



# Entwicklung eines Lastmanagementsystems zur optimierten Nutzung von Photovoltaik-Energie



Michael Enderli

Kantonsschule Rychenberg, Klasse 6eG

Betreuung: Michael Oettli

Zweitbeurteilung: Lukas Morf

Abgegeben am 05.12.2023



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Grobkonzept</b> .....	<b>7</b>
2.1	Die Monte Rosa Hütte als Vorzeigebeispiel für Energiemanagement.....	7
2.2	Umsetzung eines Lastmanagementsystems in einem Dreipersonenhaushalt .....	8
<b>3</b>	<b>Planung und Konstruktion des Lastmanagementsystems</b> .....	<b>9</b>
3.1	Auswahl der elektronischen Bauteile .....	9
3.2	Aufbau der elektronischen Schaltung.....	10
3.3	Funktionstest der elektronischen Schaltung .....	11
3.4	Konstruktion des Elektronikmoduls und Einbau im Systemgehäuse .....	13
3.5	Sicherheitsvorkehrungen .....	15
<b>4</b>	<b>Programmierung des Lastmanagementsystems</b> .....	<b>17</b>
4.1	Programmablaufplan .....	17
4.2	Datenaustausch.....	18
4.3	Berechnung der Leistung mit Hilfe des Stromsensors .....	19
4.4	Entwicklung der Lastregelung .....	21
4.5	Entwicklung einer App zur Steuerung des Lastmanagementsystems .....	23
<b>5</b>	<b>Nutzen von Lastmanagementsystemen in der Praxis</b> .....	<b>25</b>
5.1	Bewertung des selbst entwickelten Lastmanagementsystems.....	25
5.2	Erhöhung des Eigenverbrauchs durch das optimierte Laden eines Elektroautos .....	26
5.3	Das Zusammenspiel der PV-Energie und Elektromobilität in der Energiewende .....	28
<b>6</b>	<b>Schlusswort</b> .....	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>37</b>
9.1	Github-Repository.....	37
9.2	Interview .....	37



# 1 Einführung

In unserem Alltag sind wir darauf angewiesen, immer eine Steckdose in Reichweite zu haben, an der wir unsere elektrischen Geräte anschliessen können. Doch wer Strom bezieht, hat sich bisher kaum gefragt, wo dieser herkommt. Der Klimawandel und seine Folgen haben jedoch bewirkt, dass in der Gesellschaft ein Umdenken stattfindet und nun der Ausbau von erneuerbaren Energien gefragt ist. In diesem Zusammenhang spielt die Photovoltaik (PV) eine immer wichtigere Rolle. Somit konnte in der Schweiz in den letzten Jahren ein stetiges Wachstum der PV-Energie (Abb. 1) verzeichnet werden:

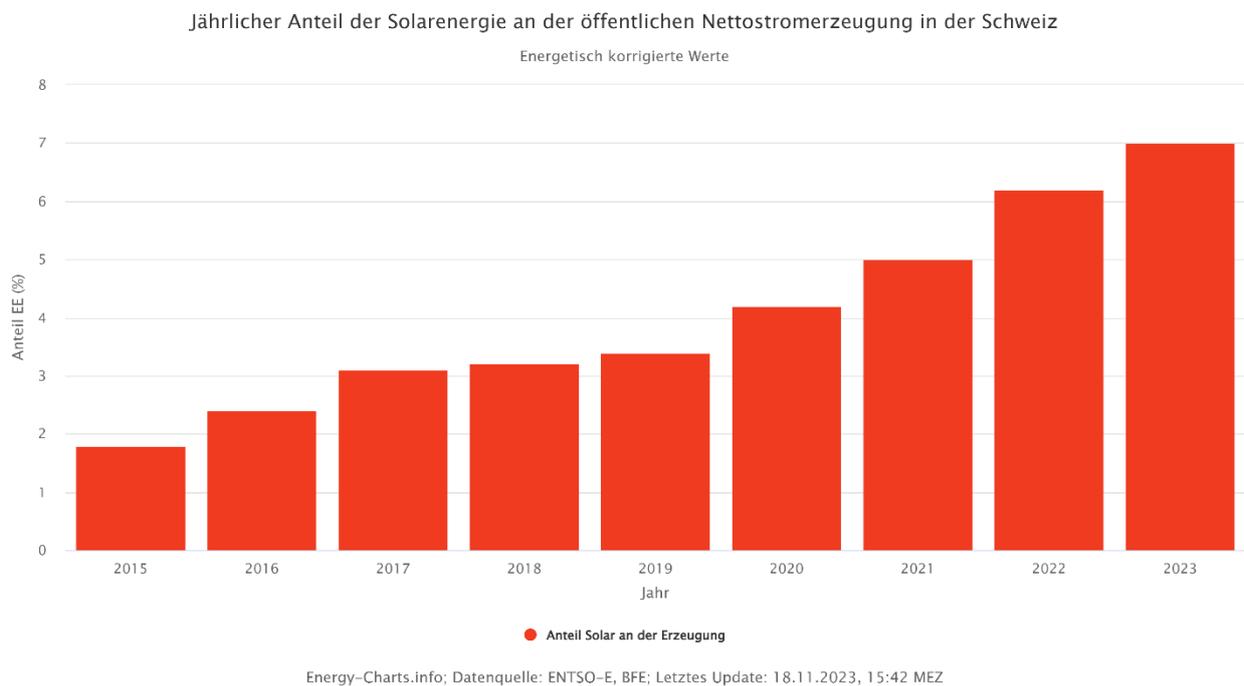


Abb. 1 - Jährlicher Anteil der PV-Energie an der Nettostromerzeugung in der Schweiz<sup>1</sup>

Aufgrund der flexiblen Anlagengrösse ergeben sich für die PV-Energie zahlreiche Standortmöglichkeiten. Viele PV-Anlagen werden daher auf Hausdächern installiert, wo die PV-Module nicht beschattet werden. Da Hausdächer meistens ungenutzte Flächen sind, ergibt sich schon allein daraus ein riesiges Potenzial für die PV-Energie.

Der Hauptnachteil der PV-Energie liegt jedoch darin, dass sie von der Sonneneinstrahlung abhängig ist und dadurch keine konstante Stromversorgung gewährleisten kann. Für private Anlagenbesitzer/-innen bedeutet dies, dass die PV-Anlage abhängig von ihrer Grösse den eigenen Stromverbrauch bei niedriger Sonneneinstrahlung nicht decken kann. Bei hoher Sonneneinstrahlung wiederum erzeugt die PV-Anlage oft mehr Strom,

---

<sup>1</sup> Swiss Energy-Charts. Jährlicher Anteil der Solarenergie an der öffentlichen Nettostromerzeugung in der Schweiz.

als benötigt wird. In diesem Fall kann die überschüssige Energie ins Stromnetz eingespeist und entsprechend vergütet werden.

Aus der Sicht privater Anlagenbesitzer/-innen lohnt sich ein erhöhter Eigenverbrauch wirtschaftlich jedoch mehr<sup>2</sup>, weil beim Einspeisen der überschüssigen Energie Abgaben an den Energieversorger bezahlt werden müssen. Demzufolge sind die gesparten Kosten bei der Eigennutzung höher als der Ertrag, der bei der Einspeisung erzielt werden würde.

Eine naheliegende Möglichkeit zur Maximierung des Eigenverbrauchs ist die Speicherung der überschüssigen Energie in einem genügend grossen Batteriespeicher. Da Batteriespeicher aber mit hohen Kosten verbunden sind, lohnt sich eine Anschaffung für kleinere Anlagen mit wenig Überschussleistung unter Umständen nicht.

Anstelle eines zusätzlichen Batteriespeichers, der nur für die Speicherung der überschüssigen PV-Energie verwendet wird, können auch bereits vorhandene Batteriespeicher, wie z. B. der Akku eines Elektroautos, diese Aufgabe übernehmen. Dazu muss der Ladevorgang aber unterbrochen werden können, wenn keine Überschussleistung vorhanden ist.

In dieser Maturitätsarbeit wird ein System entwickelt, das diese Aufgabe beim Ladevorgang eines E-Bike-Akkus automatisiert. Hierfür sollen insbesondere die Benutzerfreundlichkeit und Sicherheit berücksichtigt werden.

Für dieses System wird in dieser Arbeit der Begriff Lastmanagementsystem (LMS) verwendet. Damit sind sowohl die Hardware- als auch die Softwarekomponenten gemeint.

Da ein E-Bike-Akku nur eine kleine Last darstellt, wird mit dem Elektroauto ein realistischerer Anwendungsfall in die Bewertung von LMS miteinbezogen. Nebst diesen konkreten Anwendungsbeispielen auf der Ebene eines Dreipersonenhaushalts werden in einem Experteninterview zudem die Chancen des Zusammenspiels zwischen der PV-Energie und der Elektromobilität für das Stromnetz geklärt.

Da ich mich schon seit Längerem für Elektrotechnik und Informatik interessiere, war für mich klar, dass meine Maturitätsarbeit in diesen Fachgebieten liegen soll. Die Verfügbarkeit von Zustandsdaten der eigenen PV-Anlage in Echtzeit bewegte mich dazu, ein Produkt zu entwickeln, das anhand dieser Daten eine Funktion ausführen kann.

---

<sup>2</sup> EnergieSchweiz. Eigenverbrauch.

## 2 Grobkonzept

### 2.1 Die Monte Rosa Hütte als Vorzeigebispiel für Energiemanagement

Anlässlich des 150-Jahr-Jubiläums der ETH Zürich im Jahr 2005<sup>3</sup> hat sie sich in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Alpenclub (SAC) den Neubau der Monte Rosa Hütte vorgenommen. Das Ziel des Neubaus bestand unter anderem darin, einen möglichst hohen Autarkiegrad bezüglich Wasser, Wärme und Elektrizität zu erreichen.

Nach der Fertigstellung des Neubaus hat sich Samuel F. Fux als Teil seiner Dissertation mit der Entwicklung eines Energiemanagementsystems auseinandergesetzt. Die Stärke dieses Energiemanagementsystems ergibt sich vor allem daraus, dass Wetterprognosedaten und die Anzahl an Übernachtungen (Abb. 2) unter Anwendung einer modellbasierten Regelung miteinbezogen werden. Dadurch kann der Energieverbrauch sowie der Energieertrag abgeschätzt werden und dabei helfen, den Autarkiegrad zu erhöhen.

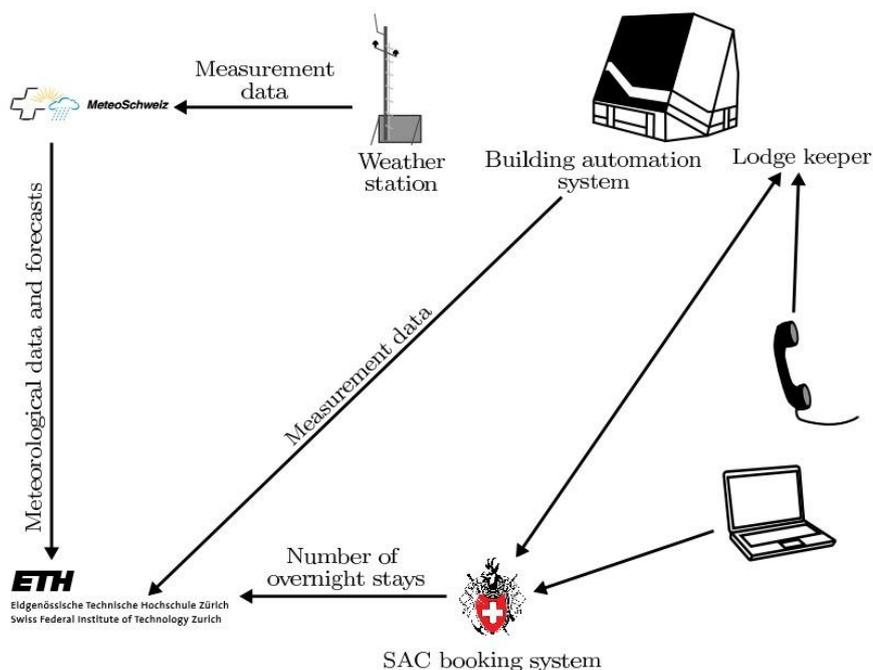


Abb. 2 - Schematisches Diagramm des Monitoring-Systems<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Fux 2013, S. 2-3, S. 14-15.

## 2.2 Umsetzung eines Lastmanagementsystems in einem Dreipersonenhaushalt

In dieser Maturitätsarbeit wird sich das LMS auf die Einbindung von Echtzeitdaten beschränken. Dazu muss eine Datenübermittlung zwischen dem Wechselrichter und dem LMS (Abb. 3) stattfinden. Die Hauptaufgabe des Wechselrichters<sup>4</sup> besteht darin, den von der PV-Anlage kommenden Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln. Der in dieser Arbeit verwendete Wechselrichter «Fronius Symo 6.0-3-M»<sup>5</sup> bietet zudem die Möglichkeit, aktuelle Zustandsdaten der PV-Anlage sowie den aktuellen Stromverbrauch über eine integrierte Datenschnittstelle bereitzustellen. Dadurch kennt das LMS immer die aktuelle Überschussleistung und kann diese in die Regelung miteinbeziehen.

Um das LMS schliesslich noch mit einer App steuern zu können, muss ein Datenaustausch zwischen dem LMS und dem Smartphone stattfinden. Der Datenaustausch sollte jedoch auch möglich sein, wenn sich die Benutzer/-innen nicht im Heimnetzwerk befinden.

Wenn das LMS mit den benötigten Daten versorgt ist, kann der Regelungsvorgang erfolgen. Hierfür muss das LMS im Stande sein, den Stromfluss zur Last unterbrechen zu können.

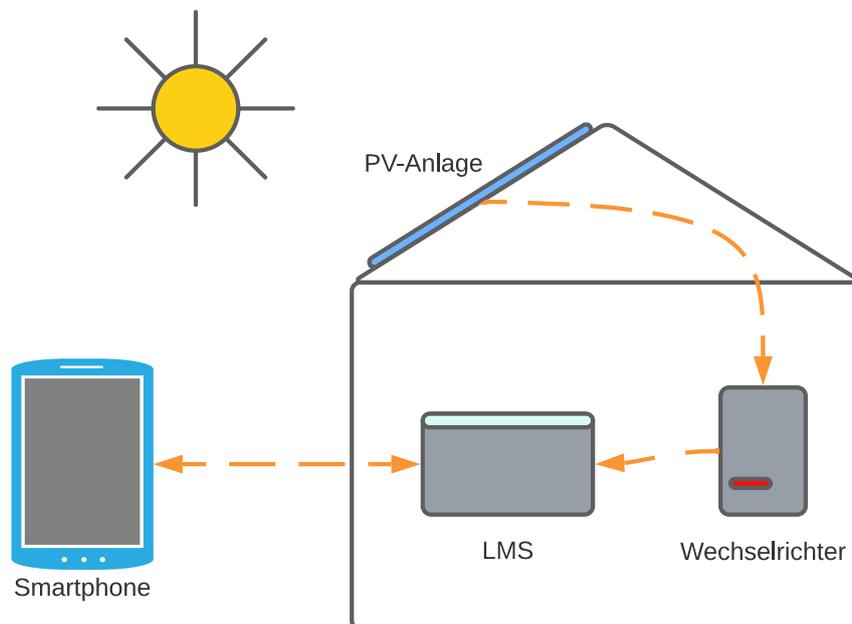


Abb. 3 - Datenfluss (orange Pfeile) zum LMS

<sup>4</sup> Mertens 2022, S. 223-224.

<sup>5</sup> Fronius International GmbH. Symo 6.0-3-M.

## 3 Planung und Konstruktion des Lastmanagementsystems

### 3.1 Auswahl der elektronischen Bauteile

Das zentrale Element des LMS bildet der Raspberry Pi Zero W<sup>6</sup>. Dabei handelt es sich um einen günstigen Einplatinencomputer, der alle nötigen Hardwarekomponenten auf einer Platine vereint und einen geringen Energieverbrauch von nur 0.5 W bis 0.7 W aufweist. Der Raspberry Pi Zero W bietet nebst mehreren programmierbaren Ein- und Ausgängen (GPIO-Pins) für die elektronischen Bauteile einen Wireless-Chip, wodurch der Datenaustausch ermöglicht wird.

