

Fuelcell-Box

Unsere Ausarbeitung der zweiten Runde

Florian Noje

Lukas Krinke

Friedrich Böttger

Gymnasium Essen-Werden

EnergieAgentur.NRW 

Vorwort

Voller Motivation starteten wir am 28.09.2020, direkt nach der Boxenübergabe damit, alle Einzelteile zu begutachten und erste Ansätze zu entwickeln, wie wir das Modell umsetzen wollen.

Begonnen haben wir mit den Brennstoffzellen, mit denen wir uns erst einmal vertraut machen mussten. Anschließend haben wir das Gewächshaus aufgebaut und uns Stück für Stück den einzelnen Bestandteilen der Anlage gewidmet. Die Umsetzung der Steuerung lief nach einigen Startschwierigkeiten problemlos, als es daraufhin allerdings an die Verschaltung der Aktoren mit den Photovoltaikmodulen und Brennstoffzellen ging, stießen wir auf mehr und mehr Probleme.

Um diese zu lösen, haben wir zuerst mit mehreren Chemie- und Physiklehrern unserer Schule gesprochen und mit zwei von diesen sogar mehrere Nachmittage in dem Schullabor verbracht mit dem Resultat, dass sich das Problem trotzdem nicht lösen ließ. Da wir mit der Zeit immer mehr verzweifelten und sich die Aufgabe als unter diesen Umständen unlösbar erwies, sahen wir keinen anderen Ausweg, als die Wettbewerbsleitung zu kontaktieren und das Projekt erst einmal auf Eis zu legen.

Einhalb Wochen vor dem Abgabeschluss wollten wir ein letztes Mal in der Schule experimentieren und die letzten Fotos für das Protokoll machen, welches hauptsächlich aus dem Analysieren von Fehlern bestand. An diesem Tag, nachdem das Projekt nun für drei Wochen unangerührt in dem Labor stand, funktionierte auf einmal alles. Die Brennstoffzellen lieferten genug Strom, sodass die Aktoren betrieben werden konnten.

Voller neuer Motivation, dass wir das Projekt nun doch noch beenden konnten und wollten, fragte unser betreuender Lehrer bei der Schulleitung nach einer Unterrichtsbefreiung. Statt des Distanzlernens experimentierten wir intensiv zwei Tage je acht Stunden und stellten den praktischen Teil schlussendlich fertig. Doch dann war es schon Mittwoch und wir hatten nur noch zwei Tage Zeit für die Dokumentation und die Aufgaben.

Unser altes Protokoll zur Fehleranalyse wurde über Bord geworfen und ein neues begonnen. Nach dem Online-Unterricht ging es direkt weiter und dies bis spät in die Nacht. Und so können wir Ihnen nun nach 14 Stunden Arbeit stolz unser neues Protokoll überreichen.

Das Team vom Gymnasium-Essen-Werden mit Florian Noje, Lukas Krinke und Friedrich Böttger

Inhaltsverzeichnis

Aufgabe 1 - Konditionierung der Brennstoffzellen.....	4
Aufgabe 2 - Leistungsdaten der Brennstoffzelle/des Elektrolyseurs.....	5
Aufgabe 3 – Brennstoffzellen seriell und parallel.....	8
Aufgabe 4 – Lichtkeimungsstation.....	11
Aufgabe 5/6/7 – Steuerung.....	13
Einschub: Kennlinien der Solarmodule.....	25
Einschub: Wirkungsgrade aller Anlagenteile.....	28
Aufgabe 8 – Ermittlung von Wasserstoffbedarf für Leistungsanforderungen.....	32
Aufgabe 10 – Berechnung Tag/Nacht-Speicher.....	33
Aufgabe 9 – Berechnung Solarfläche pro Gewächshausfläche.....	34
Aufgabe 11 – Steuerung Live-Wettbewerb.....	36
Aufgabe 12 – Wasserstoffbedarf Live-Wettbewerb.....	37
Verbesserungsvorschläge.....	38
Abbildungsverzeichnis.....	39
Gleichungsverzeichnis.....	40

Aufgabe 1

Um die Brennstoffzellen fachgerecht in Betrieb zu nehmen, wurde zunächst die Anleitung sorgfältig studiert. Für die Sicherstellung eines festen Standes wurden die Zellen auf die beiliegende Platte gesteckt, welche mit Hilfe von diversen Fischertechnik-Steckern auf der Basisplatte befestigt wurden. Anschließend wurden sie mit destilliertem Wasser bis zur Fülllinie befüllt. Die Membran musste daraufhin durchfeuchten, was durch leichtes Klopfen beschleunigt wurde, bis aus den Entlüftungsventilen Wasser tropfte. Danach war die Brennstoffzelle einsatzbereit (Abb. 1).

Um die maximale Leistung zu erreichen, musste sie allerdings noch konditioniert werden. Dafür wurden sie im Labor an Ventilatoren aus unserer Chemiesammlung angeschlossen, so wurde sichergestellt, dass alle Brennstoffzellen möglichst gleich viel Energie erzeugen. Dieser Vorgang wurde insgesamt dreimal wiederholt (Abb. 3).

Da das Aufladen über die Solarzellen sehr viel Zeit in Anspruch genommen hätte (wird später noch genauer erläutert), wurden die Brennstoffzellen im Elektrolysemodus mit Hilfe einer externen Spannungsquelle betrieben. So war es möglich, alle drei Einheiten in wenigen Minuten vollständig mit Wasserstoff zu füllen (Abb. 2).



Abbildung 1: Befestigung Brennstoffzellen

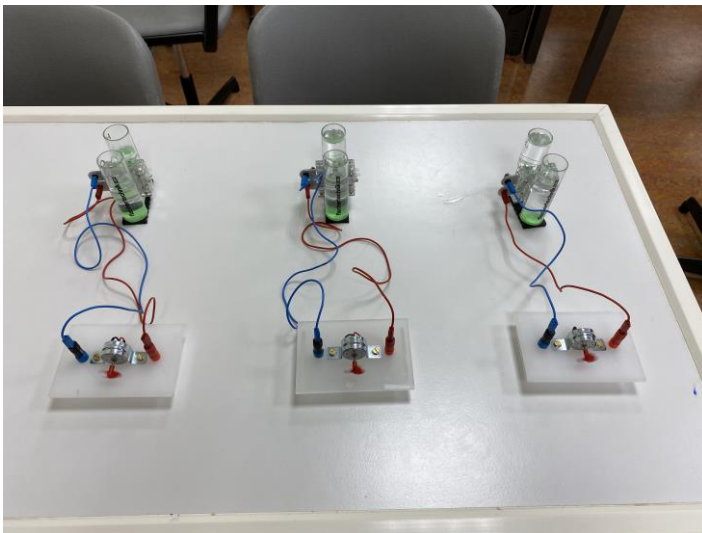


Abbildung 3: Konditionierung Brennstoffzellen



Abbildung 2: Externe Spannungsquelle

Aufgabe 2

Da es sich bei dem Fischertechnik Fuelcell-Kit um eine Kombination aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle handelt, müssen diese beiden getrennt voneinander untersucht werden. Im Folgenden wurde deshalb zunächst der Elektrolysemodus analysiert, anschließend wurde die Brennstoffzelle als Stromerzeuger betrachtet.

Um die Leistung anschaulich darzustellen und den Maximum Power Point (MPP), zu finden, wurden die Strom-Spannungs-Kennlinien und die Leistungskurve aufgenommen. Zur Verfügung standen Widerstände folgender Größen: 10, 470, 33.000 und 1.000.000 [Ω]

Um aussagekräftige Kennlinien zu erhalten, benötigt man diverse Widerstandswerte, die Verbraucher simulieren sollen (Aufbau siehe Abb. 1). Da das Projekt aber nur ein kleines Modell darstellt und die Aktoren dementsprechend geringe Leistungen und niedrigere Innenwiderstände haben, als große Motoren in realitätsgroßen Gewächshäusern, benötigt man vor allem kleinere Widerstände; 33.000 und 1.000.000 Ω wurden zwar gemessen, sind aber irrelevant, da sie zu viel Strom abfangen. Aus diesem Grund wurden die Widerstände auf den Experimentierplatinen verschaltet, wobei folgende Gesetzmäßigkeiten gelten:

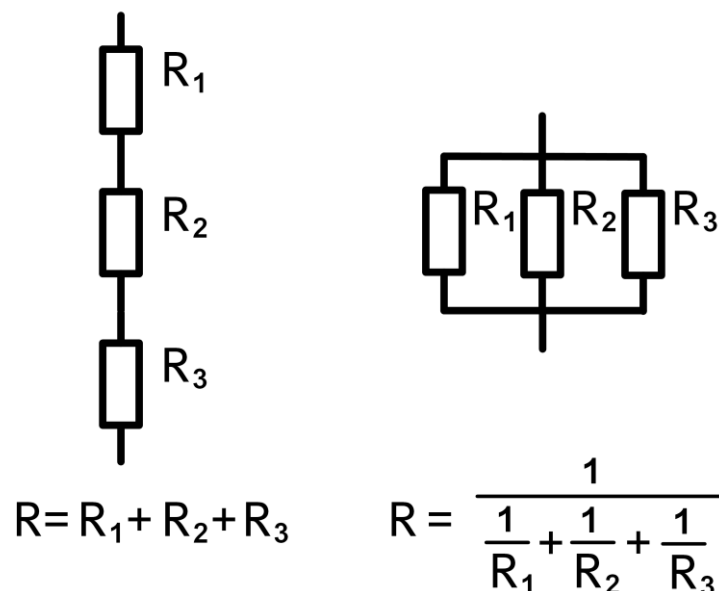


Abbildung 4: Verschaltung von Widerständen

So war es uns möglich, folgende Widerstandswerte zu erreichen und sehr detaillierte Kennlinien zu erhalten: 2; 2,5; 3,33; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 117; 156; 235; 470; 940; 1410; 8.250; 16.500; 33.000 und 1.000.000 [Ω]. Zusätzlich wurden, soweit möglich, Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung gemessen. Mehr Widerstandswerte bedeuten im Umkehrschluss aber auch, dass in der Kurve Messfehler mehr ins Auge stechen.

Die aufgenommenen Strom- und Spannungswerte wurden in Excel gegeneinander aufgetragen. Ebenso wurde nach $P = U * I$ die Leistung berechnet und in einem weiteren Diagramm gegen die Stromstärke aufgetragen. Der Maximum Power Point wird in beiden mit rot-gestrichelten Parallelen zu den Koordinatenachsen eingezeichnet. Er entspricht dem Hochpunkt der Leistungskurve und dem Punkt mit größtmöglichem Rechteck zum Ursprung in der Strom-Spannungs-Kennlinie. (Gilt für die Brennstoffzellen und Solarmodule; siehe S.7, Punkt 2: Brennstoffzelle)

1. Elektrolyseur

Um die Kennlinie des Elektrolyseurs aufzunehmen, wurde eine Brennstoffzelle an die Spannungsquelle angeschlossen. Parallel zur Brennstoffzelle wurde die Spannung gemessen, in Reihe die Stromstärke. So konnten genauere Messwerte als mit den in der Spannungsquelle integrierten Messgeräten aufgenommen werden. Zusätzlich wurde beobachtet, ab wann die Gasentwicklung sichtbar einsetzt. Bei der durchgeführten Messung wurden folgende Kennlinie und Leistungskurve erhalten:

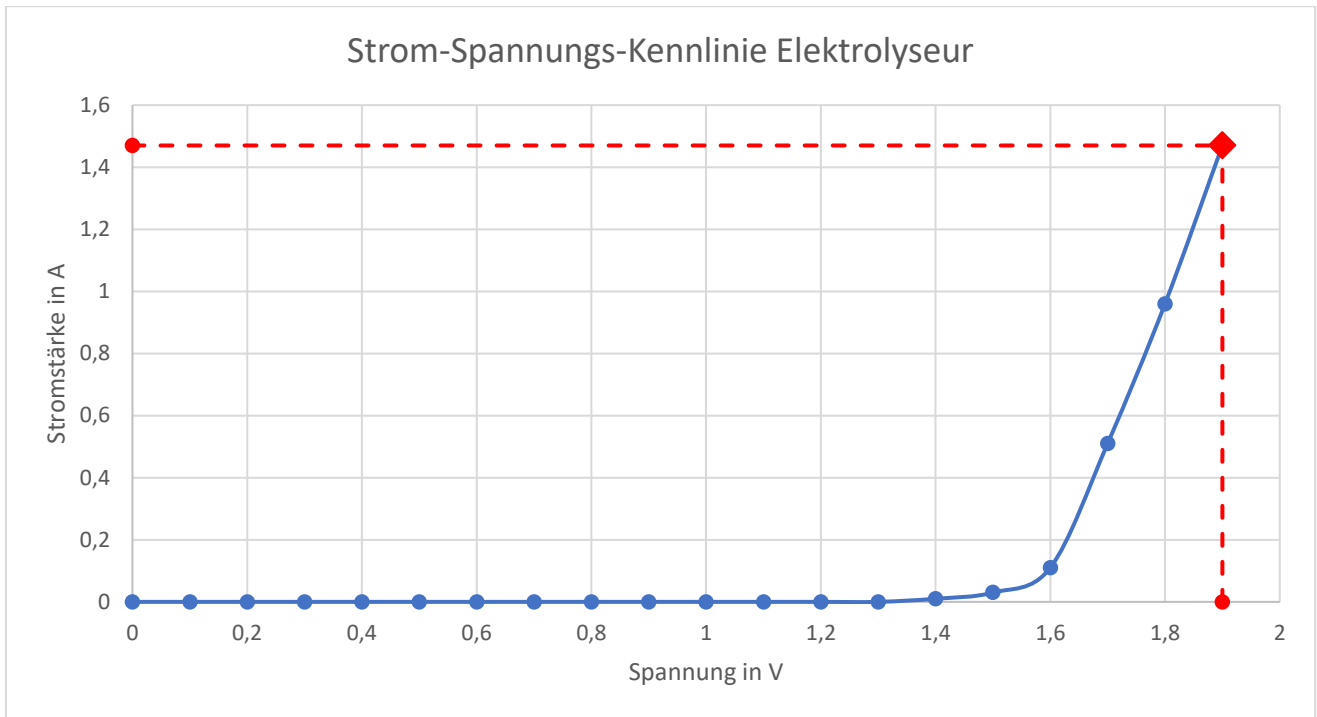


Abbildung 5: U-I-Kennlinie Elektrolyseur

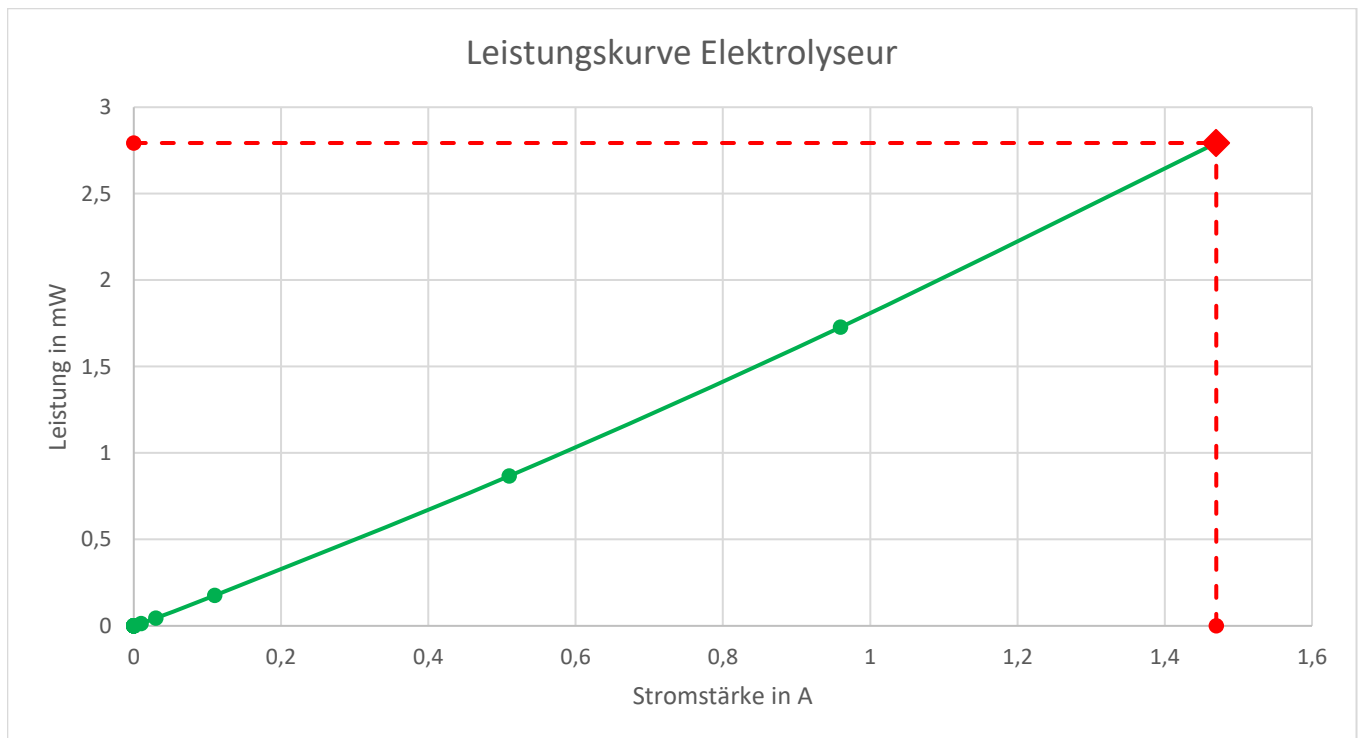


Abbildung 6: Leistungskurve Elektrolyseur

Wie zu erkennen ist, fließt der Strom erst ab etwa 1,3 oder 1,4V. Dies lässt sich mit der theoretischen Zersetzungsspannung des Wassers, nämlich 1,23V, erklären. Erst wenn diese überschritten ist, wird das Wasser in seine einzelnen Atome aufgespalten. Aufgrund von Verlusten innerhalb des Elektrolyseurs beginnt die Gasproduktion allerdings erst ab circa 1,7V. Zusätzlich kann dies auch an den Überspannungen liegen, die bei einer Elektrolyse von Gasen je nach Elektrode auftreten. Dazu liegen uns aber keine genaueren Informationen vor. Ab diesem Zeitpunkt entsteht sichtbar Wasserstoff und Sauerstoff. Allerdings steigt die Leistung linear weiter an, sprich die Leistung wird mit zunehmender Spannung immer größer. Am schnellsten kann man demnach Wasserstoff erzeugen, wenn der Elektrolyseur mit 1,9V und 1,47A betrieben wird. Diese Werte werden unterliegen aber gewissen Schwankungen, sodass die Brennstoffzellen auch mit einer etwas höheren Spannung, dafür aber niedrigeren Stromstärke betrieben wurden. Im Durchschnitt waren sie nach etwa zwei Minuten mit 20cm³ Wasserstoff gefüllt.

