur Validierung eines Matlab-Modelles, Projektarbeit 2016.

J. P. Vogt und T. Schwarze: Konstruktion und Aufbau des Ladesystems für einen optimierten Lastenpedelec, Projektarbeit 2017.

N. Zhang: Experimentelle Untersuchung Lastenpedelecs, Masterarbeit 2017.

X. Zhu: Entwicklung einer kompakten Ladestation für ein Lastenpedelec, Masterarbeit 2017.

T. Schaper und K. Koch: Ein Beitrag zur Entwicklung einer Lenkregelung zum autonomen Parken und Laden eines Lastenpedelecs, Projektarbeit 2018.

J. P. Vogt: Prototypenentwicklung eines induktiven Ladesystems für den Einsatz in automatischen Lastenpedelec-Verleihstationen, Masterarbeit 2018.

R. Hardege und C. Römhild: Design und Analyse von Spulentopologien für ein induktives Ladesystem, Projektarbeit 2020.

E. Holler: Entwicklung eines Lenkregelsystems für das autonome Parken und Laden eines Lastenpedelecs, Diplomarbeit 2020.

G. Schoth: Untersuchung geeigneter Traktionskonzepte für ein leichtes Lastenpedelec im urbanen Bereich kleiner Städte, Masterarbeit 2020.

N. Seyffer: Regelverfahren eines induktiven Ladesystems, Masterarbeit 2020.

E. Zhang: Sensorlösungen für ein autonomes Lastenpedelec: Lokalisierung und Umgebungserkennung, Masterarbeit 2021.

M. Zheng: Lokalisierung eines autonom parkenden Lastenpedelecs, Masterarbeit 2021.

T. Föppl und H. Uhlig: Energiebilanzierung eines elektrisch angetriebenen Pedelecs, Projektarbeit 2022.

W. Schmidt: Technisch-wirtschaftliche Untersuchung einer Nachrüstung von E-Bikes / Lastenpedelecs mit einem induktiven Ladesystem, Studienarbeit 2022.

2.8.2 Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung (IMKF)

Veröffentlichungen

M. Kröger: Sicherheit von Lastenrädern. 11. Freiburger Crashworkshop, 2020, S. 1-3.

T. Fürstner, J. Gerschler, J. Köckritz, R. Vrignaud, M. Kröger: Entwicklung eines Lastenrades am IMKF: Konzept - Entwicklung - Simulation. TU Freiberg, 12. Freiburger Crashworkshop, 2021, S. 1-17.

T. Fürstner, J. Köckritz, M. Kröger: Development of a cargo bicycle frame concerning multiaxial loaded welds. 5th International Conference on Structural Integrity and Durability, Dubrovnik, 2021.

Kreißig, I., Morgenstern, T., Krems, J., Fürstner, T., Gerschler, J., Köckritz, J., Nepp, R., Tischner, F., Vrignaud, R., & Kröger, M.: (2021). Umsteigen, bitte...! Nutzerzentrierte Evaluation verschiedener Lastenpedelec-Konzepte. Poster presented at the 12th congress of the DGPs departments Work, Organizational, and Economic Psychology and Human Factors, 22.-24.9.2021, Chemnitz, Germany. DOI: 10.13140/RG.2.2.11865.24162

J. Gerschler, M. Kröger: Vorderwagenkonstruktion für ein Fahrrad mit zwei Vorderrädern. Patent AKZ 10 2021 202 799.7, Anmeldetag 23.03.2021.

R. Vrignaud, J. Köckritz, J. Gerschler, T. Fürstner, R. Nepp, M. Kröger: Lastenradentwicklung und -erprobung: Vom Konzept zur Kleinserie. 13. Freiburger Crashworkshop, 2022, S. 1-20.

J. Gerschler, M. Kröger: Vorderwagenkonstruktion für ein Fahrrad mit zwei Vorderrädern. Patent DE 10 2021 202 799 A1, Offenlegungsdatum: 29.09.2022.

M. Kröger, J. Gerschler, T. Fürstner, R. Nepp: Untersuchung eines mehrspurig gelenkten Lastenrades hinsichtlich Lenkungsflattern: Der Weg zum perfekten Leihpedelec. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Workshop des DVM-Arbeitskreises Fahrradsicherheit: Die neue Vielfalt – Herausforderungen an Fahrrädern, Berlin, 2022, S. II/1-II/16.

J. Köckritz, T. Fürstner, M. Kröger: Messung realer Kräfte und deren Auswirkung auf die numerische Lebensdauerberechnung – Ein Fallbeispiel aus der Entwicklung eines neuen Lastenfahrrades. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Workshop des DVM-Arbeitskreises Fahrradsicherheit: Die neue Vielfalt – Herausforderungen an Fahrrädern, Berlin, 2022, S. I/1-I/12.

Kröger, M.: Sicherheit von Radfahrern und Fußgängern. 14. Freiburger Crashworkshop, 2023, S. 1-10.

Gerschler, J.; Vrignaud, R.; Köckritz, J.; Nepp, R.; Kröger, M.: Fahrverhalten von Lastenrädern. 14. Freiburger Crashworkshop, 2023, S. 1-26.

Köckritz, J.: Topologieoptimierung mit Lebensdauerrandbedingung am Anwendungsfall eines additiv gefertigten Tretlagers. 14. Freiburger Crashworkshop, 2023, S. 1-20.

J. Köckritz, T. Fürstner, R. Szlosarek, M. Kröger, Fatigue behavior and numerical assessment of welded aluminum EN AW 7020 tube joints under multiaxial loading, Procedia Structural Integrity, Volume 54, 2024, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.102>.

Jim Gerschler, Ringo Nepp, Matthias Kröger, Development of a multi-lane cargo bike with a view to driving behaviour , Technische Mechanik - European Journal of Engineering Mechanics: Vol. 44 No. 2 (2024): Special Issue for the 18th German-Polish / Polish-German Workshop

Robin Vrignaud, Jenny Köckritz, Ringo Nepp, Matthias Kröger, Dynamic behaviour of cargo bikes: An approach for quantitative evaluation , Technische Mechanik - European Journal of Engineering Mechanics: Vol. 44 No. 2 (2024): Special Issue for the 18th German-Polish / Polish-German Workshop

Kröger, M.: Herausforderungen von Radfahrer-Pkw Unfällen. 15. Freiburger Crashworkshop, 2024, S. 1-10

Studentische Arbeiten

M. Denker, B. Förster: Entwicklung einer topologieoptimierten Rahmenkonstruktion für ein Lastenfahrrad, Projektarbeit 2020

J. Haux: Entwicklung und Konstruktion eines variablen Lastenanhängers für ein Fahrrad, Studienarbeit 2020

C. Zhong: Entwicklung eines Lastenrollers unter Berücksichtigung von Fahrbahnunebenheiten und stoßartiger Belastungen, Masterarbeit 2020

P. Kumaresh, H. Gunda, N. Yohannan, J. Thyagarajan: Development of a multi-body simulation of a cargo bicycle, Projektarbeit 2020

M. Jünger: Versuchsstandentwicklung für Betriebsfestigkeits- und Crashprüfungen von Lastenfahrradrahmen, Masterarbeit 2020

T. Kutzner: Untersuchungen zur Entkopplung von Lasten bei dynamischer Beanspruchung bei einem Lastenpedelec, Masterarbeit 2020

T. Deepak Varma, K. Mandar Mohan, R. Krishnah Srinivasa, D. Sriharsharam, D. Chintan: Design of a pneumatic fatigue test rig for handlebars, Projektarbeit 2020

J. Rotte: Integration eines Elektroantriebes in einen Lastenanhängen, Projektarbeit 2020

T. Guhleemann: Entwicklung von Befestigungskonzepten standardisierter Lasten am Lastenpedelec, Studienarbeit 2020

Y. Lin, P. Holzmüller: Validierung und Erweiterung der Mehrkörpersimulation eines Lastenrades, Projektarbeit 2021

S. Sautner: Untersuchung der Lenkgeometrie eines mehrspurigen Lastenfahrrades, Studienarbeit 2021

Z. Tang: Möglichkeiten der Integration eines elektrischen Antriebs in einem Lastenroller, Studienarbeit 2021

M. Heimer: Entwicklung und Konstruktion des Rahmens für einen elektrischen Lastenroller, Diplomarbeit 2021

T. Bokeloh: Topologieoptimierung der Aufhängung eines innovativen dreirädrigen Konzeptes für Lastenräder, Studienarbeit 2021

C. Keilig: Simulation und experimentelle Prüfung der Schwingfestigkeit von Aluminiumschweißverbindungen, Diplomarbeit 2021

J. Bhut: Life Cycle Assessment of an electric powered Cargo Bicycle and evaluation of possible improvements, Masterarbeit 2021

Y. Lin: Experimentell gestütztes Erstellen von Lastkollektiven und Integration in eine Finite-Elemente Analyse eines Lastenrades, Masterarbeit 2021

C. Desai: Development, design and evaluation of the drivetrain of an innovative cargobike prototype, Masterarbeit 2021

S. Poppitz: Entwicklung einer adaptiven Lastplattform zur Verwendung auf einem Lastenrad, Studienarbeit 2022

S. Prajapati: Optimierung des Bauraums der Vorderradaufhängung eines mehrspurigen Lastenrades, Masterarbeit 2022

L. Hong: Untersuchung der Festigkeit von Bowdenzugverbindungen in Kombination mit einer Seilscheibe, Masterarbeit 2022

G. Bornitz: Experimentelle Untersuchungen über das Überrollverhalten eines Lastenfahrrades beim Überfahren definierter Hindernisse, Studienarbeit 2022

T. Bokeloh, V. Gorges: Entwicklung eines hybriden Rahmens für ein Leichtbau-Lastenrad, Projektarbeit 2022

A. Kerroumi: Entwicklung eines Sensors für das Messen von Pedalkräften an einem Lastenfahrrad, Studienarbeit 2022

N. Bohlmann, A. Hofmann, M. Schade: Entwicklung eines Versuchsstandes und Bewertungsmethoden für Antriebssysteme am Fahrrad, Projektarbeit 2022

P. Schiffke: Erweiterung eines Prüfstandes zur Ermittlung von Bowdenzugvorspannungen an Lastenfahrrädern, Studienarbeit 2023

D. Ebnetter: Experimentelle Untersuchungen über das Überrollverhalten eines Lastenfahrrades über Hindernisse unter verschiedenen Einflussgrößen, Studienarbeit 2023

A. Klose, W. Schmidt: Methodische Konzeption von Funktionen eines Serviceroboters für den Fahrradverleih, Projektarbeit 2024

2.8.3 Institut für Informatik (IFI)

Geplante Veröffentlichungen

M. Kreußlein, E. Wagner, L. Kulke, B. Pfleging: Who, when, why? Understanding usage behavior of a new type of micromobility rental system -results from a living lab study in Germany. (in Vorbereitung)

Studentische Arbeiten

Paul Hübler, 2022: Erfassung und Nutzung von Wartezeiten im Straßenverkehr zur Verbesserung des Radfahrerlebnisses. (Bachelorarbeit)

Lennon Kulke, 2023: Roboter-eHMIs: Externe Interfaces für die Interaktion zwischen Lieferrobotern und ungeschützten Verkehrsteilnehmern. (Bachelorarbeit)

Marco Naumann, 2024: Vorhersage des Radfahrerhaltens anhand von Kontextdaten. (Bachelorarbeit)

Florian Schierz, 2024: Eyetracking als Erweiterung von Head-Mounted Displays für Fahrradwarnsysteme. (Bachelorarbeit)

Elias Wagner: Augmented Reality-Navigationshilfen für Autofahrer im Shared Space. (laufende Bachelorarbeit, 2024)



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.

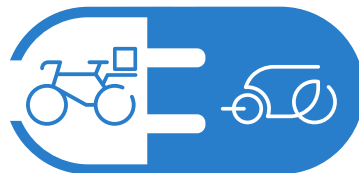
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

MiNuLa

Anhang



SteigtUM!

Institut für Elektrotechnik (IET)

Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung (IMKF)

Institut für Informatik (IFI)

Anhang zum Abschlussbericht

MiNuLa

Mikromobile, **N**utzerschnittstelle und induktives **L**adesystem

im Gesamtprojektvorhaben

SteigtUM

System elektrischer Kleinfahrzeuge zum privaten und **g**ewerblichen **T**ransport als ganzheitlicher Lösungsansatz **u**rbaner **M**obilitätsprobleme

Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

BMBF-Fördermaßnahme der Mensch-Technik-Interaktion im Förderschwerpunkt
„Individuelle und adaptive Technologien für eine vernetzte Mobilität“

Förderkennzeichen: 16SV8267

Projektleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jana Kertzsch

Freiberg, Dezember 2024

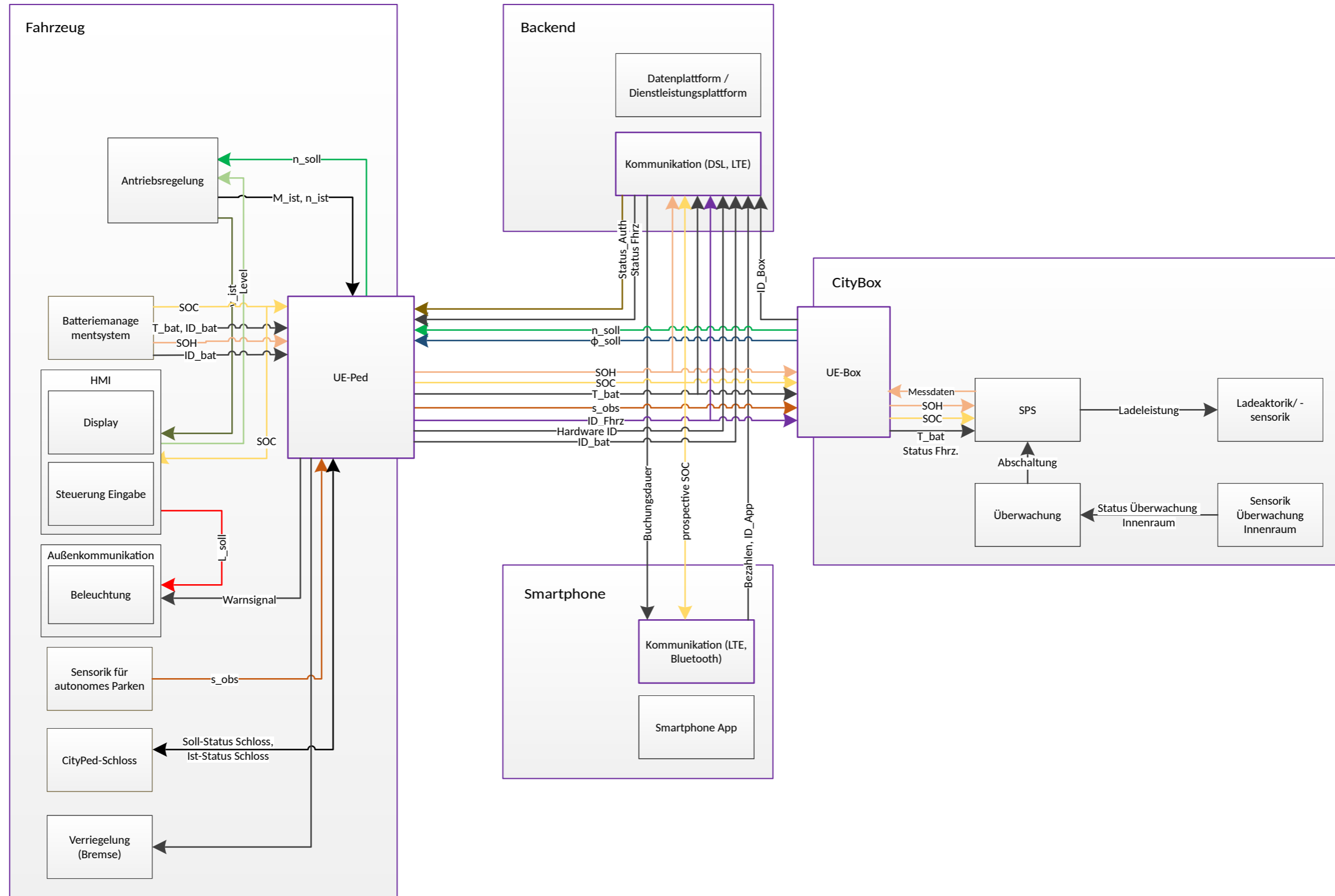
Inhalt

Anhang.....	1
A.A1 Universalelektronik	1
A.A1.1 Darstellung Signalflüsse in UE-Ped.....	1
A.A1.2 Schaltplan UE-Ped.....	3
A.A1.3 Platinenlayout UE-Ped.....	5
A.A1.4 Protokollauflistung UE-Box/UE-Ped.....	6
A.B1 Park- und Ladeinfrastruktur	10
A.B1.1 Stromlaufplan CityBox Audimax	10
A.B1.2 Wechselrichter Primärsystem – Schaltplan Leistungsplatine	44
A.B1.3 Wechselrichter Primärsystem – Schaltplan Steuerplatine	46
A.B1.4 Wechselrichter Primärsystem – Platinenlayout Leistungsplatine	48
A.B1.5 Wechselrichter Primärsystem – Platinenlayout Steuerplatine	49
A.B1.6 Gleichrichter Sekundärsystem – Schaltplan	50
A.B1.7 Gleichrichter Sekundärsystem – Platinenlayout	52
A.B1.8 VDE Test-Report	53
A.C Reallabor	76
A.C.1 Nutzungsvereinbarung	76