Um den Ladevorgang steuern zu können, muss das LMS einen elektronischen Schalter beinhalten, der den Stromkreis des angeschlossenen Ladegeräts unterbrechen kann. Die Verwendung des KY-019RM Relais<sup>7</sup> eignet sich besonders gut dafür, weil mit der Ausgangsspannung der GPIO-Pins ein Wechselstromkreis von max. 10 A und 250 V geschaltet werden kann.

Damit die Nutzer/-innen eine Meldung bekommen, wenn der Akku vollgeladen ist, benötigt das LMS einen Indikator, der über den Ladezustand Auskunft gibt. Als Alternative zur direkten Kommunikation mit dem Ladegerät bietet sich die Messung der Stromstärke an. Hierfür wurde ein Stromsensor<sup>8</sup> verwendet, der sowohl Wechselstrom als auch Gleichstrom bis zu 20 A messen kann. Dabei misst der Stromsensor jedoch nicht direkt den Strom, sondern das dadurch erzeugte Magnetfeld. Befindet sich der Sensor in einem Magnetfeld, werden die Elektronen in einem Metallplättchen auf eine Seite abgelenkt<sup>9</sup>. Durch den Elektronenüberschuss auf der einen Seite und den Elektronenmangel auf der anderen Seite entsteht eine Spannung, die sich proportional zur Stromstärke verhält. Dieses Phänomen beruht auf der Lorentzkraft und wird Halleffekt genannt.

Weil der Stromsensor die Messwerte nur in einem analogen Signal an den Raspberry Pi weitergeben kann, dieser aber keine analogen Eingänge besitzt, muss das Signal zuerst umgewandelt werden. Dazu wurde ein Analog-Digital-Wandler<sup>10</sup> eingebaut, der über den I<sup>2</sup>C-Bus<sup>11</sup> mit dem Raspberry Pi kommunizieren kann. Die I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) Kommunikation basiert auf zwei Leitungen, wovon eine Leitung Daten überträgt (SDA = Serial Data) und die andere das Taktsignal (SCL = Serial Clock) angibt. Über das I<sup>2</sup>C-Protokoll kann der Raspberry Pi als Master mit mehreren sogenannten Slaves, wie dem Analog-Digital-Wandler, kommunizieren. Dabei kann nur der Master Anfragen senden, worauf die Slaves reagieren müssen. Bei einer Anfrage des Masters wird zuerst eine Start Condition gesendet. Die darauffolgende Adresse wird von allen Slaves mit ihrer eigenen verglichen und bei Übereinstimmung sendet der Slave ein Bestätigungssignal zurück.

---

<sup>6</sup> Elektronik Kompendium. Raspberry Pi Zero und Zero W.

<sup>7</sup> SIMAC Electronics GmbH. KY-019 Relais Modul | Joy-IT.

<sup>8</sup> reichelt elektronik GmbH. DEBO SENS 20A.

<sup>9</sup> Beuth und Beuth 2013, S. 333.

<sup>10</sup> SIMAC Electronics GmbH. KY-053 Analog-Digital Wandler | Joy-IT.

<sup>11</sup> Campbell. Basics of the I2C Communication Protocol.

Anschließend beginnt der eigentliche Datenaustausch, der mit dem Senden der Stop Condition wieder beendet wird.

### 3.2 Aufbau der elektronischen Schaltung

Nach der Auswahl der erforderlichen Bauteile folgte das Entwerfen eines Schaltplans (Abb. 4). Auf dem Schaltplan sind zusätzlich zu den im vorherigen Unterkapitel erläuterten Bauteilen zwei Widerstände (R1 und R2) zur Begrenzung der Stromstärke, ein Taster (S1) sowie eine LED (LED1) zu sehen.

Befindet sich der Taster im geschlossenen Zustand, ist der GPIO-Pin mit einer Referenzspannung von 3.3 V verbunden. Wird der Taster aber losgelassen, liegt keine Spannung mehr am GPIO-Pin an und man würde beim Auslesen des Pins anstelle von «Low» einen sogenannten «floating-state» als Ausgabe bekommen. Um das zu verhindern, wurde ein Pull-Down Widerstand<sup>12</sup> (R1) verwendet, der den GPIO-Pin mit Ground verbindet.

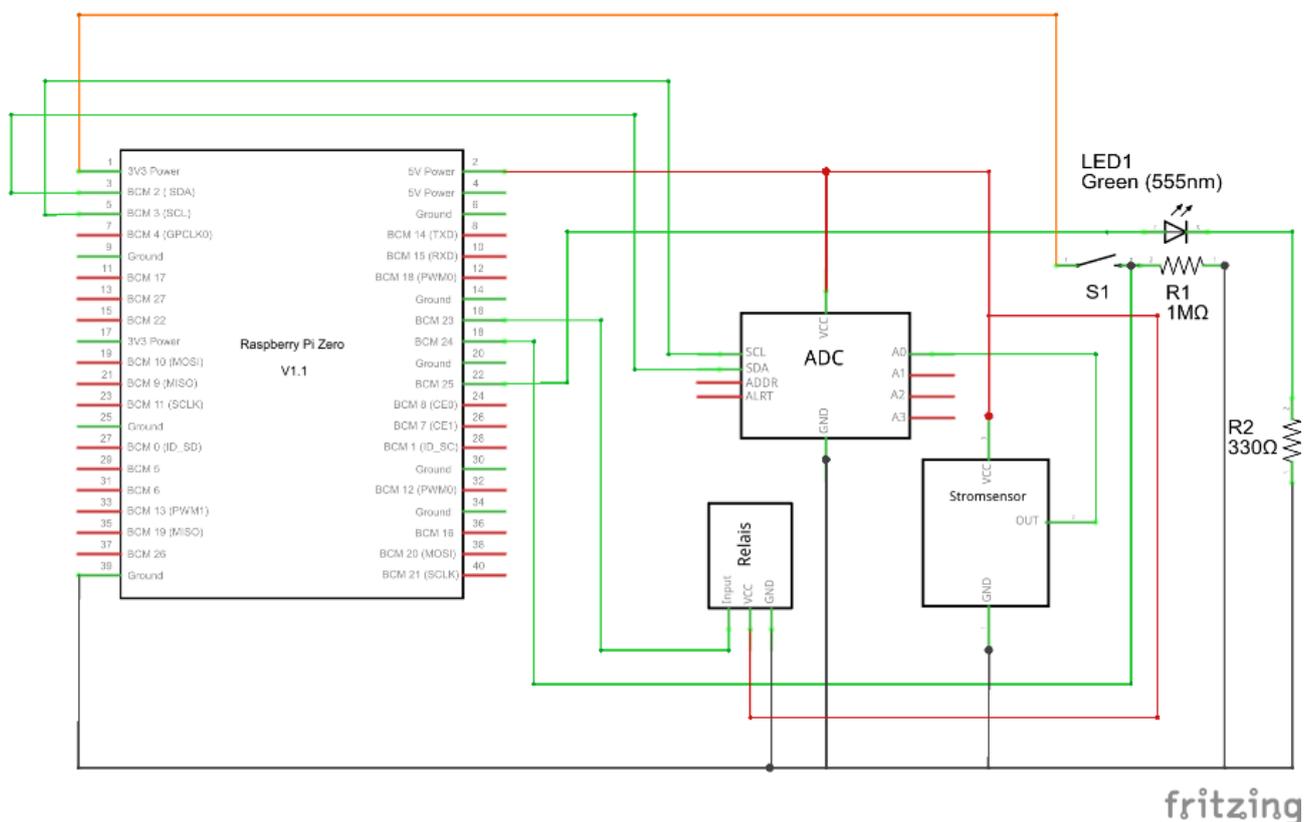


Abb. 4 – Schaltplan

<sup>12</sup> Braza. Pull-up and Pull-down Resistors.

### 3.3 Funktionstest der elektronischen Schaltung

Bevor die Schaltung in einem Gehäuse eingebaut wurde, erfolgte ein Funktionstest (Abb. 5), der die beabsichtigte Funktionsweise der Schaltung überprüfen soll.

Für den Test des Stromsensors wurde ein 1  $\Omega$ -Widerstand mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Die maximale Leistung des Widerstandes betrug 5 W, wodurch der Stromfluss auf ca. 2.2 A begrenzt war. Für den Testaufbau wurde bewusst auf die Verwendung von Netzspannung verzichtet, weil die Schaltung sich noch nicht in einem sicheren Gehäuse befand.

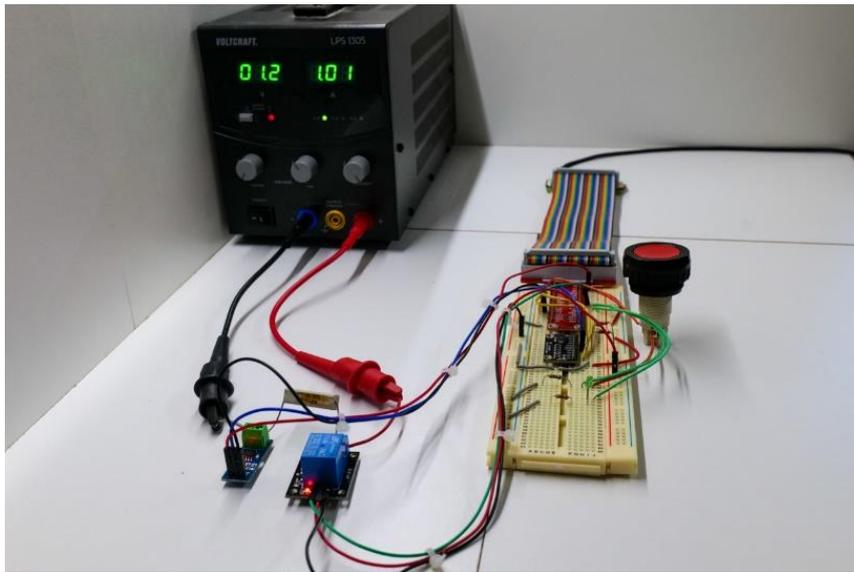


Abb. 5 - Testaufbau

Der Funktionstest wurde mittels eines Python-Skripts (siehe 9.1 Github-Repository) durchgeführt. Bei der Betätigung des Tasters speicherte das Python-Skript die Ausgangsspannung des Stromsensors, wobei die Stromstärke bei jedem neuen Eintrag um 0.1 A erhöht wurde. Aus diesen Daten ergab sich eine Kennlinie (Abb. 6), die zwar eine ähnliche Steigung wie im Datenblatt<sup>13</sup> aufweist, jedoch um ca. 0.2 V in die negative Richtung der y-Achse verschoben ist. Dies lässt sich auf die schlecht leitenden Steckverbindungen zurückführen, da deren Widerstände einen Abfall der Versorgungsspannung zur Folge hatten und die Verschiebung der Kennlinie auf der y-Achse der halbierten Versorgungsspannung entspricht.

---

<sup>13</sup> Allegro Microsystems, Inc. ACS712-Datasheet.

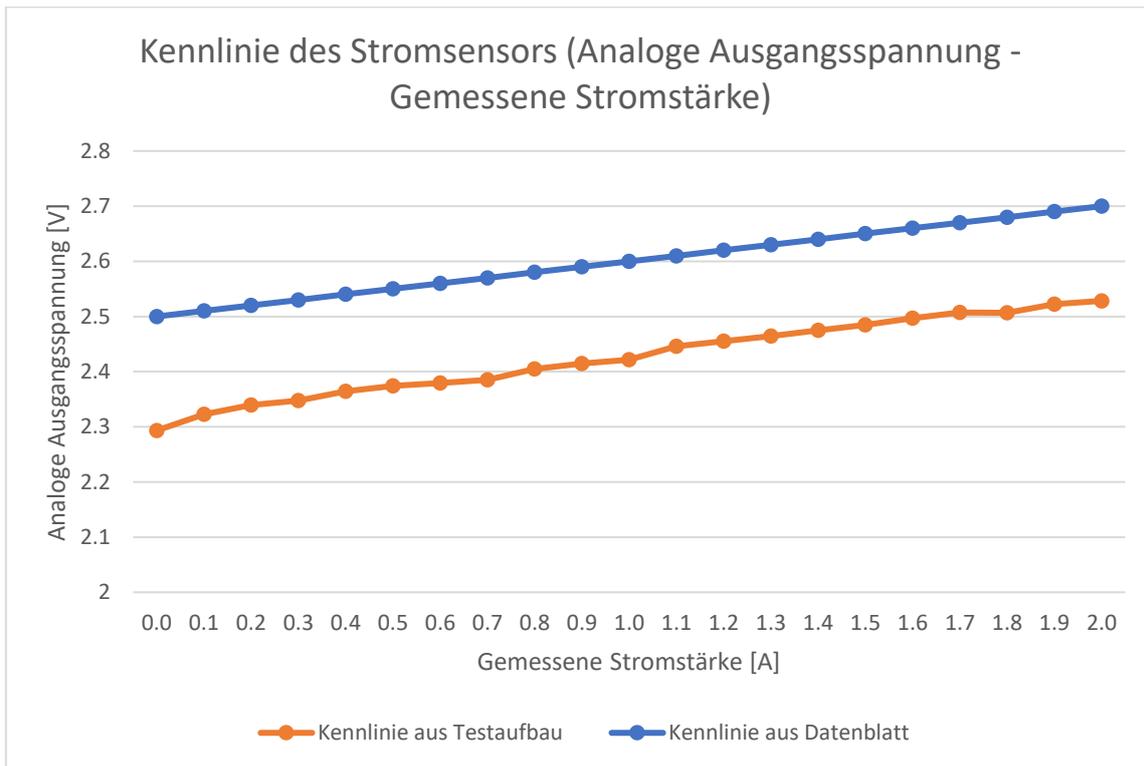


Abb. 6 - Kennlinie des Stromsensors<sup>13</sup>

### 3.4 Konstruktion des Elektronikmoduls und Einbau im Systemgehäuse

Um die Sicherheit bei der Nutzung des LMS garantieren zu können, muss sich die Elektronik in einem verschlossenen Gehäuse befinden. Hierfür wurde das Gehäuse CHX8-327C von Camdenboss<sup>14</sup> verwendet.

Damit der Stromfluss unterbrochen werden kann, muss das LMS zwischen der Last und dem Stromanschluss eingegliedert sein. Aus diesem Grund müssen sich zwei Anschlussmöglichkeiten am Systemgehäuse befinden. Auf der einen Seite befindet sich eine für die Schweiz zulässige Steckdose von der Firma Feller<sup>15</sup>, worüber das Systemgehäuse mit der Last verbunden werden kann. Auf der gegenüberliegenden Gehäuseseite wurde eine Kaltgerätebuchse<sup>16</sup> eingelassen, die eine Verbindung zum Stromanschluss ermöglicht.

Die elektronischen Bauteile benötigen eine Gleichspannungsversorgung von 5 V. Daher musste noch ein entsprechendes Netzgerät<sup>17</sup> installiert werden. Um eine leitende Verbindung von der Kaltgerätebuchse zur Steckdose und zum internen Netzgerät herzustellen, wurden Anschlussklemmen verwendet, wodurch die Drähte sicher miteinander verbunden werden konnten.

Zur Befestigung der Bauteile im Gehäuse wurden die Bauteile auf einer Montageplatte (Abb. 7) angebracht, wofür vorab eine technische Zeichnung (Abb. 8) erstellt wurde. Mit einem Gewindebohrer wurden Gewinde in die Montageplatte gebohrt, wodurch die elektronischen Bauteile festgeschraubt werden konnten. Nachdem alle elektronischen Bauteile fertig montiert waren, wurden die entsprechenden Pins miteinander verbunden und die Kabel in den Kabelkanälen verstaut. Als letzter Schritt wurde die fertige Montageplatte schliesslich noch im Gehäuse befestigt (Abb. 9).

---

<sup>14</sup> Camdenboss. CHDX8-327C - X8.

<sup>15</sup> Feller AG. Feller - Online-Katalog.