2. Brennstoffzelle

Die ersten Versuche zur Aufnahme einer Kennlinie scheiterten, da die Brennstoffzellen eine zu hohe Leerlaufspannung hatten (1,4V). In der Praxis liegt sie bei 0,9-1,0V. Auch die einzelnen Werte für verschiedene Widerstände ergaben keinen Sinn, weshalb das Vorgehen überprüft werden musste. Schlussendlich wurde entdeckt, dass die Brennstoffzellen, wenn man sie nach dem Aufladen an die Ventilatoren anschließt, zunächst mehr Energie liefern (die Ventilatoren drehen sich sehr schnell), nach etwa 30s aber langsamer werden. Es wird vermutet, dass zu diesem Zeitpunkt sehr viel Wasserstoff an der Membran ist, da er genau dort kurz vorher im Elektrolysemodus produziert wurde. Lässt man die Ventilatoren kurz laufen, ist die Wasserstoffzufuhr wieder geregelt. Nimmt man nach dieser kurzen Konditionierungsphase die Werte auf, erhält man plausible Kennlinien:

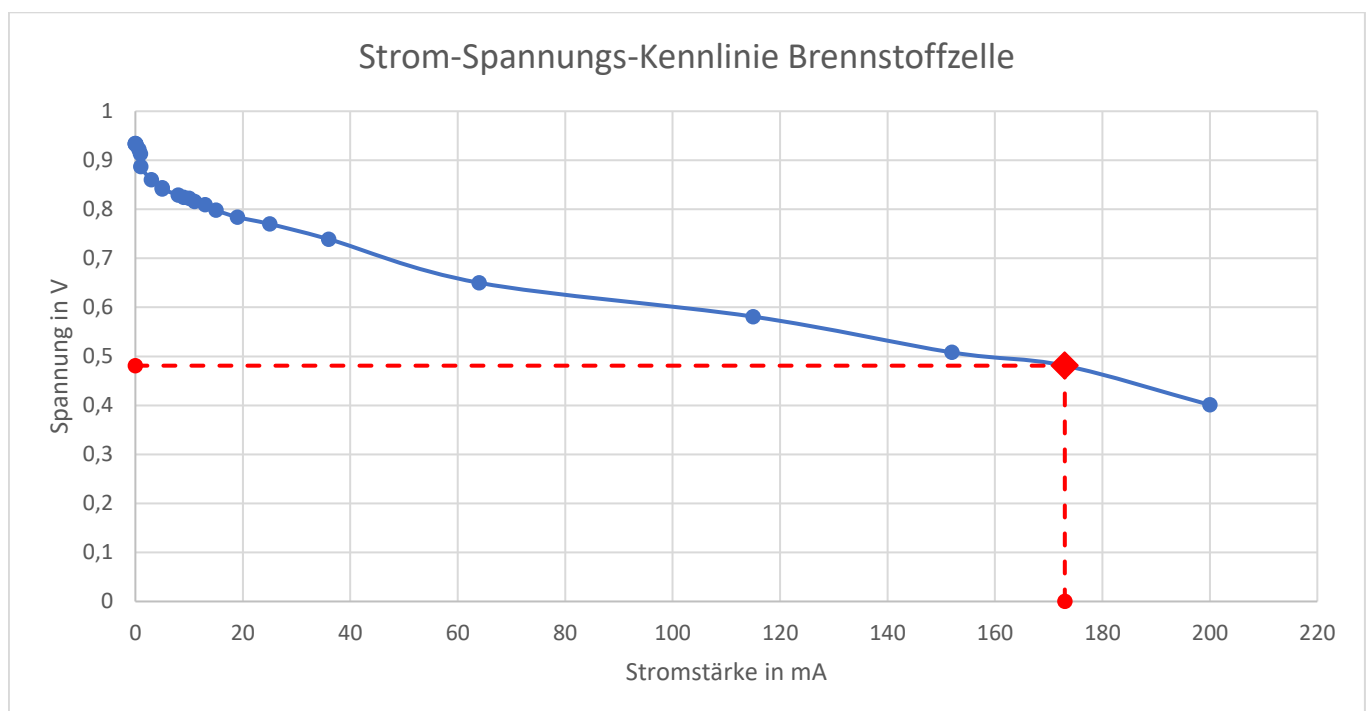


Abbildung 7: U-I-Kennlinie Brennstoffzelle

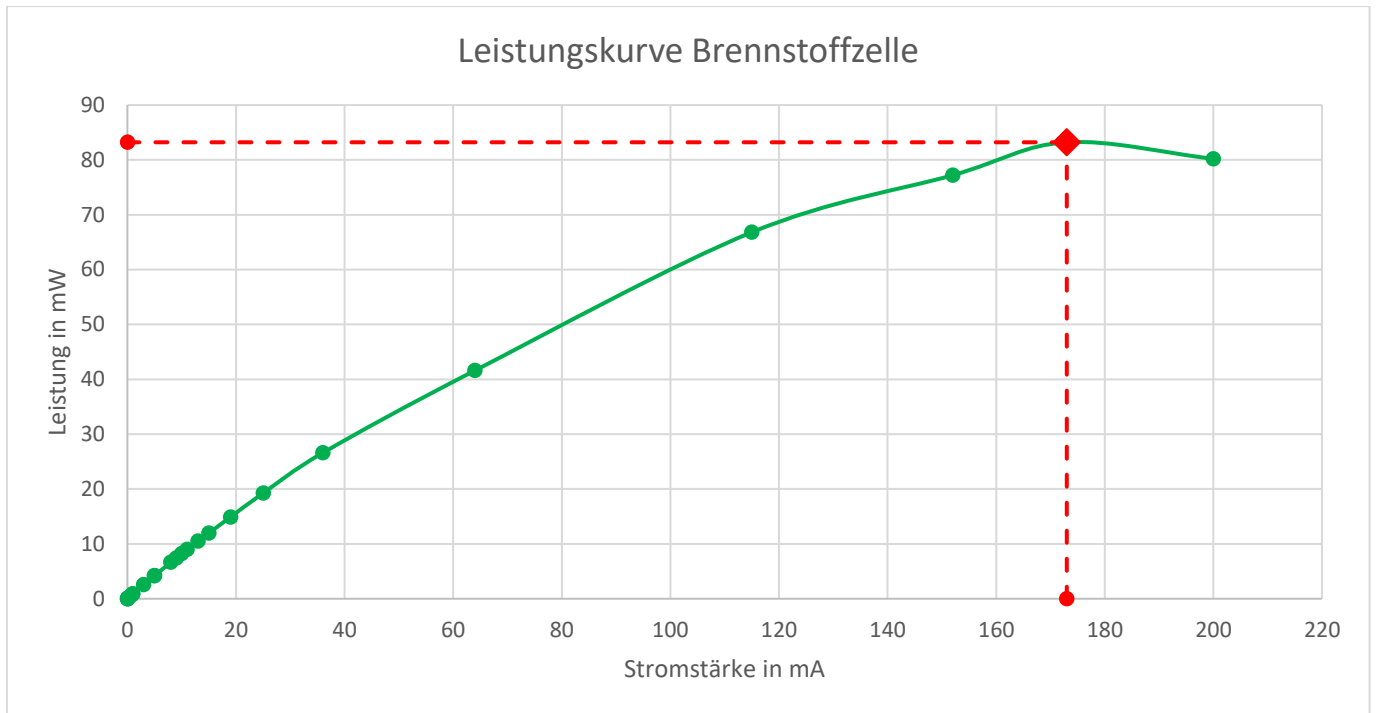


Abbildung 8: Leistungskurve Brennstoffzelle

Es ist zu erkennen, dass die Spannung mit zunehmender Stromstärke zunächst parabelförmig und dann linear abfällt. Die maximale Leistung erreicht die Brennstoffzelle bei einer Spannung von 0,481V und 173mA mit 83,213mW. Diese Werte waren zunächst eine Enttäuschung, da die Nennleistung laut Bedienungsanleitung 300mW beträgt. Um für die Aktoren eine ausreichende Leistung zu erhalten, müssen die Brennstoffzellen zu einem sogenannten „Stack“ verschaltet werden. Ob sich eine Reihen- oder Parallelschaltung besser eignet, wird nun in Aufgabe 3 skizziert.

Aufgabe 3

Um die Unterschiede der Verschaltungen zu analysieren wurden zunächst die Kennlinien aufgenommen. Begonnen wurde mit der Parallelschaltung:

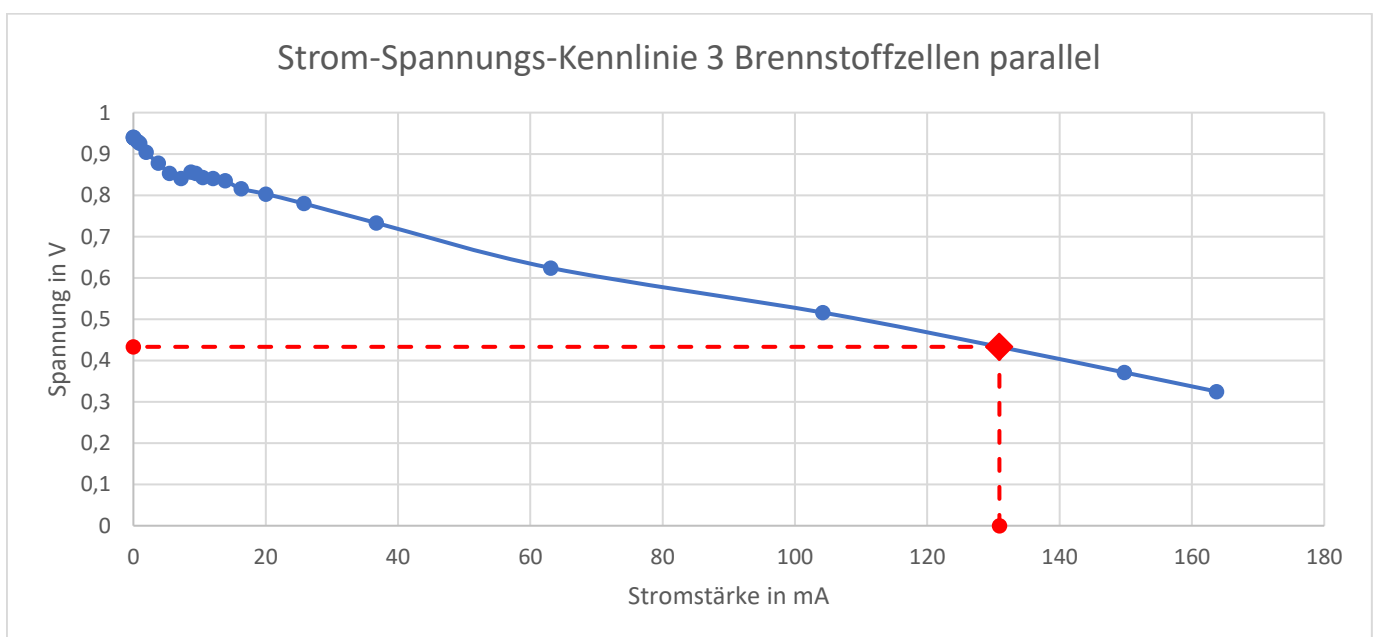


Abbildung 9: U-I-Kennlinie 3 Brennstoffzellen parallel

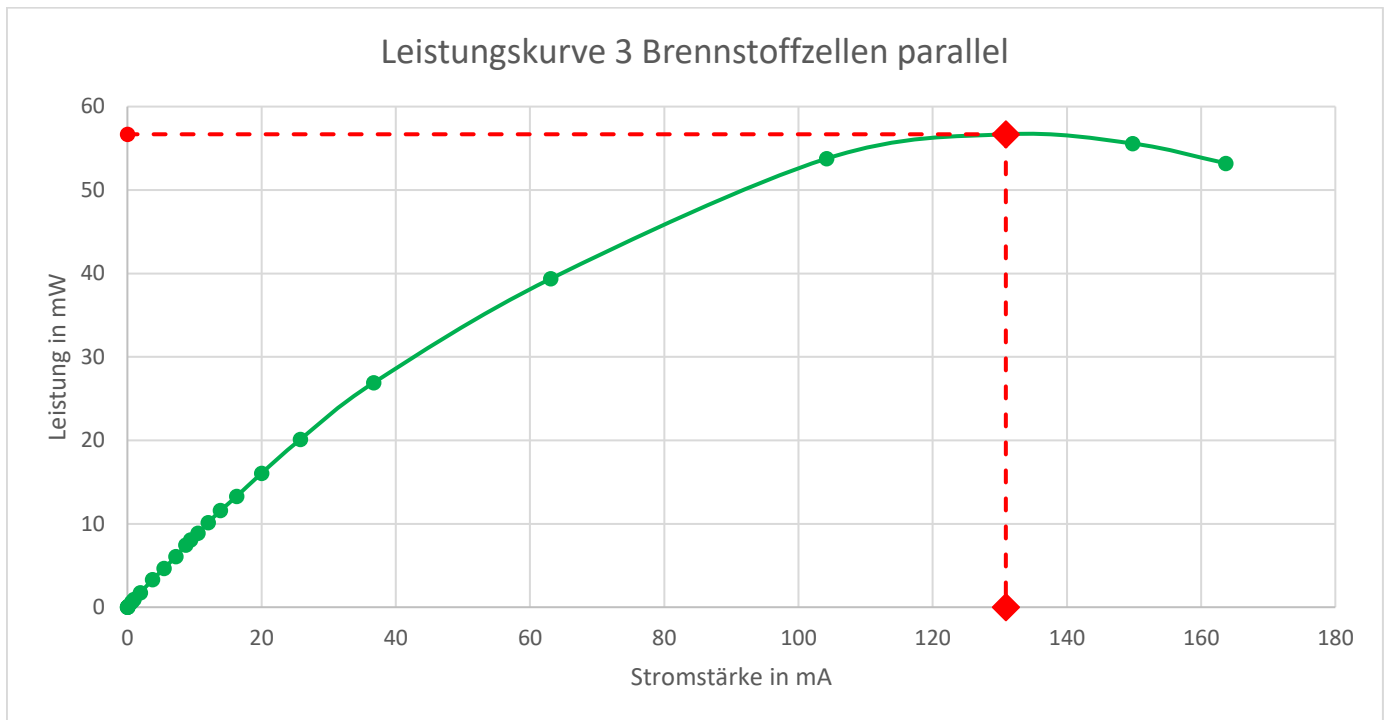


Abbildung 10: Leistungskurve 3 Brennstoffzellen parallel

Der Verlauf der Kurve mag zunächst richtig erscheinen, beim genaueren Betrachten fällt jedoch auf, dass die Leistung mit maximal 56,67mW deutlich geringer ist als die Leistung einer Einzelzelle. Dies liegt an der Kombination aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle: Da die Zellen parallel verschaltet sind, fließt der Strom nicht nur durch den Verbraucher, hier der Widerstand, sondern auch zu den anderen Brennstoffzellen. Die Zellen laden sich folglich gegenseitig wieder auf. Dies ist auch an der Bildung von Blasen in den Gastanks zu erkennen. Wären Elektrolyseur und Brennstoffzelle getrennt, so ergäbe eine Parallelschaltung eventuell Sinn.

Eigentlich sollte auch noch eine gemischte Schaltung mit zwei Zellen parallel, die dann in Reihe zu der letzten geschaltet sind, getestet werden. Aufgrund des eben erwähnten „Wiederaufladungs-Effekts“ wurde darauf verzichtet.