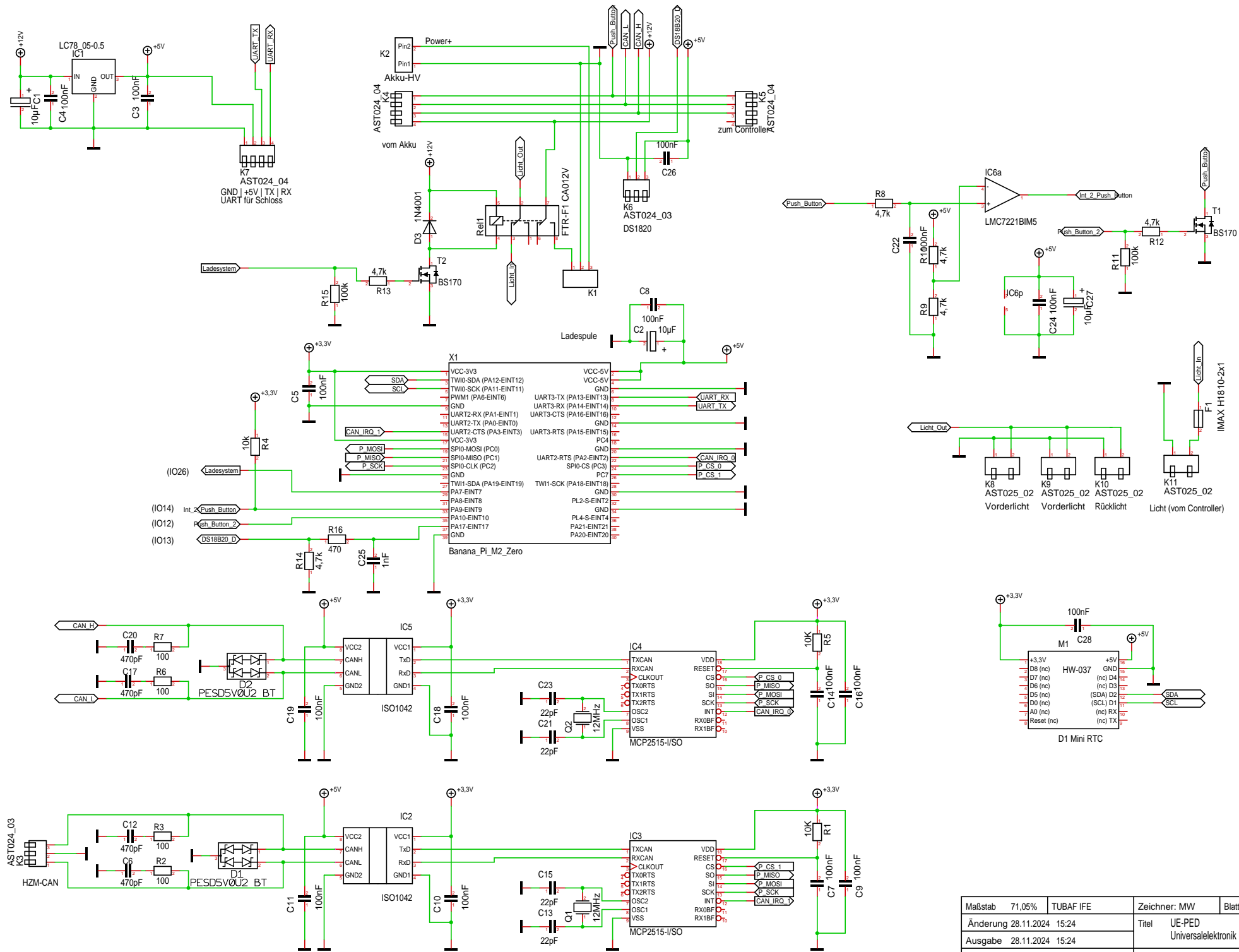
Anhang

A.A1 Universalelektronik

A.A1.1 Darstellung Signalflüsse in UE-Ped



A.A1.2 Schaltplan UE-Ped

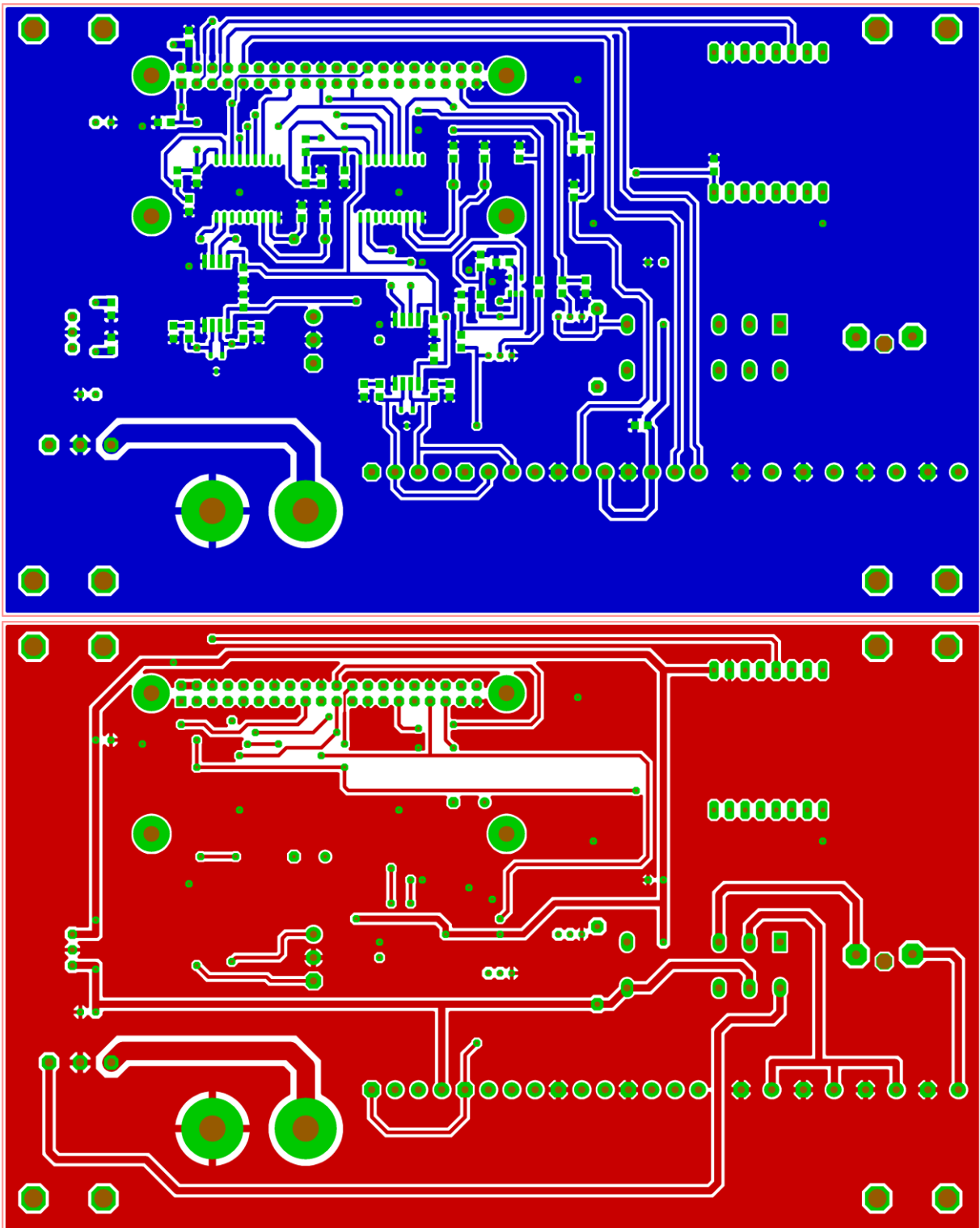


Maßstab	71,05%	TUBAF IFE	Zeichner: MW	Blatt 1
Änderung	28.11.2024	15:24	Titel UE-PED	
Ausgabe	28.11.2024	15:24	Titel Universalelektronik Pedelec	
Datei	Projekt: SteigUM!			

A.A1.3 Platinenlayout UE-Ped

Obere Abbildung: Kupferfläche Platinenoberseite

Untere Abbildung: Kupferfläche Platinenunterseite



A.A1.4 Protokollauflistung UE-Box/UE-Ped

Protokoll UE-Ped ↔ UE-Box

Das Protokoll basiert auf dem Datenformat **JSON**, welches Daten als Objekte darstellt, die Schlüssel-Wert-Paare enthalten.

Im folgenden wird UE-Box als **Server** bezeichnet und UE-Ped als **Client**.

Standardanfrage des Servers an den Client:

```
{
  command: „SetLock“,
  data: { /* */ },
  signature: „AEF343837AF...“
}
```

Dabei ist „command“ jeweils der Befehl der Citybox an den Client, „data“ zusätzliche Daten, die zu einem bestimmten Befehl gehören und „signature“ eine Signatur, die die Integrität der Kommunikation zwischen Server und Client sicherstellt.

Standardantwort des Clients an den Server:

```
{
  command: „SetLock“,
  data: { /* */ },
}
```

Dabei ist „command“ jeweils der Befehl der von der Citybox an den Client geschickt oder ein Clientbefehl wurde und „data“ zusätzliche Daten, die die Citybox in der Antwort des Clients benötigt.

List von Befehlen des Servers:

Name des Befehls „command“	Kurzbeschreibung
SetLock	Öffnet/Schließt das Fahrradschloss
SetState	Ändert den BMS-Zustand
GetKeys	Fordert Schlüsselaustausch an
Restart	Startet Controller neu
SendLogs	Fordert Log-Dateien vom CityPed an
NotifyUpdate	Informiert das CityPed, dass Software-Update bereitsteht
SoftRestart	Startet die Software neu
Shutdown	Führt den Controller herunter

SetLock:

- data: „Lock“ oder „Unlock“ (String)

SetState:

- data: „Idle“, „Charge“, „Discharge“

GetKeys:

Zwischen Backend-Server und CityPed wird während des Ausleihvorgangs ein Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch durchgeführt. Hierfür muss dem CityPed der Teil des Schlüssel (partkey) des Backends geschickt werden. Das wird über diesen Befehl realisiert.

- data: {„key“: partkey}

Restart:

- data: {}

SendLogs:

- data: {}

NotifyUpdate:

- data: {}

SoftRestart:

- data: {}

Shutdown:

- data: {}

List von Befehlen des Clients:

Name des Befehls „command“	Kurzbeschreibung
Meas	Messdaten übermitteln
Auth	Authentifikation an der Citybox
SetName	Fahrradnamen übermitteln

Meas:

Diese Nachricht wird in regelmäßigen Abständen vom CityPed an die CityBox geschickt. In den Daten der sind Messwerte und Fehler des BMS und die gemessene Temperatur der Temperatursonde enthalten.

- data: {soc: Float, current: Float, voltage: Float, temperatur_ind: Float, temperatur_bat: Float, errors: [String], battery_serial_nr: UInteger, full_charge_cycles: Integer}

Auth:

Dieser Befehl dient zur sicheren Authentifizierung der CityBox beim CityPed. Das CityPed schickt eine Zufallszahl an die CityBox. Diese muss von der CityBox verschlüsselt werden und an das CityPed zurückgeschickt werden. Das CityPed entschlüsselt die Zufallszahl und überprüft somit, ob diese korrekt von der Box verschlüsselt wurde. Somit meldet sich das CityPed nur bei Stationen an, die von SteigtUm! betrieben werden.

- data: Integer

SetName:

Das CityPed schickt in dieser Nachricht seinen Namen (z.B. #PD00006) an die CityBox.

- data: String

A.B1 Park- und Ladeinfrastruktur

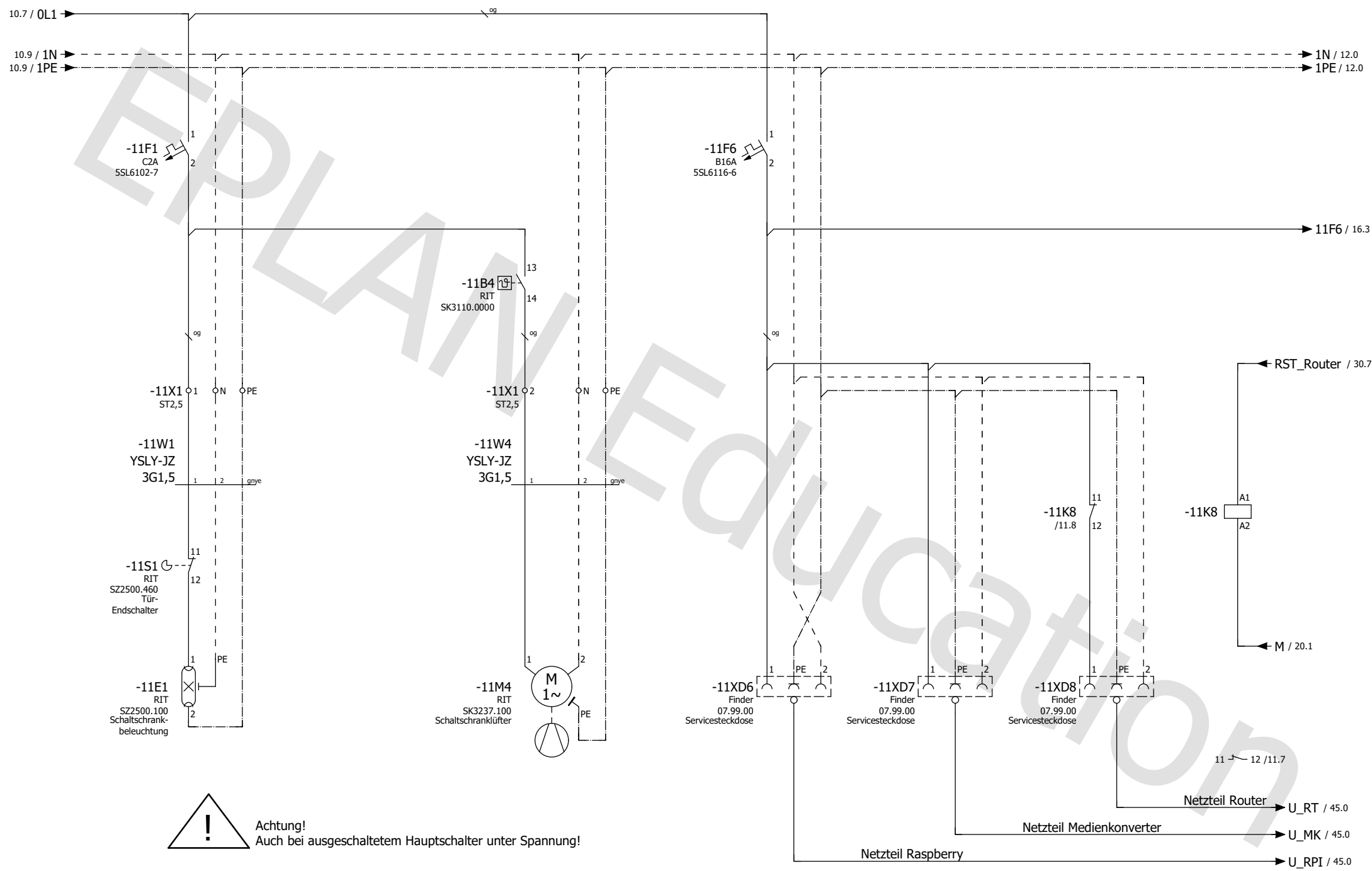
A.B1.1 Stromlaufplan CityBox Audimax

EP L A N Education

Standort Audimax

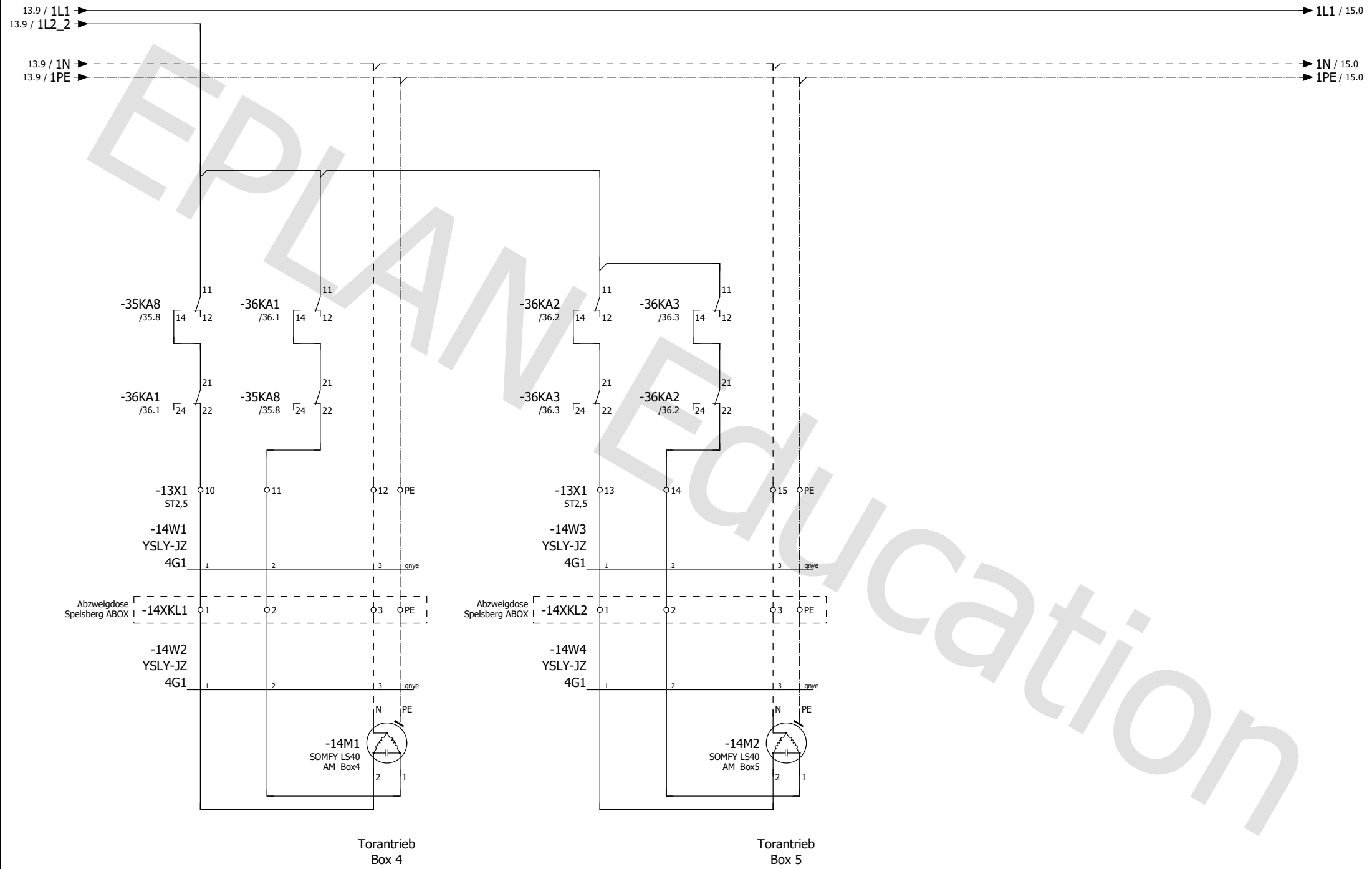
=CB+AM

		Datum 16.09.2022		SteigtUM		Institut für Elektrotechnik		Standort Audimax		= CB	
		Bearb. SCHICHA		CityBox-Automation						+ AM	
		Gepr								01/04_2022schi	
Änderung	Datum	Name	Urspr	Ersatz von	Ersetzt durch					Blatt 9	
										Blatt 33	