<sup>16</sup> Conrad Electronic AG. Bulgin PF0001/63 Kaltgeräte-Steckverbinder PF Stecker.

<sup>17</sup> reichelt elektronik GmbH. MW HDR-15-5: Schaltnetzteil.

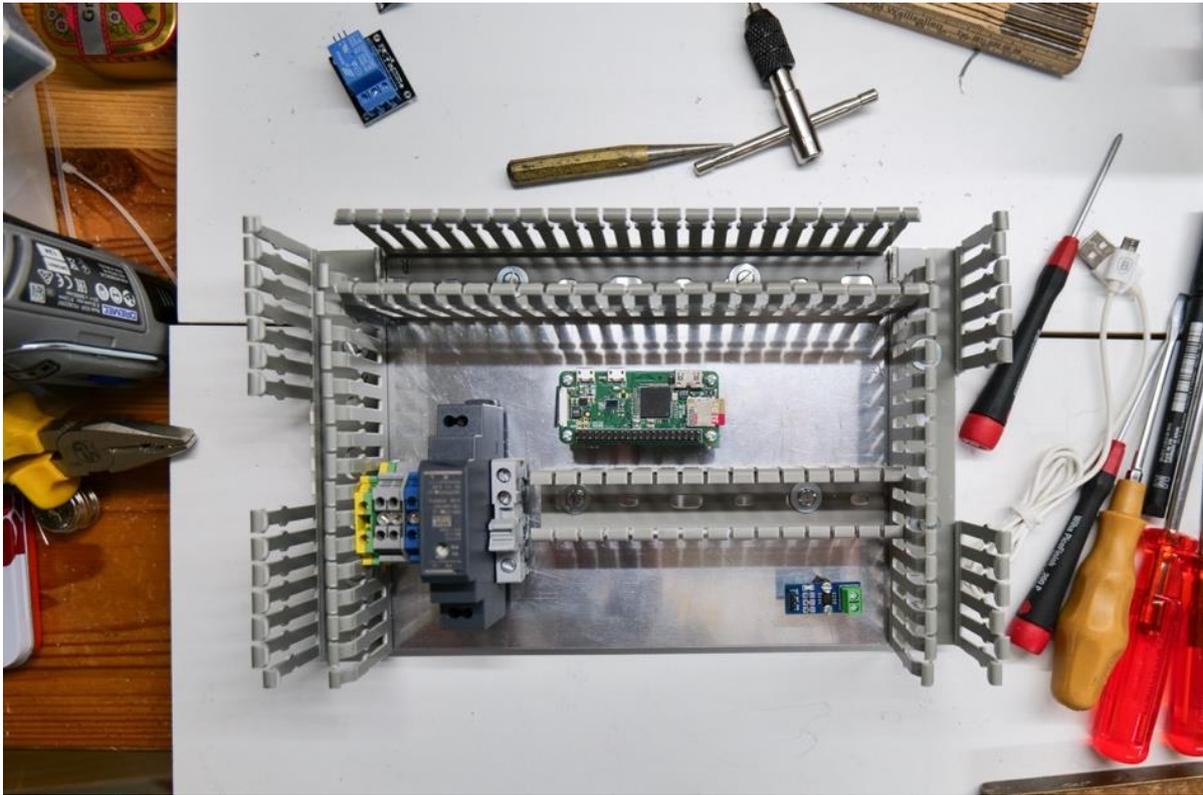


Abb. 7 - Montageplatte während des Zusammenbaus

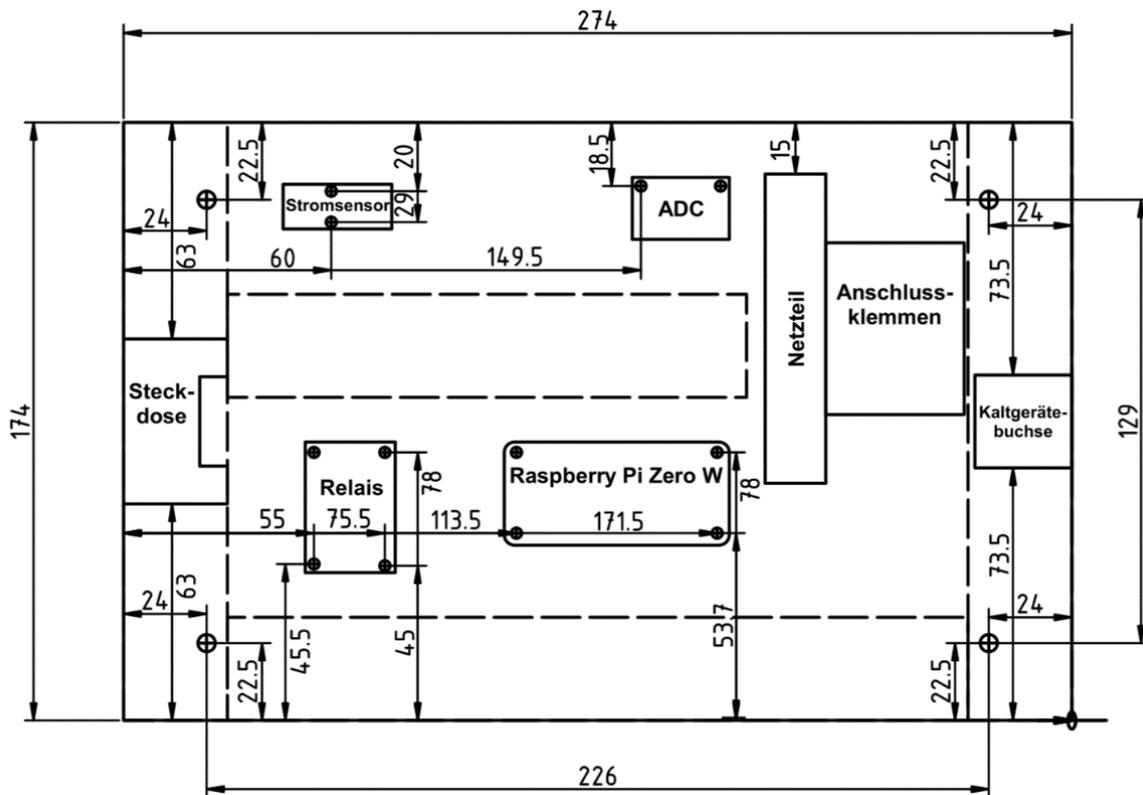


Abb. 8 - Entwurf der Montageplatte (Masseinheit: [mm])

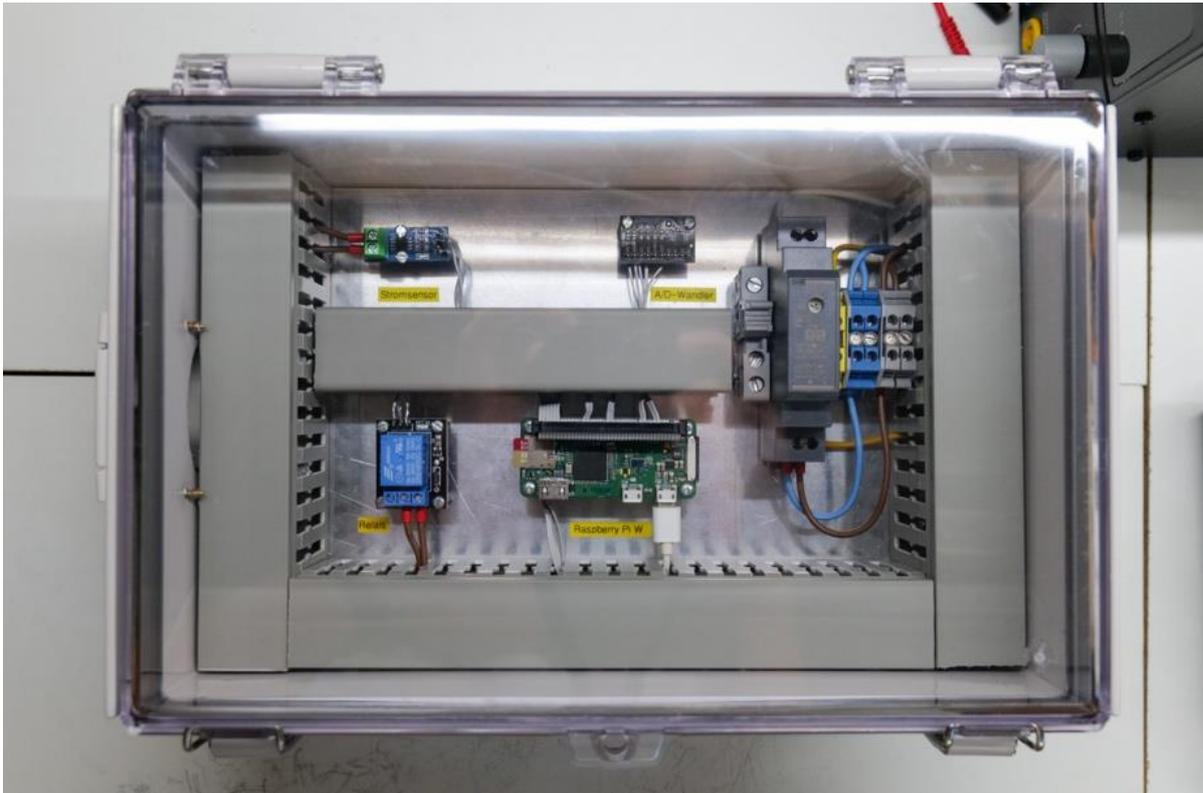


Abb. 9 - Fertig zusammengebautes LMS

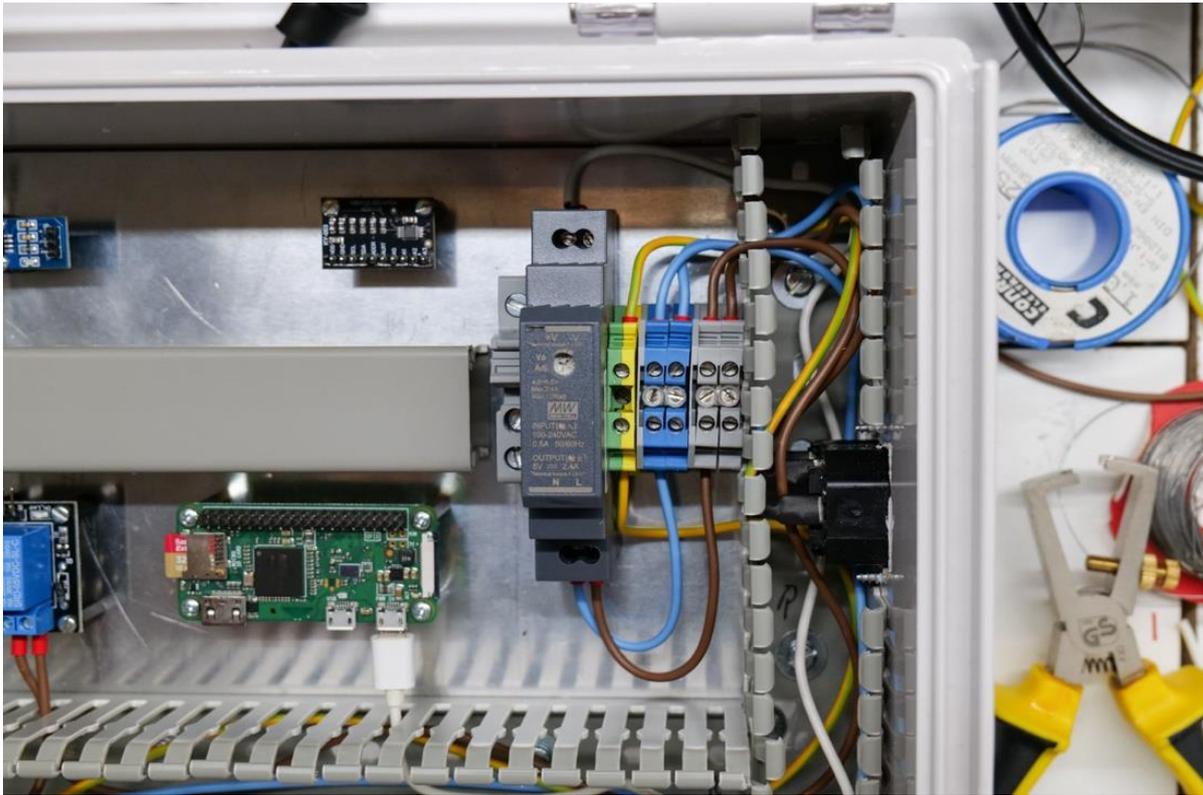
### 3.5 Sicherheitsvorkehrungen

Eine Haushaltssteckdose in der Schweiz liefert eine Wechselspannung von 230 V<sup>18</sup>. Da eine Berührung mit einer solchen Spannung für Menschen sehr gefährlich ist, spielte die Sicherheit bei der Entwicklung des LMS eine zentrale Rolle.

Die primäre Schutzmassnahme bildet das stabile Kunststoffgehäuse, das eine Berührung während des Betriebs verhindern soll. Eine weitere Schutzmassnahme besteht aus der Verbindung aller elektrisch leitenden Teile im Gehäuse mit dem Schutzleiter (Abb. 10). Zur abschliessenden Kontrolle erhielt ich Hilfe von meinem Vater, Martin Enderli. Er hat eine Lehre als Elektroinstallateur absolviert und konnte deshalb die Sicherheitsvorkehrungen beurteilen.

---

<sup>18</sup> Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation. Dreiphasen-Wechselstrom.



*Abb. 10 - Anschlussklemmen mit Schutzleiter (gelb-grün)*

## 4 Programmierung des Lastmanagementsystems

### 4.1 Programmablaufplan

Der im Rahmen dieser Maturitätsarbeit entstandene Code wird aufgrund seines Umfangs in diesem Kapitel nur teilweise abgebildet sein. Der ganze Code ist jedoch in einem Github-Repository (siehe 9.1 Github-Repository) abgespeichert und frei zugänglich.

Der Code für das LMS ist auf mehrere Module aufgeteilt, die für unterschiedliche Teilaufgaben des LMS zuständig sind. Im Hauptskript wiederum werden alle Module vereint, wodurch das LMS erst seine Funktion erfüllen kann. Im untenstehenden Programmablaufplan (Abb. 11) sind hierbei die wichtigsten Elemente des Hauptskripts und deren Verbindungen zueinander dargestellt.

Da das LMS ständig mit neuen Daten aktualisiert werden muss, ist im Hauptskript eine While-Schleife integriert, die sich so lange wiederholt, bis das LMS mit der App oder dem Taster am Gehäuse ausgeschaltet wird. In der While-Schleife befindet sich der Code, der für den Aktualisierungsprozess des LMS zuständig ist. Dabei werden zuerst die externen Datenressourcen und der Schaltzustand des Relais abgefragt. Falls sich das Relais nun im geöffneten Schaltzustand befindet und somit kein Strom fließt, wird die Offsetspannung kalibriert. Falls der Stromkreis jedoch geschlossen ist, wird anhand der gemessenen Stromstärke überprüft, ob der angeschlossene E-Bike-Akku vollständig geladen ist. Mit den aktualisierten Daten kann dann schliesslich die Lastregelung eingeleitet werden und danach als letzter Schritt des Aktualisierungsprozesses die relevanten Daten mit der App ausgetauscht werden.