Die einzig sinnvolle Möglichkeit bleibt demnach die Verschaltung der Brennstoffzellen in Reihe. Bei den Messungen wurden folgende Kennlinien ermittelt:

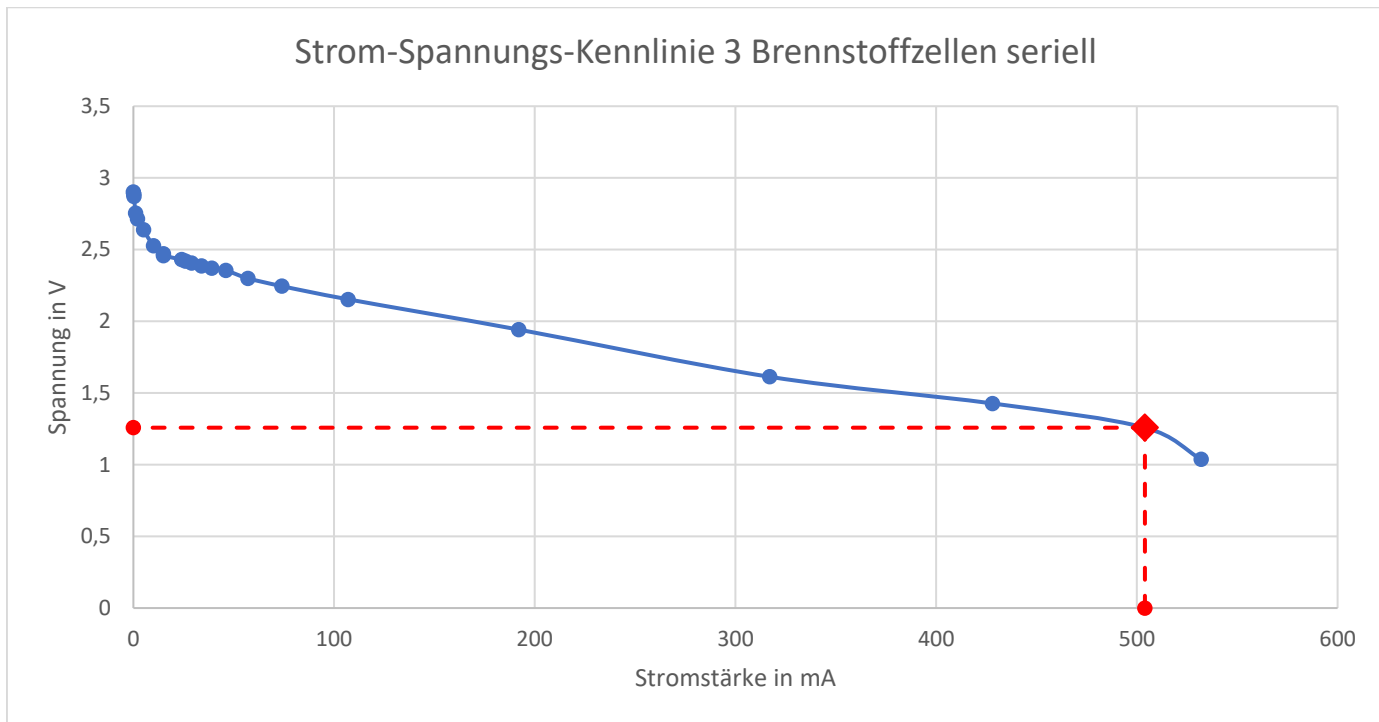


Abbildung 11: U-I-Kennlinie 3 Brennstoffzellen seriell

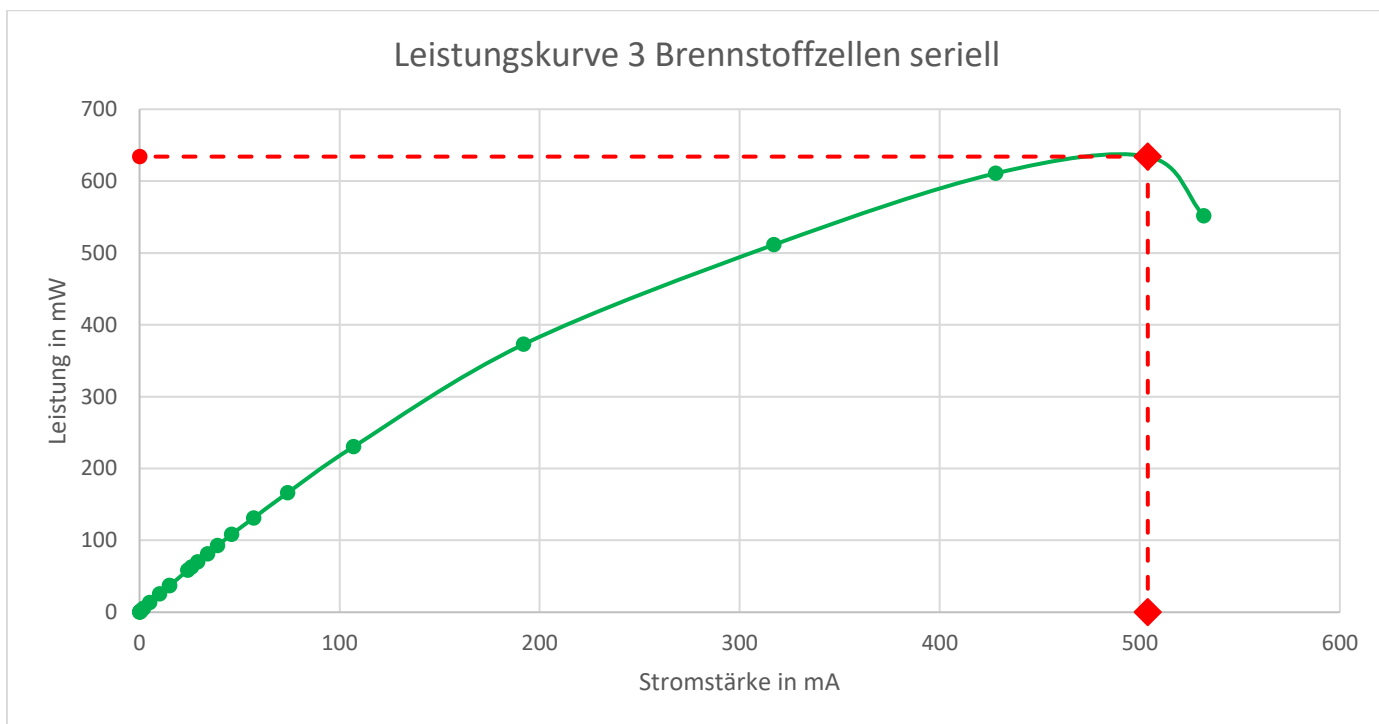


Abbildung 12: Leistungskurve 3 Brennstoffzellen seriell

Wie auf den ersten Blick zu erkennen ist, erreichen die Zellen in Reihe geschaltet eine deutlich höhere Leistung. Der MPP liegt hier bei einer Spannung von 1,258V und 504mA. Die maximal erreichte Leistung beträgt somit 634mW. Diese reicht nun auch aus, um die Aktoren zu betreiben. Um den Unterschied noch einmal zu verdeutlichen und sich nicht von der Skalierung der Diagramme täuschen zu lassen, haben wir im

folgenden Diagramm beide Kennlinien zum Vergleich eingefügt. Dieses begründet unsere Entscheidung für die Reihenschaltung in unserem Modell eindeutig:

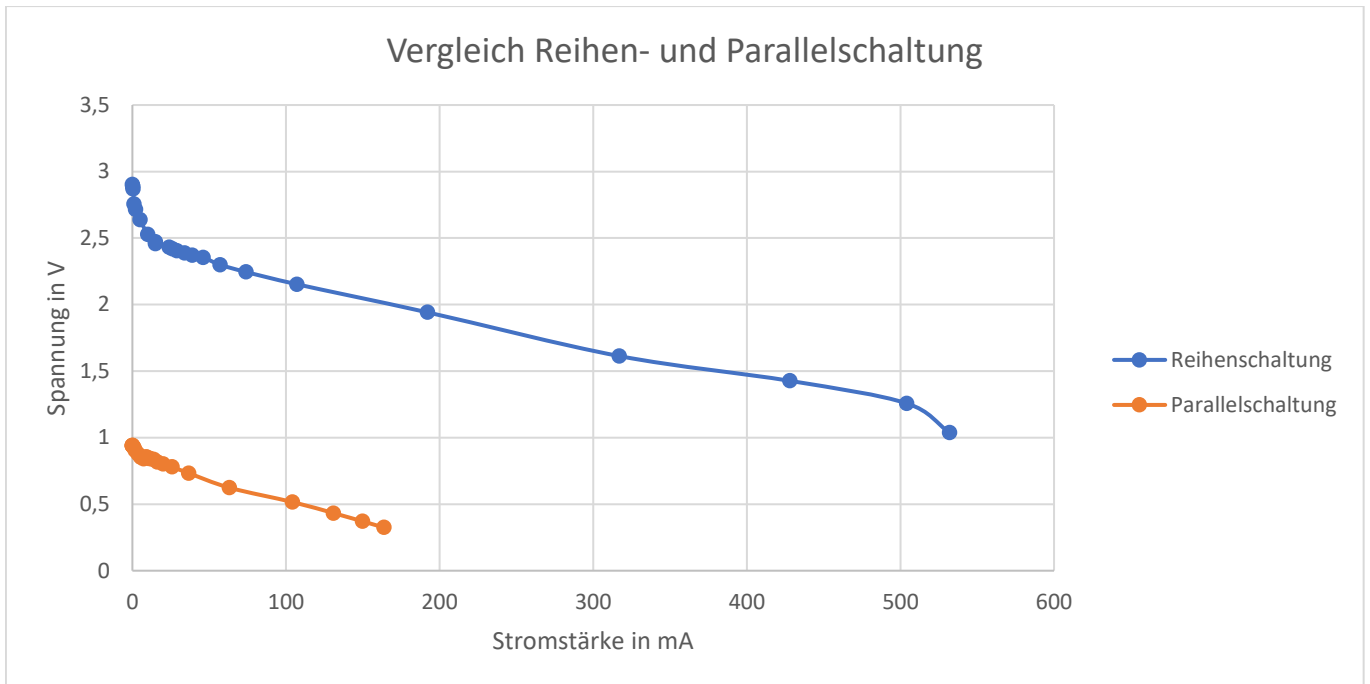


Abbildung 13: Vergleich Reihen- und Parallelschaltung der Brennstoffzellen

Aufgabe 4

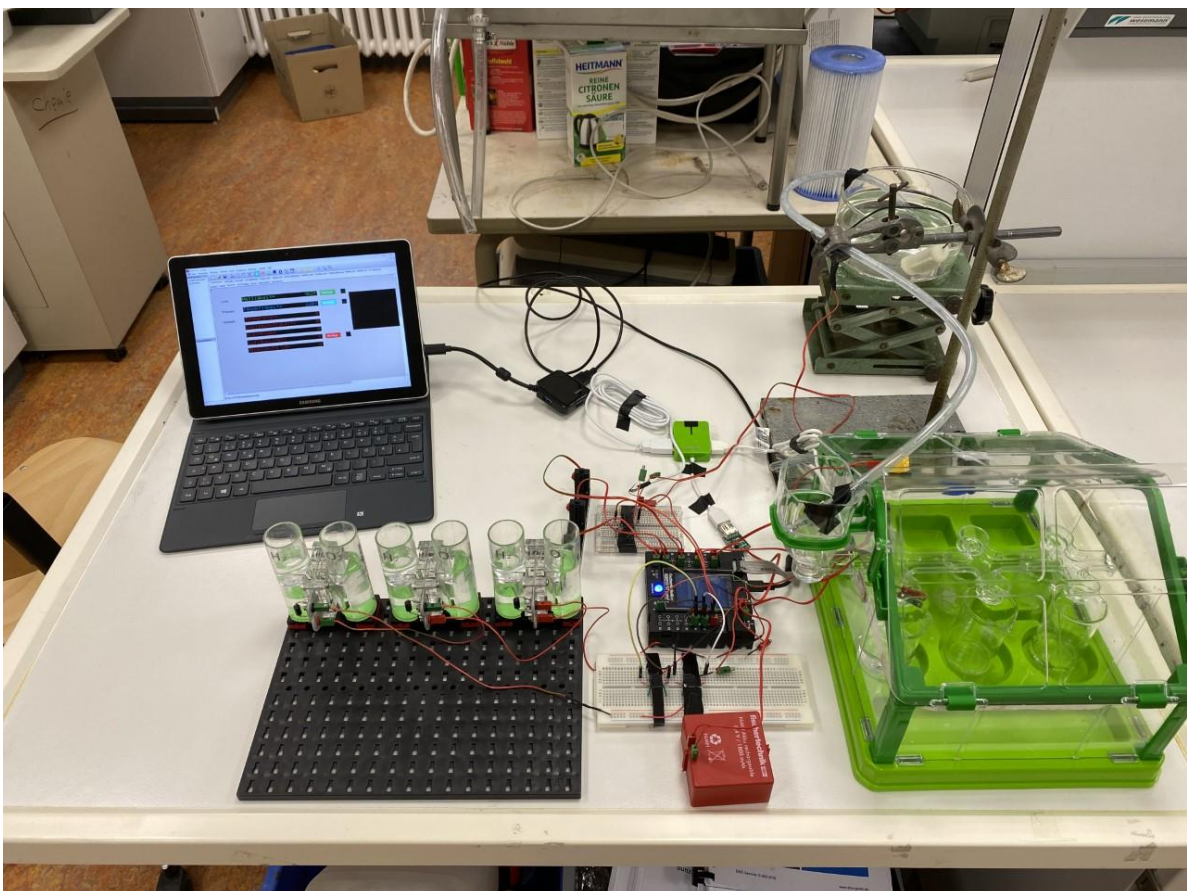


Abbildung 14: Aufbau der Lichtkeimungsstation

Auf dem Bild auf der vorherigen Seite ist nun der gesamte Aufbau zu sehen, welcher im Folgenden erläutert wird:

- Das Herzstück der Anlage ist der TXT-Controller, an dem alle Kabel angeschlossen sind und welcher sich um die Steuerung der Sensoren und Aktoren kümmert. Betrieben wird er mit dem Accu-Pack; überwacht mit dem Computer, auf welchem das Steuerungsprogramm mit Bedienfeld gespeichert ist (*wird bei Aufgabe 5/6/7 erläutert*).
- Vorne auf dem Wagen stehen die in Reihe geschalteten Brennstoffzellen, welche mit dem vorderen Breadboard verbunden sind. Auf diesem und dem kleinen, welches sich hinter dem Controller befindet, werden einzelne Stromkreise geschlossen und somit die Aktoren angesteuert (*wird bei Aufgabe 7 erläutert*).
- Zu dem Gewächshaus führt ein Schlauch, durch welchen das Wasser aus dem Reservoir befördert wird. Da die Pumpe zu schwach ist, das Wasser von Tischhöhe auf die Höhe des Tanks des Gewächshauses zu befördern, wurde sie auf ein Podest gestellt. Das integrierte „Tröpfchenbewässerungssystem“ erfüllt seinen Zweck nicht, da das Wasser zum einen ab einem gewissen Wasserstand im Tank regelrecht auf die Pflanzen strömt und zum anderen die hinteren und mittleren Pflanzen deutlich weniger Wasser bekommen als die vorderen.
- Um beim Einschalten des Ventilators einen optimalen Luftaustausch zu gewährleisten, wurde der Ventilator nicht an die Wand, sondern das Dach montiert. Zum Lüften muss nur die andere Dachhälfte geöffnet werden.
- Auf der Innenseite der Wände wurde der LED-Streifen angebracht. Dieser erzeugt genug Helligkeit, um den Lichtkeimern optimale Wachstumsbedingungen zu bieten. In einem fortgeschrittenen Modell wäre allerdings eine Lichtquelle, die die Pflanzen senkrecht von oben bescheint besser, dies war mit den LED-Streifen aber nicht möglich, da das Dach sonst nicht mehr hätte geöffnet werden können.
- Selbstverständlich mussten auch die Sensoren angebracht werden:
 - Der Helligkeitssensor wurde auf dem Dach befestigt; am Rand, sodass er keinen Schatten auf die Pflanzen wirft, aber immer noch gut im Sonnenlicht liegt.
 - Der NTC-Widerstand wurde in die Erde eines Topfes gesteckt, um die Feuchtigkeit zu messen und die Bewässerung so zu steuern.
 - Der Umweltsensor wurde an die Wand geklebt, wo er alle Luftdaten gut messen kann. Läge ein längeres Breitbandkabel bei, könnte er auf Höhe der Pflanzen angebracht werden, um die Bedingungen auf dieser Luftschicht zu überprüfen. Da das beiliegende Kabel allerdings zu kurz und unflexibel war, musste er recht weit oben unter dem Dach in Nähe der Öffnung für die Bewässerung angebracht werden.

(Benutzung der einzelnen Sensoren wird unter Aufgabe 5/6/7 genauer erläutert)

Aufgabe 5/6/7

Bevor im Folgenden das Steuerungsprogramm und das Steuerungskonzept vorgestellt werden, werden zunächst die einzelnen Sensoren erläutert. Diese sollen die Aktoren, nämlich LED-Leiste, Pumpe und Ventilator steuern.

- Der Fotowiderstand (Abb. 15) gibt einen Wert von 0 bis 15.000 [Ω] aus, der sich in Abhängigkeit von der Helligkeit der Umgebung ändert. Je heller es ist, desto kleiner ist der Wert; ist es sehr dunkel, so beträgt der Wert 15.000 [Ω]. Er wird folglich für die Steuerung der Beleuchtung genutzt, die ab einer gewissen Dunkelheit eingeschaltet werden muss.
- Der NTC-Widerstand (Abb. 16), ein sogenannter *Negative Temperature Coefficient* Widerstand, verändert ebenfalls seinen Widerstandwert, allerdings in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die Temperatur misst allerdings auch schon der Umweltsensor. Aus diesem Grund wurde experimentiert und festgestellt, dass sich der Widerstandwert auch in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit ändert. Steckt er folglich in einem Topf in der Erde, beträgt sein Wert bei trockener Erde etwa 2200 [Ω], bei gut durchfeuchteter etwa 1700 – 1800 [Ω]. So ist es möglich, die Bewässerung recht präzise zu steuern.
- Der Umweltsensor (Abb. 17) nimmt gleich mehrere Messwerte auf: die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, den Luftdruck und die Luftqualität mitsamt Abweichungsfaktor. Die Werte der Luftfeuchtigkeit eignen sich allerdings nicht für die Steuerung der Bewässerung, genauer ist die Messung in der Erde. Konkret wird über den Wert der Luftqualität der Ventilator gesteuert; dies ist keine optimale Lösung, da keine Angaben vorhanden sind, woraus sich dieser Wert zusammensetzt, lediglich, dass er zwischen 0 (sehr gut) und 500 (sehr schlecht) liegen kann. Zudem darf der CO₂-Gehalt in dem Gewächshaus hoch sein, um das Pflanzenwachstum zu beschleunigen, sprich eigentlich muss nur ventiliert werden, wenn eine Person das Gewächshaus betreten soll und somit der CO₂-Gehalt gesenkt werden muss.
- Die Kamera sollte eigentlich genutzt werden, um in einem festgelegten Abstand den Wachstumsprozess der Pflanzen festzuhalten. Dies ist mit der ROBO-Pro Software allerdings nicht automatisierbar. Deshalb wird sie in dem Modell als Bewegungsmelder genutzt, der eine Person wahrnimmt, ventiliert, damit der CO₂-Gehalt in dem Gewächshaus sinkt, und anschließend die Person eintreten lässt.