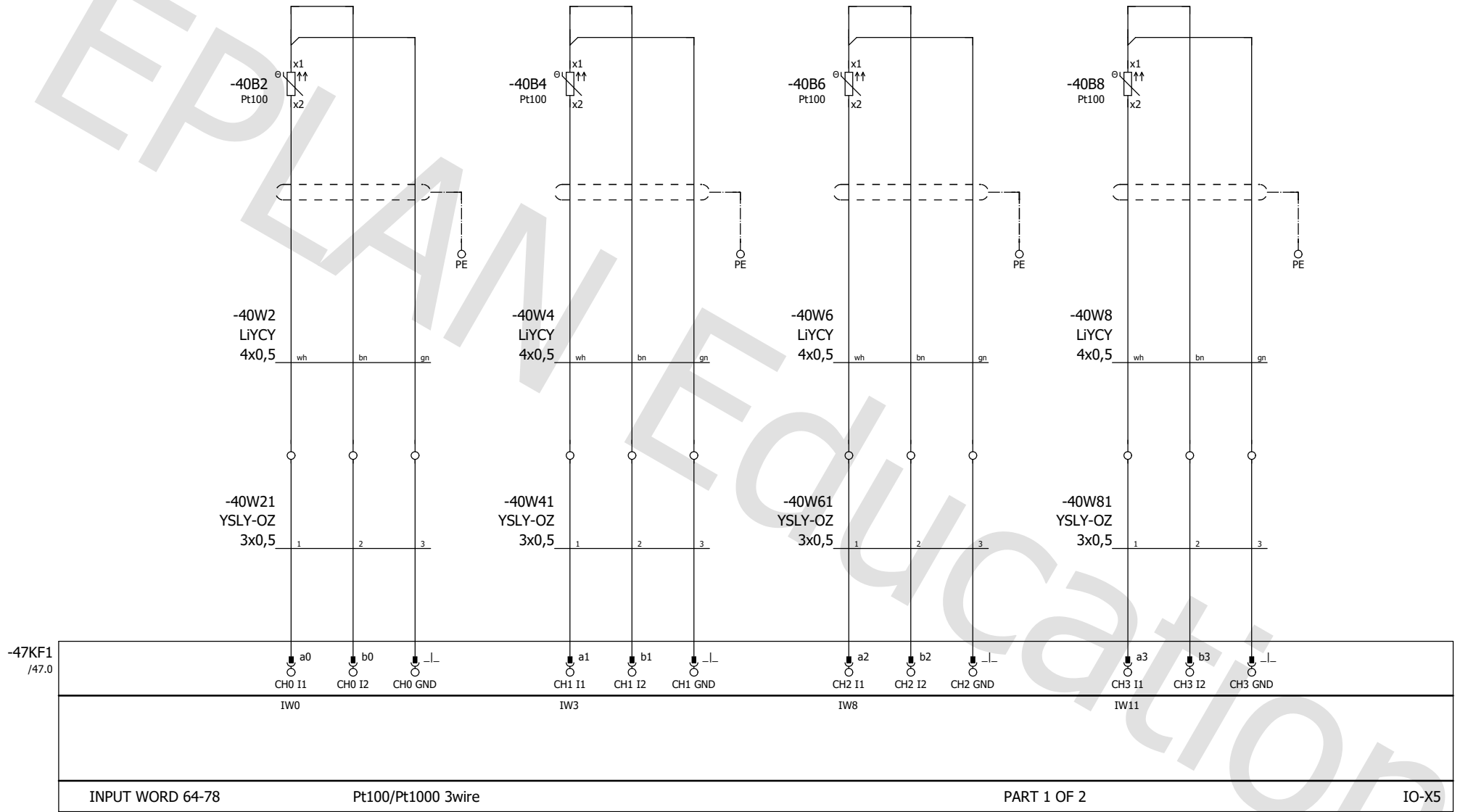


Achtung!
Auch bei ausgeschaltetem Hauptschalter unter Spannung!

			Datum	09.04.2024	SteigtUM		Institut für Elektrotechnik		Beleuchtung/Klima/Service		= CB		
			Bearb.	SCHICHA	CityBox-Automation						+ AM		
			Gepr								01/04_2022schi		
Änderung	Datum	Name	Urspr	Ersatz von	Ersetzt durch							Blatt	11
												Blatt	33



			Datum	11.07.2022	SteigtUM	Institut für	Ansteuerung Rolllor	= CB
			Bearb.	SCHICHA	CityBox-Automation	Elektrotechnik	Box 4; 5	+ AM
Änderung	Datum	Name	Urspr		Ersatz von	Ersetzt durch		Blatt 14
							01/04_2022schi	Blatt 33



INPUT WORD 64-78

Pt100/Pt1000 3wire

PART 1 OF 2

IO-X5

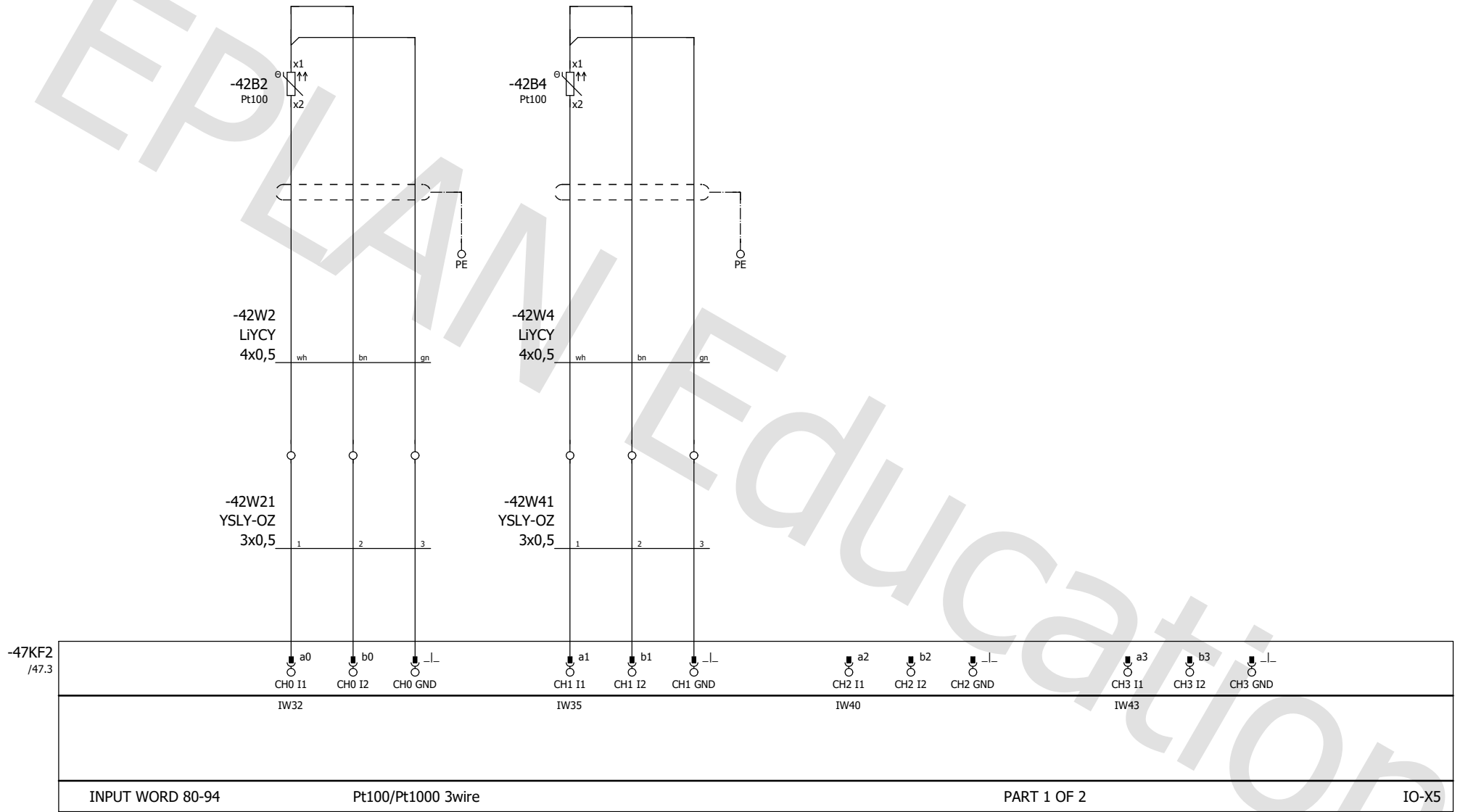
Temperatur 1
Box 1 (oben)

Temperatur 2
Box 1 (unten)

Temperatur 1
Box 2 (oben)

Temperatur 2
Box 2 (unten)

			Datum	12.12.2024	SteigtUM	Institut für	Analoge Eingänge Pt100	= CB
			Bearb.	SCHICHA	CityBox-Automation	Elektrotechnik		+ AM
Änderung	Datum	Name	Urspr	Ersatz von	Ersetzt durch			Blatt 40
							01/04_2022schi	Blatt 33



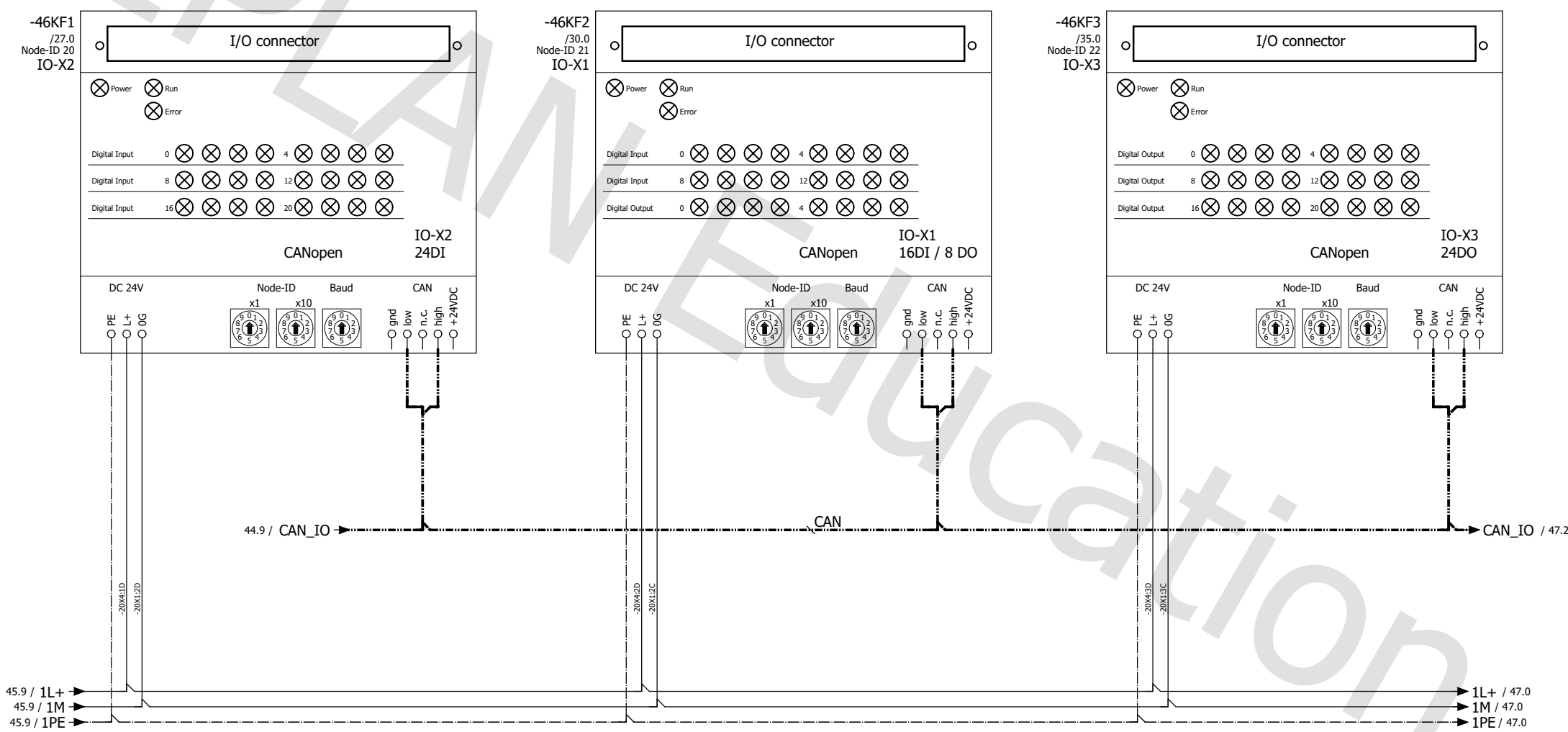
Temperatur 1
Box 5 (oben)

Temperatur 2
Box 5 (unten)

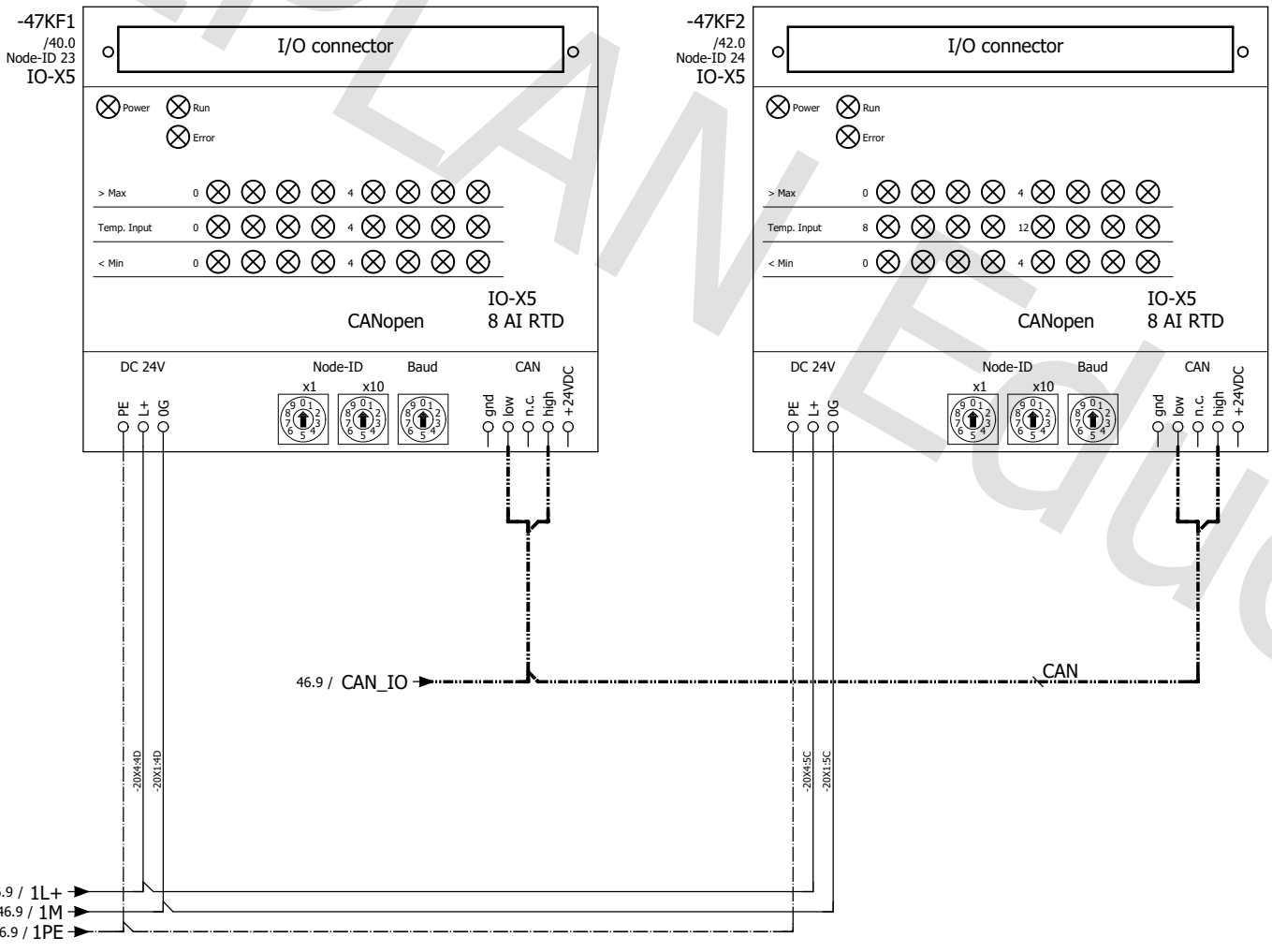
AI_RES1

AI_RES2

			Datum	12.12.2024	SteigtUM	Institut für	Analoge Eingänge Pt100	= CB
			Bearb.	SCHICHA	CityBox-Automation	Elektrotechnik		+ AM
Änderung	Datum	Name	Urspr	Ersatz von	Ersetzt durch			Blatt 42
							01/04_2022schi	Blatt 33