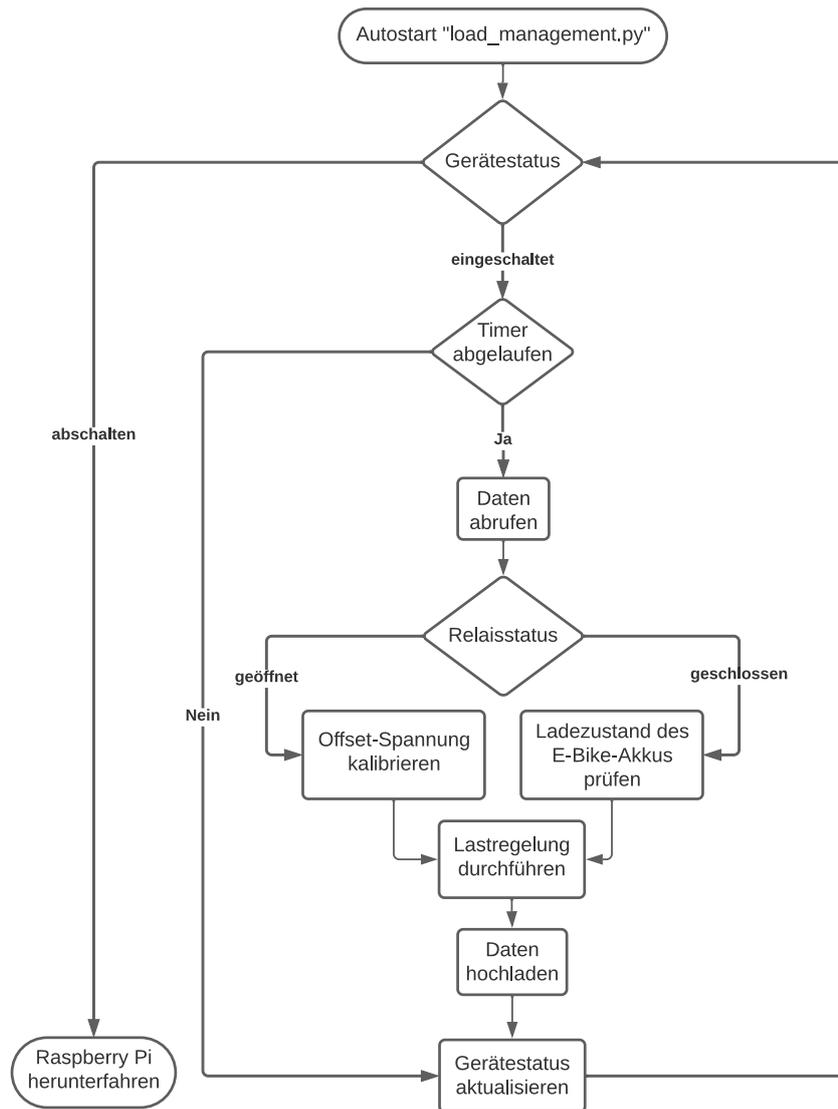


Abb. 11 - Programmablaufplan des Haupt-Skripts

## 4.2 Datenaustausch

Der Datenaustausch zwischen dem Wechselrichter und dem Raspberry Pi geschieht über eine offene REST API<sup>19</sup>, die im Wechselrichter integriert ist. Bei einer REST API<sup>20</sup> handelt es sich um eine Programmierschnittstelle, die eine Kommunikation über das Netzwerk ermöglicht.

Um die Daten mit einem Python-Skript (Abb. 12) vom Wechselrichter abrufen zu können, muss an die URL der REST API eine Anfrage übermittelt werden. Dazu muss die URL aber noch mit der korrekten IP-Adresse des Wechselrichters ergänzt werden. Die vom GET-Request zurückgelieferten Daten werden in einem JSON-Objekt zurückgeliefert, das anschliessend in ein Python-Dictionary umgewandelt werden muss.

<sup>19</sup> Fronius International GmbH. 100% Erneuerbare für Ihre Kunden - Fronius Solar Energy.

<sup>20</sup> Srocke. Was ist eine REST API?

```

class Fronius:
    def __init__(self, ip="192.168.188.28"):
        self.request_url = (f'http://{ip}/solar_api/v1/GetPowerFlowRealtimeData.fcgi/')

    def get_data(self, request_type):
        data = requests.get(self.request_url).json()
        data = self.request["Body"]["Data"]["Site"][request_type]
        print(data)
        return data

```

*Abb. 12 - GET-Request für den Abruf der Wechselrichter-Daten*

Damit ein Datenaustausch zwischen der App und dem LMS stattfinden kann, muss eine Datenschnittstelle verwendet werden, worauf beide Komponenten zugreifen können. Damit dies auch geschehen kann, wenn sich die Benutzer/-innen nicht zu Hause befinden, muss diese Datenschnittstelle über das Internet zugänglich sein.

Eine praktische und sichere Lösung hierfür bietet die REST API von Github<sup>21</sup>. Sowohl das LMS als auch die App können dadurch auf das Repository zugreifen und den Inhalt eines JSON-Objekts ändern sowie dessen Inhalt abrufen. Wie auch bei der REST API von Fronius geschieht dies über einen GET-Request.

Ein wichtiger Unterschied besteht jedoch in der Authentifizierung. Währenddem sich der Wechselrichter im lokalen Heimnetzwerk befindet und keine Authentifizierung benötigt, muss bei der Github-API ein sogenanntes Access-Token mitgeliefert werden. Dadurch kann eine Authentifizierung gewährleistet werden, ohne dass dafür die Zugangsdaten des Github-Kontos verwendet werden müssen.

### 4.3 Berechnung der Leistung mit Hilfe des Stromsensors

Um die Wirkleistung<sup>22</sup> berechnen zu können, werden die Effektivwerte der Wechselspannung und des Wechselstromes benötigt. Der Effektivwert der Wechselspannung ist bereits bekannt und beträgt  $230 \text{ V}^{18}$ , weshalb nur noch der Effektivwert des Wechselstromes mit Hilfe des Stromsensors gemessen werden muss. Dazu wurde eine Methode definiert, die über mindestens eine Periode hinweg die analogen Messwerte in einer Liste speichert, wobei jeder Messwert auf die kleinstmöglich auflösbare Spannung gerundet wird.

Wie dem Datenblatt<sup>23</sup> des Stromsensors zu entnehmen ist, steht die analoge Ausgangsspannung  $[u(t)_{\text{analog}}]$  in linearem Zusammenhang mit der Stromstärke  $[i(t)]$ . Da der Stromsensor den Strom aber auch bei umgekehrter Polarität messen kann, wird die analoge Ausgangsspannung mit der Offsetspannung  $[U_{\text{offset}}]$  auf der y-Achse

<sup>21</sup> GitHub, Inc. Repository contents - GitHub Docs.

<sup>22</sup> Marinescu und Winter 2007, S. 172.

<sup>23</sup> Allegro Microsystems, Inc. ACS712-Datasheet.

angehoben. Dadurch wird bewirkt, dass die analoge Spannung immer im positiven Bereich bleibt. Die folgende Gleichung (1) stellt die vollständige Funktionsgleichung dar:

$$u(t)_{\text{analog}} = 0.1 \frac{V}{A} \cdot \hat{i} \cdot \sin(\omega t) + U_{\text{offset}} \quad (1)$$

Wenn der Sensor zu einem bestimmten Zeitpunkt  $[t]$  den Maximalwert des Wechselstromes  $[\hat{i}]$  misst, ergibt  $\sin(\omega t) = 1$ . Dadurch ergibt sich die folgende Gleichung (2):

$$\hat{u}_{\text{analog}} = 0.1 \frac{V}{A} \cdot \hat{i} + U_{\text{offset}} \quad (2)$$

Aus der Liste mit den aufgezeichneten Spannungswerten des Stromsensors kann nun der grösste Wert  $[\hat{u}_{\text{analog}}]$  extrahiert werden und in der folgenden Gleichung (3) eingesetzt werden:

$$\hat{i} = 10 \frac{A}{V} \cdot (\hat{u}_{\text{analog}} - U_{\text{offset}}) \quad (3)$$

Mit dem Maximalwert des Wechselstromes  $[\hat{i}]$  kann nun der Effektivwert des Wechselstromes  $[I]$  mit der folgenden Gleichung (4) berechnet werden:

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Da das LMS nicht über die Elektronik verfügt, um die Wechselspannung messen zu können, wird in der Gleichung (5) zur Berechnung der Wirkleistung  $[P]$  ein Phasenwinkel von  $\varphi = 0\pi$  angenommen.

$$P = U \cdot I \cdot \cos(0\pi) = U \cdot I \quad (5)$$

Laut dem Datenblatt<sup>23</sup> beträgt die Offsetspannung  $[U_{\text{offset}}]$  unter idealen Bedingungen 2.5 V. Ein entscheidender Faktor, der die Offsetspannung jedoch beeinflusst, ist die Versorgungsspannung des Stromsensors. Im Datenblatt steht dazu, dass die Offsetspannung der halben Versorgungsspannung entspricht. Im Kapitel 3.3

wurde jedoch beim Testaufbau bereits eine grosse Abweichung der Versorgungs- und somit der Offsetspannung aufgrund schlecht leitender Verbindungen festgestellt. Im fertig zusammengebauten LMS ist diese Abweichung wesentlich geringer, jedoch schwankt sie immer noch um den Normalwert von 2.5 V. Deshalb wurde eine Methode implementiert, welche die Offsetspannung kalibriert, wenn das Relais geöffnet ist und kein Strom fliesst.

#### 4.4 Entwicklung der Lastregelung

Die einfachste Form einer Lastregelung zur Optimierung des Autarkiegrades besteht in der Verwendung eines Schwellenwertschalters<sup>24</sup>. Ein Schwellenwertschalter löst einen Schaltvorgang aus, wenn ein gewisser Schwellenwert erreicht wird.

Ein Schaltvorgang bewirkt eine unmittelbare Änderung des Stromverbrauches und dadurch auch der Überschussleistung. Da das Auslösen des Schaltvorganges von der Überschussleistung abhängig ist, hätte die unmittelbare Änderung der Überschussleistung auch sofort einen erneuten Schaltvorgang zur Folge. Solange sich die Überschussleistung in der Nähe des Schwellenwertes befindet, würde dies zu einem ständigen Hin- und Herschalten führen.

Um das Relais und das Akku-Ladegerät vor Verschleiss durch zu häufige Schaltvorgänge zu schützen, muss deshalb eine Hysterese<sup>25</sup> integriert werden. Dafür werden zwei Schwellenwerte benötigt, die sich gegenseitig abwechseln. Somit wird beim Überschreiten des oberen Schwellenwertes der untere Schwellenwert aktiv und umgekehrt wird beim Unterschreiten des unteren Schwellenwertes der obere Schwellenwert aktiv. Der Abstand der beiden Schwellenwerte muss dabei mindestens so gross sein wie die Leistung des LMS selbst.

Mit der Implementierung der Hysterese konnten die Schaltvorgänge zwar bereits stark reduziert werden, jedoch stellte sich heraus, dass besonders an wechselhaften Tagen kurzzeitig sehr grosse Schwankungen in der Überschussleistung auftreten (Abb. 13) und dies trotz der Hysterese zu einem häufigen Auslösen des Schaltvorgangs führte.

Beim untenstehenden Diagramm (Abb. 13) muss beachtet werden, dass die Datenpunkte nicht die Leistung zum jeweiligen Zeitpunkt, sondern den Energiefluss der letzten 5 Minuten repräsentieren. Folglich könnten wesentlich mehr Schwankungen aufgetreten sein, als im Diagramm ersichtlich sind.

---

<sup>24</sup> Wikipedia. Schwellenwertschalter.

<sup>25</sup> Wikipedia. Hysterese.

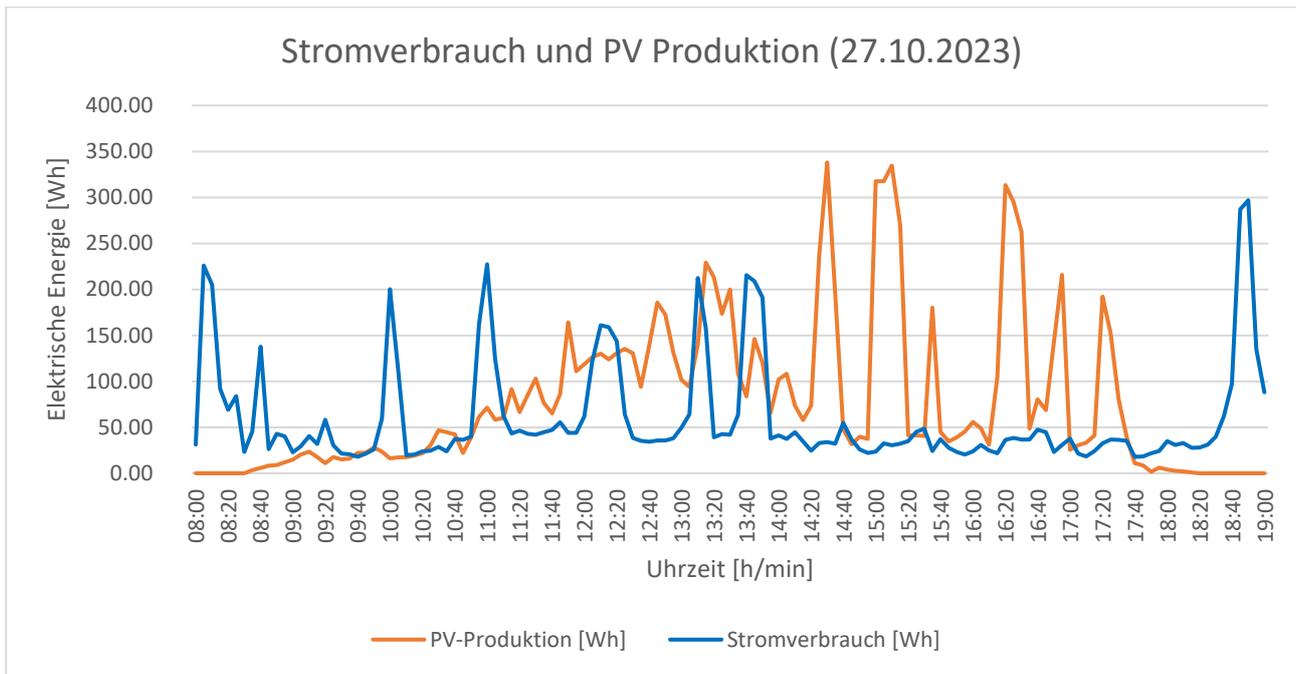


Abb. 13 - Stromverbrauch und PV-Produktion am 27.10.2023 (Daten von Fronius Solarweb)

Um auch diesem Problem entgegenzuwirken, wurde eine Methode (Abb. 14) entwickelt, die einen Timer aktiviert, sobald die Bedingungen für einen Schaltvorgang erfüllt sind. Bei kurzzeitigen Schwankungen würden somit die Bedingungen für einen Schaltvorgang nicht mehr erfüllt sein und das Relais würde im aktuellen Zustand bleiben.

```
def set_delay(self, delay, delay_counter_start, delay_on):
    max_self_consumption = self.p_grid > self.p_device and self.pv_mode == self.mode_1 and self.relay_state == self.relay_config[1]
    only_self_consumption = self.p_grid <= (-1 * self.p_device) and self.pv_mode == self.mode_2 and self.relay_state == self.relay_config[0]
    delay_condition = max_self_consumption or only_self_consumption

    if delay_condition and delay_on == False:
        delay_on = True

    elif delay_on:
        if check_timer(delay, delay_counter_start):
            delay_on = False

    return delay_on
```

Abb. 14 - Methode zur Verzögerung des Schaltvorgangs

Die Benutzer/-innen des LMS können sich zwischen drei verschiedenen Lade-Modi entscheiden. Sollte der E-Bike-Akku unabhängig von der gerade zur Verfügung stehenden Leistung der PV-Anlage geladen werden, kann der Modus «Einfaches Laden» gewählt werden. Mit dem Modus «Nur PV-Strom» (Abb. 15) wird der Stromkreis sofort unterbrochen (grüner Pfeil), sobald Strom vom Netz bezogen wird. Wenn die PV-Anlage gerade Überschussleistung produziert und diese grösser ist als die Leistung, die das LMS beziehen würde, wird der Timer aktiviert (oranjer Pfeil). Wenn die Überschussleistung nach Ablauf des Timers immer noch grösser als die Leistung des LMS ist, wird der Stromkreis geschlossen.