Abbildung 15: Fotowiderstand



Abbildung 16: NTC-Widerstand



Abbildung 17: Umweltsensor

Die von den Sensoren erfassten Daten sollen in einem Steuerungsprogramm auf dem TXT-Controller verarbeitet werden und bei Bedarf dann die Aktoren eingeschaltet werden. Der Strom dafür soll von den Brennstoffzellen, welche, wie bereits erwähnt, in Reihe geschaltet sind, geliefert werden, weshalb die einzelnen Stromkreise der Aktoren über Relais geschlossen/geöffnet werden müssen. Unsere Steuerung ist deshalb wie folgt aufgebaut.

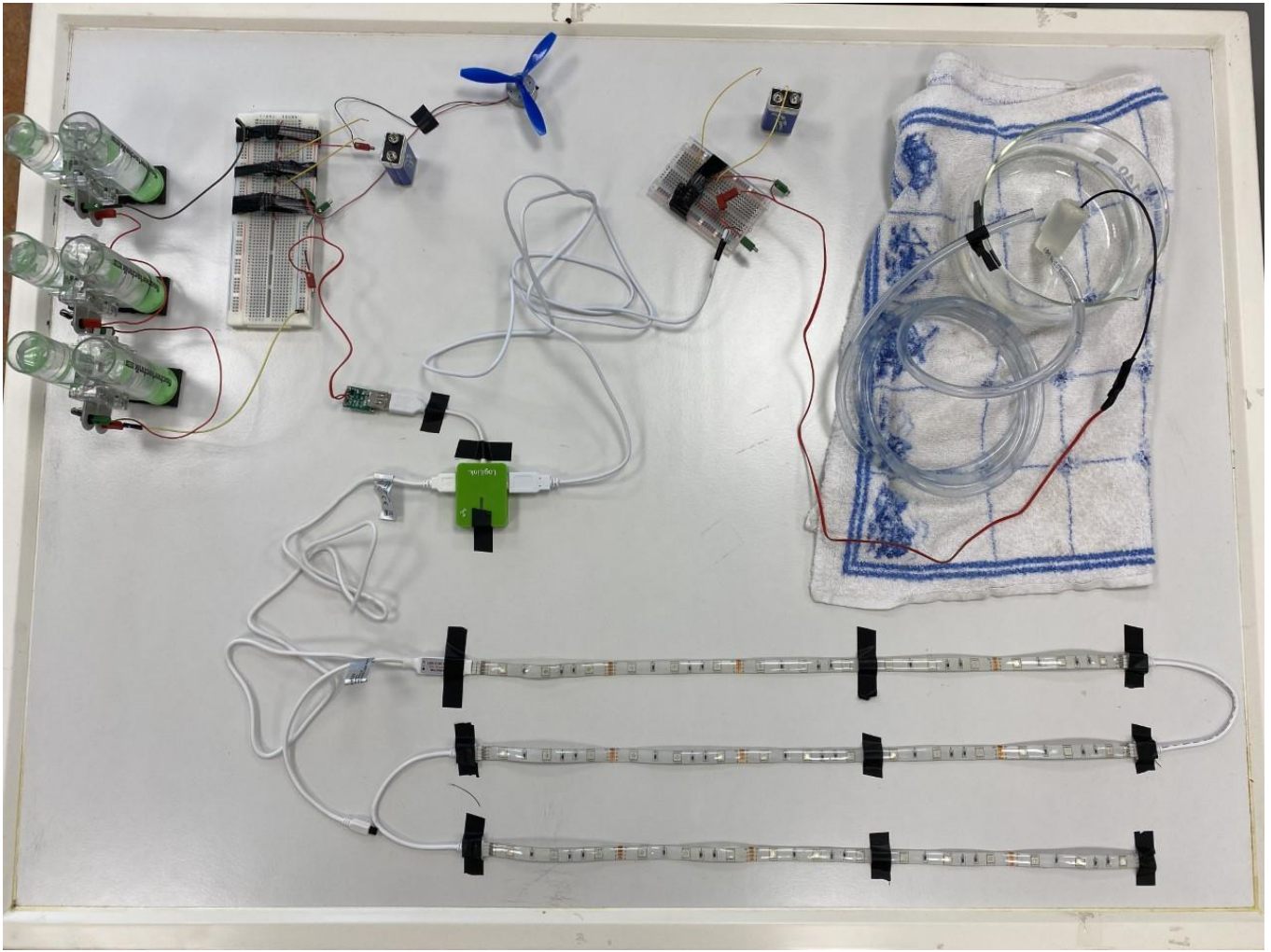


Abbildung 18: Steuerung der Aktoren

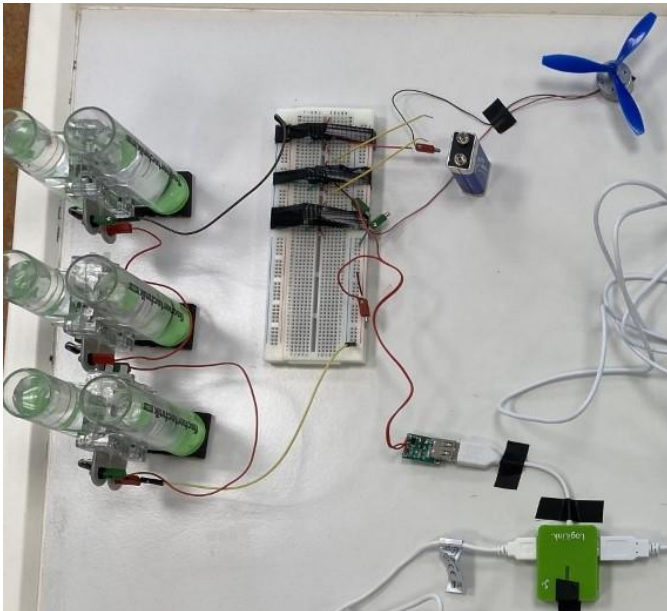


Abbildung 20: linkes Breadboard/Hauptsteuerung

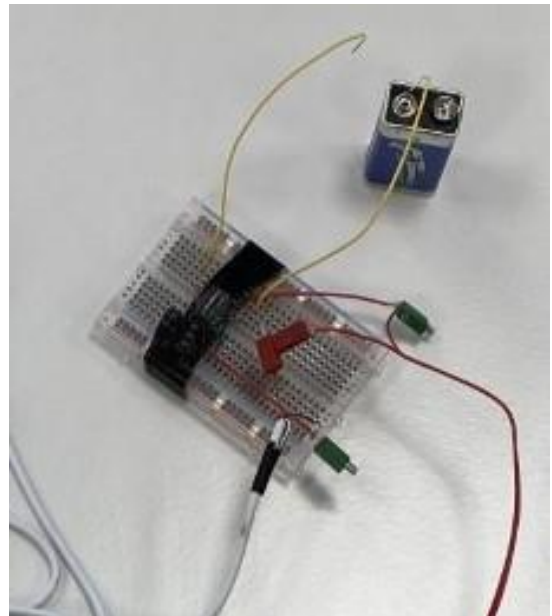


Abbildung 19: rechtes Breadboard/Pumpensteuerung

In den ersten Versuchen wurde zunächst ohne die Sensoren und das Steuerungsprogramm getestet, die Relais wurden mit Batterien geschaltet (Abb. 18). Alle Aktoren sollten eigentlich einzeln angesteuert werden können, dies war allerdings nicht möglich, ohne das Kabel der LED-Leiste zu öffnen, weshalb wir darauf verzichtet haben. Im Wesentlichen besteht unsere Steuerung demnach aus drei Stromkreisen, welche nun erläutert werden.

1. Der Strom der Brennstoffzellen wird in den negativen Bus-Strip geleitet. Dort können mit Hilfe von zwei Relais die unter Punkt 2 folgenden zwei Stromkreise geschlossen werden (das dritte Relais wird nicht gebraucht) (Abb. 20).
2. Wird das aus dieser Sicht oberste Relais nun geschlossen, so fließt der Strom zu dem Ventilator und dann zurück in den positiven Bus-Strip des Boards. Von diesem aus wird der Stromkreis geschlossen, indem er zurück zum Brennstoffzellen-Stack fließt (Abb. 20).
3. Wird hingegen an das mittlere Relais eine Spannung angelegt, so wird der Stromkreis zu dem Spannungsbooster nach demselben Prinzip geschlossen. An diesem hängt der USB-Hub, welcher mit der LED-Leiste und der Pumpe verbunden ist. Hier trifft man nun auf das bereits oben erwähnte Problem: bei der Pumpe lässt sich an dem offenen Kabel noch ein Relais zwischenschalten, bei dem Kabel der LED-Leiste nicht. Deshalb bleiben nur zwei Möglichkeiten:
 - a. Das Kabel der LED-Leiste zu öffnen und ebenfalls ein Relais zwischenschalten. Dabei besteht allerdings das Risiko, das Kabel und somit die Leitung zu beschädigen, weshalb Variante b) gewählt wurde.
 - b. Bei der LED-Leiste kein Relais zwischenschalten, sondern diese über das Relais unter Punkt 3 zu steuern. Möchte man nun die Pumpe einschalten, so wird das Relais dort geschaltet und die Pumpe läuft. Die Leistung reicht dann nicht mehr aus, die LED-Leiste gleichzeitig zu betreiben, weshalb jene in der Zeit nur schwach leuchtet. Sobald der Pumpvorgang beendet ist, leuchtet die LED wieder in voller Stärke. Diese Schaltung setzt lediglich voraus, dass für einen Pumpvorgang beide Relais angesteuert werden müssen (Abb. 19/20).

**Die Relais mussten mit Klebeband auf den Experimentierplatinen befestigt werden, da die Steckverbindungen nicht auf die beiliegenden Boards passten. Normalerweise werden Relais waagrecht, wie der unten zu sehende Schaltplan, über die Nut in der Mitte gesteckt, sodass in der Skizze übereinander liegende Pins nicht auf denselben Terminal-Strips liegen und so einen Kurzschluss verursachen. Dafür waren die Pins allerdings zu nah beieinander. Letztendlich wurden die Relais deshalb senkrecht über die Nut gesteckt, sodass die mittleren beiden für die Steuerspannung in der Nut „hingen“. Über zurecht gebogene Steckbrücken wurde der Kontakt in umliegende Strips verlegt. Diese Lösung ist selbstverständlich unsicher.*

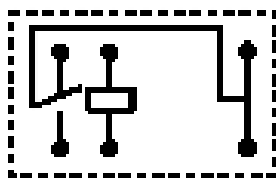


Abbildung 22: Relais Schaltplan

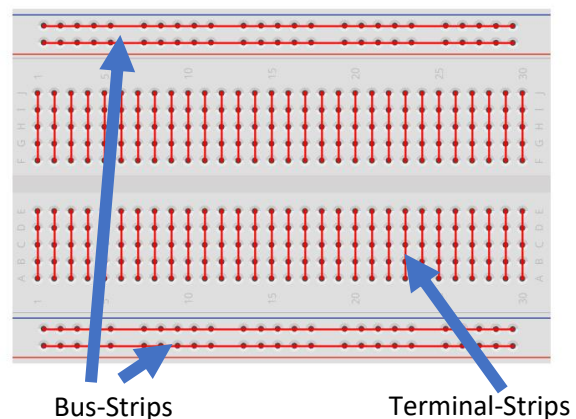


Abbildung 21: Breadboard

In einem letzten Schritt wird nun noch das auf dem Controller laufende Steuerungsprogramm beschrieben: Unsere Steuerung soll möglichst automatisch auf die jeweilige Situation reagieren, aber man soll die Automatik immer manuell unterbrechen können und die einzelnen Komponenten auch per Taster bedienen können. Dafür haben wir ein Hauptprogramm, welches die einzelnen Unterprogramme automatisch aufruft oder beim Drücken eines Tasters auf das manuelle Programm wechselt. Die Unterprogramme dienen nur der Übersicht, man hätte auch alles in ein Hauptprogramm schreiben können. Die Sensoren und Relais, welche später die Aktoren ansteuern, sind wie folgt an den TXT-Controller angeschlossen:

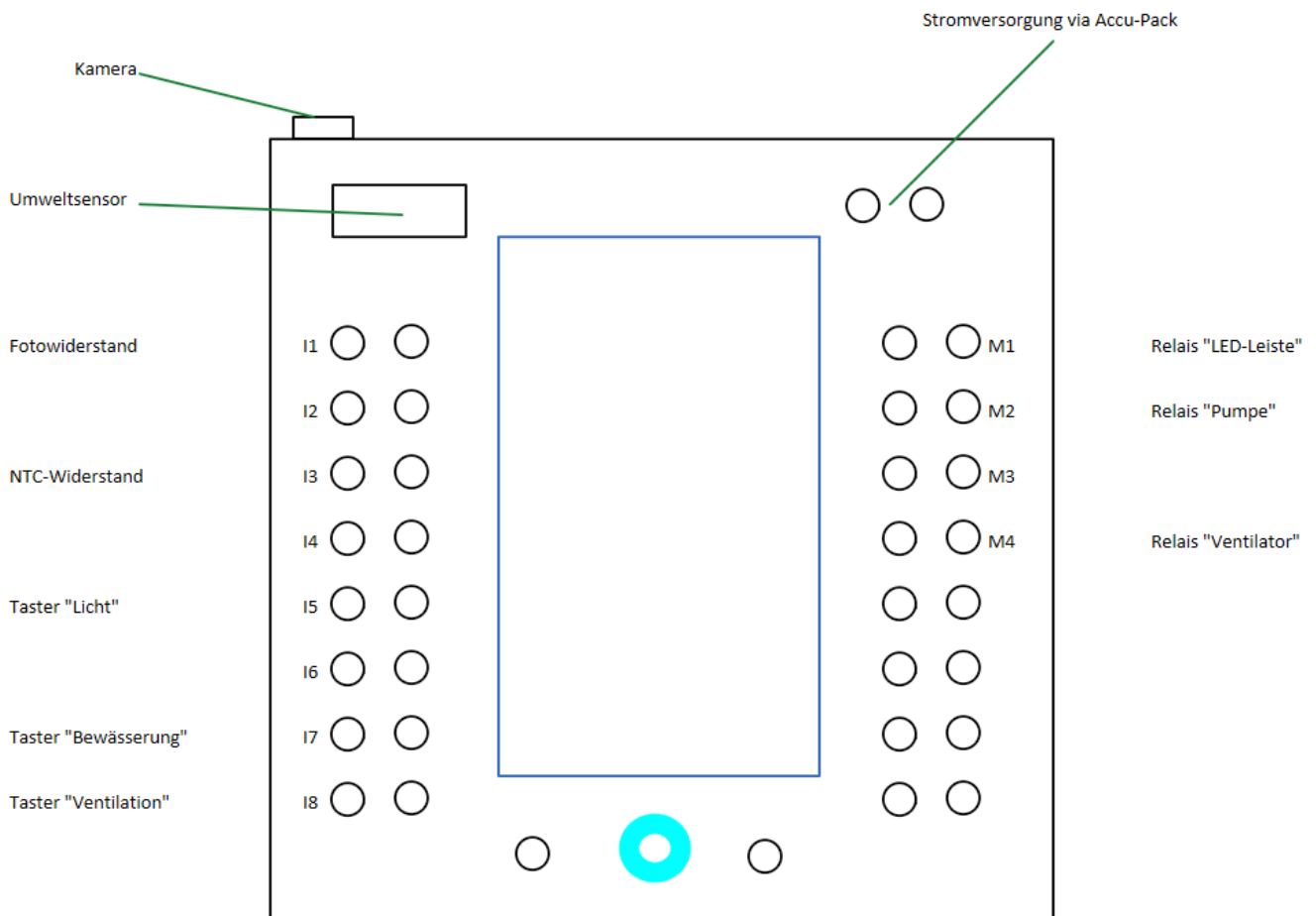


Abbildung 23: TXT-Controller Anschlüsse

Alle Sensordaten können auf dem Bedienfeld des Programmes (auf dem angeschlossenen Computer) eingesehen werden, ebenso die Aktivität der Aktoren. Da dieses als Kontrollbildschirm fungiert, kann weitergehend auch eine Steuerungsoberfläche programmiert werden. Das Einbinden von Knöpfen, welche wie die analogen Taster die Aktoren steuern, konnten wir aus zeitlichen Gründen nicht mehr ergänzen. Für die Funktionalität des Programms hat dies allerdings keinen Einfluss.

Das Programm wird nach einer kurzen Erklärung des Bedienfeldes am Beispiel der Lichtsteuerung ausführlich erläutert. Da die Bewässerungs- und Ventilationssteuerung ähnlich aufgebaut sind, werden dort nur Abweichungen beschrieben.

Das Bedienfeld

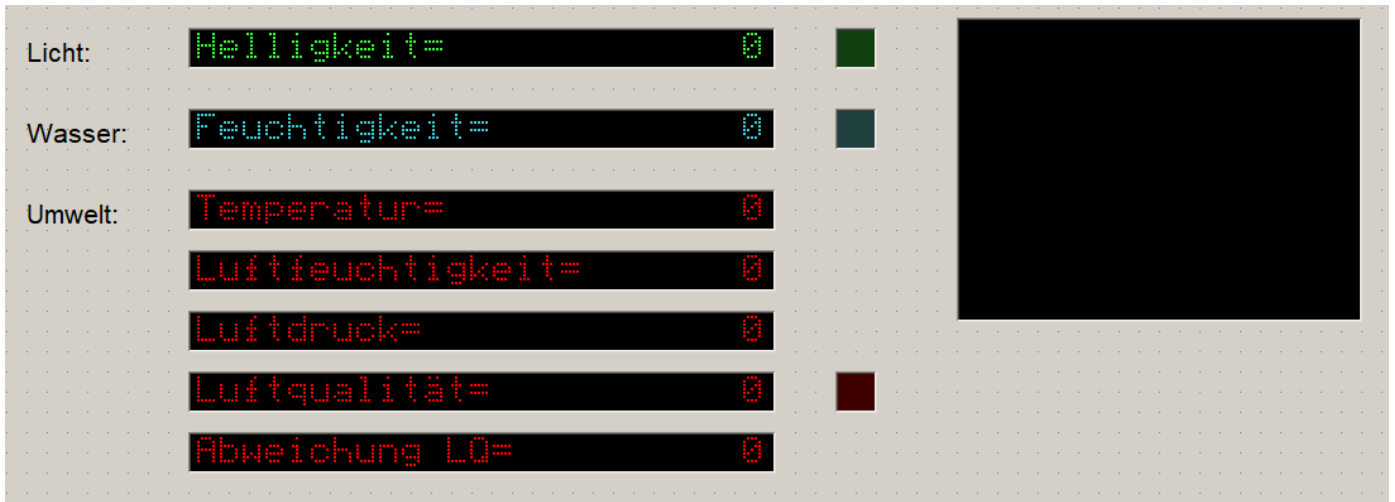


Abbildung 24: Bedienfeld

Auf dem Bedienfeld werden alle wichtigen Messwerte angezeigt. Diese sind nach den drei Sensoren sortiert und dem jeweiligen Aktor zugeordnet. Die Lampen neben den Ausgabefeldern zeigen an, ob die Aktoren aktiv sind. Die grüne oberste Lampe steht für die Beleuchtung, blau für die Bewässerung und rot für den Ventilator. Ganz rechts in dem Fenster wird das Bild der Kamera übertragen.