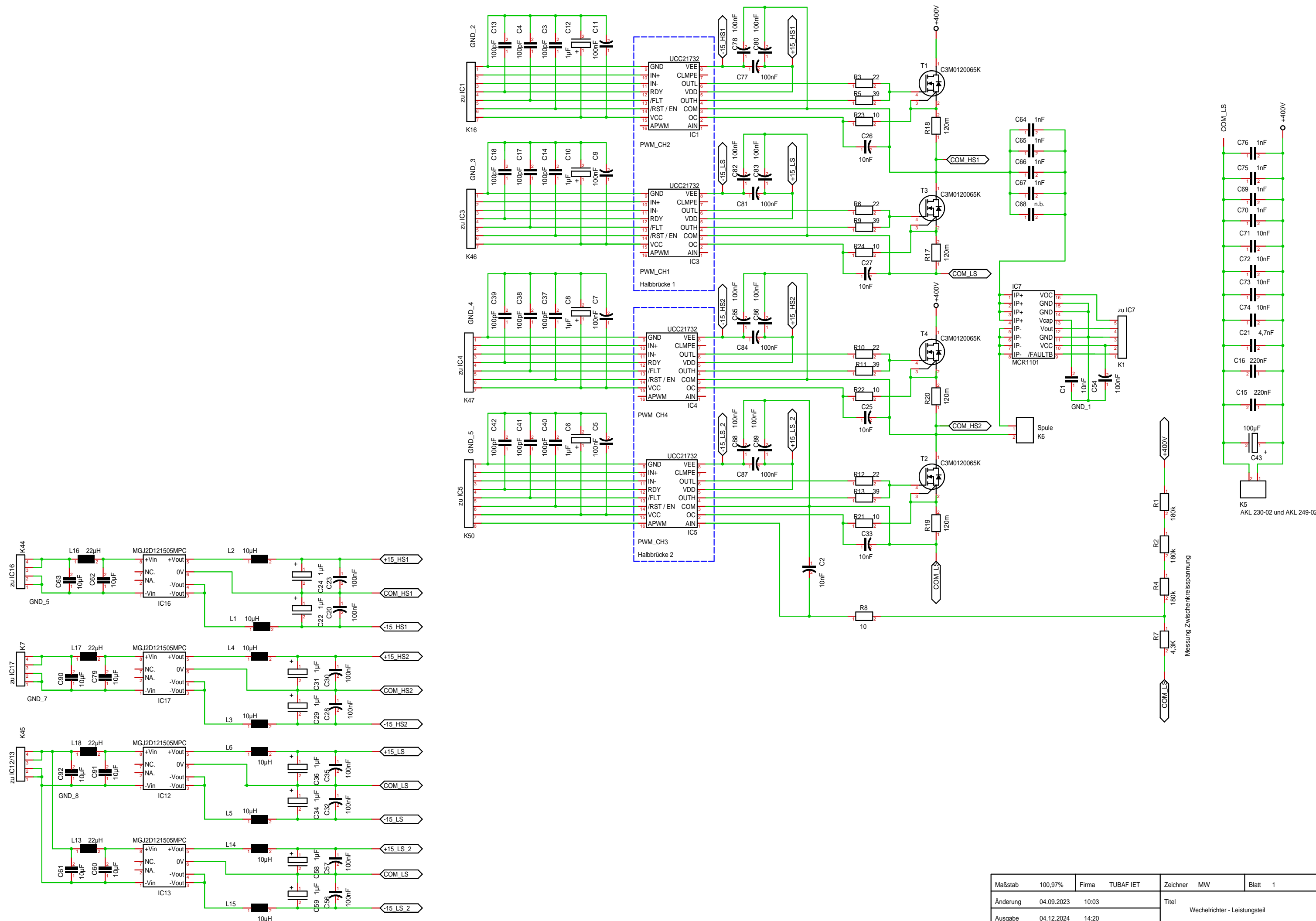


			Datum	12.12.2024	SteigtUM	Institut für	CAN-Module binär	= CB
			Bearb.	SCHICHA	CityBox-Automation	Elektrotechnik		+ AM
Änderung	Datum	Name	Urspr	Ersatz von	Ersetzt durch			Blatt 46
							01/04_2022schi	Blatt 33



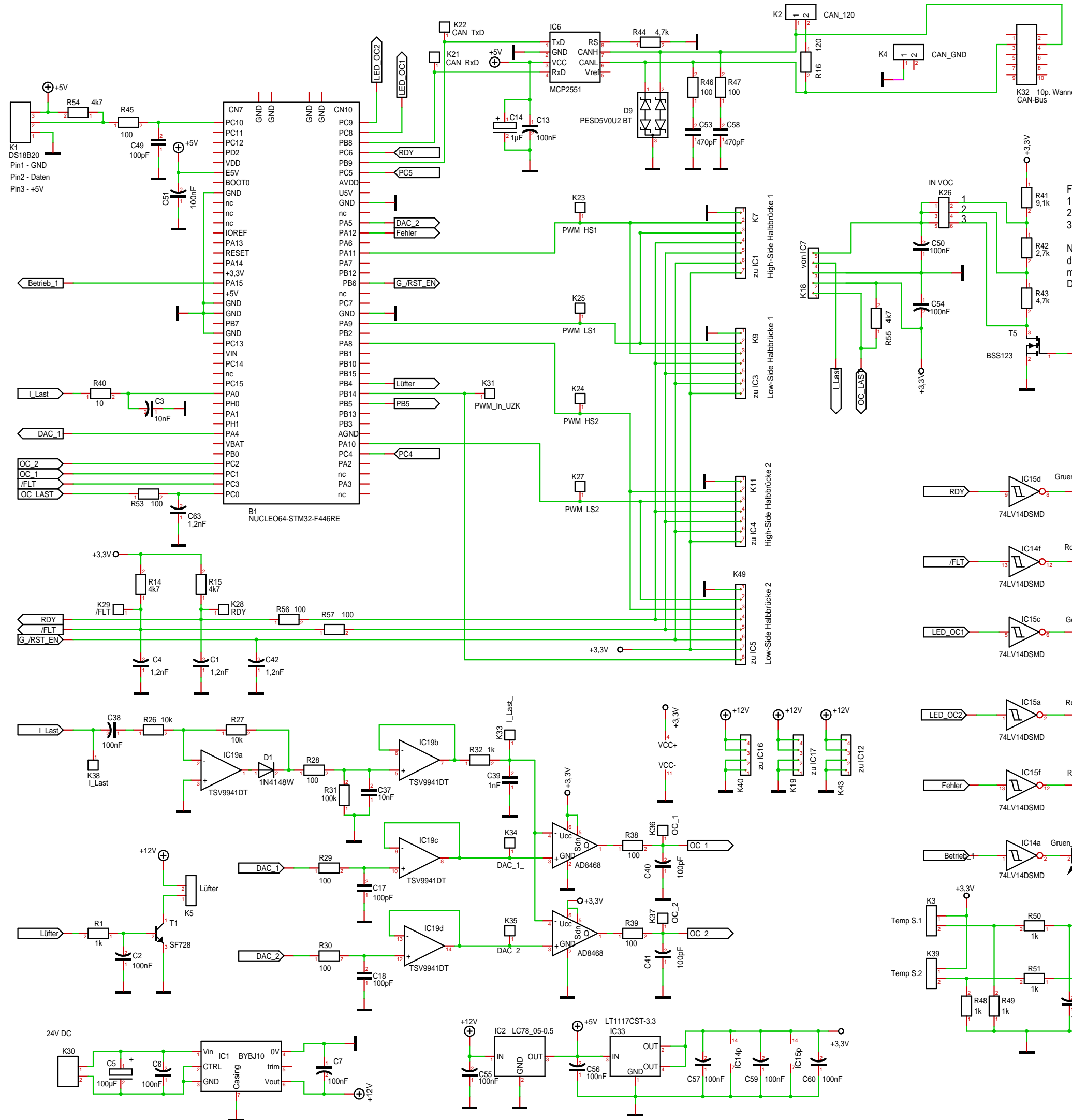
			Datum	12.12.2024	SteigtUM	Institut für Elektrotechnik	CAN-Module analog	= CB
			Bearb.	SCHICHA	CityBox-Automation			+ AM
Änderung	Datum	Name	Urspr	Ersatz von	Ersetzt durch			
							01/04_2022schi	Blatt 47 Blatt 33

A.B1.2 Wechselrichter Primärsystem – Schaltplan Leistungsplatine



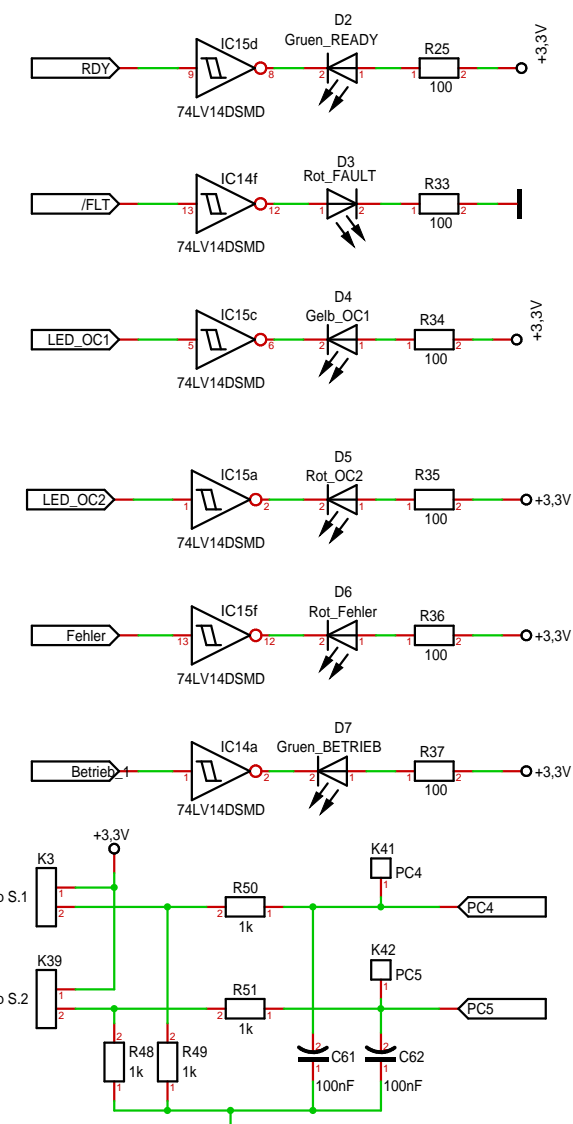
Maßstab	100,97%	Firma	TUBAF IET	Zeichner	MW	Blatt	1
Änderung	04.09.2023	10:03		Titel			
Ausgabe	04.12.2024	14:20		Wechlerlichter - Leistungsteil			
Datei	2022_08_Primarsystem_4_HV_P.T3001						

A.B1.3 Wechselrichter Primärsystem – Schaltplan Steuerplatine



Faktor Überstromabschaltung:
 1 (Pin1 - Pin2) zwischen 0.35*VCC und 0.5*VCC => 2.0*IP = 10,0 A
 2 (Pin3 - Pin4) zwischen 0.225*VCC und 0.35*VCC => 1.5*IP = 7,5 A
 3 (Pin5 - Pin6) zwischen 0*VCC und 0.225*VCC => 1.2*IP = 6,0 A

Nach Auslösung der Überstromerkennung muss zum Rücksetzen des Ausgangs /FAULT (OC_LAST) der Eingang VOC für mindesten THvoc (>1µs) auf VCC (3,3V) gelegt werden. Dies geschieht mittels T5 durch Port B5.

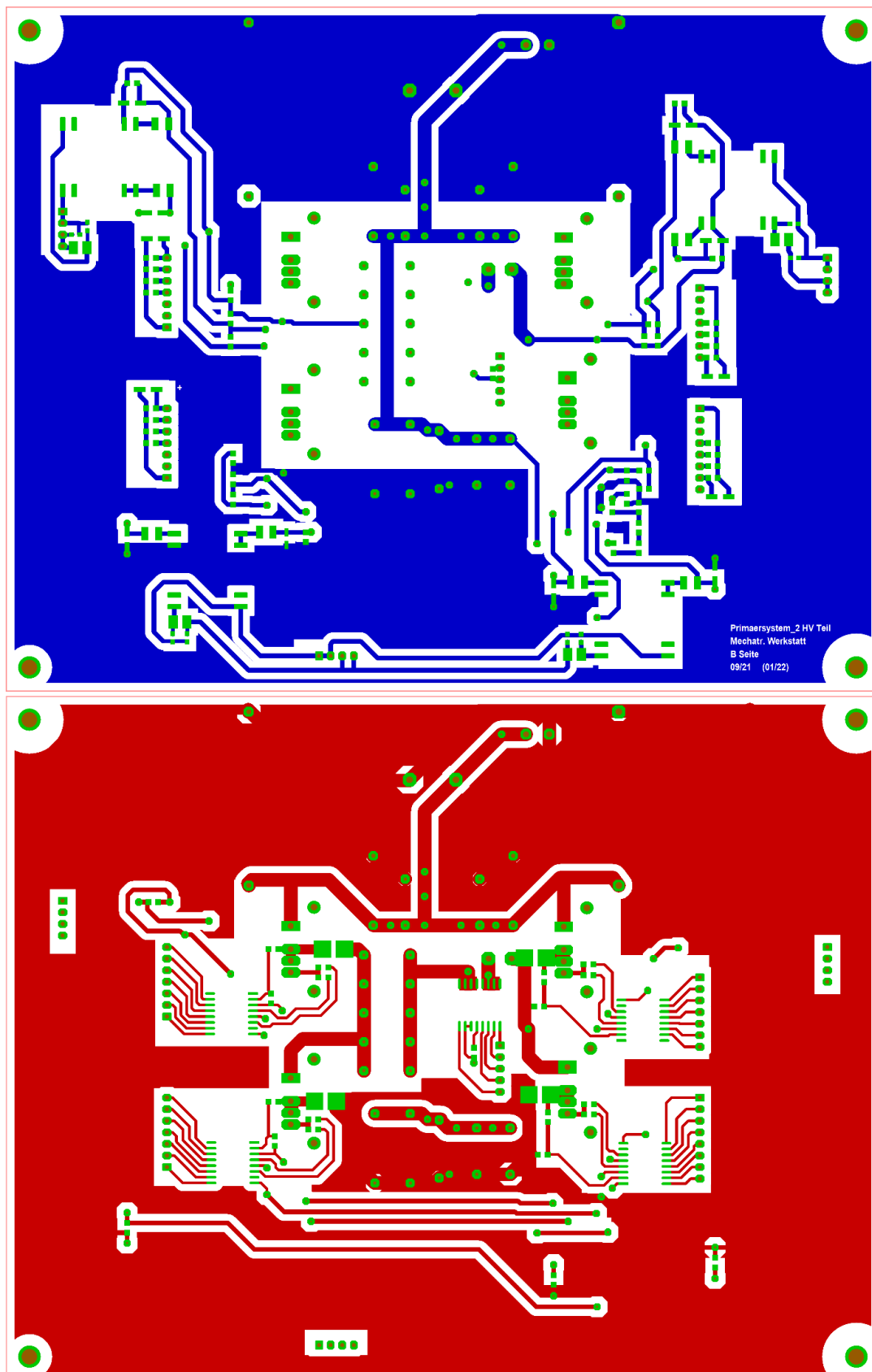


Maßstab	100,97%	Firma	TUBAF IET	Zeichner	MW	Blatt	1
Änderung	06.01.2023 10:17			Titel			
Ausgabe	04.12.2024 14:22			Wechselrichter - Steuerplatine			
Datei	2022_01_Primärsystem_2 Motherboard_P.T3001						