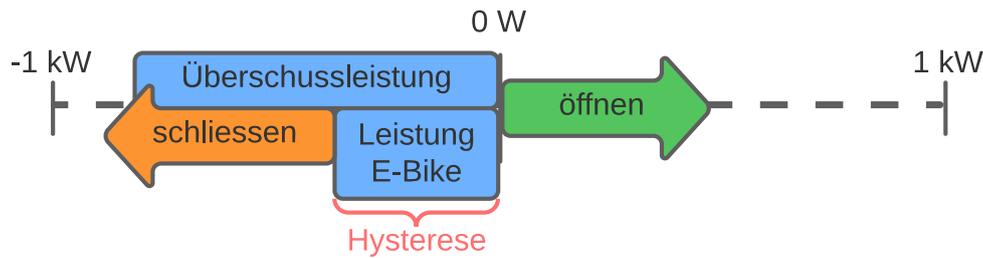


Abb. 15 - Schematische Darstellung des Modus "Nur PV-Strom"

Im dritten Modus «Max. Eigenverbrauch» (Abb. 16) liegt die Priorität darauf, die ganze zur Verfügung stehende Leistung der PV-Anlage selbst zu nutzen, weshalb der Stromkreis hier direkt geschlossen (grüner Pfeil) wird, sobald Überschussleistung anfällt. Die Timer-Funktion hingegen wird erst aktiviert (oranjer Pfeil), wenn die vom Stromnetz bezogene Leistung grösser ist als die Leistung des LMS. Diese Regelung macht vor allem dann Sinn, wenn grössere Lasten am LMS angeschlossen sind. Denn mit dem Modus «Nur PV-Strom» würde der Ladevorgang bei grossen Lasten schon früh unterbrochen werden. Dadurch würde einerseits der Ladevorgang viel länger dauern, andererseits müsste mehr PV-Energie ins Stromnetz eingespeist werden.

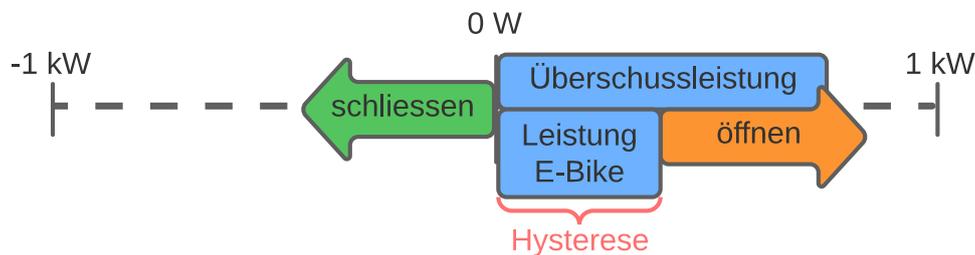


Abb. 16 - Schematische Darstellung des Modus "Max. Eigenverbrauch"

## 4.5 Entwicklung einer App zur Steuerung des Lastmanagementsystems

Zur Entwicklung der App wurde die Kivy-Softwarebibliothek<sup>26</sup> verwendet. Mittels Kivy können Anwendungen mit grafischen Benutzeroberflächen in der Programmiersprache Python entwickelt werden. Zudem ist es möglich, aus Kivy-Programmen Android-Apps zu erstellen.

Die Aufgabe der Lastmanagement-App besteht darin, Benutzereingaben entgegenzunehmen und damit das Github-Repository zu aktualisieren. Damit die App aber auch Daten darstellen kann, die vom LMS bereitgestellt werden, muss sie diese regelmässig vom Github-Repository abrufen.

<sup>26</sup> Kivy. Kivy 2.2.1 documentation.

Beim Senden eines Requests vergeht immer eine gewisse Zeit. Damit die Benutzeroberfläche nicht blockiert wird, müssen die Requests daher parallel ausgeführt werden. Mit dem Modul «Threading»<sup>27</sup> können Threads erstellt werden, um mehrere Aufgaben parallel auszuführen. Ein Thread stellt einen separaten Ablauf des Programms dar, wobei in Python die Threads aber immer abwechselungsweise Operationen ausführen. Da die Operationen jedoch sehr schnell stattfinden, erscheinen die Threads parallel zueinander.

Damit die App auf einem Android-Smartphone installiert werden kann, muss aus sämtlichen Dateien, die für die App benötigt werden, ein Android-Package erstellt werden. Dazu wurde das Open-Source-Tool Buildozer<sup>28</sup> verwendet, womit der Erstellungsprozess automatisiert werden kann und nur noch die Anforderungen für die App in einer Spezifikationsdatei eingetragen werden müssen. Nachdem der Erstellungsprozess des Android-Package beendet war, konnte die App auf dem Smartphone installiert werden. Die beiden unteren Abbildungen (Abb. 17 und Abb. 18) sind Screenshots aus der fertigen Android-App.

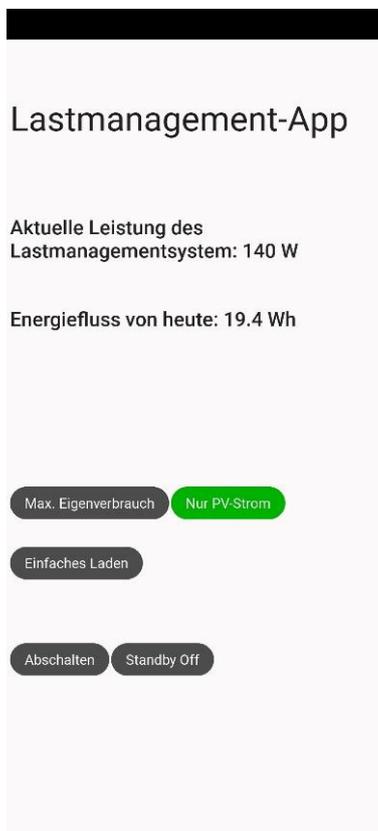


Abb. 17 - Screenshot aus der Lastmanagement-App während des Ladevorgangs

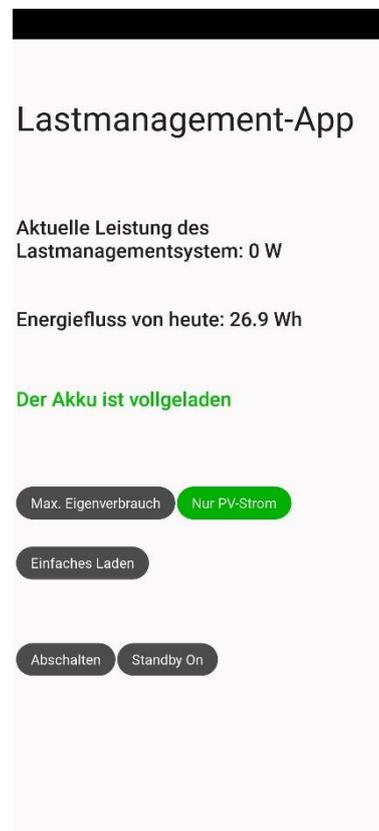


Abb. 18 - Screenshot aus der Lastmanagement-App nach Beendigung des Ladevorgangs

<sup>27</sup> Anderson. An Intro to Threading in Python – Real Python.

<sup>28</sup> Buildozer. Buildozer 0.11 documentation.

## 5 Nutzen von Lastmanagementsystemen in der Praxis

### 5.1 Bewertung des selbst entwickelten Lastmanagementsystems

Zur Visualisierung der Funktionalität des LMS wurde über zwei Tage hinweg der Ladevorgang eines E-Bike-Akkus aufgezeichnet (Abb. 19 und Abb. 20). Das wechselhafte Herbstwetter erbrachte dabei den Vorteil, dass das Verhalten des LMS bei Schwankungen der Überschussleistung dadurch besser aufgezeigt werden konnte. Für die Diagramme wurden bewusst nur Ausschnitte gewählt, da während der restlichen Zeit keine Überschussleistung vorhanden war und somit der Akku auch nicht geladen wurde. Die vollständige Aufzeichnung mit weiteren Daten ist jedoch im Github-Repository (siehe 9.1 Github-Repository) ersichtlich.

Als der Ladevorgang gestartet wurde, war der Akku halbvoll geladen. Als Lademodus wurde «Max. Eigenverbrauch» gewählt, da der Ladevorgang mit dem Lademodus «Nur PV-Strom» aufgrund der geringen Überschussleistung wesentlich länger gedauert hätte. In der Aufzeichnung ist zu sehen, dass der Akku zu Zeiten geladen wurde, als die vom Stromnetz bezogene Leistung grösser war wie die Leistung des LMS. Einerseits kam dies zustande, weil die Unterbrechung des Stromes aufgrund des Timers um zwei Minuten verzögert war, andererseits lag der Aktualisierungsintervall der Lastregelung bei zehn Sekunden.

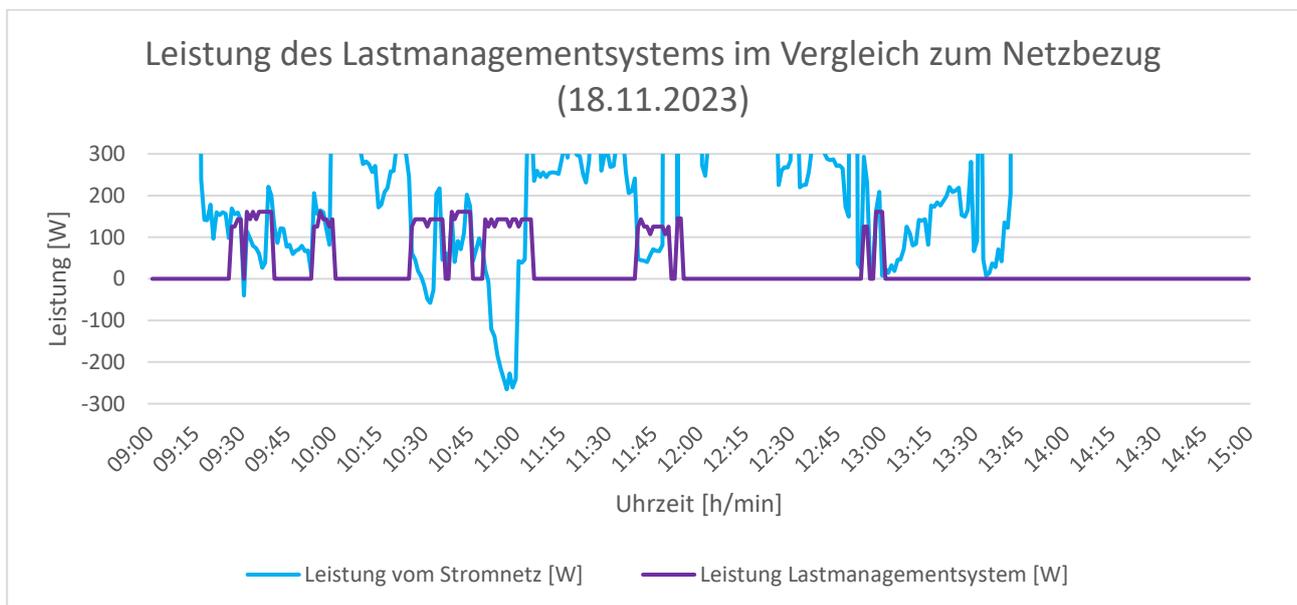


Abb. 19 - Aufzeichnung eines Ladevorgangs mit dem LMS (18.11.2023)

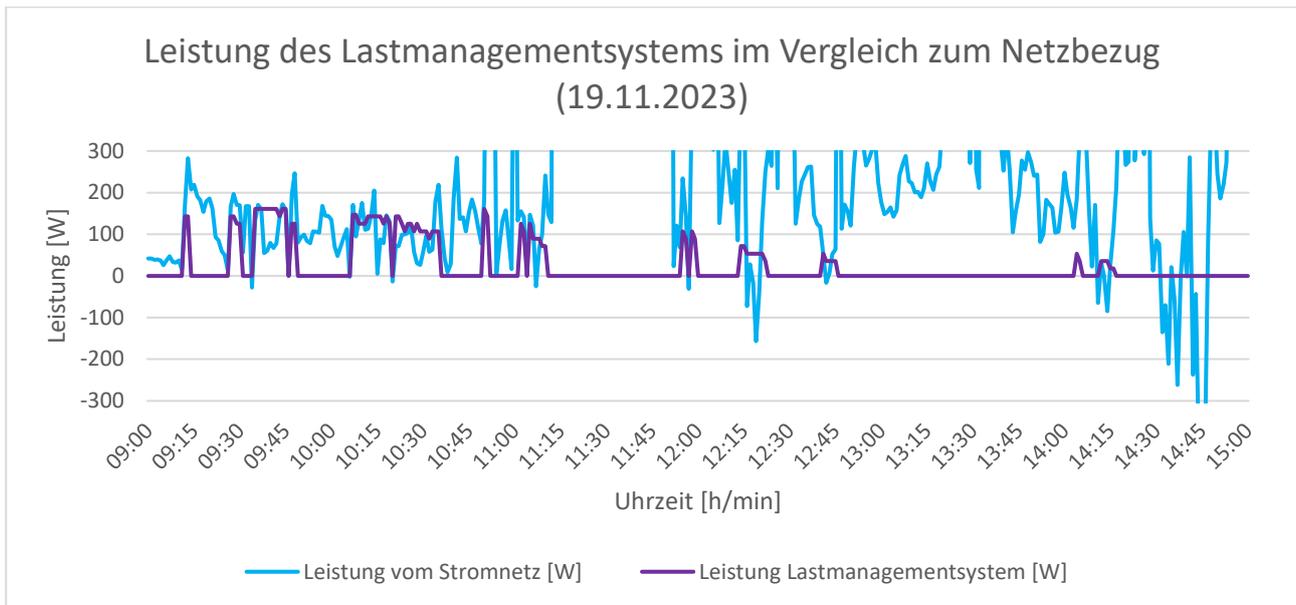


Abb. 20 - Aufzeichnung eines Ladevorgangs mit dem LMS (19.11.2023)

Durch den Einsatz des LMS für das Laden eines E-Bike-Akkus kann zwar keine nennenswerte Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs erzielt werden, jedoch könnte das LMS auch für Verbraucher mit einer höheren Leistungsaufnahme verwendet werden. Die zu regelnde Last muss dabei auch nicht zwingend ein Akku sein. Im Grunde kommen alle Lasten in Frage, die eine zeitliche Flexibilität aufweisen und somit nach Bedarf zugeschaltet werden können.

## 5.2 Erhöhung des Eigenverbrauchs durch das optimierte Laden eines Elektroautos

Der Akku eines Elektroautos hat im Gegensatz zu einem E-Bike-Akku eine viel höhere Kapazität und kann mit einer wesentlich höheren Leistung geladen werden. Im untenstehenden Diagramm (Abb. 21) ist der Ladevorgang eines Elektroauto-Akkus an einem wechselhaften Tag im September zu sehen.

Die Ladestation (Wattpilot 11 Home J<sup>29</sup>) des Elektroautos bietet verschiedene Lade-Modi, die den Ladevorgang beeinflussen. Der in diesem Beispiel gewählte «Eco-Mode» bewirkt eine Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs, indem die Ladestation, wie auch beim selbst entwickelten LMS, den Elektroauto-Akku möglichst nur mit Überschussleistung lädt. Durch die Anwendung des «Eco-Mode» konnten dem Elektroauto-Akku somit 7.9 kWh von 8.5 kWh aus der Energie der PV-Anlage zugeführt werden. Über den ganzen Tag gesehen wurde dadurch der PV-Eigenverbrauch um über 50% gesteigert, wobei der Gesamtstromverbrauch des Haushalts (Abb. 22) grösstenteils mit der Energie der PV-Anlage gedeckt werden konnte.

<sup>29</sup> Fronius International GmbH. Wattpilot - die Ladelösung für Elektroautos - Fronius Solar Energy.