Von einer Anzeige der Werte auf dem Controller-Display selbst wurde abgesehen, da dieses sehr klein ist und keine klare und eindeutige Struktur zulässt.

Das Hauptprogramm

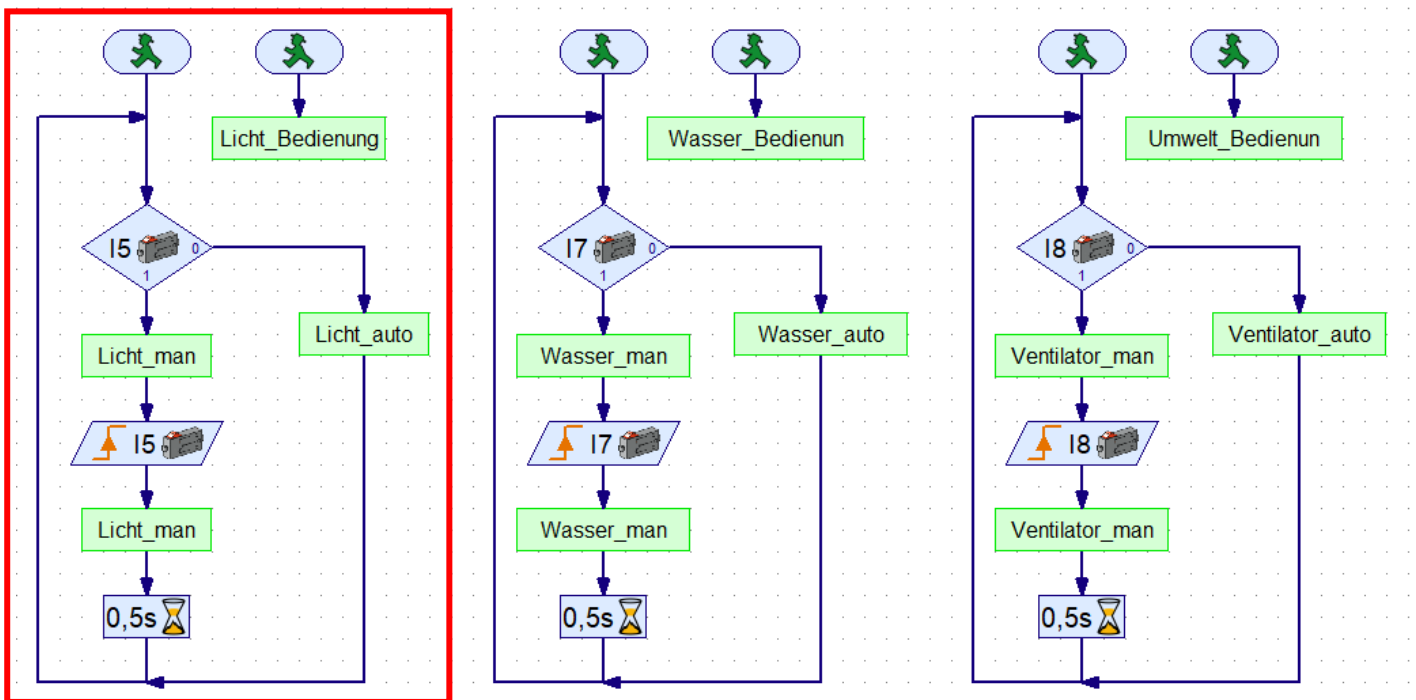


Abbildung 25: Hauptprogramm

Das Hauptprogramm ist in drei Teile aufgeteilt, die jeweils dafür sorgen, die passenden Unterprogramme anzusteuern: Es ist die **Verknüpfung** aller Prozesse. Der linke Block, in Rot umrandet, ist die Steuereinheit für das Licht, der mittlere für die Bewässerung und der rechte für die Ventilation.

Jeder Block startet zum einen das Bedienungsprogramm, welches für die Messwert-Anzeige zuständig ist und zum andere den eigentlichen Steuerungsblock, welcher beim Druck eines Tasters vom automatischen in den manuellen Modus wechselt.

Auf den linken Programmstart folgt eine Verzweigung. Diese überprüft, ob der an I5 angeschlossene Taster betätigt wird. Ist dies nicht der Fall, so läuft das Programm am Ausgang „0“ weiter; das Unterprogramm *Licht_auto* sorgt für die automatische, nach Sensoren geregelte, Steuerung. Wird der Taster allerdings gedrückt, so läuft das Programm am Ausgang „1“ weiter und startet das Unterprogramm *Licht_man* (wird später erläutert). Anschließend wird solange gewartet, bis der Taster erneut gedrückt wird, dann wird wieder das Unterprogramm *Licht_man* gestartet. Nach einer Wartezeit von 0,5 Sekunden sorgt eine Endlos-Schleife dafür, dass die Überprüfung immer wieder durchgeführt wird. Folglich wird das Programm *Licht_auto* immer wieder aufgerufen, solange der Taster nicht gedrückt wird.

I. Licht_Bedienung

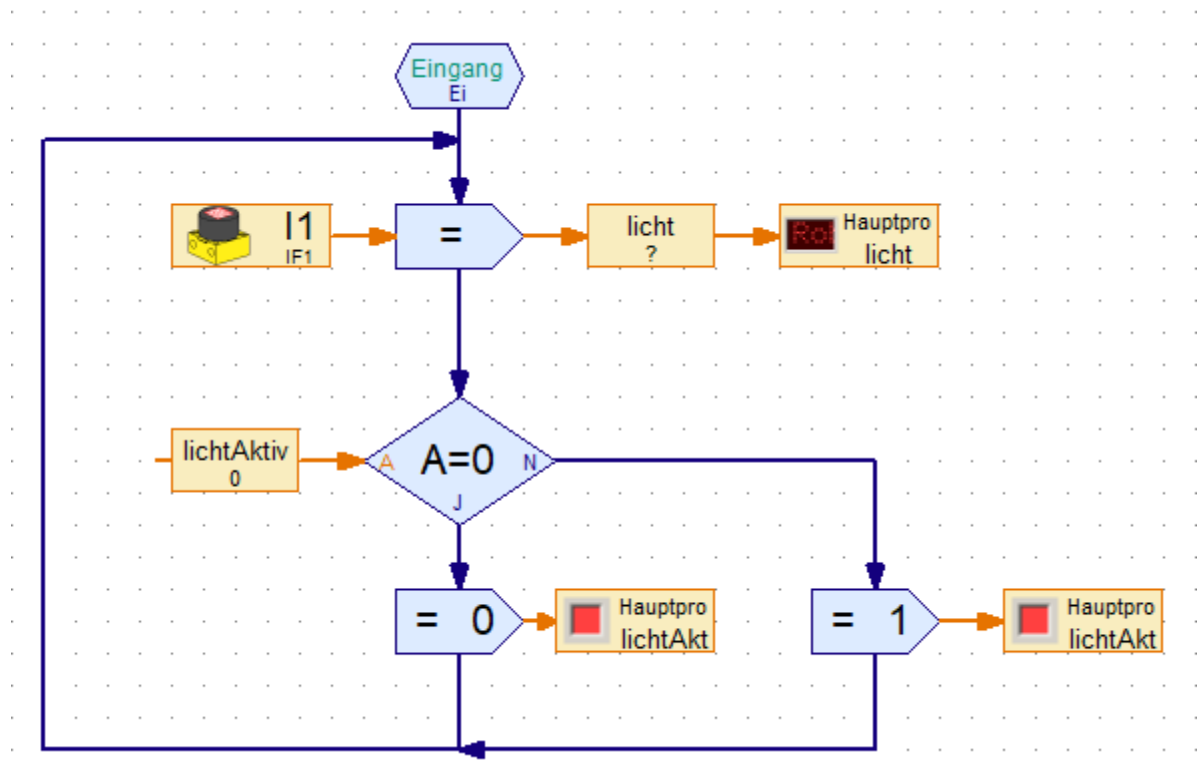


Abbildung 26: Licht_Bedienung

Wie bereits kurz angeschnitten, dient dieses Unterprogramm der Anzeige der erfassten Messwerte. Durch den Start des Hauptprogramms wird es aufgerufen. Wie an dem Pfeil links zu erkennen ist, handelt es sich dabei um eine Endlos-Schleife; der Messwert wird folglich fortlaufend aktualisiert. Mit einem „=“-Operator wird der Wert in die lokale Variable *licht* geschrieben, die anschließend auf dem Bedienfeld ausgegeben wird. Danach wird überprüft, ob die Beleuchtung aktiv ist: Dies geschieht mit Hilfe der globalen Variable *lichtAktiv*, die in den Unterprogrammen *Licht_man* und *Licht_auto* auf „1“ für aktiv oder „0“ für nicht aktiv gesetzt wird (siehe II) und III)). Ist der Wert der Variablen „0“, so wird die Lampe im Bedienfeld auf den Status „0“ für „aus“ gesetzt. Ist der Wert ungleich „0“, so läuft das Programm nach der Überprüfung auf dem „N“-Pfad weiter und setzt den Status der Lampe auf „1“ für „an“.

II. Licht_auto

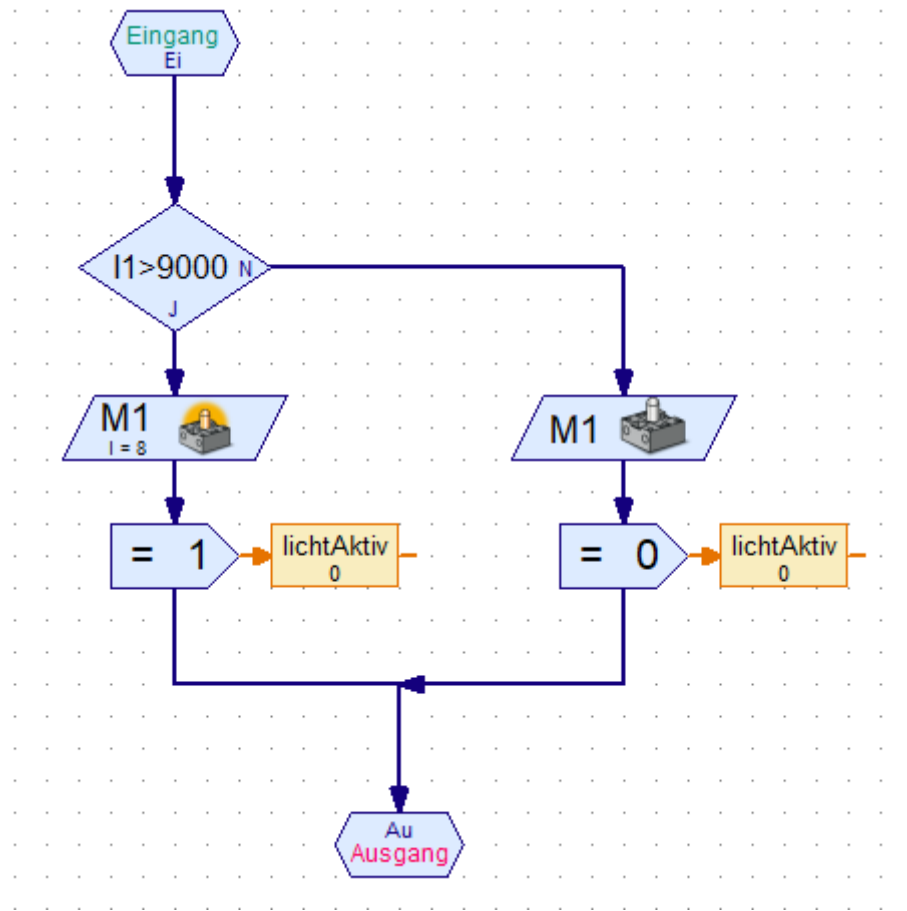


Abbildung 27: Licht_auto

Dieses Unterprogramm wird immer aufgerufen, wenn der Taster für die manuelle Steuerung nicht gedrückt wurde. Es wird dann zuerst überprüft, ob der eingehende Wert des Fotowiderstandes größer als „9000“ ist, es also dunkel ist. Wenn dies der Fall ist, wird an das Relais für die Beleuchtung eine Steuerspannung angelegt und die globale Variable *lichtAktiv* auf „1“ gesetzt. So empfängt das Bedienungs-Unterprogramm die Information, dass die Beleuchtung eingeschaltet ist. Erst wenn der Wert „9000“ wieder unterschreitet, es also hell genug ist, wird die Steuerspannung wieder abgestellt und die Variable auf „0“ gesetzt, sodass die Lampe im Bedienfeld ausgeht.

III. Licht_man

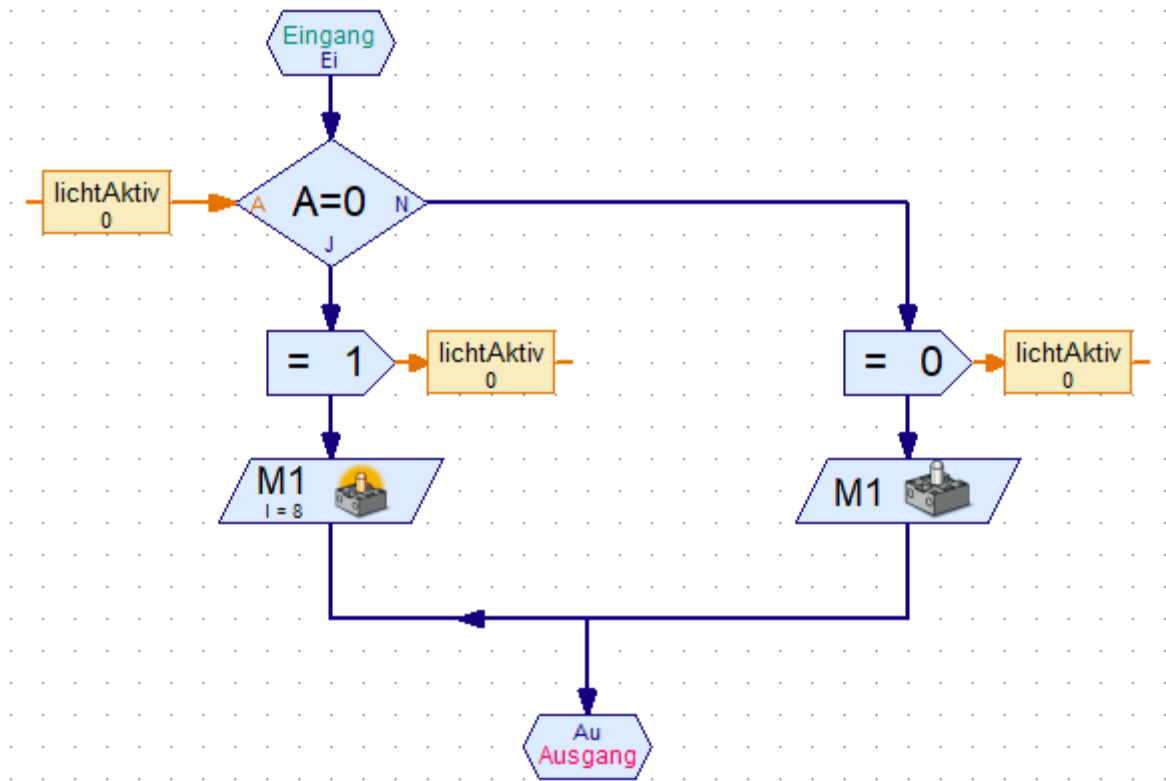


Abbildung 28: Licht_man

Wird im Hauptprogramm der Taster für die Beleuchtung gedrückt, so wird dieses Unterprogramm gestartet. Dann wird überprüft, ob die Beleuchtung bereits aktiv ist, weil der Taster beide Fälle, also sowohl das manuelle Ausschalten der Beleuchtung als auch das manuelle Einschalten, übernehmen können soll. Ist das Licht in dem Moment aus, so hat die Variable *lichtAktiv* den Wert „0“. Die Überprüfung ist also wahr, die Variable *lichtAktiv* wird dementsprechend auf „1“ gesetzt und die LED-Leiste mit Strom versorgt. Ist das Licht in dem Moment, wenn der Taster gedrückt wird, an, so wird die Variable *lichtAktiv* auf „0“ gesetzt und das Licht abgeschaltet. Danach wartet das Hauptprogramm auf ein erneutes Drücken, welches die Beleuchtung dann wieder ein- beziehungsweise ausschaltet. In dieser Zeit ist die Automatik nicht aktiv. Durch dieses Prinzip ist es möglich, das Licht auf unbestimmte Weise an- und abzuschalten und die Automatik zu übersteuern.

Die Programme zur Bewässerungsteuerung weichen nur an der Stelle ab, dass vor dem Einschalten der Pumpe an sich das Relais für die LED-Leiste geschaltet werden muss. Um dies zu tun, wird überprüft, ob das Licht bereits an ist oder nicht; im letzteren Fall wird es eingeschaltet. Beim Abschalten der Bewässerung wird der vorherige Zustand der Beleuchtung wiederhergestellt. Sprich, war das Licht vorher an, so ist es wieder an; war es vorher aus, so wird es wieder abgeschaltet.