A.B1.4 Wechselrichter Primärsystem – Platinenlayout Leistungsplatine

Obere Abbildung: Kupferfläche Platinenoberseite

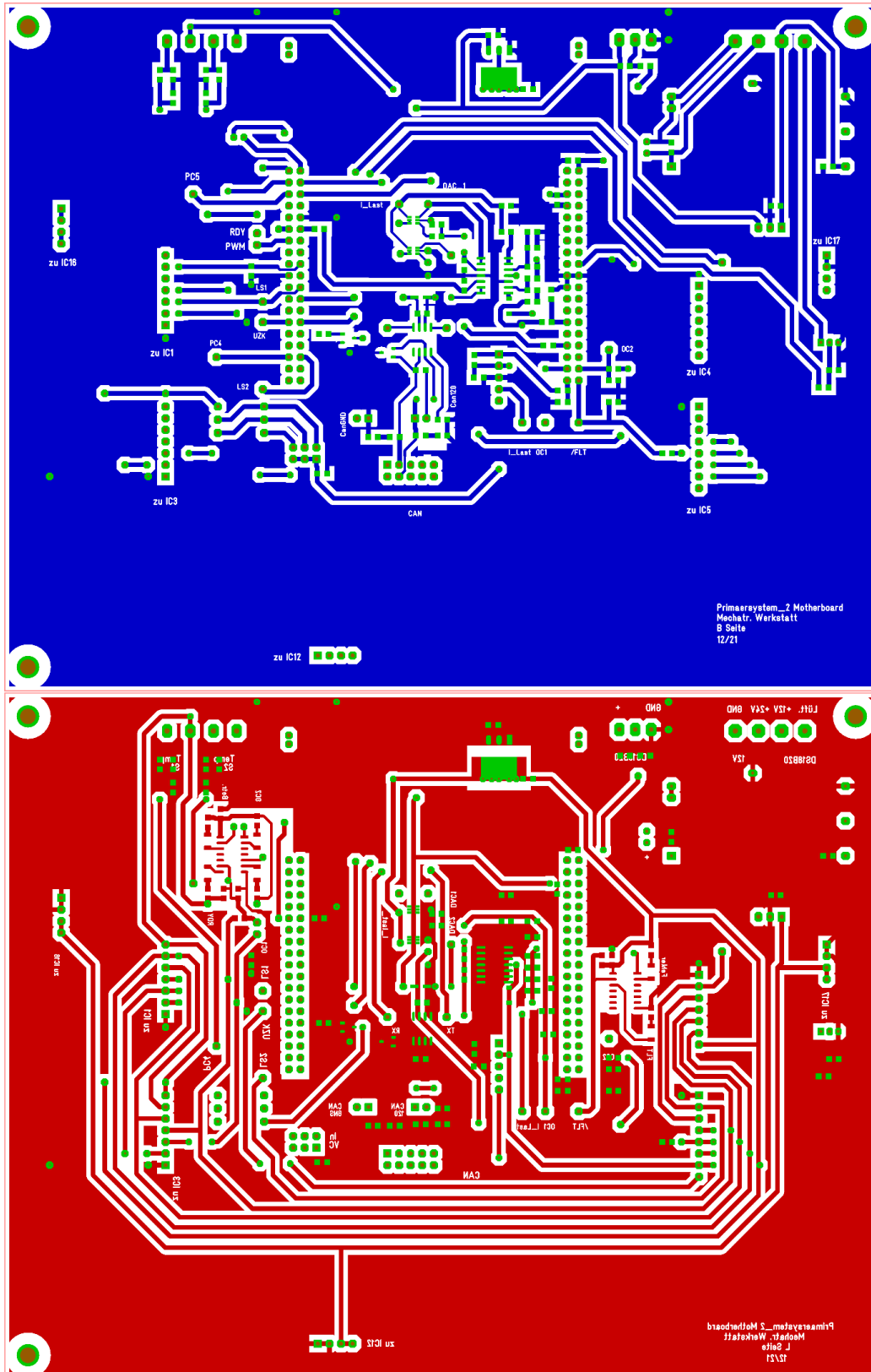
Untere Abbildung: Kupferfläche Platinenunterseite



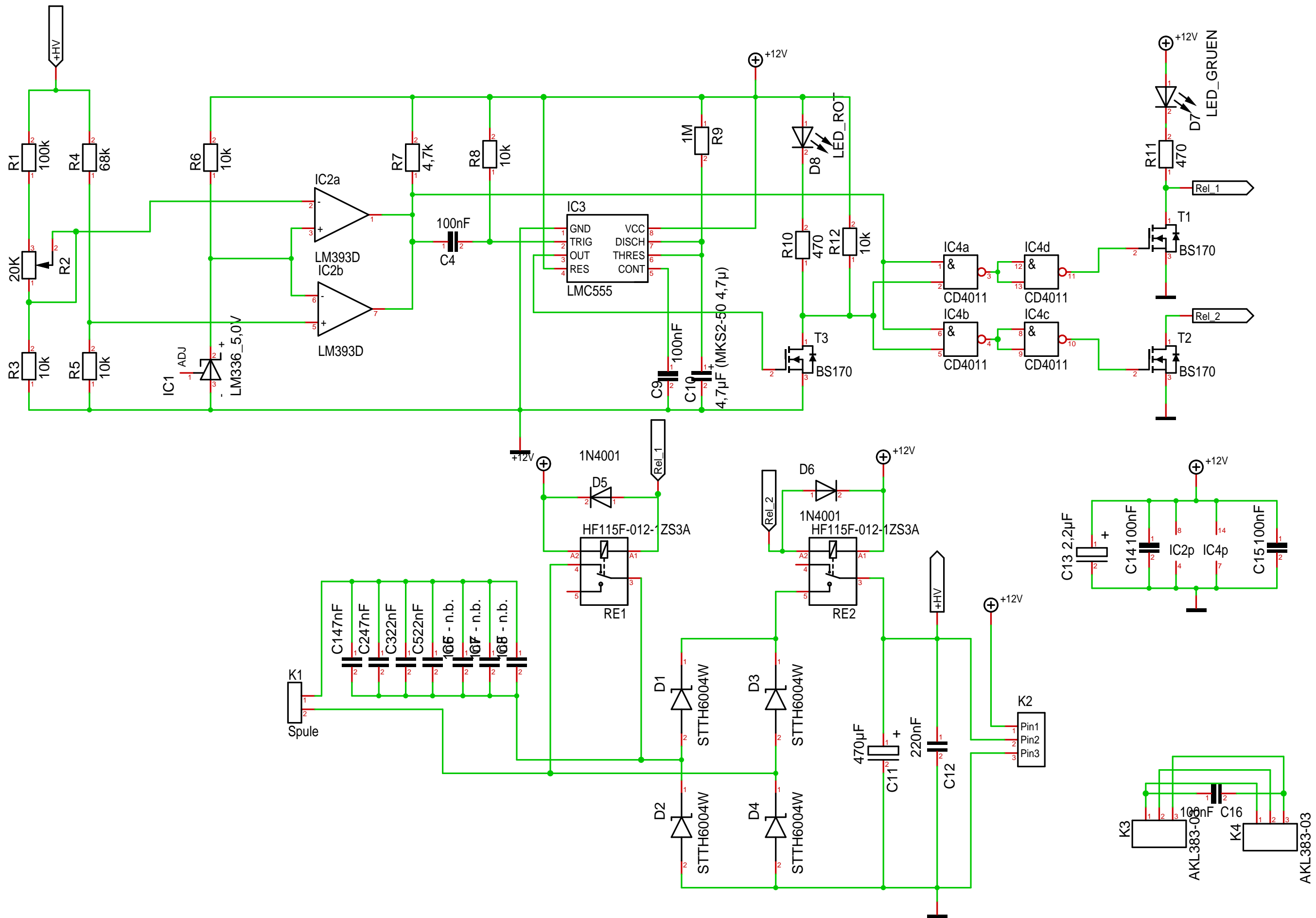
A.B1.5 Wechselrichter Primärsystem – Platinenlayout Steuerplatine

Obere Abbildung: Kupferfläche Platinenoberseite

Untere Abbildung: Kupferfläche Platinenunterseite



A.B1.6 Gleichrichter Sekundärsystem – Schaltplan

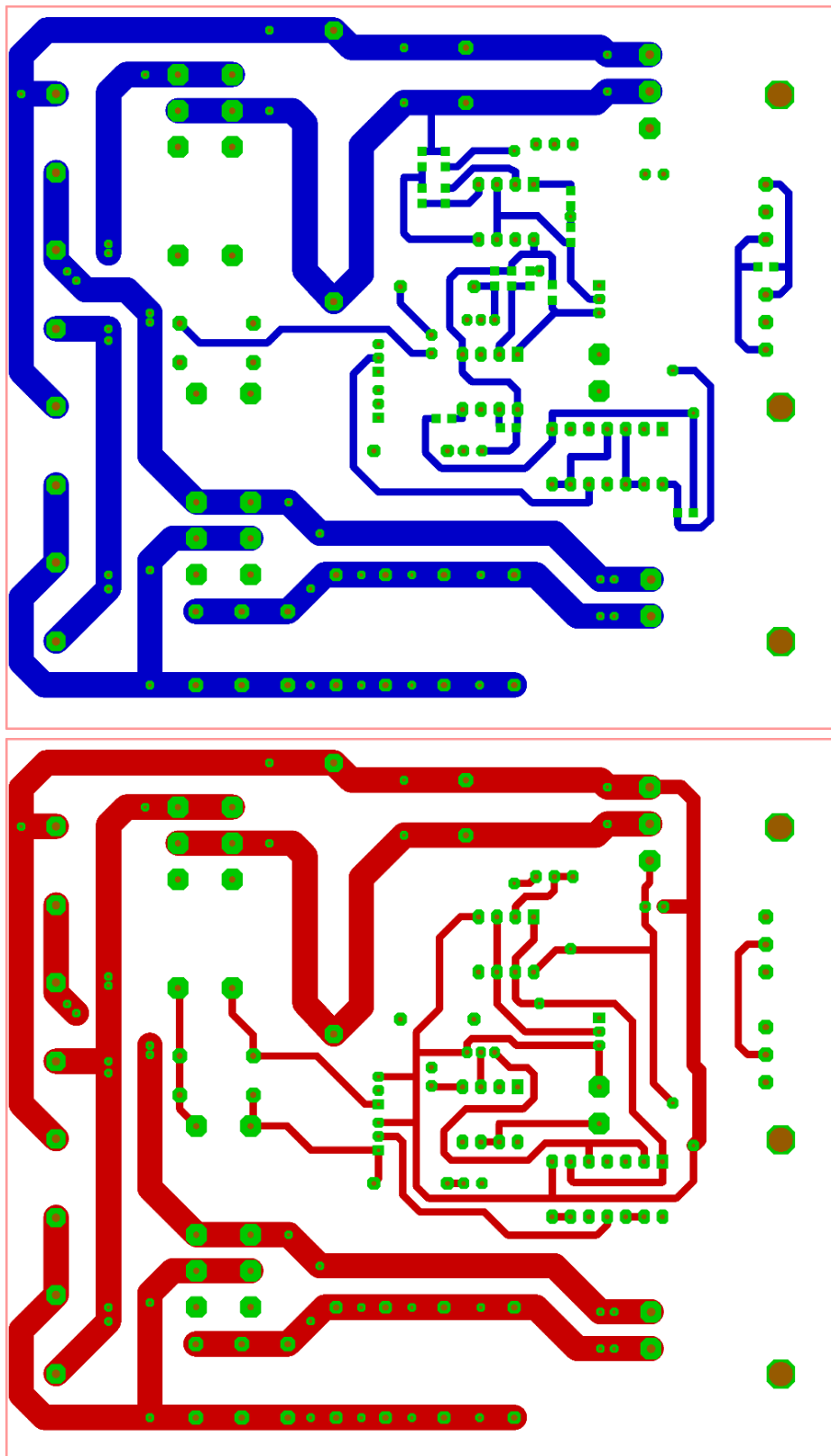


Maßstab	144,10%	Firma	TUBAF IET	Zeichner	MW	Blatt	1
Änderung	04.12.2024 14:34	Titel		Gleichrichter mit Schutzbeschaltung			
Ausgabe	04.12.2024 14:43						
Datei	Gleichrichter_mit_Kurzschliesser_v2_P.T3001A						

A.B1.7 Gleichrichter Sekundärsystem – Platinenlayout

Obere Abbildung: Kupferfläche Platinenoberseite

Untere Abbildung: Kupferfläche Platinenunterseite



A.B1.8 VDE Test-Report

**VDE TEST REPORT****EMC / Radio spectrum**

Report Reference No..... :	293548-TL7-1		
VDE File No..... :	5028840-5980-0001/293548		
Date of issue:	2022-02-28		
Laboratory:	VDE Testing and Certification Institute		
Laboratory Address	Merianstrasse 28, 63069 Offenbach/Main; Germany		
Applicant's name	TU Bergakademie Freiberg Institut für Elektrotechnik		
Applicant's Address			
Applied Standards:			
European Standard			
EN IEC 61980-1:2021 <i>only in parts</i>			
Supplementary information: Spot testing of the listed standards. Emission tests were carried out in order to prevent any influence to the environment.			
Test Report Form No..... :	Radio ETSI EN 300 330 RFID NFC		
Master TRF..... :	2020-11-30		
Test item description	Charging station for electrified bicycles		
Trademark	--		
Manufacturer	TU Bergakademie Freiberg Institut für Elektrotechnik		
Type reference(s)	--		
Final verdict	<input type="checkbox"/>	Pass	<input type="checkbox"/> Fail
Supplementary information	As the report shows a partial examination, no final verdict has been given.		

Report No.:	293548-TL7-1	Page	1	of	23
Disclaimer:					
This test report contains the result of a singular investigation carried out on the product submitted. A sample of this product was tested to found the accordance with the thereafter listed standards or clauses of standards resp.					
The test report does not entitle for the use of a VDE Certification Mark and considers solely the requirements of the specifications mentioned below.					
Whenever reference is made to this test report towards third party, this test report shall be made available on the very spot in full length.					



Responsible Testing Laboratory (as applicable), testing procedure and testing location(s):		
Tested by (Name, Signature)	Hendrik Wissel	 (Authorization of test report)
Function	Testing engineer	
Verified by (Name, Signature)	Giuseppe Citera	
Function	Reviewer	

List of attachments (including a total number of pages in each attachment):	

Summary of testing: See verdict section.	
Tests performed (name of test and test clause): See verdict section.	Testing location: Merianstrasse 28 63069 Offenbach/Main; Germany
Copy of marking plate:	
--	



Possible test case verdicts:	
- test case does not apply to the test object.....:	N/A
- test object does meet the requirement.....:	Pass
- test object does not meet the requirement.....:	Fail
Testing:	
Test sample condition	<input checked="" type="checkbox"/> Non-damaged sample
	Remark: --
Date of receipt of test item	
Date (s) of performance of tests	2022-02-25 See dates for each test case.
General remarks:	
Conformity statement:	
<input checked="" type="checkbox"/> Conformity statement for measurements required by ETSI radio standards is decided in accordance with the applicable ETSI radio standard. <input checked="" type="checkbox"/> Conformity statement for other measurements or tests is decided in accordance with IEC Guide 115, Procedure 2 (Accuracy method). <input type="checkbox"/> Conformity statement is decided in accordance with internal procedure. Procedure number, issue date and title: -- Measurement instrumentation uncertainty: See Annex.	
--	--
<ul style="list-style-type: none"> ▪ This report shall not be reproduced except in full without the written approval of the testing laboratory. ▪ The test results presented in this report relate only to the item(s) tested. ▪ "(see remark #)" refers to a remark appended to the report. ▪ "(see Annex #)" refers to an annex appended to the report. ▪ Throughout this report a comma is used as the decimal separator. 	
Manufacturer's declaration per sub-clause 4.2.5 of IEC 60335-1:	
The application for obtaining a CB test certificate includes more than one factory location and a declaration from the manufacturer stating that the sample(s) submitted for evaluation is (are) representative of the products from each factory has been provided..... :	<input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> Not applicable
When differences exist; they shall be identified in the general product information section.	
Name and address of factory (ies)	--
General product information and other remarks:	



Table of Contents:

1	Description of the equipment.....	5
1.1	Test items	5
1.2	Radio characteristics	5
1.8	Photos of the test item.....	7
2	Verdict summary section.....	8
3	Test conditions	9
3.1	General.....	9
4	Radiated emissions.....	10
4.1	Magnetic field strength acc. to 61980-1:2021	10
4.1.1	Magnetic field strength test protocol.....	11
4.2	Radiated electric emission / field strength acc. to 61980-1:2021 (30 MHz – 1 GHz)	16
4.3	Test protocol (30 MHz – 1 GHz).....	17
4.4	Test protocol (1 - 6 GHz).....	20
5	Annex.....	22
5.1	Measurement instrumentation uncertainty, Decision rule and Software.....	22
5.1.1	Measurement instrumentation uncertainty	22
5.1.2	Decision rule	23
5.1.3	Software	23

1 Description of the equipment

Note: All information in this section has been provided by the applicant.

1.1 Test items

No.	Type designation	Description (Details)
1	WPT- CityPed	Inductive energy transmission system for cargo pedelecs
Supplementary information: --		

1.2 Radio characteristics

Radio technology (relevant for receiver tests)..... :	<input type="checkbox"/>	Tagging system (e.g. Wideband NFC)		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Wireless Power Transfer		
	<input type="checkbox"/>	System in the 27 MHz range		
	<input type="checkbox"/>	Other: --		
Operating frequency..... :		f_L Lower frequency limit:	f_H Upper frequency limit:	Applications
	<input checked="" type="checkbox"/>	11,810 MHz	15,310 MHz	RFID only (Center freq. 13,56 MHz)
	<input type="checkbox"/>	13,553 MHz	13,567 MHz	Inductive devices, Generic use
	<input type="checkbox"/>			
Product class..... :	<input checked="" type="checkbox"/>	Product Class A Class A equipment is equipment suitable for use in all locations except those in the residential environment and those directly connected to a low-voltage supply network supplying buildings used for residential purposes. except those located in the residential environment and those directly connected to a low-voltage supply network supplying buildings used for residential purposes.		
	<input type="checkbox"/>	Product Class B		
Antenna type..... :	<input checked="" type="checkbox"/>	Type 1: Integral antenna		
	<input type="checkbox"/>	Type 2: Dedicated antenna supplied with the equipment. Factory defined loop		
	<input type="checkbox"/>	Customized, large size loop antenna		
	<input type="checkbox"/>	E-field transmitter		
	<input type="checkbox"/>	Other: --		
Power source..... :	<input checked="" type="checkbox"/>	Mains voltage		
	<input type="checkbox"/>	Regulated lead-acid battery power sources		
	<input type="checkbox"/>	Power sources using other types of batteries		
	<input type="checkbox"/>	Other power sources: --		
Supplementary information: --				

1.3 WPT interface

Radio module	<input type="checkbox"/>	There is no dedicated radio module in the test item
	<input checked="" type="checkbox"/>	There is a dedicated radio module in the test item
Type designation of RF module / chip	NodeMCU ESP32	
Software version	--	
Hardware version	--	
Clock frequencies	240 MHz	

1.4 Power supply

Rated power supply		Voltage and Frequency	1 ph/N/PE	2 ph/N/PE	3 ph/N/PE
	<input checked="" type="checkbox"/>	230 V, 50 Hz	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	DC:			
Rated power					

1.5 Accessories

Accessories (not part of the test item)			
No.	Accessory	Type	Manufacturer
1	Cargo pedelec	CityPed ®	TU Bergakademie Freiberg
2			
Supplementary information: --			

1.6 Components – relevant for rf evaluation

Documents as provided by the applicant			
No.	Components	Type	Manufacturer
1	Switching power supply	CSP-3000-400	Mean Well
2	Inverter	#1.1	TU Bergakademie Freiberg
3	Primary coil system	#5	TU Bergakademie Freiberg
4	Secondary coil system	#5	TU Bergakademie Freiberg
5	Rectifier	#3.1	TU Bergakademie Freiberg
6			
Supplementary information: --			

1.7 Modifications to the test item during testing

<input checked="" type="checkbox"/>	No modifications done during testing	
<input type="checkbox"/>	Modifications done during testing (see details below)	
No.	Description of modification including the purpose	Date of modification
1	---	---
Supplementary information: --		

1.8 Photos of the test item



2 Verdict summary section

EN 61980-1:2021					
Frequency range	Requirement	16.2	U/C	Comment	Verdict
---	Immunity requirements	16.2	C	---	N/T
---	Limit values and test conditions for interference emissions in the low frequency range (LF)	16.3.2	C	---	N/T
9 kHz – 1 GHz	Limit values and test conditions for interference emissions in the radio frequency range (HF)	16.3.3	C	---	Tested
EN 55032					
1 – 6 GHz	Requirements for radiated emissions at frequencies above 1 GHz	TA.2 TA.4	C	Due to the radio interfaces	Tested
Legend: U = Unconditional requirement C = Conditional requirement					
Supplementary information: --					



3 Test conditions

3.1 General

Environmental reference conditions	The climatic conditions during the tests are within the limits specified by the manufacturer for the operation of the EUT and the test equipment. The climatic conditions during the tests were within the following limits:		
	Temperature	Humidity	Atmospheric pressure
	15 °C – 35 °C	30 % - 60 %	800 hPa – 1060 hPa
	If explicitly required in the basic standard or applied product standard the climatic values are recorded and documented separately in this test report.		