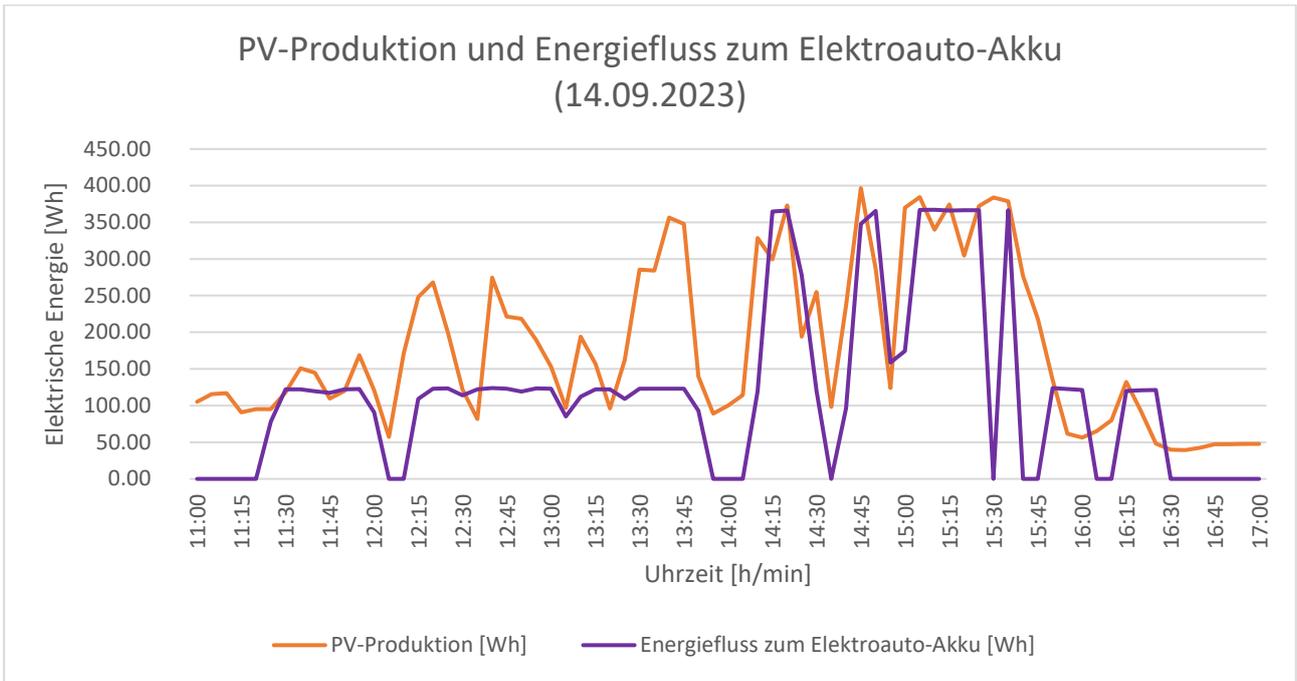


Abb. 21 - Elektroauto-Ladevorgang am 14.09.2023 (Daten von Fronius Solarweb)

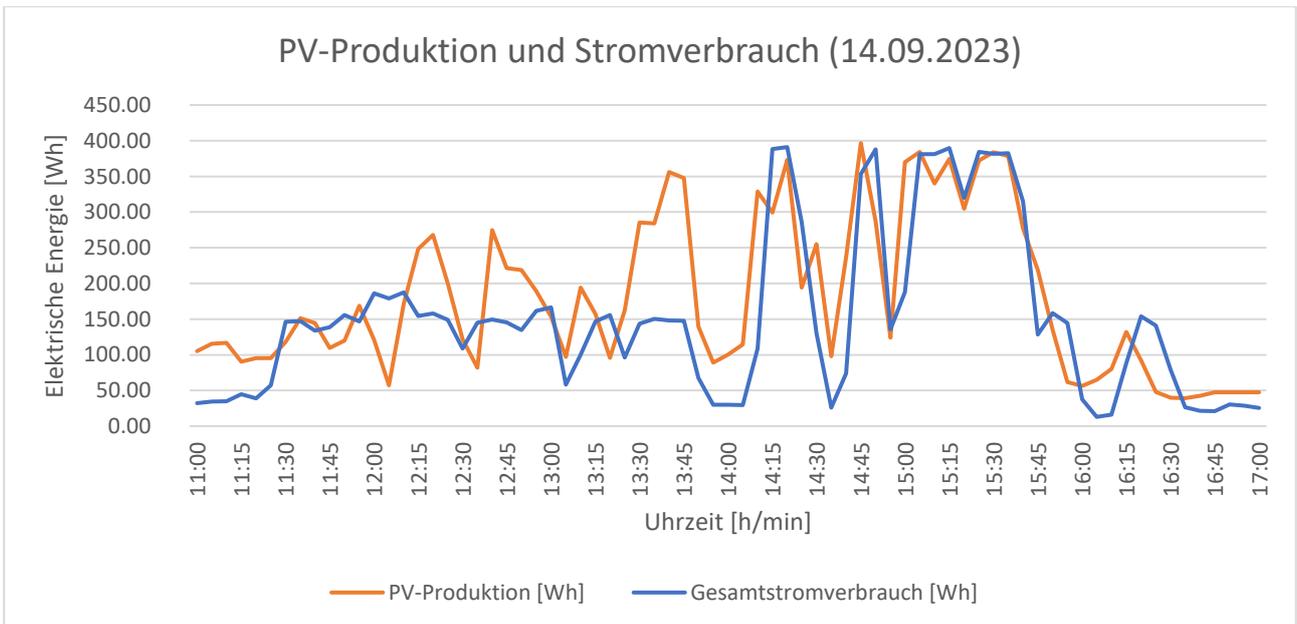


Abb. 22 - PV-Produktion und Gesamtstromverbrauch am 14.09.2023 (Daten von Fronius Solarweb)

### 5.3 Das Zusammenspiel der PV-Energie und Elektromobilität in der Energiewende

Um die Auswirkungen und Möglichkeiten des Zusammenspiels zwischen der PV-Energie und der Elektromobilität in der Energiewende besser einordnen zu können, durfte ich mit Franz Baumgartner, dem Studiengangleiter in Energie- und Umwelttechnik an der ZHAW, ein Interview (siehe 9.2 Interview) über diese Thematik führen.

Mit der Umstellung auf erneuerbare Energien ändern sich die traditionellen Betriebsbedingungen für Verteilungsnetze<sup>30</sup>. Private Haushalte sind nicht mehr nur Verbraucher, sondern können auch Erzeuger sein und ins lokale Verteilungsnetz einspeisen. Abhängig vom Verhältnis lokaler Lasten und der verteilten Erzeugung kann sich nun der Leistungsfluss auch in die Richtung der übergeordneten Netze bewegen. Dies ist dann der Fall, wenn viele dezentrale Stromerzeuger an einem sonnigen Tag in das lokale Verteilnetz einspeisen.

Im Interview erzählte Franz Baumgartner diesbezüglich von einem Projekt zusammen mit dem Elektrizitätswerk des Kantons Schaffhausen (EKS) in Dettighofen (siehe 9.2 Interview, 80-90), wo versucht wurde, mit Hilfe der Blindleistungsregelung eine Spannungserhöhung zu reduzieren. Der Standort Dettighofen war dabei sehr interessant, weil dort ein Solarstromanteil von 40 % vorhanden ist und daher wetterabhängige Spannungsschwankungen auftreten können. Die heutigen Wechselrichter bieten die Möglichkeit, nebst der Wirkleistung auch Blindleistung<sup>31</sup> einzuspeisen. Die Blindleistung kann im Gegensatz zur Wirkleistung nicht von Verbrauchern genutzt werden, da sie periodisch zwischen der Quelle und dem Verbraucher hin- und her pendelt. Dadurch kann der Wechselrichter eine Spannungserhöhung um 2 % reduzieren.

Dasselbe Prinzip wird auch in Vorarlberg angewendet (siehe 9.2 Interview, 91-92), wo die geregelte Blindleistungskompensation mit Wechselrichtern schon seit 2015 im Einsatz ist. Laut Franz Baumgartner müsste dies auch in der Schweiz endlich angegangen werden (siehe 9.2 Interview, 97-99).

Ein weiterer wichtiger Schritt für Franz Baumgartner stellt das bidirektionale Laden von Elektroautos dar (siehe 9.2 Interview, 104-111). Elektroautos könnten als Zwischenspeicher für die PV-Energie dienen und dadurch Lastspitzen glätten. Wenn beispielsweise 1 Million Elektroautos tagsüber PV-Energie speichern und am Abend 10 kWh abgeben würden, könnte damit praktisch die maximale Last des Schweizer Stromnetzes abgedeckt werden. Folglich würde das Zusammenspiel zwischen der PV-Energie und der Elektromobilität eine Stabilisierung des Stromnetzes bewirken.

---

<sup>30</sup> Buchholz und Styczynski 2018, S.161-162.

<sup>31</sup> Mertens 2022, S. 240.

## 6 Schlusswort

In dieser Maturitätsarbeit wurde ein Lastmanagementsystem (LMS) für die Anwendung in einem Dreipersonenhaushalt mit einer PV-Anlage entwickelt. Mit dem LMS sollte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie mit der Verwendung einer zeitlich flexiblen Last eine Eigenverbrauchserhöhung der PV-Energie erreicht werden kann.

Der Entwicklungsprozess begann mit der Planung und Konstruktion der Hardwarekomponenten. Dabei folgte nach der Planung der elektronischen Schaltung die Errichtung eines Testaufbaus, wodurch sichergestellt werden konnte, dass die elektronische Schaltung wie beabsichtigt funktioniert. Nach einer erfolgreichen Prüfung wurde die elektronische Schaltung schliesslich in einem Gehäuse fest verbaut.

Nachdem die Hardwarekomponenten fertiggestellt waren, wurde die Entwicklung der Software in Angriff genommen. Die scheinbar einfache Funktionalität des LMS erwies sich als eine Herausforderung, da diverse Daten von unterschiedlichen Quellen in die Lastregelung mit einfließen und diese erst einmal bereitgestellt werden mussten. Durch die Einbindung aller relevanten Daten in die Lastregelung konnte schliesslich ein Schwellenwertschalter implementiert werden, der auf die Änderungen der Überschussleistung der PV-Anlage entsprechend reagiert. Um eine Schnittstelle für die Nutzer/-innen zu schaffen, wurde eine App zur Überwachung und Steuerung des LMS entwickelt. Hierbei haben die Benutzer/-innen auch die Möglichkeit, persönliche Präferenzen festzulegen, wodurch die Lastregelung beeinflusst wird.

Anhand eines Ladevorgangs bei wechselhafter Sonneneinstrahlung konnte gezeigt werden, dass das LMS auch in der Praxis funktioniert. Da der angeschlossene E-Bike-Akku nur über eine begrenzte Kapazität und eine geringe Leistungsaufnahme verfügt, konnte kein nennenswerter Nutzen für die Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs erbracht werden.

Bei der Optimierung des Ladeprozesses bei einem Elektroauto konnte hingegen eine enorme Steigerung des PV-Eigenverbrauchs beobachtet werden. Dies konnte jedoch nicht mit dem selbst entwickelten LMS realisiert werden, da dieses nicht für eine solche Last ausgelegt ist. Stattdessen wurde das Lastmanagement von der Ladestation des Elektroautos übernommen.

Eine weitere Möglichkeit, wie das Zusammenspiel zwischen der PV-Energie und dem Elektroauto optimiert werden kann, stellt das bidirektionale Laden dar. Mit dem bidirektionalen Laden kann das Elektroauto die Überschussenergie tagsüber aufnehmen und nach Bedarf wieder abgeben.

Nebst den privaten PV-Anlagenbesitzer/-innen profitiert auch das Stromnetz vom geschickten Zusammenspiel zwischen der PV-Energie und dem Elektroauto. Durch das Lastmanagement auf der Ebene des Stromnetzes ergeben sich Möglichkeiten, wie einerseits Lastspitzen geglättet, andererseits aber auch Leistungsüberschüsse genutzt werden könnten.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Michael Oettli bedanken, der mir während des ganzen Arbeitsprozesses immer unterstützend zur Seite stand.

Ein weiterer Dank geht an Franz Baumgartner, der sich für ein Interview Zeit genommen hat und dadurch wertvolle Aspekte in die Maturitätsarbeit mit einbringen konnte.

Ein besonderer Dank gilt Henry Frenzel. Er hat die Montageplatte bestellt und in seiner Werkstatt das Gehäuse des Lastmanagementsystems bearbeitet, wodurch der weitere Zusammenbau überhaupt erst möglich wurde.

Ebenfalls möchte ich mich bei Corvin Sydow, Werner Senn und bei meinen Eltern für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Meinem Vater danke ich auch für die Unterstützung während des Zusammenbaus der Hardwarekomponenten. Ich konnte ihn immer wieder um Rat fragen, wodurch die Sicherheit während des Zusammenbaus sichergestellt werden konnte.

## 7 Literaturverzeichnis

- Allegro MicroSystems, Inc. *ACS712-Datasheet*. 9. Februar 2023. <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx> (Zugriff am 24. September 2023).
- Anderson, Jim. *An Intro to Threading in Python – Real Python*. 22. Mai 2022. <https://realpython.com/intro-to-python-threading/> (Zugriff am 5. November 2023).
- Beuth, Klaus, und Olaf Beuth. *Elementare Elektronik*. Berlin und Waldkirch: Vogel Buchverlag, 2013.
- Braza, Jenn. *Pull-up and Pull-down Resistors*. 18. 11 2021. <https://www.circuitbasics.com/pull-up-and-pull-down-resistors/> (Zugriff am 9. September 2023).
- Buchholz, Bernd Michael, und Zbigniew Antoni Styczynski. *Smart Grids*. Pyrbaum, Remseck: VDE Verlag GmbH, 2018.
- Buildozer. *Buildozer 0.11 documentation*. <https://buildozer.readthedocs.io/en/latest/#> (Zugriff am 5. November 2023).
- Camdenboss. *CHDX8-327C - X8 Series Waterproof Hinged Door Enclosure with Clear Lid, Grey, PC/ABS UL94-HB, 300x200x150mm | CamdenBoss*. <https://www.camdenboss.com/camden-boss/chdx8-327c-x8-series-waterproof-hinged-door-enclosure-with-clear-lid%2C-grey%2C-pcabs-ul94-hb%2C-300x200x150mm/c-23/p-23374> (Zugriff am 18. September 2023).
- Campbell, Scott. *Basics of the I2C Communication Protocol*. 14. November 2021. <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/> (Zugriff am 17. September 2023).
- Conrad Electronic AG. *Bulgin PF0001/63 Kaltgeräte-Steckverbinder PF Stecker, Einbau vertikal Gesamtpolzahl: 2 + PE 10 A Schwarz 1 St.* <https://www.conrad.ch/de/p/bulgin-pf0001-63-kaltgeraete-steckverbinder-pf-stecker-einbau-vertikal-gesamtpolzahl-2-pe-10-a-schwarz-1-st-740784.html> (Zugriff am 18. September 2023).
- Elektronik Kompendium. *Raspberry Pi Zero und Zero W*. <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/raspberry-pi/2105231.htm#:~:text=Der%20Raspberry%20Pi%20Zero%20ist,RAM%20und%20zugleich%20weniger%20Stromverbrauch.> (Zugriff am 16. September 2023).
- EnergieSchweiz. *Eigenverbrauch*. <https://www.energieschweiz.ch/gebaeude/eigenverbrauch/> (Zugriff am 25. Oktober 2023).
- Feller AG. *Feller - Online-Katalog*. [https://online-katalog.feller.ch/kat\\_details.php?fnr=87003.NUP.Q.61](https://online-katalog.feller.ch/kat_details.php?fnr=87003.NUP.Q.61) (Zugriff am 18. September 2023).