I. Wasser_Bedienung

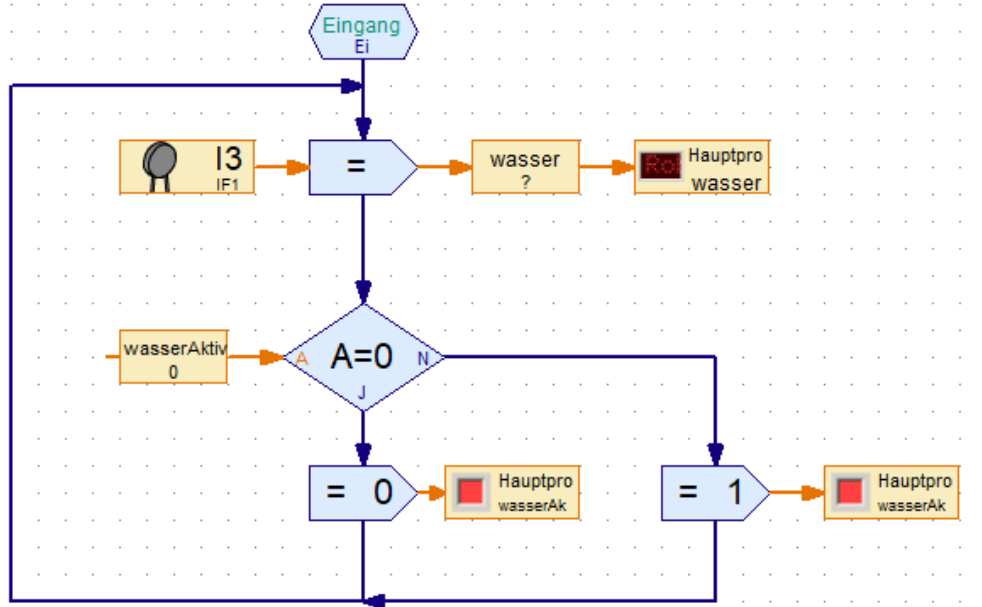


Abbildung 29: Wasser_Bedienung

II. Wasser_auto

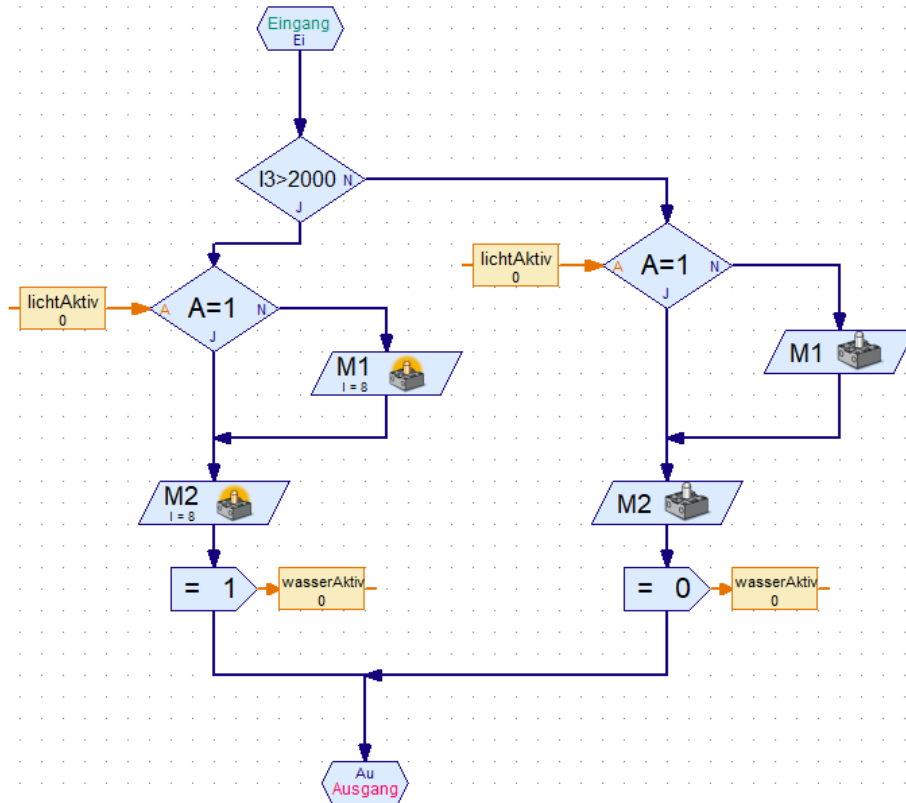


Abbildung 30: Wasser_auto

III. Wasser_man

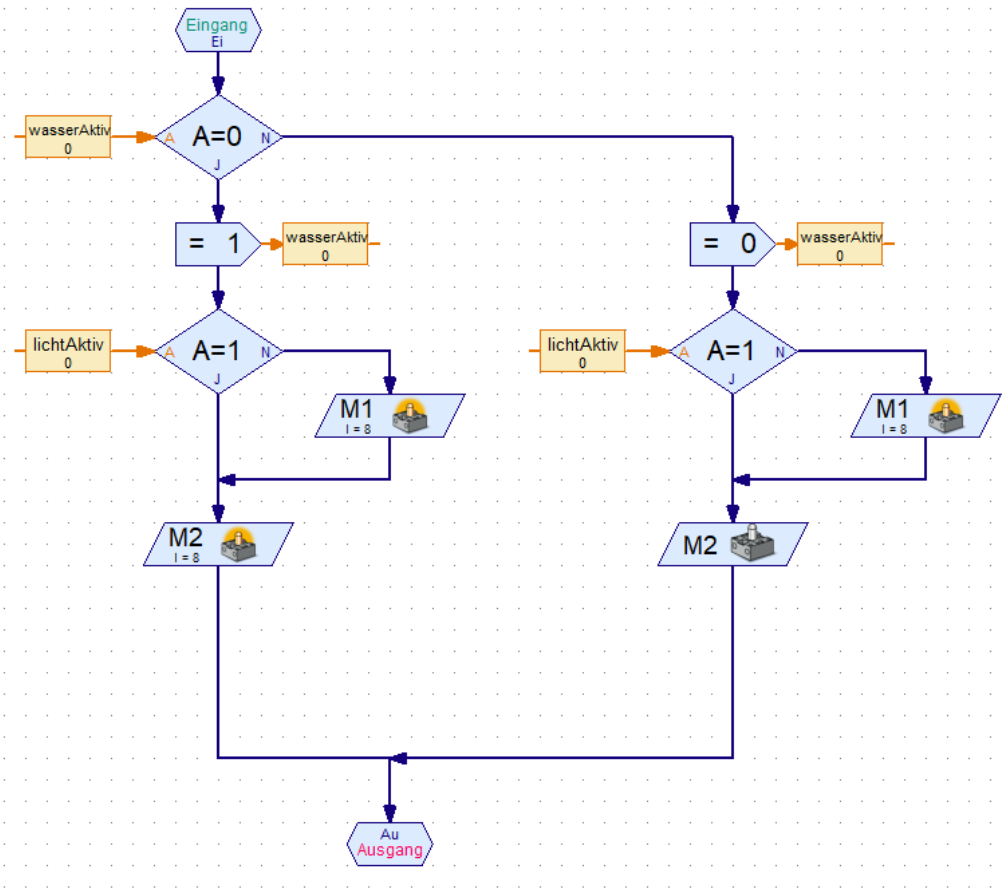


Abbildung 31: Wasser_man

Das Unterprogramm für die Personenerkennung ist recht simpel aufgebaut. Es wird lediglich auf eine Bewegung gewartet. Sobald eine von der Kamera registriert wird, schaltet sich der Ventilator für eine gewisse Zeit ein und anschließend ertönt ein Eintrittssignal. In der Realität würde sich dann die Tür automatisch öffnen.

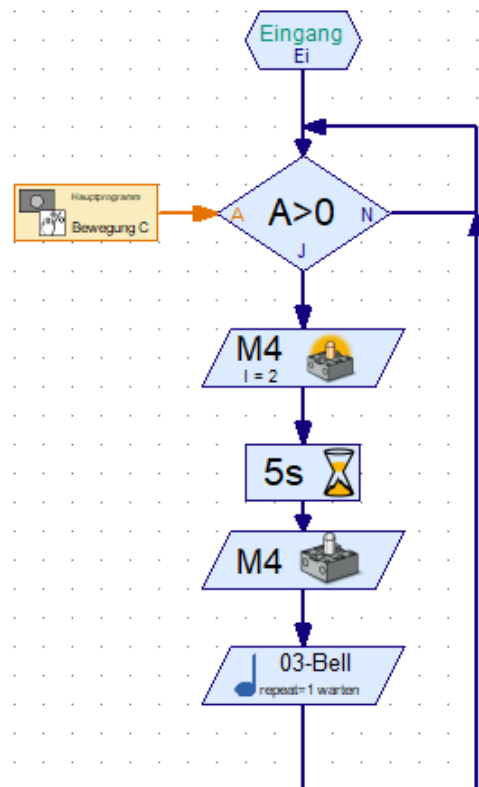


Abbildung 32: Personen_Erkennung

Die Steuerung des Umweltsensors unterscheidet sich leicht von den anderen, da der Sensor nicht einen Wert ausgibt, sondern ein Kombisensor ist, der 5 Werte misst.

I. Umwelt_Bedienung

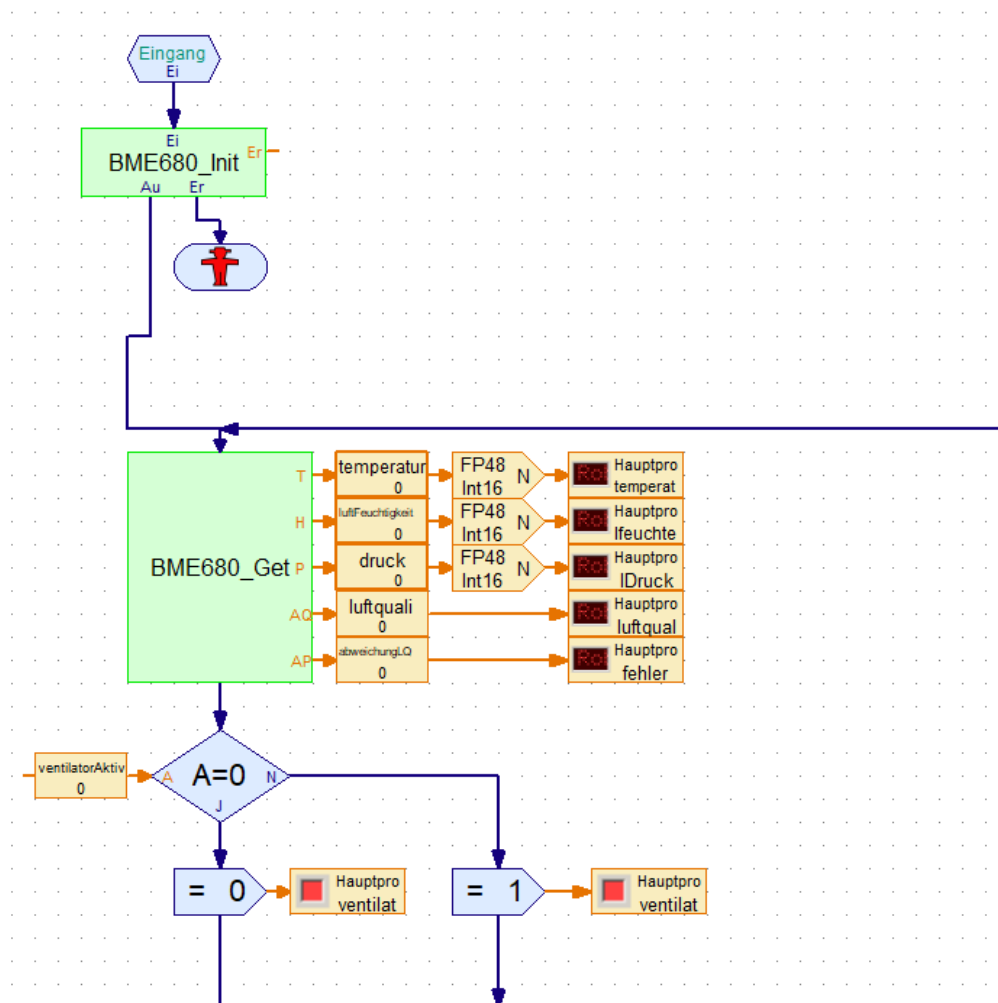


Abbildung 33: Umwelt_Bedienung

Der Sensor muss beim Start des Programms einmalig initialisiert werden. Der dafür benötigte Init-Block (und auch der Get-Block) sind von Fischertechnik bereits vorgefertigt und mussten nur eingesetzt werden. Sollte dieser Block einen Fehler melden, wird das Programm direkt beendet und die Messwerte werden nicht angezeigt. Darauf folgt der eigentliche Get-Block, der die Werte ausliest. An den Schnittstellen werden diese in Variablen gespeichert und, eventuell nach Umwandlung von einer Dezimalzahl in eine natürliche Zahl, auf dem Bedienfeld ausgegeben (da auf dem Bedienfeld nur natürliche Zahlen angezeigt werden können). Anschließend wird wie bei der Bewässerungs- und Lichtsteuerung überprüft, ob der Ventilator gerade aktiv ist, und anhand dessen die Lampe ein- oder ausgeschaltet.

Das *_auto* und *_man* Unterprogramm funktioniert wieder ähnlich wie die anderen beiden der jeweiligen Art. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Werte anders ausgelesen werden und eine doppelte Überprüfung stattfindet. Steigt der Wert der Luftqualität auf über 100, so wird zunächst noch überprüft, ob die Verlässlichkeit der Werte gut ist (sprich $ap=0$ oder $ap=1$; ap ist der Abweichungsfaktor von 0 (genau) bis 3 (unverlässlich)), und nur wenn beides der Fall ist, wird auch ventiliert.

II. Ventilator_auto

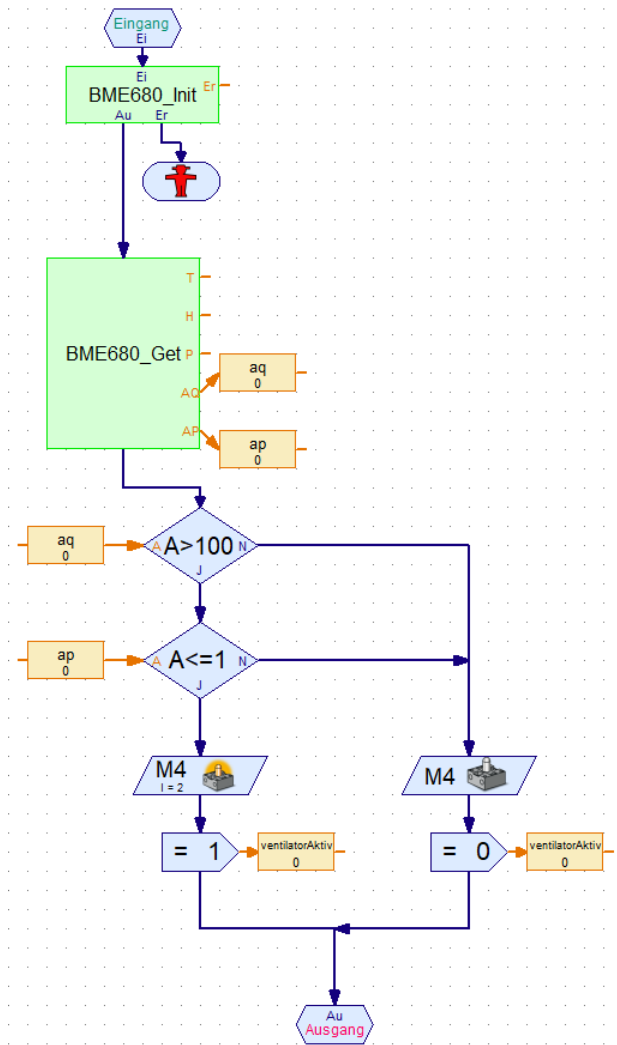


Abbildung 34: Ventilator_auto

III. Ventilator_man

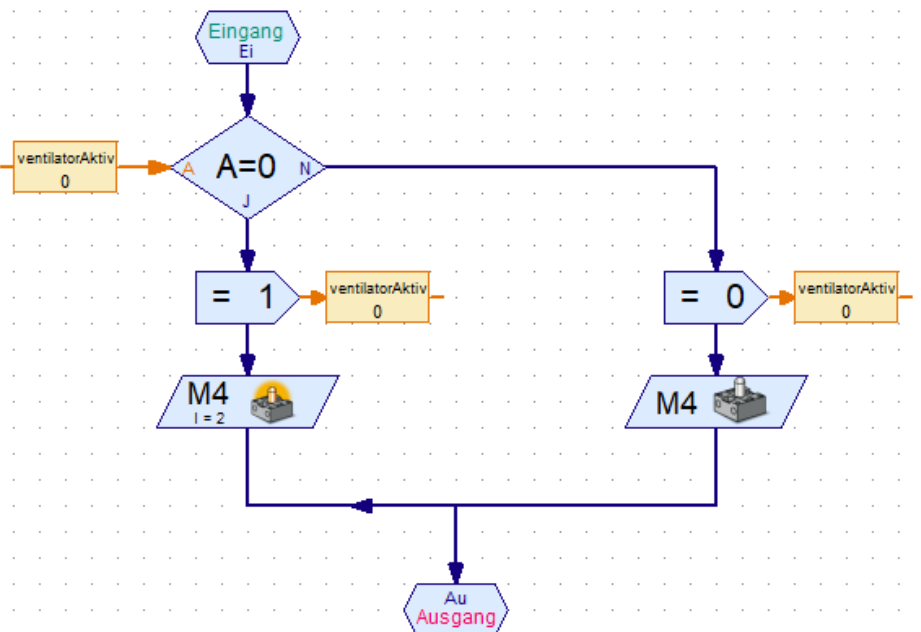


Abbildung 35: Ventilator_man

Einschub: Kennlinien der Solarmodule

Die Kennlinien und Leistungskurven der Solarmodule wurden aufgenommen, um den Maximum Power Point und somit im nächsten Schritt den Wirkungsgrad zu ermitteln.