4 Radiated emissions

4.1 Magnetic field strength acc. to 61980-1:2021

Tested by..... :	Wissel, Hendrik	
Test date..... :	2022-02-25	
Test location (stand)..... :	26 - SAC	
Applied test set-up..... :	<input checked="" type="checkbox"/>	Semi anechoic chamber with 10 m distance between the magnetic loop antenna and the DUT
	<input type="checkbox"/>	Anechoic chamber
	<input checked="" type="checkbox"/>	Other: Centre of the loop antenna at 1,3 m height.
Applied limits	<input checked="" type="checkbox"/>	Class A
	<input type="checkbox"/>	Class B
Supplemental information..... :	Measurement antenna in y-orientation means 90° to the measurement axis Measurement antenna in x-orientation means 0° to the measurement axis	
Applied test modulation	<input checked="" type="checkbox"/>	Standard test modulation
	<input type="checkbox"/>	Other: --

Test set-up photo: Orientation 0° of the DUT, Antenna orientation 90° (Y)



4.1.1 Magnetic field strength test protocol

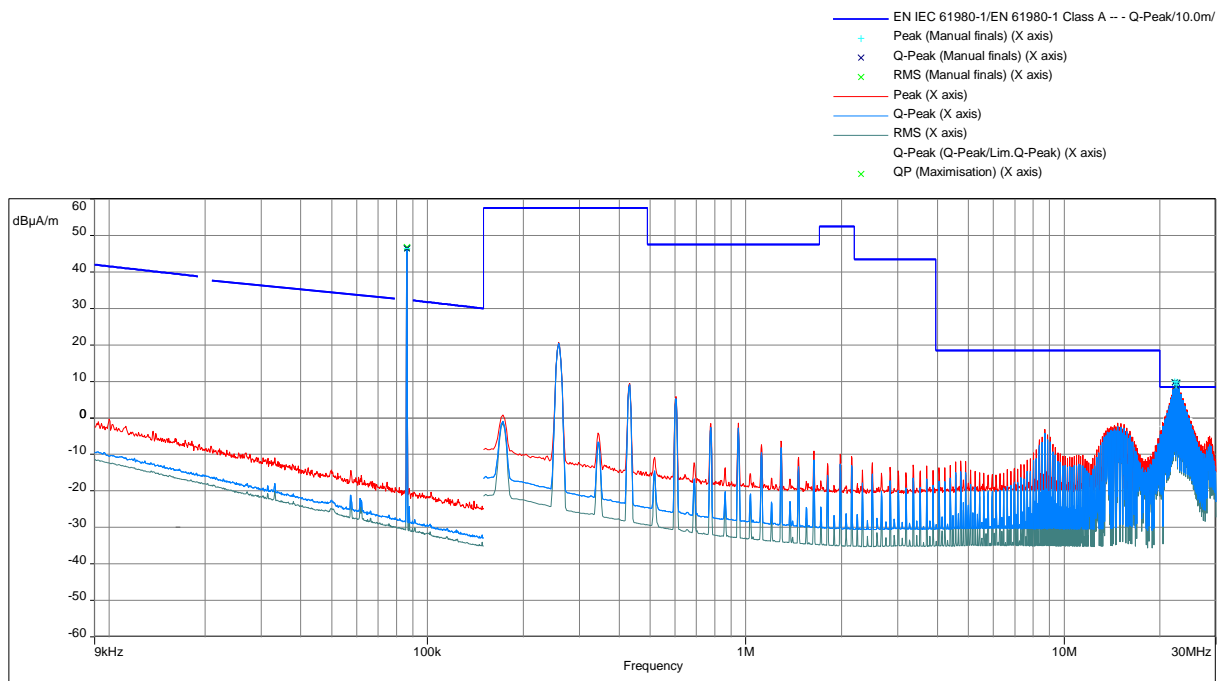
Project number: 293548 TU Freiberg	
Tested by	H. Wissel
Comment on test / measurement	Antenna 0° (X)
Test date	25.02.2022 12:07:25
Test place	SAC / 26
Result	Pass

Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810100	Loop Antenna	Schwarzbeck	FMZB 1513
--	Cable	--	SAC 3m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Frame	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
1) 9kHz - 150kHz	X Axis Position	50Hz	200Hz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF
2) 150kHz - 30MHz	X Axis Position	2.25kHz	9kHz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level Peak / dBµA/m	Level QP / dBµA/m	Limit dBµA/m
0.0861	1	46.41	46.40	92.80
22.30575	2	10.01	9.69	8.50
22.479	2	9.15	8.80	8.50
22.65	2	9.89	9.61	8.50

Supplementary information: The table is listing the highest emissions during a 360° scan. The highest emission was detected at an angle of 90° (Operating cabinet facing the antenna)

Project number: 293548 TU Freiberg

Operating mode	Charging with 6,6 A
Tested by	H. Wissel
Comment on test / measurement	Antenna 0° (X)
Test date	25.02.2022 12:50:00
Test place	SAC / 26
Result	--

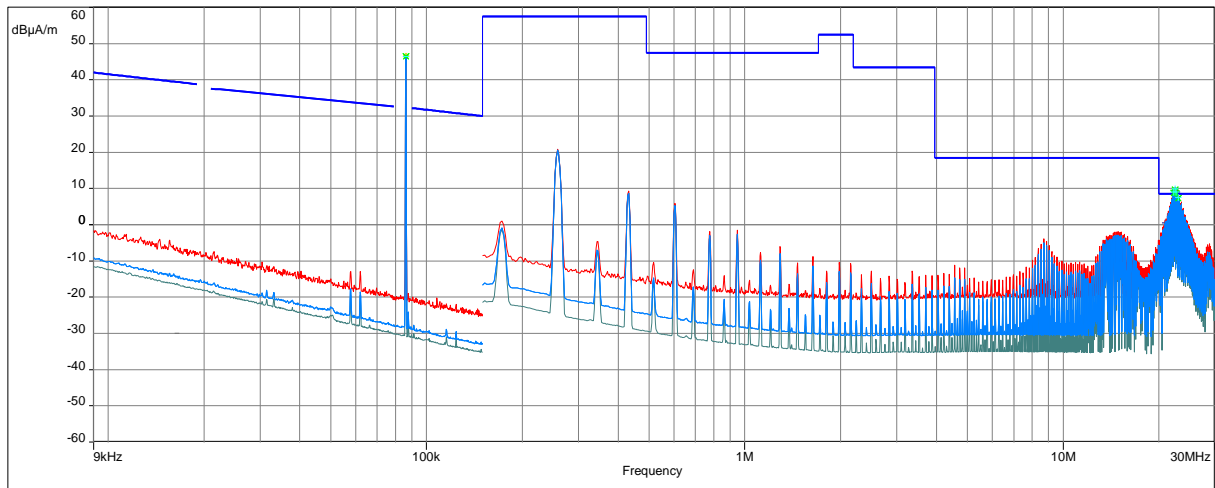
Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810100	Loop Antenna	Schwarzbeck	FMZB 1513
--	Cable	--	SAC 3m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Frame	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
9kHz - 150kHz	X Axis Position	50Hz	200Hz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF
150kHz - 30MHz	X Axis Position	2.25kHz	9kHz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF

- EN IEC 61980-1/EN 61980-1 Class A -- Q-Peak/10.0m/
- ◇ Peak (Manual suspects) (X axis)
- ◇ Q-Peak (Manual suspects) (X axis)
- ◇ RMS (Manual suspects) (X axis)
- + Peak (Manual finals) (X axis)
- x Q-Peak (Manual finals) (X axis)
- x RMS (Manual finals) (X axis)
- Peak (X axis)
- Q-Peak (X axis)
- RMS (X axis)
- + Q-Peak (Q-Peak/Lim.Q-Peak) (X axis)
- x QP (Maximisation) (X axis)



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level Peak / dBµA/m	Level QP / dBµA/m	Limit dBµA/m
0.08615	1	46.44	46.43	92.80
22.30575	2	9.07	8.73	8.50
22.479	2	9.89	9.59	8.50
22.65	2	8.99	8.65	8.50
22.99425	2	7.59	7.24	8.50

Supplementary information: The table is listing the highest emissions during a 360° scan. The highest emission was detected at an angle of 90° (Operating cabinet facing the antenna)

Project number: 293548 TU Freiberg

Operating mode	Charging with 6 A
Tested by	H. Wissel
Comment on test / measurement	Antenna 0° (X)
Test date	25.02.2022 12:57:44
Test place	SAC / 26
Result	Pass

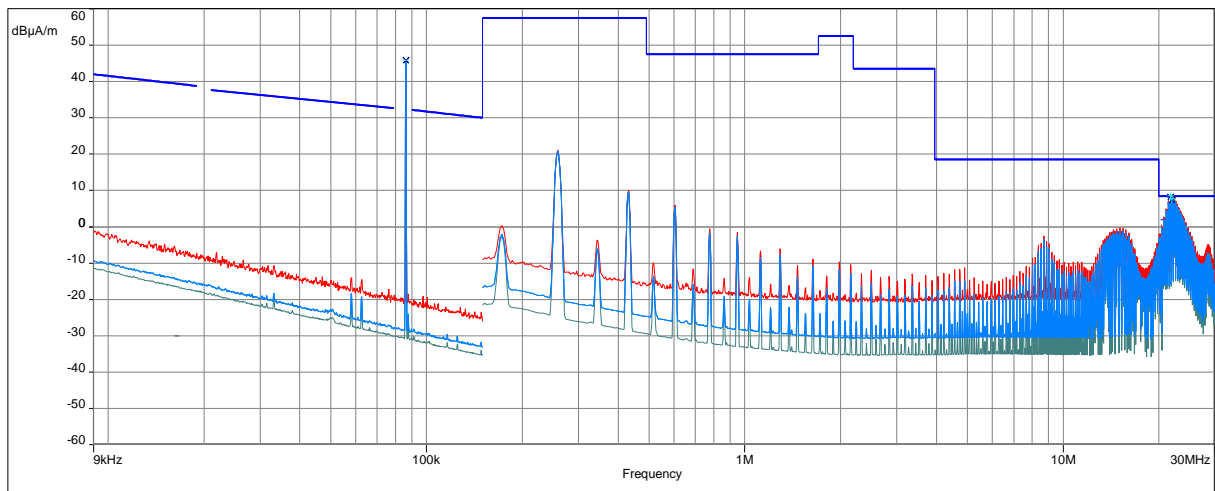
Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810100	Loop Antenna	Schwarzbeck	FMZB 1513
--	Cable	--	SAC 3m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Frame	Frequency step	IF Bandwith	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
9kHz - 150kHz	X Axis Position	50Hz	200Hz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF
150kHz - 30MHz	X Axis Position	2.25kHz	9kHz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF

- EN IEC 61980-1/EN 61980-1 Class A -- Q-Peak/10.0m/
- Peak (Manual suspects) (X axis)
- ◇ Q-Peak (Manual suspects) (X axis)
- RMS (Manual suspects) (X axis)
- + Peak (Manual finals) (X axis)
- x Q-Peak (Manual finals) (X axis)
- x RMS (Manual finals) (X axis)
- Peak (X axis)
- Q-Peak (X axis)
- RMS (X axis)
- + Q-Peak (Q-Peak/Lim.Q-Peak) (X axis)



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level Peak / dBµA/m	Level QP / dBµA/m	Limit dBµA/m
0.08615	1	45.84	45.83	92.80
21.78825	2	8.50	8.19	8.50
21.9615	2	7.68	7.30	8.50

Supplementary information: The table is listing the highest emissions during a 360° scan. The highest emission was detected at an angle of 90 ° (Operating cabinet facing the antenna)

Project number: 293548 TU Freiberg

Operating mode	Charging with 6 A
Tested by	H. Wissel
Comment on test / measurement	Antenna 90° (Y)
Test date	25.02.2022 13:16:56
Test place	SAC / 26
Result	Pass

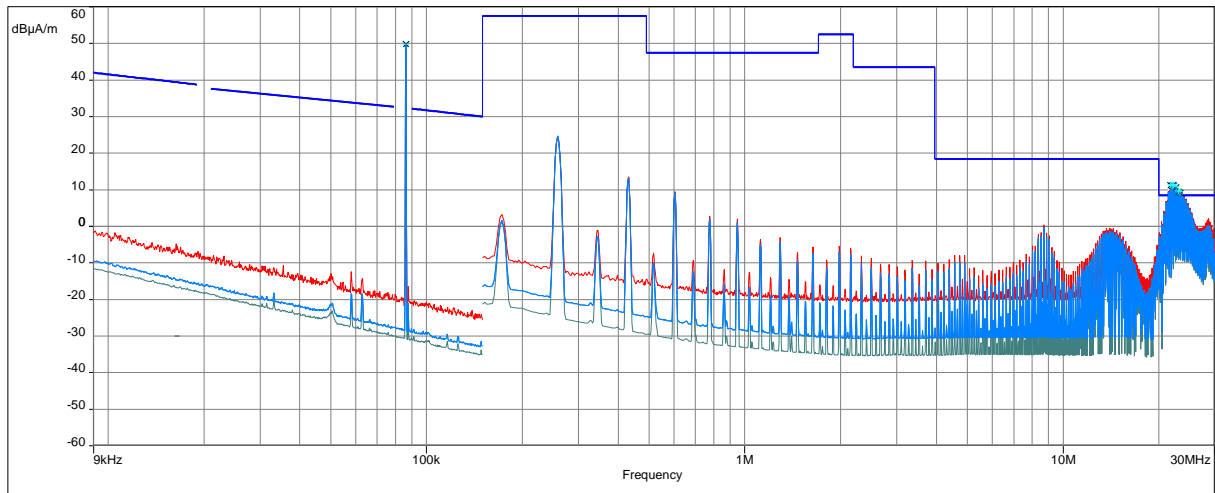
Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810100	Loop Antenna	Schwarzbeck	FMZB 1513
--	Cable	--	SAC 3m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Frame	Frequency step	IF Bandwith	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
1) 9kHz - 150kHz	X Axis Position	50Hz	200Hz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF
2) 150kHz - 30MHz	X Axis Position	2.25kHz	9kHz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF

- EN IEC 61980-1/EN 61980-1 Class A -- - Q-Peak/10.0m/
- + Peak (Manual finals) (X axis)
- x Q-Peak (Manual finals) (X axis)
- x RMS (Manual finals) (X axis)
- Peak (X axis)
- Q-Peak (X axis)
- RMS (X axis)
- Q-Peak (Q-Peak/Lim.Q-Peak) (X axis)



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level Peak / dBµA/m	Level QP / dBµA/m	Limit dBµA/m
0.0861	1	49.80	49.79	92.80
21.78825	2	11.47	11.17	8.50
21.9615	2	11.23	10.97	8.50
22.1325	2	11.46	11.21	8.50
22.30575	2	11.26	11.02	8.50
22.65	2	10.90	10.63	8.50
22.9965	2	9.72	9.39	8.50
23.34075	2	9.49	9.14	8.50

Supplementary information: The table is listing the highest emissions during a 360° scan. The highest emission was detected at an angle of 90 ° (Operating cabinet facing the antenna)