- Forschungsförderung Strom und Mobilkommunikation. *Dreiphasen-Wechselstrom*. <https://www.emf.ethz.ch/de/emf-info/themen/technik/stromversorgung/dreiphasen-wechselstrom> (Zugriff am 14. September 2023).
- Fronius International GmbH. „100% Erneuerbare für Ihre Kunden - Fronius Solar Energy.“ *Fronius Solar API (JSON)*. <https://www.fronius.com/de-ch/switzerland/solarenergie/installateure-partner/technische-daten/alle-produkte/anlagen-monitoring/offene-schnittstellen/fronius-solar-api-json-> (Zugriff am 1. November 2023).
- . *Fronius Symo 6.0-3-M*. <https://www.fronius.com/de-ch/switzerland/solarenergie/installateure-partner/technische-daten/alle-produkte/wechselrichter/fronius-symo/fronius-symo-6-0-3-m> (Zugriff am 28. Oktober 2023).
- . *Wattpilot - die Ladelösung für Elektroautos - Fronius Solar Energy*. [https://www.fronius.com/de/solarenergie/installateure-partner/produkte-loesungen/energieloesungen-eigenheim/e-mobilitaet-und-photovoltaik-eigenheim/wattpilot-ladeloesung-fuer-elektroautos-eigenheim#anc\\_keyfeatures](https://www.fronius.com/de/solarenergie/installateure-partner/produkte-loesungen/energieloesungen-eigenheim/e-mobilitaet-und-photovoltaik-eigenheim/wattpilot-ladeloesung-fuer-elektroautos-eigenheim#anc_keyfeatures) (Zugriff am 6. November 2023).
- Fux, Samuel Felix. *Optimal energy management and component sizing of a stand-alone building energy system*. ETH, 2013.
- GitHub, Inc. *Repository contents - GitHub Docs*. <https://docs.github.com/en/free-pro-team@latest/rest/repos/contents?apiVersion=2022-11-28#get-repository-content> (Zugriff am 1. November 2023).
- Kivy. *Kivy 2.2.1 documentation*. 17. Juni 2023. <https://kivy.org/doc/stable/> (Zugriff am 5. November 2023).
- Marinescu, Marlene, und Jürgen Winter. *Basiswissen Gleich- und Wechselstromtechnik*. Frankfurt und Rüsselsheim: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- Mertens, Konrad. *Photovoltaik*. Steinfurt: Carl Hanser Verlag München, 2022.
- reichelt elektronik GmbH. *DEBO SENS 20A: Entwicklerboards - Stromsensor-Modul, 20 A, 5 V, ACS712ELC bei reichelt elektronik*. [https://www.reichelt.com/ch/de/entwicklerboards-stromsensor-modul-20-a-5-v-acs712elc-debo-sens-20a-p282569.html?PROVID=2808&gclid=Cj0KCQjwx5qoBhDyARIsAPbMagArKasd3LV7QKNoxfZ1-KgjwdoY41\\_txMrnxP4Ghu3LwexTRs3M7o8aAqGBEALw\\_wcB](https://www.reichelt.com/ch/de/entwicklerboards-stromsensor-modul-20-a-5-v-acs712elc-debo-sens-20a-p282569.html?PROVID=2808&gclid=Cj0KCQjwx5qoBhDyARIsAPbMagArKasd3LV7QKNoxfZ1-KgjwdoY41_txMrnxP4Ghu3LwexTRs3M7o8aAqGBEALw_wcB) (Zugriff am 17. September 2023).
- . *MW HDR-15-5: Schaltnetzteil, Hutschiene, 12 W, 5 V, 2,4 A bei reichelt elektronik*. [https://www.reichelt.de/schaltnetzteil-hutschiene-12-w-5-v-2-4-a-mw-hdr-15-5-p202990.html?&trstct=pos\\_10&nbc=1](https://www.reichelt.de/schaltnetzteil-hutschiene-12-w-5-v-2-4-a-mw-hdr-15-5-p202990.html?&trstct=pos_10&nbc=1) (Zugriff am 18. September 2023).

- SIMAC Electronics GmbH. „KY-019 Relais Modul | Joy-IT.“ *For Makers and Professionals | Joy-IT*. 6. April 2021. [https://joy-it.net/files/files/Produkte/COM-KY019RM/COM-KY019RM\\_Datenblatt\\_2021-04-06.pdf](https://joy-it.net/files/files/Produkte/COM-KY019RM/COM-KY019RM_Datenblatt_2021-04-06.pdf) (Zugriff am 17. September 2023).
- . „KY-053 Analog-Digital Wandler | Joy-IT.“ *For Makers and Professionals | Joy-IT*. 25. November 2022. [https://joy-it.net/files/files/Produkte/COM-KY053ADC/COM-KY053ADS\\_Datenblatt\\_2022-11-25.pdf](https://joy-it.net/files/files/Produkte/COM-KY053ADC/COM-KY053ADS_Datenblatt_2022-11-25.pdf) (Zugriff am 9. September 2023).
- Srocke, Dirk. *Was ist eine REST API?* 6. Juni 2017. <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-eine-rest-api-a-6e93daacdd9a10179bf0fcd6dec9507d/#:~:text=REST%20steht%20f%C3%BCr%20REpresentational%20State,und%20Server%20in%20Netzwerken%20beschreibt.> (Zugriff am 1. November 2023).
- Swiss Energy-Charts. *Jährlicher Anteil der Solarenergie an der öffentlichen Nettostromerzeugung in der Schweiz.* [https://www.energy-charts.info/charts/renewable\\_share/chart.htm?l=de&c=CH&share=solar\\_share&legendItems=01&interval=year](https://www.energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.htm?l=de&c=CH&share=solar_share&legendItems=01&interval=year) (Zugriff am 18. November 2023).
- Wikipedia. *Hysterese*. 2. Juli 2023. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Hysterese&oldid=235109009> (Zugriff am 5. November 2023).
- . *Schwellenwertschalter*. 14. April 2021. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schwellenwertschalter&oldid=210922879> (Zugriff am 5. November 2023).



## 8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 - Jährlicher Anteil der PV-Energie an der Nettostromerzeugung in der Schweiz.....	5
Abb. 2 - Schematisches Diagramm des Monitoring-Systems .....	7
Abb. 3 - Datenfluss (orange Pfeile) zum LMS .....	8
Abb. 4 – Schaltplan .....	10
Abb. 5 - Testaufbau .....	11
Abb. 6 - Kennlinie des Stromsensors .....	12
Abb. 7 - Montageplatte während des Zusammenbaus.....	14
Abb. 8 - Entwurf der Montageplatte (Masseinheit: [mm]).....	14
Abb. 9 - Fertig zusammengebautes LMS .....	15
Abb. 10 - Anschlussklemmen mit Schutzleiter (gelb-grün) .....	16
Abb. 11 - Programmablaufplan des Haupt-Skripts.....	18
Abb. 12 - GET-Request für den Abruf der Wechselrichter-Daten .....	19
Abb. 13 - Stromverbrauch und PV-Produktion am 27.10.2023 (Daten von Fronius Solarweb) .....	22
Abb. 14 - Methode zur Verzögerung des Schaltvorgangs .....	22
Abb. 15 - Schematische Darstellung des Modus "Nur PV-Strom".....	23
Abb. 16 - Schematische Darstellung des Modus "Max. Eigenverbrauch" .....	23
Abb. 17 - Screenshot aus der Lastmanagement-App während des Ladevorgangs .....	24
Abb. 18 - Screenshot aus der Lastmanagement-App nach Beendigung des Ladevorgangs.....	24
Abb. 19 - Aufzeichnung eines Ladevorgangs mit dem LMS (18.11.2023).....	25
Abb. 20 - Aufzeichnung eines Ladevorgangs mit dem LMS (19.11.2023).....	26
Abb. 21 - Elektroauto-Ladevorgang am 14.09.2023 (Daten von Fronius Solarweb).....	27
Abb. 22 - PV-Produktion und Gesamtstromverbrauch am 14.09.2023 (Daten von Fronius Solarweb).....	27



## 9 Anhang

### 9.1 Github-Repository

Unter diesem Link finden Sie den Code und die Excel-Dokumente zu den verwendeten Diagrammen:



<https://github.com/LaTartaRugaa/Lastmanagement-System>

### 9.2 Interview

Interviewpartner: Prof. Dr. Franz Baumgartner, Studiengangleiter Energie- und Umwelttechnik ZHAW

Datum: 6. September 2023, 15:20 Uhr

Dauer: 34 Minuten

Ort: ZHAW School of Engineering, Technikumstrasse 9, 8401 Winterthur

1 I: Könnten Sie mir zu Beginn über Ihre berufliche Laufbahn und Ihre Tätigkeit hier bei der ZHAW erzählen?

2

3 B: Ja – ich war zuerst 4 Jahre an einem Gymnasium in Ost-Österreich. Danach absolvierte ich die technische  
4 Mittelschule mit einem Maturaabschluss im Bereich Elektrotechnik. Diese dauerte dann nochmals fünf Jahre.  
5 Anschliessend habe ich dann an der TU in Wien Elektrotechnik studiert und in Elektromedizin meine  
6 Diplomarbeit gemacht. Danach habe ich gesagt, dass ich unbedingt in der Solarzellenforschung arbeiten  
7 möchte, weil mich das interessiert hat, und bin dann an die Universität nach Konstanz gegangen. Dort habe  
8 ich in der Physik promoviert. Als ich dann fertig war, habe ich vier Jahre lang eine Forschungsgruppe geleitet,  
9 die Dünnschichtsolarzellen entwickelt hat. Danach bin ich in die Schweiz gegangen, ins Rheintal nach Buchs,  
10 und habe an der Fachhochschule unterrichtet. Daneben hatte ich vorher in Konstanz ein Startup, wo wir ein

11 Elektroauto produziert haben. Am Ende in Buchs habe ich dann auch noch bei einem Startup gearbeitet, das  
12 neue Montagesysteme entwickelt hat, wie z. B. der erste Solar-Skilift in Tenna. Aktuell bin ich in einem Projekt  
13 involviert, das sich mit solchen Systemen über Kläranlagen beschäftigt.

14 Fazit ist: Wenn die Solarzelle vor 30 Jahren den grössten Kostenanteil von 80 % gehabt hat, ist der Anteil heute  
15 nur noch 20 %. Deswegen ist der Rest, die Systemtechnik, die Montage, die Elektronik und wie man das macht  
16 und plant, von der Wertschöpfung her viel wichtiger geworden. Das bietet in der Zukunft auch viel mehr Jobs,  
17 wie allein die Forschung an der Solarzelle.

18 Nun bin ich seit 15 Jahren hier, an der ZHAW, und bin Studiengangleiter in Energie- und Umwelttechnik. Hier  
19 habe ich viele Forschungsprojekte mit dem EKZ, Elektrizitätsunternehmen und Startups aus der Industrie  
20 durchgeführt. Ich habe dabei immer etwa drei bis vier Mitarbeitende gehabt, die nur in Forschungsprojekten  
21 arbeiten, die extern finanziert werden. International bin ich auch schon seit 20 Jahren im Programmkomitee  
22 für die wichtigste Photovoltaik-Konferenz in Europa. Dort bin ich in 2 Wochen wieder. Die Konferenz mit  
23 4000 Teilnehmern und 1000 Beiträgen geht eine ganze Woche lang. Ich bin da einer von 40 Personen, die das  
24 Programm koordinieren und auswählen, welche Beiträge man nimmt und wer einen Vortrag machen darf. Der  
25 Schlüssel ist, dass man so lange schon dabei ist. Man muss länger in einem Gebiet tätig sein, engagiert dabei  
26 sein und da auch Verschiedenes machen. Dann merkt man, dass es total spannend ist und in welche Richtung  
27 es sich weiterentwickelt. Es ist nicht immer gleich. Vor 30 Jahren habe ich mir es anders vorgestellt, wie es  
28 jetzt ist. Aber grundsätzlich traue ich mir immer noch zu, dass ich den Trend ganz gut abschätzen könnte –  
29 immer mit Unsicherheiten. Aber ich finde es heute viel spannender als vor 30 Jahren, weil die Umsetzung da  
30 ist.

31

32 I: Sie haben vorher erwähnt, dass Steuerungstechnologien immer wichtiger werden. Waren Sie auch schon an  
33 Projekten beteiligt, die mit Lastmanagementsystemen zu tun hatten?

34

35 B: Die Steuerungen sind nicht das Wichtigste. Das habe ich nicht gesagt. Ich habe nur gesagt, dass die Planung  
36 von Allem das Wichtigste ist. Dass wir Hardware zubauen, in Form von Solarzellen, in Form von  
37 Windkraftwerken, in Form von Speichermodulen. Die müssen gebaut werden. Oft erzählt man heute den  
38 jungen Leuten, dass nur die Digitalisierung das Wichtigste sei. Das glaube ich nicht. Ich glaube, wir haben  
39 noch andere Kompetenzen. Digitalisierung ist eigentlich Mathematik. Das wird jeder in irgendeiner Form  
40 verwenden. Allein mit der Digitalisierung können wir aber noch keine praktische Anwendung machen.

41 Zu Ihrer Frage: Wir haben in einigen Projekten die Batterien für Photovoltaiksysteme zwischen 5 kW und 10  
42 kW, die im Haus eingesetzt sind, für einen Energieversorger auf Herz und Nieren getestet. Dort haben wir über  
43 das Einstrahlungsprofil im Labor den Gleichspannungsanteil hineingegeben und dann geschaut, wie viel  
44 Verlust entsteht. Dann haben wir auch gesehen, dass gewisse Steuerungen der Batterie vom Hersteller falsch

45 waren. Z. B. wurde Strom vom Stromnetz zusätzlich bezogen, obwohl es am Mittag viel Sonneneinstrahlung  
46 hatte. Solche Projekte haben wir begleitet. Allerdings muss man heute sagen, dass der Zugang zu sehr vielen  
47 praktischen Projekten der Schlüssel ist. Diesen Zugang haben die Energieversorger in der Regel nicht, weil sie  
48 zu klein sind. Ein Wechselrichter-Hersteller hat hunderttausende Kunden und über die digitale Datenbank hat  
49 er den Zugriff auf die Verbrauchs- und Erzeugungsdaten. Es ist nicht nur entscheidend, dass man irgendeine  
50 Idee hat, wie man das steuert. Man muss auch einen grossen Datensatz haben. Den Datensatz haben heute eher  
51 die Wechselrichter-Hersteller und nicht die Energieversorger. Deswegen haben die auch die besten  
52 Komponenten.

53

54 I: Findet die Datenübermittlung dabei über den Smart Meter statt?

55

56 B: Das würde man sich so wünschen. Technisch würde man das erwarten. Ich war gerade vor zwei Wochen  
57 bei einer Tagung in Rüschlikon beim GDI. Dort waren viele Geschäftsführer von Energieversorgern. Die  
58 mussten auch sagen, dass die Smart Meter nur 15-Minuten-Werte liefern können. Das ist eine Vorgabe. Das ist  
59 nicht so, weil die Energieversorger so doof und so langsam sind. Aus Datenschutzgründen will man nur die  
60 15-Minuten-Werte dokumentieren, obwohl die Smart Meter verrückterweise schneller messen könnten. Es ist  
61 jetzt eine Diskussion im Gange, weil der Smart Meter Rollout vor Jahren in der Schweiz und auf europäischer  
62 Ebene beschlossen worden ist. In der Schweiz ist erst ein Bruchteil, weniger als 10 %, umgesetzt und jetzt  
63 sagen viele: «Gut, dass noch nicht so viel umgesetzt worden ist», denn vielleicht wäre es besser, wenn man in  
64 Zukunft andere Smart Meter im Haus hat, die schneller messen und dann gleich die Rückmeldung an das  
65 Batteriemanagementsystem geben können. Sie haben in Ihrer Arbeit ja auch überlegt, wann es sinnvoll wäre,  
66 das Auto zu entladen, und wann es sinnvoll wäre, das Auto zu laden. Dazu brauchen Sie den Lastfluss genau  
67 an der Schnittstelle zum Energieversorger, wo der Stromzähler sitzt.

68

69 I: In meinem Projekt wird diese Aufgabe aber vom Smart Meter von Fronius übernommen.

70

71 B: Eben das ist der Witz. Die Energieversorger machen einen Smart Meter Rollout und verlangen vielleicht  
72 200 CHF pro Smart Meter. Dann muss die Privatperson aber noch einen zweiten Smart Meter für die PV-  
73 Anlage einbauen. Das wäre eigentlich überflüssig. Eigentlich müsste man heute erwarten, dass ich als Kunde  
74 digital zu jeder Sekunde von meinem Smart Meter im Web auf die Daten Zugriff habe.

75

76 I: Was halten Sie davon, wenn Lastmanagementsysteme in privaten Haushalt zur Anwendung kommen  
77 würden, vor allem in Bezug auf Elektroautos? Was hätte das für einen Einfluss auf die Netzstabilität,  
78 insbesondere auch in Bezug auf erneuerbare Energien?