1V Solarzelle

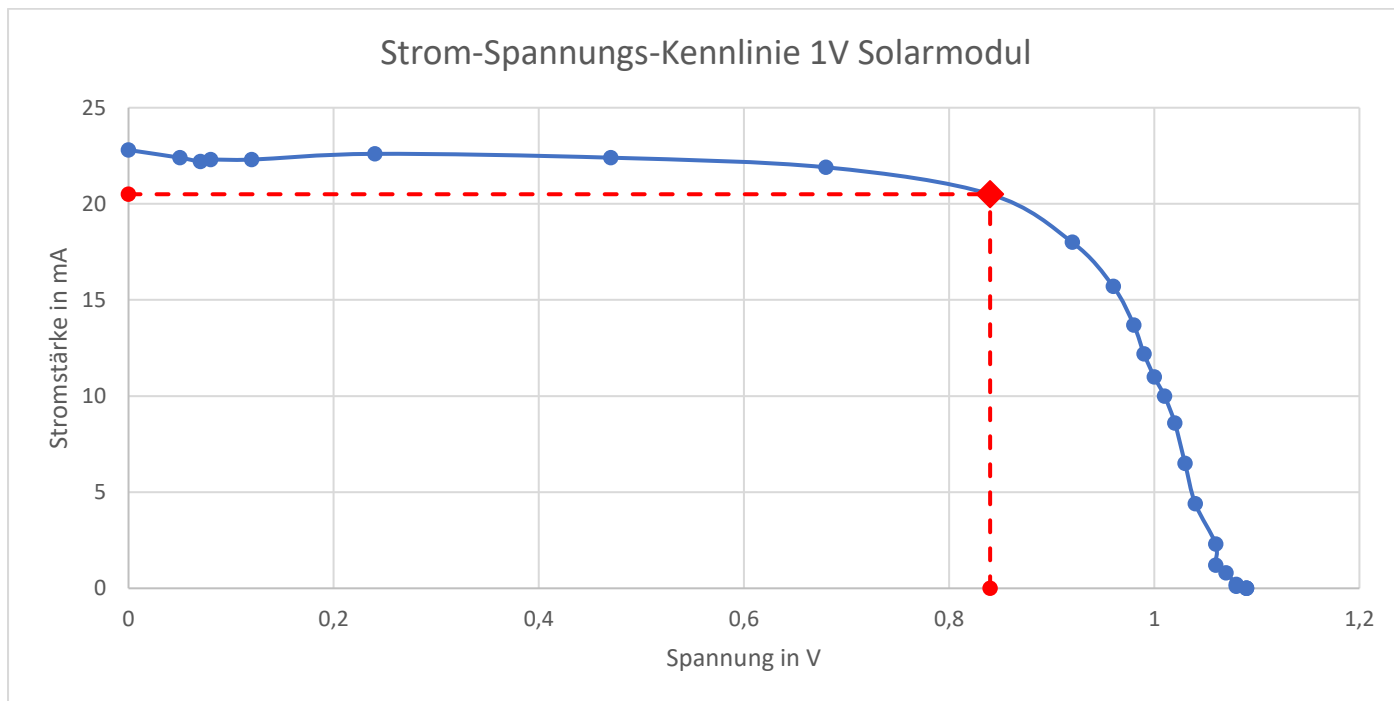


Abbildung 36:: U-I-Kennlinie 1V Solarmodul

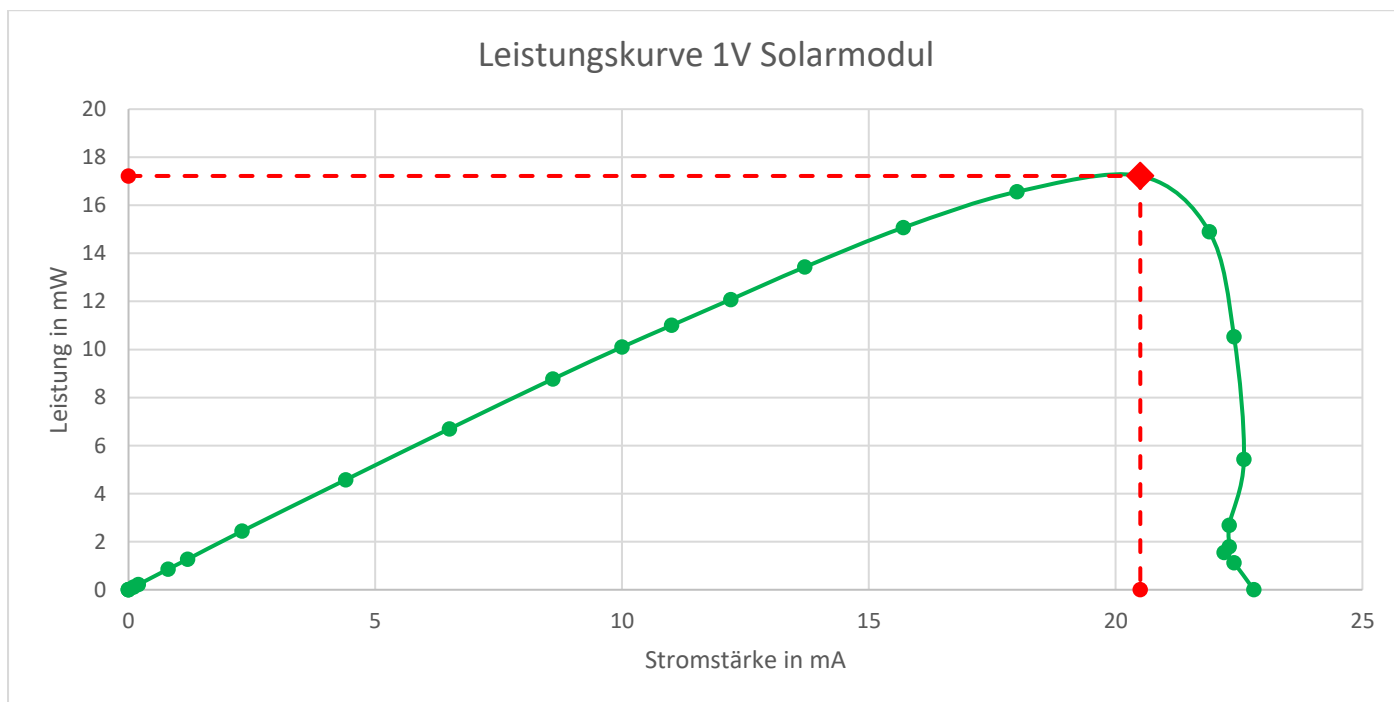


Abbildung 37: Leistungskurve 1V Solarmodul

Die 1V Solarzelle erreicht ihre maximale Leistung bei einer Spannung von 0,84V und einer Stromstärke von 20,5mA mit einer Leistung von 17,22mW.

2V Solarzelle

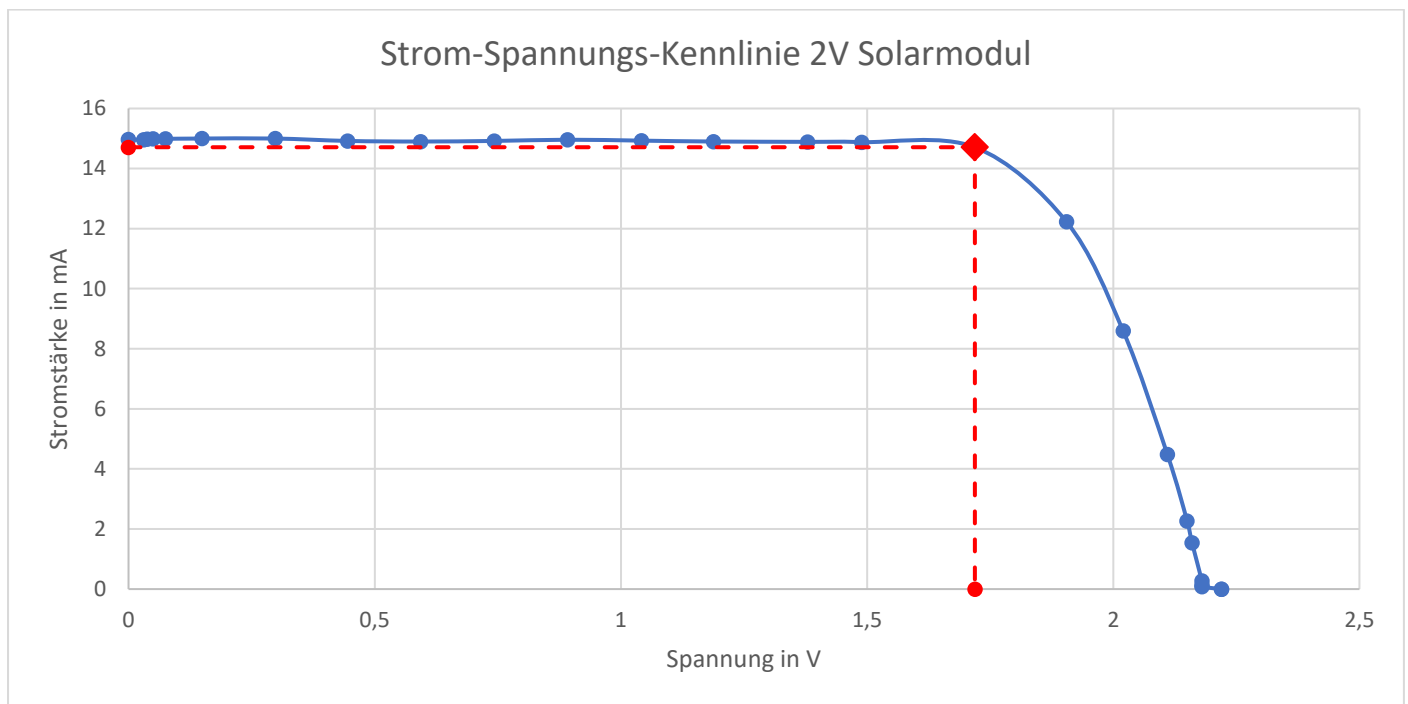


Abbildung 38: U-I-Kennlinie 2V Solarmodul

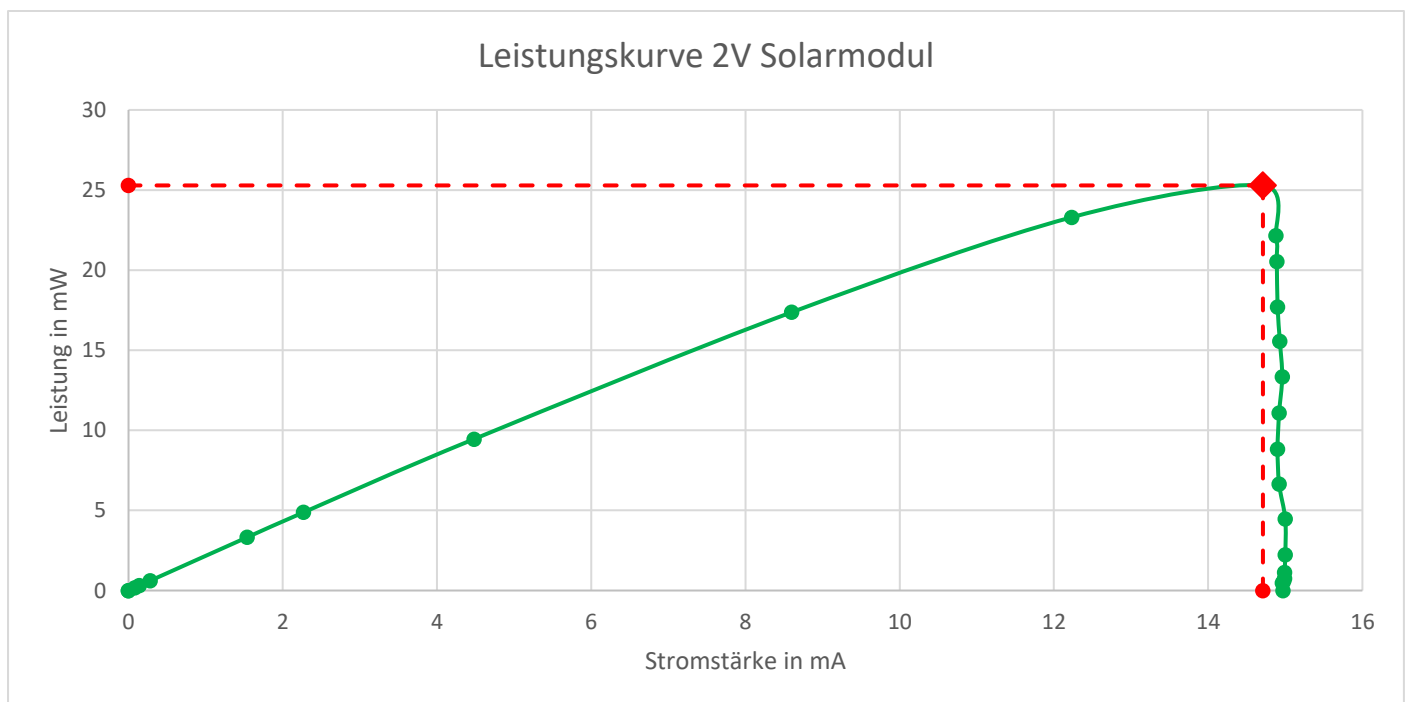


Abbildung 39: Leistungskurve 2V Solarmodul

Die 2V Solarzelle erreicht ihre maximale Leistung bei einer Spannung von 1,719V und einer Stromstärke von 14,71mA mit einer Leistung von 25,28mW.

6V Solarzelle

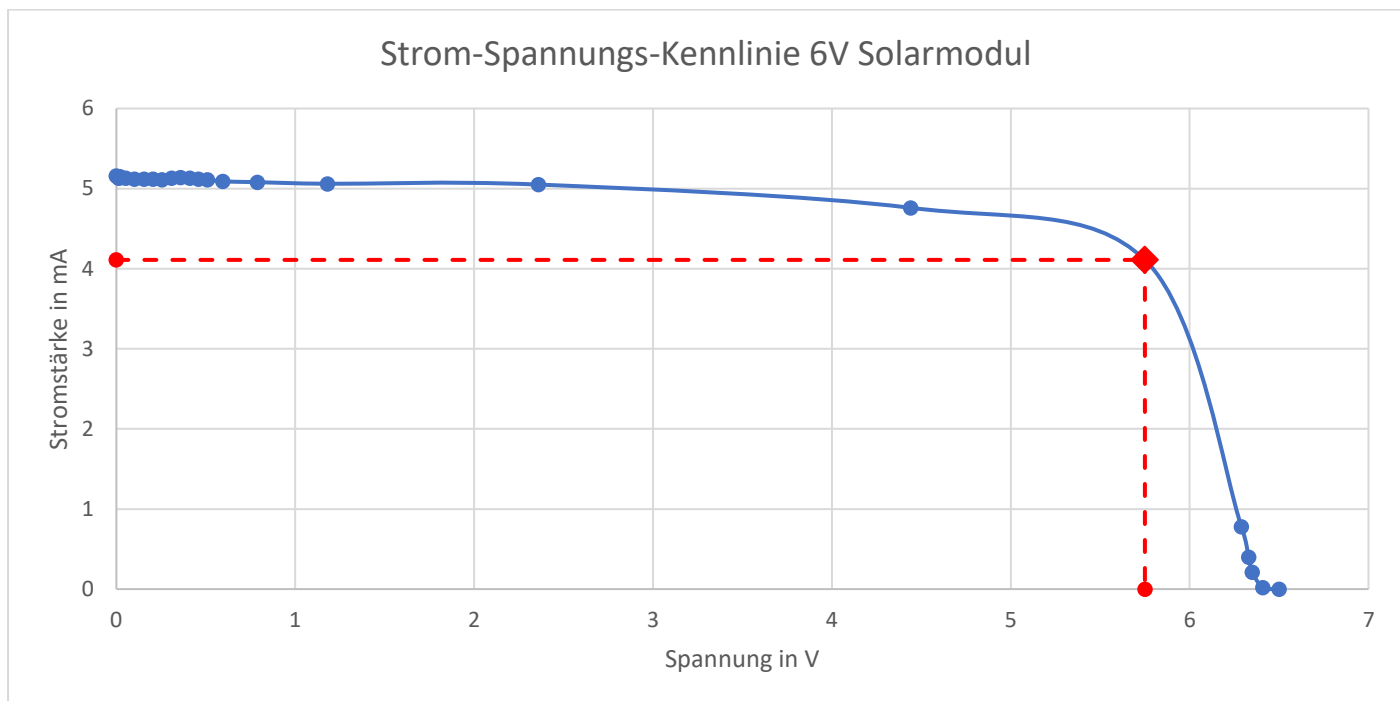


Abbildung 40: U-I-Kennlinie 6V Solarmodul

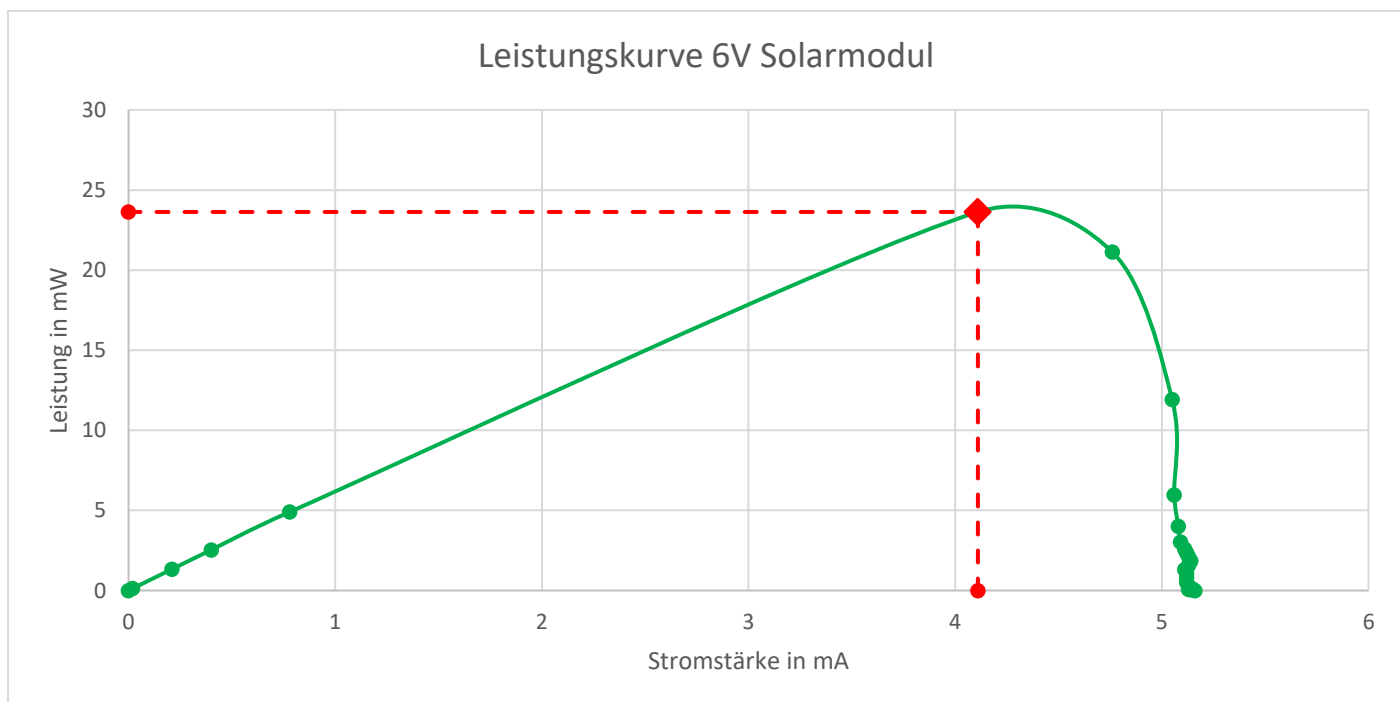


Abbildung 41: Leistungskurve 6V Solarmodul

Die 6V Solarzelle erreicht ihre maximale Leistung bei einer Spannung von 5,75V und einer Stromstärke von 4,11mA mit einer Leistung von 23,63mW.