**Project number: 293548 TU Freiberg**

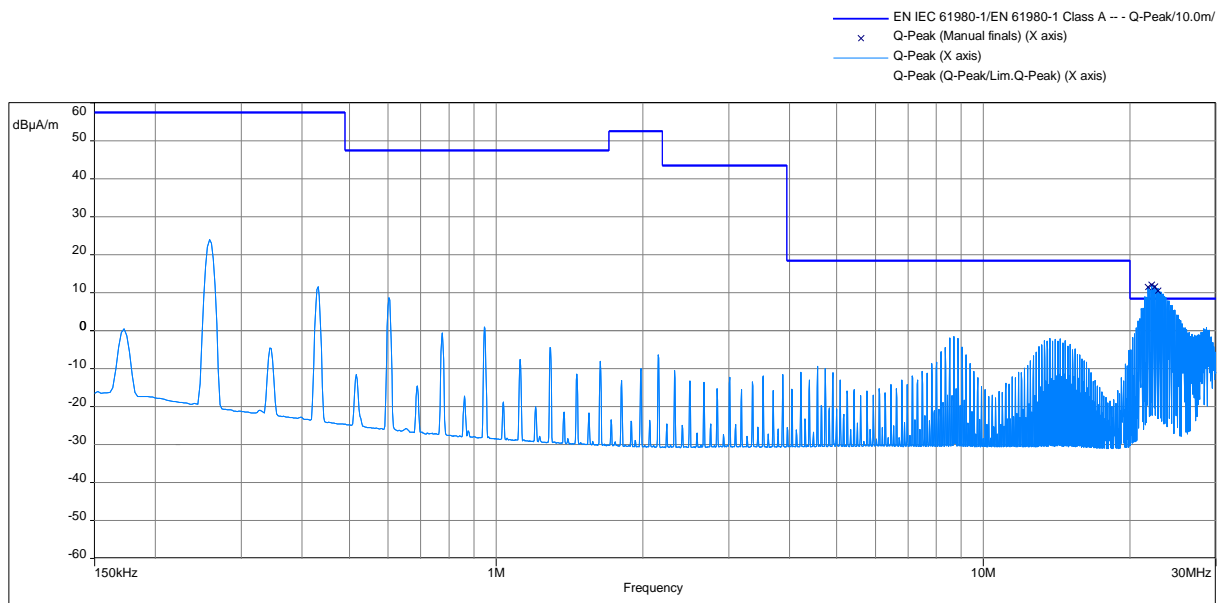
Operating mode	Charging with 5.3 A
Tested by	H. Wissel
Comment on test / measurement	Antenna 90° (Y)
Test date	25.02.2022 13:41:01
Test place	SAC / 26
Result	---

Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810100	Loop Antenna	Schwarzbeck	FMZB 1513
--	Cable	--	SAC 3m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Frame	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
150kHz - 30MHz	X Axis Position	2.25kHz	9kHz	1000 ms/Step	10 dB	OFF	OFF



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level QP / dBµA/m	Limit / dBµA/m
21.78825	1	11.48	8.50
22.1325	1	12.10	8.50
22.47675	1	11.58	8.50
22.821	1	10.45	8.50

Supplementary information: The table is listing the highest emissions during a 360° scan. The highest emission was detected at an angle of 90° (Operating cabinet facing the antenna)

4.2 Radiated electric emission / field strength acc. to 61980-1:2021 (30 MHz – 1 GHz)

Tested by..... :	Wissel, Hendrik	
Test date..... :	2022-02-25	
Test location (stand)..... :	26 - SAC	
Applied test set-up..... :	<input checked="" type="checkbox"/>	Semi anechoic chamber with 10 m distance between the magnetic loop antenna and the DUT
	<input type="checkbox"/>	Anechoic chamber
	<input type="checkbox"/>	Other: --
Applied limits :	<input checked="" type="checkbox"/>	Class A
	<input type="checkbox"/>	Class B
Supplemental information..... :	--	
Applied test modulation :	<input checked="" type="checkbox"/>	Standard test modulation
	<input type="checkbox"/>	Other: --

Test set-up photo



4.3 Test protocol (30 MHz – 1 GHz)

Radiated Electrical Emission Measurement

Project number: 293548 TU Freiberg	
Comment on test / measurement	Standby, http connect, CAN active,
Test date	25.02.2022 09:53:43
Test place	SAC / 26
Result	Pass

Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810061	Trilog Super Broadband Antenna	Schwarzbeck	VULB 9163
	Antenna Mast	Maturo	BAM 4.0-P with NCD
--	Cable	--	SAC 10m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Line	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
30MHz - 1GHz	H/V	30kHz	120kHz	50 ms/Step	0 dB	ON	ON

Sub-range 1

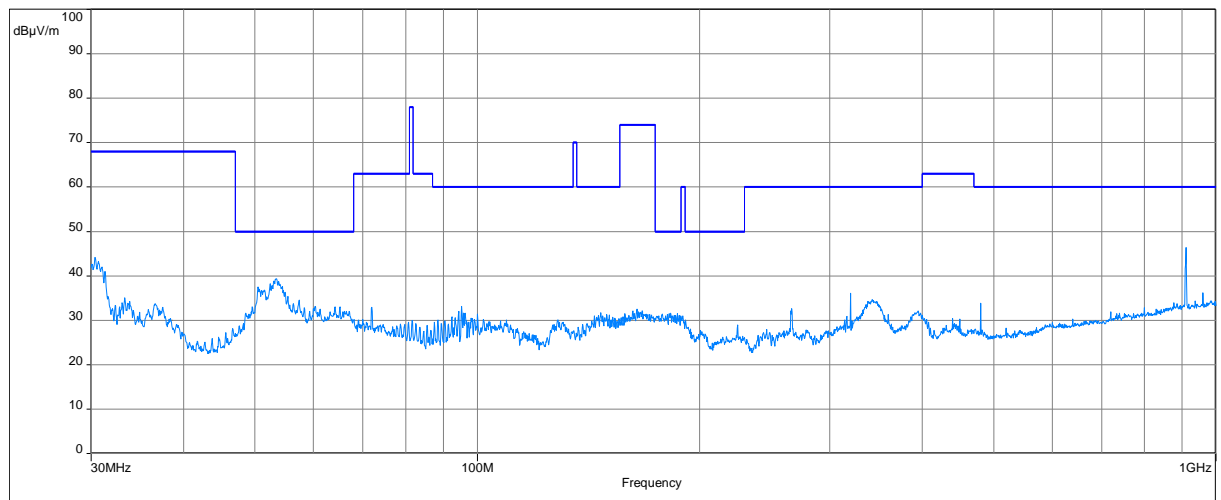
Frequencies: 30 MHz - 1 GHz (Mode: - Step: 30 kHz)

Settings: RBW: 120kHz, VBW: Auto, Sweep time: 50 ms/Pts, Attenuation: 0 dB, Sweep count: 1, Preamp: On: 10 dB, LN Preamp: Off, Preselector: On

Polarization:H/V

Distance: 10 m

— EN 55011/EN 55011 Group 2 Test site A - QPeak/10.0m/
— Peak



VDE Testing and Certification Institut

Results:

—

**Project number: 293548 TU Freiberg**

Operating mode	6,6 A
Tested by	--
Comment on test / measurement	Charging mode
Test date	25.02.2022 10:20:39
Test place	SAC / 26
Result	--

Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810061	Trilog Super Broadband Antenna	Schwarzbeck	VULB 9163
	Antenna Mast	Maturo	BAM 4.0-P with NCD
--	Cable	--	SAC 10m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Line	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
30MHz - 1GHz	H/V	30kHz	120kHz	50 ms/Step	0 dB	ON	ON

— EN 55011/EN 55011 Group 2 Test site A - QPeak/10.0m/
 Peak
 ◊ Peak (Peak/Lim.Q-Peak)
 × Q-peak (Maximisation)
 × Q-peak (Maximisation)

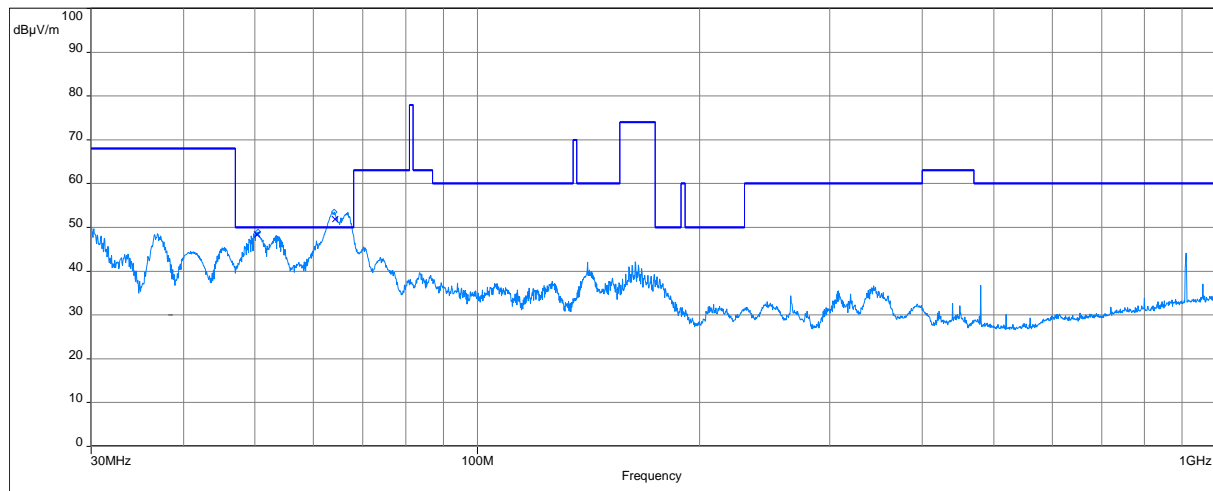
Sub-range 1

Frequencies: 30 MHz - 1 GHz (Mode: - Step: 30 kHz)

Settings: RBW: 120kHz, VBW: Auto, Sweep time: 50 ms/Pts, Attenuation: 0 dB, Sweep count: 1, Preamp: On: 10 dB, LN Preamp: Off, Preselector: On

Polarization:H/V

Distance: 10 m



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level QP / dBµA/m	Limit / dBµA/m	Polarization
50.3016	1	48.38	50.00	Vertical
63.9768	1	53.42	50.00	Vertical*

*Antenna height at 3 m, Turntable azimuth at 100°

—

**Project number: 293548 TU Freiberg**

Operating mode	Charging with 6 A
Tested by	--
Comment on test / measurement	Charging mode
Test date	25.02.2022 13:54:06
Test place	SAC / 26
Result	--

Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810061	Trilog Super Broadband Antenna	Schwarzbeck	VULB 9163
	Antenna Mast	Maturo	BAM 4.0-P with NCD
--	Cable	--	SAC 10m Antenna Cable Path 2
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Line	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
30MHz - 1GHz	H/V	30kHz	120kHz	50 ms/Step	0 dB	ON	ON

— EN 55011/EN 55011 Group 2 Test site A - QPeak/10.0m/
Peak
 ◊ Peak (Peak/Lim.Q-Peak)
 × Q-peak (Maximisation)

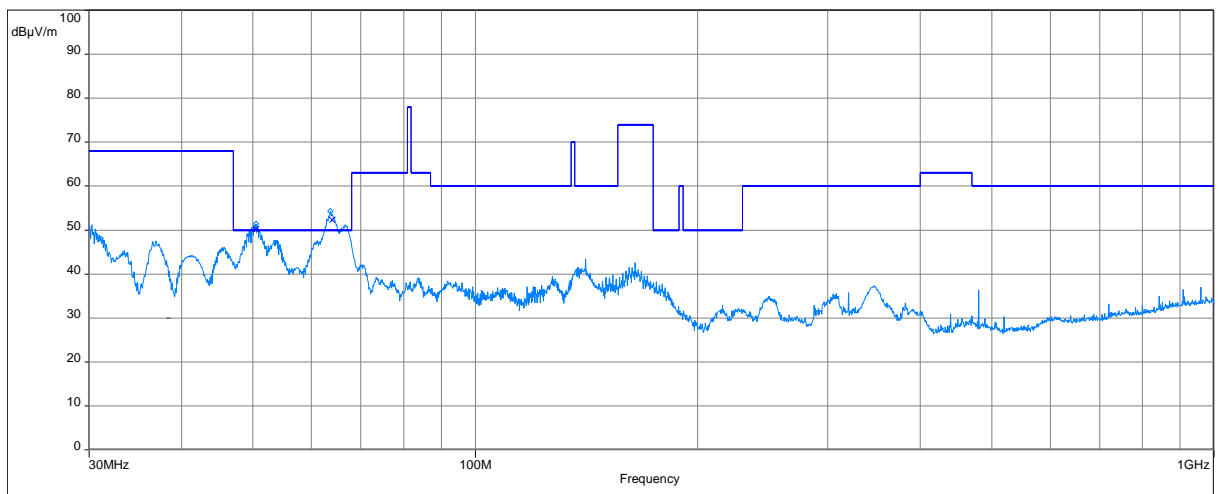
Sub-range 1

Frequencies: 30 MHz - 1 GHz (Mode: - Step: 30 kHz)

Settings: RBW: 120kHz, VBW: Auto, Sweep time: 50 ms/Pts, Attenuation: 0 dB, Sweep count: 1, Preamp: On: 10 dB, LN Preamp: Off, Preselector: On

Polarization:H/V

Distance: 10 m



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level QP / dBµA/m	Limit / dBµA/m	Polarization
50.4672	1	50.15	50.00	Vertical
63.9768	1	52.35	50.00	Vertical*

*Antenna height at 3 m, Turntable azimuth at 97,2°

—

4.4 Test protocol (1 - 6 GHz)

Project number: 293548 TU Freiberg	
Operating mode	6 A
Tested by	--
Comment on test / measurement	--
Test date	25.02.2022 15:18:56
Test place	SAC / 26
Result	--

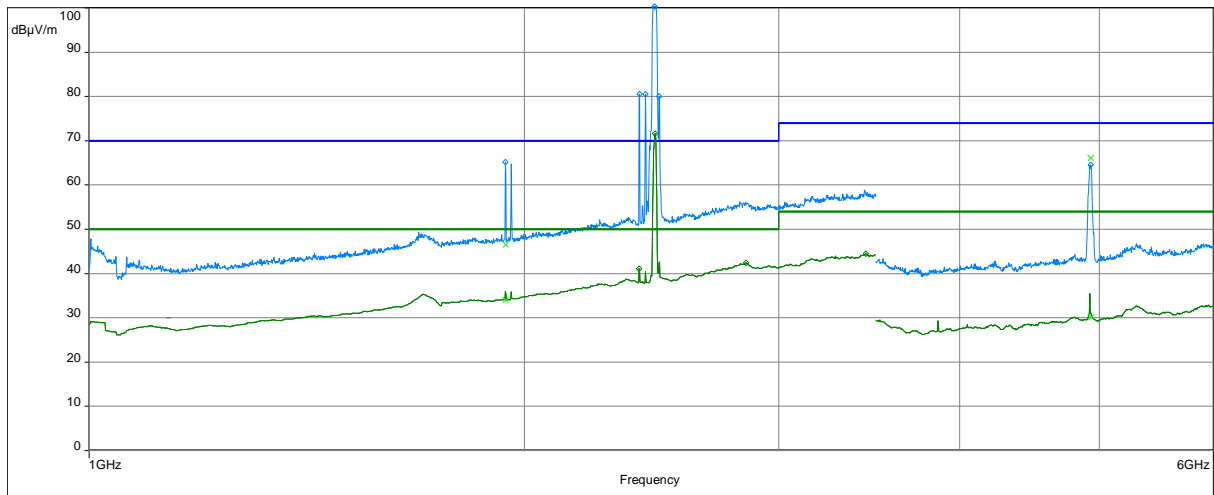
Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810066	Log. Per. Antenna	Rohde & Schwarz	HL025
--	Cable 9m	Huber+Suhner	RF cable
--	Cable	--	GHz path in SAC (3m)
--	Cable 9m with preamplifier and high pass filter	Huber+Suhner	RF cable with 35 dB preamp.
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Line	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
1GHz - 3.5GHz	H/V	250kHz	1MHz	100 ms/Step	0 dB	ON	ON
3.5GHz - 6GHz	H/V	250kHz	1MHz	100 ms/Step	10 dB	OFF	ON

- EN 55032/EN 55032 (1 - 6 GHz) B - Average/3.0m/
- EN 55032/EN 55032 (1 - 6 GHz) B - Peak/3.0m/
- Peak
- Avg
- ◊ Peak (Peak/Lim.Peak)
- ◊ Avg (Avg/Lim.Avg)
- × Peak (Peak results)
- × CISPR Avg (Avg results)



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level QP / dBµA/m	Limit / dBµA/m	Polarization
1941.92	1	46.54	70.00	Vertical
4931.46	2	66.07	74.00	Vertical

Communication frequencies within the 2,4 GHz ISM Band are not judged.