79

80 B: Wir haben bezüglich dieser Frage zur Photovoltaik mit dem EKS in Schaffhausen in Dettighofen ein  
81 langjähriges Projekt gemacht. Dettighofen hat 40 % Solarstromanteil. Die ganze Schweiz hat jetzt 8 %. Dort  
82 haben wir Folgendes untersucht: Die heutigen Solarwechselrichter können die Spannungserhöhung um 2 %  
83 reduzieren, wenn die Spannung zu hoch ist. Und es gibt ein oberes Limit: 10 % über den 230 V dürfen nicht  
84 überschritten werden. Ansonsten müsste der Energieversorger eine Strafe bezahlen. Wenn man in der  
85 Elektrotechnik mit der komplexen Rechnung Dinge beschreibt, kann man über die Blindleistungsregelung  
86 Scheinleistung hineinschicken. Scheinleistung ist eigentlich nichts anderes, als wenn Strom und Spannung im  
87 Nulldurchgang phasenverschoben werden. Wenn ich diesen Trick anwende, kann ich die Spannungserhöhung  
88 um 2 % reduzieren. Das kann der Solarwechselrichter selbst machen. Ich muss ihm nur sagen, ab welcher  
89 Spannung er das machen soll. Z. B. soll er bei 5 % über dem Nennpunkt beginnen. Bei 8 % hätte er dann das  
90 Maximum erreicht. Ein kommerzieller Wechselrichter ist heute im Stande dieses «Reactive Power Control»  
91 durchzuführen. Das habe ich auch mit einem Forschungsinstitut in Wien genauer angeschaut. Das ist sehr  
92 effizient. Vorarlberg hat das schon seit 2015 eingesetzt. Und wie wir das Forschungsprojekt in Dettighofen  
93 vom BFE finanziert gestartet haben, haben wir dort mit dem Zuständigen ein erstes einleitendes Gespräch  
94 gemacht und der hat Folgendes gesagt: «Unsere Erfahrung ist, dass Photovoltaik nicht das grosse Problem ist.  
95 Das eigentliche Problem ist das Laden des Elektroautos. Das ist viel mehr Leistung.» Das ist auch logisch,  
96 weil das Laden mit 22 kW mehr Leistung ist, als eine 5 kW oder 10 kW PV-Anlage liefern kann. Ihre Frage  
97 war bezogen auf die Stabilität des Stromnetzes, das Laden von Elektroautos und die Photovoltaik. Dort muss  
98 man sagen, dass die Blindleistungskompensation, wie es die Vorarlberger und Bayern machen, von der  
99 Schweiz endlich mal angegangen werden sollte. Es kostet nämlich nichts. Da ist die Elektronik in den  
100 Wechselrichtern schon drin. Der Energieversorger müsste nur sagen: «Bei 5 % fängst du an und dann machst  
101 du es linear fertig.» Das ist alles, was man in den Anschlussbestimmungen reinschreiben müsste. Und dann  
102 müssten bei der Installation des Wechselrichters einmal die Speicherplätze mit diesen Vorgaben belegt werden.  
103 Das gleiche könnte man auch für die Rückspeisung ins Netz machen. Die Energie, die von der Batterie des  
104 Elektroautos ins Stromnetz geht, könnte auch Blindleistung enthalten. Es muss nicht nur Wirkleistung ins  
105 Stromnetz zurückgehen. Und wenn man das alles berücksichtigt, könnte das Elektroauto das Stromnetz  
106 stabilisieren. Denken Sie nur an folgendes Szenario: Wenn man jetzt tagsüber mit einer Million Elektroautos  
107 jeweils 10 kWh speichern würde, und am Abend würden Sie wieder jeweils 10 kWh ins Netz zurückspeisen,  
108 wäre das enorm. Dann können Sie praktisch mehr als die maximale Last des Schweizer Stromnetzes abdecken.  
109 Das ist ein enormes Potenzial, das man da hat. Fazit ist, dass das Elektroauto eigentlich mit der Photovoltaik  
110 das Stromnetz stabilisiert. Die fluktuierende Erzeugung wird durch den Speicher geglättet und kann nachher  
111 gezielt Störungen im Stromnetz an hunderttausend verschiedenen Orten kompensieren.

112

113 I: Aber dann müsste doch eigentlich festgelegt werden, dass in jedem privaten Haushalt Lastmanagement-  
114 systeme vorhanden sind, die auch untereinander vernetzt sind?

115

116 B: Da würde ich dazusagen, das ist kein Ding der Unmöglichkeit. Seit Jahrzehnten werden die  
117 Elektroheizungen in der Schweiz über Rundsteuer-Impulse schon so ein- und ausgeschaltet. Das hat es bereits  
118 vor einem halben Jahrhundert gegeben. Als man die Kernkraftwerke in der Schweiz gebaut hat, stellte man  
119 fest, dass man in der Nacht viel Strom hat, den man gar nicht verbraucht. Dann haben sie gesagt: «Ja, dann  
120 fördern wir doch die Elektroheizungen. Dann müssen die Leute nicht in Erdöl, sondern in Strom investieren.»  
121 Das war auch in Europa und international so. Dann haben sie gesagt, dass die Menschen ja nicht schon tagsüber  
122 Strom brauchen dürfen. Sie sollten erst am Abend die Nachtspeicheröfen einschalten.

123

124 I: Und wie wurde das genau geschaltet?

125

126 B: Sie haben ein hochfrequentes Signal über die Stromleitung auf moduliert. Das könnte man heute wieder so  
127 machen. Man könnte die Stromnetze anstelle der normalen IT-Schiene benutzen. Oder man könnte zwei  
128 unabhängige Kanäle haben, damit das Stromnetz nicht destabilisiert werden kann.

129

130 I: Bei der Recherche habe ich auch noch eine andere Möglichkeit gefunden, und zwar mit dynamischen  
131 Netztarifen.

132

133 B: Ja, das gibt es auch. Das ist keine Zukunftsvision, die die ETH noch entwickeln muss. Das ist seit drei  
134 Jahren in Schweden und in Finnland in Betrieb. Dort haben sie stündliche Strompreise.

135

136 I: Warum macht man das in der Schweiz nicht?

137

138 B: Es gibt Vieles, was man noch nicht macht, z. B. auch das bidirektionale Laden. Ich glaube, das ist auch  
139 noch ein gewisser Schutz für die Energieversorger. Sobald man bidirektional einspeist, könnte man sagen, dass  
140 man es bis zu einer kleinen Leistung nicht regeln muss. In Deutschland war es so, dass Photovoltaik-Anlagen  
141 mit über 100 kW immer schon vom Energieversorger her gesteuert werden mussten. D. h. technisch geht das  
142 heute schon. Man muss es nur noch mehr anwenden.

143

144 I: Diesbezüglich wurde ja auch im Jahr 2017 das Gesetz zur Energiestrategie 2050 angenommen, wovon ein  
145 Bestandteil die Einführung von Smart Metern ist. Dann wäre das Potenzial für die Integration von mehr PV-  
146 Energie aber grundsätzlich vorhanden?

147

148 B: Die Smart Meter haben aber dazu nichts beigetragen. Ich war zur Abstimmung «Energie 2050» sogar einmal  
149 in einer Fernsehdiskussion in Zürich und da habe ich mit dem Swissmem Direktor diskutiert. Er war dagegen  
150 und ich war dafür.

151

152 I: Sie würden also sagen, dass wir mehr PV-Anlagen installieren können und die nötigen technischen Mittel  
153 haben, um das Stromnetz stabil zu halten?

154

155 B: Wenn wir jetzt 8 % haben, wäre das bis 20 % Solarstromanteil kein Problem. Jetzt werden wir vielleicht  
156 20 % installiert haben. Ich denke, wir haben bis 2030 sicher mehr installiert. Der Punkt ist, dass die  
157 Speicherkraftwerke in der Schweiz auch noch extrem viel PV-Leistung aufnehmen, nämlich 5 GW. Viel mehr,  
158 als das heute schon installiert ist, könnten alle Pumpspeicherkraftwerke im Pumpstadium aufnehmen. Also  
159 Strom am Mittag aus dem Netz herausziehen, hochpumpen und am Abend wieder gegengleich machen. Dann  
160 hätte man noch in Zukunft die Elektroautos. Ab 2030 will Deutschland 15 Millionen Elektroautos haben. 1.5  
161 Millionen kann sich die Schweiz auch zutrauen. Wenn ich von den 1.5 Millionen Autos 1 Million zur  
162 Verfügung habe, die bidirektional sind, habe ich pro Elektroauto 10 kW. Dann sind das 10 GW Leistung. Mehr  
163 Leistung habe ich im Schweizer Stromnetz nie. Wenn ich von den 1.5 Millionen nur zwei Drittel bidirektional  
164 zur Verfügung hätte, dann könnten sie mehr als die ganze Leistung aufnehmen und liefern. Wir reden hier von  
165 8 Jahren. Wenn Sie jetzt die Schule fertig machen, dann studieren und nachher in einem Betrieb arbeiten,  
166 müssen Sie sich beeilen, weil das sonst schon alles getan ist. Das muss ja alles jetzt schon erfolgen. Da ist ein  
167 riesiges Potenzial. Bei der Tagung beim GDI habe ich das auch an der Diskussion angefügt, weil die Empa  
168 eine Studie darüber gemacht hat. Ich habe dann kritisch nachgefragt, ob sie das bidirektionale Laden bei  
169 Elektroautos miteinbezogen haben. Das haben sie bis jetzt nicht in ordentlicher Form gemacht.

170

171 I: Aber das wird auch noch miteinbezogen werden?

172

173 B: Das wird sicher passieren. Und dann wird es auch die Empa miteinbeziehen. Die Fachwelt wird aber nicht  
174 auf die Empa warten. Die Fachwelt ist viel grösser und international viel umfassender, wie eine Forschungs-  
175 einrichtung nur hier.

176

177 I: In den Medien ist viel von «Smart Grid» die Rede. Können Sie mir dazu mehr erzählen?

178

179 B: Die riesige Chance ist ja, wenn ich das Laden und Entladen steuern kann. Dann ist es «smart».

180

181 I: Der Begriff «smart» bedeutet in dem Fall einfach, dass es vernetzt ist?

182

183 B: «Smart» ist im Grunde ein Unwort. Es sagt etwas aus, aber gleichzeitig auch nicht. Es ist so ein «Gummi-  
184 Begriff».

185

186 I: Wenn das Elektroauto aufgeladen und entladen werden kann, ist es dann ein Teil vom «Smart-Grid»?

187

188 B: Nein. Denn «Smart-Grid» verwendet jeder so, wie er es braucht. Der Stromzähler-Hersteller Landis+Gyr  
189 war mit seiner Lobbyarbeit hauptverantwortlich, dass in Brüssel dieses Smart-Meter Rollout war. Heute sagen  
190 viele, dass sie eigentlich schuld waren, dass wir jetzt diese Millionen zahlen müssen und der Nutzen nahe null  
191 ist. Die Leute stellen fest, wie viel Strom sie jetzt verbrauchen. Das haben sie ja aber vorher auch schon  
192 ungefähr gewusst. Man hätte es viel mehr generalisieren und standardisieren müssen. Das ist aber ein anderes  
193 Thema. Die Definition von «smart» aber gibt es nicht. Jeder verwendet es und biegt den Begriff so hin, wie er  
194 es braucht. Ein Mitarbeiter von mir, einer der besten, hat jetzt im August beim Stadtwerk Winterthur begonnen  
195 und ist dort im Bereich «Smart-Grid» zuständig. Er ist aber ein Techniker. Er ist alles andere als ein  
196 Schaumschläger mit Begriffen. Aber er muss das jetzt auch im politischen Umfeld erklären und verkaufen.  
197 Eine Technik kann nicht «intelligent» sein. Sie muss ein gewisses Ziel erreichen können. Dann ist es eine  
198 saubere, zielführende und starke technische Lösung. Es könnte auch in der Zukunft so sein, dass 1000 Leute  
199 bei einer Firma «X» in Winterthur arbeiten, wovon 500 mit dem Elektroauto kommen und es zur Verfügung  
200 stellen, damit der Strom, der erzeugt wird, nicht für einen Pappenstiel von 4 Rappen ins Stromnetz  
201 zurückgespeist werden muss. Die sagen dann: «Ja, wir nehmen den Strom auf, weil wir dort während der  
202 Arbeitszeit laden.» Der Bedienstete sagt: «Liebe Firma, ich zahl dir 10 Rappen.» Am Abend fährt er dann  
203 zurück und lädt seine Batterie. Dabei verliert er sicher etwas. Wenn das aber günstiger ist, wie die Energie, die  
204 der Haushaltsbesitzer vom Stromnetz in der Nacht bezieht, kann sich so etwas rechnen. Dann merkt man

205 schnell, auch bei uns bei der FH für angewandte Wissenschaften, dass die technische Lösung allein mir nichts  
206 nützt. Ich muss die Kosten immer im Auge behalten. Ich setze ja auch keinen Gold- oder Silberdraht ein, nur  
207 weil dieser einen kleineren Widerstand hat wie Kupfer. Es wird zu teuer. Wenn ich eine Lösung für die  
208 Gesellschaft oder irgendjemanden liefern will, darf es nicht unendlich teuer sein. Ansonsten kann ich nur  
209 Milliardäre befriedigen. Wenn ich das für die normalen Leute machen will, muss ich immer auf die  
210 Wirtschaftlichkeit schauen. Das könnte am Arbeitsplatz gegeben sein, wo der Photovoltaik-Strom vom  
211 Industriedach in das Elektroauto vom Mitarbeiter und schliesslich nach Hause gebracht wird. Die Firma sagt:  
212 «Wir haben genügend Einnahmen und gleichzeitig ist es gerade noch eine Mitarbeiterbindung.» Das muss man  
213 sich alles überlegen. Das könnte sein. Dann könnte man erreichen, dass der Energieversorger auch wirklich an  
214 jedem Arbeitsplatz einen bidirektionalen Anschluss macht. Der muss nämlich auch etwas davon haben.  
215 Gleichzeitig würde damit das Stromnetz mit 500 Autos wieder stabiler werden. Dafür müssten sie dann eine  
216 Notfunktion haben, wo der Energieversorger eingreifen kann und dafür aber auch eine Vergünstigung vom  
217 Energieversorger bekommen. Die Anschlussgebühr wäre dann günstiger, weil sie ja das Netz stabilisieren. Ich  
218 denke, so wird es in den nächsten 20 Jahren etwa aussehen. Es weiss heute keiner, wie es genau wird, aber  
219 diese Funktionalitäten werden wir wirtschaftlich abbilden. Das werden junge Leute machen. Aber das werden  
220 wir auch nicht erst in zehn Jahren machen, sondern werden wir schon früher beginnen – und das finde ich  
221 hochspannend. Es wird nicht einer herkommen und sagen: «Ich habe die richtige Steuerung für das Auto  
222 entwickelt und diese übernehmen jetzt alle.» Es sind so viele verschiedene Interessen da. Z. B. muss ich auch  
223 eine ältere Frau mit 85 Jahren berücksichtigen. Ihr kann ich jetzt nicht die ganzen Stromkosten reindrücken,  
224 die die ganzen Smart-Meter-Rollouts verursachen. Denn die hat ja nicht so viel davon und da muss ich auch  
225 fair sein. Da sind so viele technische, soziale und wirtschaftliche Aspekte – eine komplizierte Geschichte, aber  
226 spannend. Wenn sie aber das alles machen, wären sie viel autonomer. Bei Ihrem Haus merken Sie es ja schon.  
227 Wenn draussen alles zusammenbricht, haben Sie eine Notstromversorgung, das Elektroauto. Das wäre das  
228 Ziel. Ich muss da auch gar keine grosse «Intelligenz» haben. Wenn ich in der Früh losgehe, schaue ich, wie  
229 das Wetter heute wird, und mache die Vorwahl, damit die Spülmaschine um 11 Uhr eingeschaltet wird. Das ist  
230 auch schon mal gegeben und das könnte jeder ohne irgendeinen grossen Algorithmus machen.