--

Project number: 293548 TU Freiberg

Operating mode	6 A
Tested by	--
Comment on test / measurement	--
Test date	25.02.2022 15:18:56
Test place	SAC / 26
Result	--

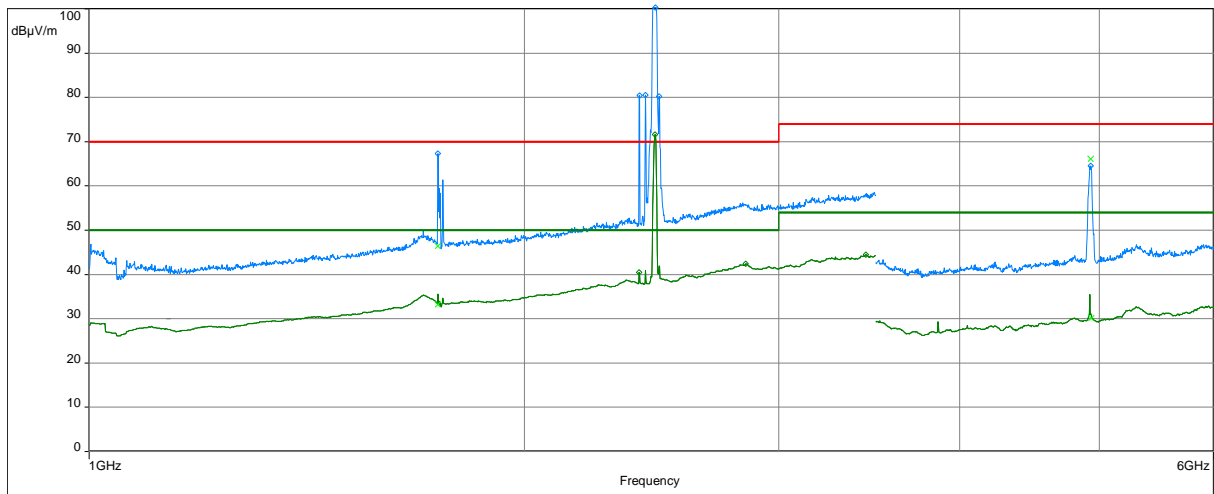
Instruments:

Inventory number	Description	Manufacturer	Type
1810066	Log. Per. Antenna	Rohde & Schwarz	HL025
--	Cable 9m	Huber+Suhner	RF cable
--	Cable	--	GHz path in SAC (3m)
--	Cable 9m with preamplifier and high pass filter	Huber+Suhner	RF cable with 35 dB preamp.
1800176	EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESR
--	Turntable	Frankonia	FC02

Prescan settings:

Subrange	Line	Frequency step	IF Bandwidth	Measurement time	RF Attenuation	Preamplifier	Presel. Multisampling
1GHz - 3.5GHz	H/V	250kHz	1MHz	100 ms/Step	0 dB	ON	ON
3.5GHz - 6GHz	H/V	250kHz	1MHz	100 ms/Step	10 dB	OFF	ON

- EN 55032/EN 55032 (1 - 6 GHz) B - Average/3.0m/
- EN 55032/EN 55032 (1 - 6 GHz) B - Peak/3.0m/
- Peak
- Avg
- ◊ Peak (Peak/Lim.Peak)
- ◊ Avg (Avg/Lim.Avg)
- × Peak (Peak results)
- × CISPR Avg (Avg results)



VDE Testing and Certification Institut

Results:

Frequency /MHz	Subrange	Level QP / dBµA/m	Limit / dBµA/m	Polarization
1742.45	1	46.45	70.00	Horizontal
4931.46	2	66.07	74.00	Vertical

Communication frequencies within the 2,4 GHz ISM Band are not judged.

--

5 Annex

5.1 Measurement instrumentation uncertainty, Decision rule and Software

Version 007; 2021-06-24

5.1.1 Measurement instrumentation uncertainty

Radiated disturbances

Type of disturbance Test method	Main test equipment	Calculated expanded uncertainty	U _{CISPR}
Magnetic field strength 9 kHz ... 30 MHz	Loop antenna 60 cm Measurement receiver or FFT 3 m test distance (E023_01 V001)	3,66 dB	not specified
Magnetic field strength (Induced RF current) 9 kHz ... 30 MHz	Loop antenna system 2 m Ø (Van Veen) Measurement receiver or FFT (E024_01 V001)	3,64 dB	not specified
Electric field strength 30 MHz ... 1000 MHz Horizontal and Vertical	Biconical/Log.-per. combination antenna Measurement receiver 10 m SAC no external preamp (E018_01 V003) With external preamp (E018_02 V003)	5,5 dB 5,9 dB	6,3 dB 6,3 dB
	Biconical/Log.-per. combination antenna Measurement receiver 3 m FAR (E031_01 V001)	5,2 dB	5,3 dB
Electric field strength 1 GHz ... 6 GHz	Log.-per. antenna Spectrum Analyzer or Receiver Switching unit with amplifiers + filter 3 m FSOATS (SAC with floor absorbers) (E020_01 V001)	5,1 dB	5,2 dB
	Log.-per. antenna Measurement receiver 3 m FAR, no preamp (E031_01 V001)	4,5 dB	5,2 dB
Electric field strength 6 GHz ... 18 GHz	Log.-per. antenna Measurement receiver 3 m FAR, no preamp (E031_01 V001)	4,8 dB	5,5 dB

The calculated numbers were calculated in accordance with CISPR 16-4-2:2011 + AM1:2014 (some with + AMD2:2018). They are valid for the expanded uncertainty (k=2) of measurements that have been carried out in accordance with the provisions of the relevant parts of CISPR 16.

Typically, the MU calculated for immunity standards shall not be considered during testing (e.g. C.5 of IEC 61000-4-4:2012). Therefore, the uncertainties of some of the immunity test set-ups have not been documented, except those mentioned above. All instrumentation used for immunity tests is calibrated and within the specifications required by the basic standards (IEC 61000-4-X).

Internal procedure used for type testing through which traceability of the measuring uncertainty has been established: PG 0114, 2020-07-10, "Ermittlung und Anwendung der Messunsicherheit"

Calculations leading to the reported values are on file within the testing laboratory that conducted the testing.

5.1.2 Decision rule

Applied decision rule(s)	
<input checked="" type="checkbox"/>	The conformity statements for EMC emission measurements according CISPR standards are decided as required by the applied product standard, typically referring to the decision rule of CISPR 16-4-2 clause 4.
<input checked="" type="checkbox"/>	A decision rule for EMC immunity tests is not required since the test instrumentation uncertainty (e. g. as calculated according to the IEC 61000-4-X series) has no influence on the test signal and therefore the test result.
<input checked="" type="checkbox"/>	Conformity statements for other measurements than EMC emission or EMC immunity in this report are decided in accordance with IEC Guide 115:2021 Procedure 2, Accuracy method.
<input type="checkbox"/>	The conformity statements in this report are decided in accordance with the following procedure. Procedure number, issue date and title: --

5.1.3 Software

The versions of the software programs which have been applied for the tests and measurements are documented in the laboratory Quality Management System. On request of the client the applied software version can be submitted.

A.C Reallabor

A.C.1 Nutzungsvereinbarung

Stand: 04.04.2022

Nutzungsbedingungen für Fahrzeuge im Rahmen des Projekts „SteigtUM“

Die **Technische Universität Bergakademie Freiberg**,

Akademiestraße 6, 09596 Freiberg

vertreten durch den Kanzler

Ausführende Stellen:

Institut für Elektrotechnik

Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung

Institut für Informatik

(nachfolgend **TU BAF** genannt)

bietet im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts „SteigtUM“ die Möglichkeit, Lastenpedelecs, genannt CityPeds und Scooter, genannt CityScooter, (zusammengefasst: Fahrzeuge) sowie das zugehörige Verleihsystem in der Praxis zu erproben. Dies geschieht zu nachfolgenden Bedingungen. Soweit im Folgenden grammatisch männliche Bezeichnungen für Personen verwendet werden, gelten diese für alle Menschen ohne Ansehen der Geschlechtszugehörigkeit.

Die Nutzung wird angeboten für Mitglieder und Angehörige der TU BAF sowie für Mieter der Städtischen Wohnungsgesellschaft Freiberg AG (SWG) und deren Haushaltsangehörige im Alter von mindestens 16 Jahren, die sich bei der TU BAF hierfür haben registrieren lassen und durch die TU BAF akzeptiert wurden (Nutzer). Die TU BAF entscheidet über die Anzahl der zuzulassenden Nutzer und über Annahme oder Ablehnung jedes einzelnen Nutzungsantrages abschließend und unter Ausschluss des Rechtsweges.

§ 1 Vertragsgegenstand, Nutzungsumfang, Nutzungsentgelt

- (1) Gegenstand der Nutzungsvereinbarung ist die befristete unentgeltliche Benutzung eines der im Eigentum der TU BAF stehenden Fahrzeuge innerhalb Deutschlands unter der Voraussetzung gleichzeitiger Teilnahme an der wissenschaftlichen Begleitforschung der TU Chemnitz.
- (2) Der Nutzer hat keinen Anspruch auf Verfügbarkeit und Benutzbarkeit eines Fahrzeugs, sondern lediglich das Recht, vorhandene, über das elektronische Verleihsystem buchbare Fahrzeuge zu nutzen, sofern und solange sie funktionstüchtig sind. Der Nutzer kann nicht mehrere Fahrzeuge gleichzeitig reservieren oder nutzen.

- (3) Die Nutzung ist im Rahmen eines Verleihvorganges auf die vereinbarte Zeit begrenzt. Das ausgeliehene Fahrzeug ist innerhalb der vereinbarten Zeit ordnungsgemäß zurückzubringen.
- (4) Die Fahrzeuge werden nur zur privaten bestimmungsgemäßen Nutzung angeboten. Sportwettkämpfe, Rennen und ähnliches sind untersagt. Gewerbliche oder berufliche Nutzung ist nicht zulässig und führt zum Ausschluss von der weiteren Nutzung sowie zur Berechnung eines angemessenen Nutzungsentgeltes für die Dauer der gewerblichen oder beruflichen Nutzung.
- (5) Durch die Entleihe eines Fahrzeugs akzeptiert der Nutzer die jeweils aktuelle Fassung der „Nutzungsbedingungen für Fahrzeuge im Rahmen des Projekts ‚SteigtUM‘“.

§ 2 Vertragsdauer

- (1) Die Laufzeit des Nutzungsverhältnisses beginnt mit der Freischaltung zur Nutzung in der SteigtUM-App und endet spätestens mit dem Ende der Erprobungsphase im Projekt „SteigtUM“.
- (2) Das Nutzungsverhältnis endet zudem mit Wegfall der Nutzungsberechtigung, also Ausscheiden aus der TU BAF oder Beendigung des Mietverhältnisses mit der SWG.
- (3) Sowohl Nutzer als auch TU BAF sind berechtigt, das Nutzungsverhältnis jederzeit ohne Angabe von Gründen zu beenden.
- (4) Die vorliegenden Nutzungsbedingungen gelten weiter, solange der Nutzer ein etwa ausgeliehenes Fahrzeug nicht zurückgegeben hat. Zum Zeitpunkt der Beendigung des Nutzungsverhältnisses begründete Schadensersatzansprüche bleiben unberührt.

§ 3 Rechte und Pflichten der TU BAF

- (1) Die TU BAF ist bestrebt, die Fahrzeuge und das Verleihsystem in einwandfreiem und funktionstüchtigem Zustand vorzuhalten. Sie wird keine Fahrzeuge ausgeben, deren Mangelhaftigkeit ihr bekannt ist.
- (2) Die TU BAF trägt die Kosten für den Betrieb des Verleihsystems, die Kosten der Antriebsenergie und die Abnutzung der Fahrzeuge und Garagen durch bestimmungsgemäßen Gebrauch. Die Fahrzeuge werden jeweils mit aufgeladenem Akku ausgegeben.

- (3) Zu Beginn des Nutzungsverhältnisses wird dem Nutzer unentgeltlich ein Kontingent an Nutzungsminuten zugeteilt. Bei Bedarf kann der Nutzer weitere Nutzungsminuten hinzubuchen. Für bestimmte Aktivitäten (z.B. Zurückbringen des Fahrzeugs zu einer vom System vorgegebenen alternativen CityBox) erhält der Nutzer zusätzliche Minutengutschriften. Sämtliche Zeitguthaben werden nur zu Erprobungszwecken geführt und gewähren keinen Anspruch auf tatsächliche Nutzung im Umfang des Zeitguthabens und keinen Anspruch auf anderweitige Ersatz- oder Erstattungsleistungen.

§ 4 Pflichten während der Benutzung

- (1) Die Nutzung der Fahrzeuge erfolgt auf eigene Gefahr und auf eigenes Risiko. Der Nutzer muss das Fahrradfahren beherrschen und körperlich in der Lage sein, das vergleichsweise schwere CityPed auch in beladenem Zustand zu halten und erforderlichenfalls nach Umkippen wieder aufzurichten. Der Nutzer muss sich mit der allgemeinen Funktionsweise des Fahrzeugs vertraut machen und dieses auf erkennbare, die Verkehrssicherheit beeinträchtigende Mängel untersuchen. Festgestellte Schäden, auch kleinere Mängel, sind der TU BAF sofort über die SteigtUM-App zu melden. Ein erkennbar verkehrsuntaugliches Fahrzeug darf nicht benutzt werden. Stellt sich ein die Verkehrssicherheit beeinträchtigender Mangel während der Nutzung heraus, hat der Nutzer dies unverzüglich mitzuteilen und die Nutzung des Fahrzeugs sofort zu unterlassen sowie das Fahrzeug gegen unbefugte Benutzung zu sichern. Bei Verkehrsunfällen richtet sich das Verhalten nach den straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften, zusätzlich ist der Unfall umgehend über die SteigtUM-App zu melden.
- (2) Der Nutzer ist für die Einhaltung aller straßenverkehrsrechtlichen Regelungen selbst verantwortlich. Eine Benutzung unter Alkoholeinfluss ist untersagt (Null-Promillegrenze). Gleiches gilt für andere berauschende oder sonst bewusstseinsverändernde Substanzen („Drogen“) sowie für Medikamente, die die Fahrtauglichkeit beeinträchtigen. Der Nutzer darf ausschließlich selbst und nicht freihändig fahren. Die Überlassung des Fahrzeugs an andere Personen ist ausnahmslos untersagt. Die maximale Zuladung ist zu beachten. Beim Transport von Gegenständen hat der Nutzer sich von deren ordnungsgemäßer Befestigung zu überzeugen. Die Mitnahme weiterer Personen ist untersagt.
- (3) Der Nutzer hat selbstständig auf den Ladezustand des Akkus zu achten und seine Fahrt unter Berücksichtigung der zu transportierenden Last so zu planen, dass er auch den Rückweg noch mit ausreichender elektrischer Unterstützung zurücklegen kann. Es erfordert erhebliche Anstrengung, das Lastenfahrrad mit leerem Akku über größere Strecken zu fahren. Bei verspäteter Rückgabe kommen Schadensersatzforderungen anderer Nutzer wegen verspäteter oder ausgefallener Nutzungsmöglichkeit in Betracht.

- (4) Reparaturen, Umbauten oder sonstige Veränderungen am Fahrzeug sind untersagt. Erlaubt sind lediglich die in der Gebrauchsanweisung als Störungsbeseitigung beschriebenen Handlungen.
- (5) Das Fahrzeug ist gegen Diebstahl und unbefugte Benutzung zu sichern, also auch bei kurzzeitigem Stehenlassen mit dem am Fahrzeug angebrachten, über die App zu steuernden Schloss sicher abzuschließen. Das Fahrzeug darf nur so abgestellt werden, dass dadurch weder straßenverkehrsrechtliche Vorschriften noch Rechte Dritter (z.B. auf Privatgrundstücken) verletzt werden.
- (6) Der Nutzer hat seine Anmeldedaten und den Zugriff zur SteigtUM-App zu schützen, insbesondere den Zugriff Dritter zu verhindern. Sollten Dritte von Anmeldedaten Kenntnis erhalten oder sonst Zugriff auf die App erlangt haben oder sind andere Anzeichen für Missbrauch und Manipulation der SteigtUM-App oder der Zugangsdaten vorhanden, hat der Nutzer die TU BAF sofort telefonisch oder per E-Mail zu informieren. Die TU BAF ist berechtigt, das Nutzerkonto bis zur Wiederherstellung der erforderlichen Sicherheit zu sperren.
- (7) Bei Beendigung der Nutzung ist das Fahrzeug ordnungsgemäß in die Garage (SWG) bzw. CityBox zurückzubringen. Eine unmittelbare Übergabe an einen anderen Nutzer ist auch dann nicht zulässig, wenn dieser eine entsprechende Nutzung gebucht hat. Sollte dem Nutzer die Rückgabe nicht oder nicht rechtzeitig möglich sein, hat er sich sofort mit der TU BAF über die SteigtUM-App in Verbindung zu setzen.

§ 5 Haftung

- (1) Der Nutzer haftet für alle durch ihn verursachten Schäden sowohl gegenüber der TU BAF als auch gegenüber Dritten in vollem Umfang nach den gesetzlichen Vorschriften. Der Nutzer haftet für vermeidbare Folgeschäden, wenn er einen Diebstahl, Unfall oder sonstigen Schaden nicht umgehend der TU BAF meldet. Die TU BAF bietet keinerlei Versicherungsschutz und verfügt auch selbst nicht über Versicherungen, die ein Schadens- oder Verlustrisiko abdecken. Übliche Privat-Haftpflichtversicherungen decken möglicherweise Schäden an gemieteten Gegenständen nicht ab. Es ist Sache des Nutzers, sich über die Bedingungen seiner eventuell vorhandenen Versicherung zu vergewissern.
- (2) Die TU BAF haftet für Schäden, die von ihr oder ihren gesetzlichen Vertretern oder Erfüllungsgehilfen vorsätzlich oder grob fahrlässig verursacht werden, der Höhe nach unbegrenzt. Für Schäden aus der Verletzung von Leben, Körper oder Gesundheit haftet die TU BAF auch bei eigener, leicht fahrlässiger Pflichtverletzung oder leicht fahrlässiger Pflichtverletzung ihrer gesetzlichen Vertreter oder Erfüllungsgehilfen der

Höhe nach unbegrenzt. Darüber hinaus ist eine Schadensersatzpflicht der TU BAF gegenüber dem Nutzer ausgeschlossen.

§ 6 Sonstiges

- (1) Nebenabreden, Änderungen und Ergänzungen dieser Vereinbarung bedürfen der Schriftform. Dies gilt auch für das Abbedingen des Schriftformerfordernisses.
- (2) Sofern einzelne Bestimmungen dieser Vereinbarung aus gesetzlichen Gründen unwirksam sind oder werden, wird die Gültigkeit der übrigen Bestimmungen hiervon nicht berührt. Die Vertragsparteien verpflichten sich, unwirksame Bestimmungen durch solche wirksamen Bestimmungen zu ersetzen, die dem Sinn und Zweck der unwirksamen Bestimmung am nächsten kommen. Soweit Lücken bestehen, werden die Vertragsparteien solche Bestimmungen vereinbaren, die sinnvoller Weise in den Vertrag aufgenommen worden wären, wäre die Angelegenheit von vornherein bedacht worden.