Einschub: Wirkungsgrade aller Anlagenteile

Da für die folgenden drei Aufgaben die Wirkungsgrade der einzelnen Anlagenteile benötigt werden, werden diese nun berechnet.

Solarzelle allgemein

Bei Solarzellen ist der Wirkungsgrad als Verhältnis von eingestrahelter Sonnenleistung P_{ein} und maximal abgegebener elektrischer Leistung P_{aus} definiert:

$$\eta = \frac{P_{aus}}{P_{ein}}$$

Formel 1: Wirkungsgrad Solarzelle generell

Die maximale elektrische ausgegebene Leistung wird am MPP erreicht und kann mit den vorhandenen Messwerten ermittelt werden:

$$P_{aus} = P_{MPP} = U_{MPP} * I_{MPP}$$

Formel 2: ausgegebene elektrische Energie

Für die eingestrahelte Sonnenleistung steht kein Messgerät zur Verfügung, weshalb die Lichtleistung mit Hilfe eines Multimeters abgeschätzt wird. Dafür benötigt man neben dem aktuell gemessenen Kurzschlussstrom I_K den Faktor F , der von dem Maximalwert des Kurzschlussstromes abhängt. Er ergibt sich nach folgender Formel aus der Lichtleistung im Sommer von $P_{max} = 1000W/m^2$ und dem vom Hersteller angegebenen maximalen Kurzschlussstrom $I_{K max}$ (dieser wird bei den genannten $1000W/m^2$ erreicht):

$$F = \frac{P_{max}}{I_{K max}}$$

Formel 3: Faktor F als Referenz für die Lichtleistung

Anschließend kann die eingestrahelte Leistung P_{ein} mit dem gemessenen Kurzschlussstrom I_K , dem Faktor F und der Fläche A des Moduls berechnet werden:

$$P_{ein} = F * I_K * A$$

Formel 4: eingestrahelte Sonnenenergie

Mit den nun errechneten Werten für P_{aus} und P_{ein} kann abschließend der Wirkungsgrad η berechnet werden. Die zusammengefasste Formel sieht dann wie folgt aus:

$$\eta = \frac{P_{aus}}{P_{ein}} = \frac{P_{MPP}}{F * I_K * A} = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{\frac{P_{max}}{I_{K max}} * I_K * A}$$

Formel 5: Wirkungsgrad einer Solarzelle

1V Solarzelle

Gegeben: $U_{MPP} = 0,84V$; $I_{MPP} = 0,0205A$; $I_{K \max} = 440mA$; $I_K = 22,8mA$; $A = 0,003025m^2$

$$\eta = \frac{0,84V * 0,0205A}{\frac{1000 \frac{W}{m^2}}{440mA} * 22,8mA * 0,003025m^2} \approx 10,99\%$$

2V Solarzelle

Gegeben: $U_{MPP} = 0,1,719V$; $I_{MPP} = 0,01471A$; $I_{K \max} = 380mA$; $I_K = 14,97mA$; $A = 0,0069m^2$

$$\eta = \frac{1,719V * 0,01471A}{\frac{1000 \frac{W}{m^2}}{380mA} * 14,97mA * 0,0069m^2} \approx 9,30\%$$

6V Solarzelle

Gegeben: $U_{MPP} = 5,75V$; $I_{MPP} = 0,00411A$; $I_{K \max} = 150mA$; $I_K = 5,16mA$; $A = 0,0069m^2$

$$\eta = \frac{5,75V * 0,00411A}{\frac{1000 \frac{W}{m^2}}{150mA} * 5,16mA * 0,0069m^2} \approx 9,96\%$$

Elektrolyseur

Für den Elektrolyseur kann sowohl der energetische als auch der faradaysche Wirkungsgrad bestimmt werden. Ersterer gibt das Verhältnis zwischen zugeführter elektrischer und erzeugter chemischer Energie an, letzterer das zwischen tatsächlich erzeugter und theoretisch berechneter Gasmenge an.

1. Energetischer Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta_{\text{energetisch}} &= \frac{E_{\text{Wasserstoff}}}{E_{\text{elektrisch}}} = \frac{V_{\text{H}_2} * H_0}{U * I * t} \\ &= \frac{2 * 10^{-5} \text{m}^3 * 12,745 * 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{1,9\text{V} * 1,47\text{A} * 114\text{s}} \approx 80,06\%\end{aligned}$$

Formel 6: Energetischer Wirkungsgrad Elektrolyseur

- V_{H_2} : erzeugte Menge Wasserstoff
- H_0 : oberer Brennwert des Wasserstoffs
- U : Mittelwert der Spannung
- I : Mittelwert der Stromstärke
- t : Zeit bis die 20cm^3 Wasserstoff erzeugt wurden

2. Faradayscher Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Faraday}} &= \frac{V_{\text{H}_2}(\text{erzeugt})}{V_{\text{H}_2}(\text{errechnet})} = \frac{V_{\text{H}_2}(\text{erzeugt})}{\frac{R * I * T * t}{F * p * z}} \\ &= \frac{0,00002\text{m}^3}{\frac{8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}} * 1,47\text{A} * 298\text{K} * 114\text{s}}{96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} * 1,013 * 10^5 \text{Pa} * 2}} \approx 94,16\%\end{aligned}$$

Formel 7: Faradayscher Wirkungsgrad Elektrolyseur

- R : universelle Gaskonstante
- I : Mittelwert der Stromstärke
- T : Umgebungstemperatur
- t : Zeit bis die 20cm^3 Wasserstoff erzeugt wurden
- F : Faraday-Konstante
- p : Umgebungsdruck
- z : Anzahl der Elektronen, um ein Molekül abzuscheiden

Brennstoffzelle

Auch für die Brennstoffzelle lässt sich der energetische und faradaysche Wirkungsgrad berechnen. Ersterer gibt das Verhältnis zwischen zugeführter und nutzbarer Energie an, letzterer das zwischen tatsächlich verbrauchtem und theoretisch berechneter Gasvolumen an.

1. Energetischer Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta_{\text{energetisch}} &= \frac{E_{\text{elektrisch}}}{E_{\text{Wasserstoff}}} \\ &= \frac{U * I * t}{V_{H_2} * H_U} = \frac{0,51V * 0,101425A * 1128s}{15 * 10^{-6}m^3 * 10,782 * 10^6 \frac{J}{m^3}} \approx 36,08\%\end{aligned}$$

Formel 8: Energetischer Wirkungsgrad Brennstoffzelle

V_{H_2} : verbrauchte Menge Wasserstoff

H_U : untere Brennwert des Wasserstoffs

U : Mittelwert der Spannung

I : Mittelwert der Stromstärke

t : Zeit bis die 15cm^3 Wasserstoff verbraucht wurden

2. Faradayscher Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Faraday}} &= \frac{V_{H_2}(\text{errechnet})}{V_{H_2}(\text{verbraucht})} = \frac{\frac{R * I * T * t}{F * p * z}}{V_{H_2}(\text{verbraucht})} \\ &= \frac{8,314 \frac{J}{\text{mol} * K} * 0,101425A * 298K * 1128s}{96485 \frac{C}{\text{mol}} * 1,013 * 10^5 Pa * 2} \approx 96,67\% \\ &= \frac{\quad}{0,000015m^3}\end{aligned}$$

Formel 9: Faradayscher Wirkungsgrad Brennstoffzelle

R : universelle Gaskonstante

I : Mittelwert der Stromstärke

T : Umgebungstemperatur

t : Zeit bis die 20cm^3 Wasserstoff erzeugt wurden

F : Faraday-Konstante

p : Umgebungsdruck

z : Anzahl der Elektronen, um ein Molekül abzuscheiden

Aufgabe 8

Um den Wasserstoffbedarf V der einzelnen Aktoren zu bestimmen, wurde zunächst eine allgemeine Formel hergeleitet:

$$V_P(t) = \frac{P * t}{H_U * \eta_{BZ \text{ energetisch}}} = \frac{P * t}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608}$$

Formel 10: Wasserstoffbedarf für einzelne Aktoren

Der Parameter P gibt die Leistung des jeweiligen Aktors an, welche bei laufendem Betrieb gemessen wurde; t gibt die Zeit in Sekunden an, die der Aktor laufen soll.

Ventilator

Gegeben: $U=2,218V$; $I=0,0342A \rightarrow P = 2,218V * 0,0342A = 0,0758556W$

Pumpe

Gegeben: $U=2,02V$; $I=0,1005A \rightarrow P = 2,02V * 0,1005A = 0,20301W$

LED-Leiste

Gegeben: $U=4,24V$; $I=0,19A \rightarrow P = 4,24V * 0,19A = 0,8056W$

Möchte man den Wasserstoffbedarf nun berechnen, so setzt man für P die jeweilige Leistung des Aktors ein und für t die gewünschte Zeit.

Beispiel

„Berechnen Sie den Wasserstoffbedarf, wenn die Pumpe für 50s laufen soll.“

$$V_{0,20301}(50) = \frac{0,20301W * 50s}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608} \approx 0,34cm^3$$

Es werden etwa $0,34cm^3$ Wasserstoff benötigt.

Aufgabe 10

Da für Aufgabe 9 die Formel aus Aufgabe 10 verwendet werden kann, wird nun erst Aufgabe 10 bearbeitet und im Anschluss Aufgabe 9.

Um eine möglichst flexible Formel für das Volumen eines Tag/Nacht-Speichers aufzustellen, wurde mit einigen Parametern gerechnet, die beliebig verändert werden können:

- Das Licht bleibt die gesamte Nacht an und ist deshalb lediglich von der Zeit t_N abhängig, welche die Dauer der Nacht in Sekunden angibt.
- Für die Pumpe muss die Gesamtzeit der Pumpgänge P_D in Sekunden angegeben werden.
- Für den Ventilator muss die Gesamtlänge der Ventilationsvorgänge V_D in Sekunden angegeben werden.
→ So ist es möglich, unterschiedlich lange Pump-/Ventilationsvorgänge mit der Formel zu berechnen.

Addiert man die einzelnen Verbräuche, welche sich aus der Formel aus Aufgabe 8 herleiten, ergibt sich folgende neue Formel für den Speicher S:

$$S_{P_D, V_D}(t_N) = \frac{0,8056W * t_N}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608} + \frac{0,20301W * P_D}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608} + \frac{0,0758556W * V_D}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608}$$
$$= \frac{0,8056W * t_N + 0,20301W * P_D + 0,0758556W * V_D}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608}$$

Formel 11: Volumen eines Tag/Nacht-Speichers

Beispiel

„Berechnen Sie die Speichergröße eines Tag/Nacht-Speichers, wenn die Nacht 120s dauert und zweimal für 10s ventiliert werden soll und einmal für 20s die Pumpe aktiv sein soll.“

$$S_{20,20}(120) = \frac{0,8056W * 120s + 0,20301W * 20s + 0,0758556W * 20s}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608}$$
$$\approx 26,28cm^3$$

Es müssen etwa 26,28cm³ Wasserstoff gespeichert werden.

Aufgabe 9

Die Formel für die Berechnung einer notwendigen Solarfläche setzt sich unter anderem aus den bereits aufgestellten Formeln zusammen. Da einige Faktoren noch hinzukommen, werden die einzelnen Schritte erläutert und am Ende zur Gesamtgleichung zusammengefügt. Da es sich allerdings um ein Modell handelt, geht der Tag/Nacht-Zyklus nicht mehrere Stunden, sondern einige Minuten/Sekunden. Bei Verwendung der Formel müssen deshalb unbedingt die Einheiten beachtet werden.

Als erstes wird mit der Formel aus Aufgabe 10 das benötigte Wasserstoffvolumen für einen Tag/Nacht-Zyklus berechnet. Dafür muss die Dauer der Nacht t_N sowie die Gesamtpumpdauer P_D und Gesamtventilationsdauer V_D (jeweils Pump- und Ventilationsdurchgänge von Tag und Nacht inbegriffen), alles in Sekunden angegeben, festgelegt werden:

$$S_{P_D, V_D}(t_N) = \frac{0,8056W * t_N + 0,20301W * P_D + 0,0758556W * V_D}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608}$$

Der benötigte Wasserstoff wird durch den Elektrolyseur erzeugt. Dieser läuft bei einer Spannung von 1,9V und einer Stromstärke von 1,47A; die Leistung beträgt dementsprechend 2,793W. Aus den Messwerten zum Wirkungsgrad lässt sich ablesen, dass er für 20cm³ Wasserstoff 114s benötigt. Bildet man den Quotienten, so ergibt dies 5,7 Sekunden pro Kubikzentimeter. Dies multipliziert mit der Leistung und dem Speichervolumen S und anschließend geteilt durch den Wirkungsgrad, ergibt die Energie E , die dem Elektrolyseur zugeführt werden muss, um das Speichervolumen S an Wasserstoff zu erzeugen:

$$E(S_{P_D, V_D}(t_N)) = \frac{2,793W * S_{P_D, V_D}(t_N) * 5,7 \frac{s}{cm^3}}{0,8006}$$

Formel 12: benötigte Energie des Elektrolyseurs

Diese Energie soll durch die Solarzellen erzeugt werden. Die Lichtleistung in unserem Modell kommt von der beiliegenden Lampe, weshalb diese in der Rechnung nicht beachtet werden muss. Aus diesem Grund wurde für die folgende Rechnung das 1V-Solarmodul gewählt, da es mit 10,99% den besten Wirkungsgrad hat und damit ökonomisch am effizientesten ist. Anhand der maximalen Leistung am MPP lässt sich die abgegebene Energie M eines Moduls an einem Tag mit der Länge t_T in Sekunden berechnen:

$$M(t_T) = 0,01722W * t_T$$

Formel 13: Leistung pro Solarmodul

Um abschließend die benötigte Solarfläche A zu berechnen, muss die für den Elektrolyseur benötigte Energie E durch die von einem Modul abgegebene Energie M dividiert und mit der Fläche eines Moduls multipliziert werden. Da die Fläche als Solarfläche pro Quadratmeter Gewächshausfläche angegeben werden soll, muss sie noch mit einem Faktor multipliziert werden, nämlich mit $1m^2 / 0,3m * 0,25m = 40/3$ (da das Gewächshaus 30cm * 25cm groß ist):

$$A(E(S_{P_D, V_D}(t_N)), M(t_T)) = \frac{E(S_{P_D, V_D}(t_N))}{M(t_T)} * 0,003025m^2 * \frac{40}{3}$$

Formel 14: Solarfläche generell

Führt man alle diese Formeln zusammen, ergibt sich für die benötigte Solarfläche folgende Formel:

$$A_{P_D, V_D}(t_T, t_N) = \frac{2,793W * \frac{(0,8056W * t_N + 0,20301W * P_D + 0,0758556W * V_D)}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608} * 5,7 \frac{s}{cm^3}}{0,8006} * 0,003025m^2 * \frac{40}{3} \\ \frac{0,01722W * t_T}{0,8006}$$

Formel 15: benötigte Solarfläche pro Quadratmeter Gewächshausfläche

Möchte man trotz des schlechteren Wirkungsgrades andere Solarzellen nutzen, so muss die Leistung in $M(t_T)$ sowie die Fläche eines Moduls in $A(E(S_{P_D, V_D}(t_N)), M(t_T))$ angepasst werden.

Beispiel

„Berechnen Sie die benötigte Solarfläche pro Quadratmeter Gewächshausfläche, wenn während einer 180s langen Nacht zwei Mal für 15s der Ventilator laufen soll. Am 5minütigen Tag soll zudem die Bewässerung für 20s eingeschaltet werden.“

$$A_{P_D, V_D}(t_T, t_N) = \frac{2,793W * \frac{(0,8056W * 180s + 0,20301W * 20s + 0,0758556W * 30s)}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608} * 5,7 \frac{s}{cm^3}}{0,8006} * 0,003025m^2 * \frac{40}{3} \\ \frac{0,01722W * 300s}{0,8006} \\ \approx 6,04m^2$$

Es wird eine Solarfläche von etwa $6,04m^2$ pro Quadratmeter Gewächshaus benötigt.

Aufgabe 11

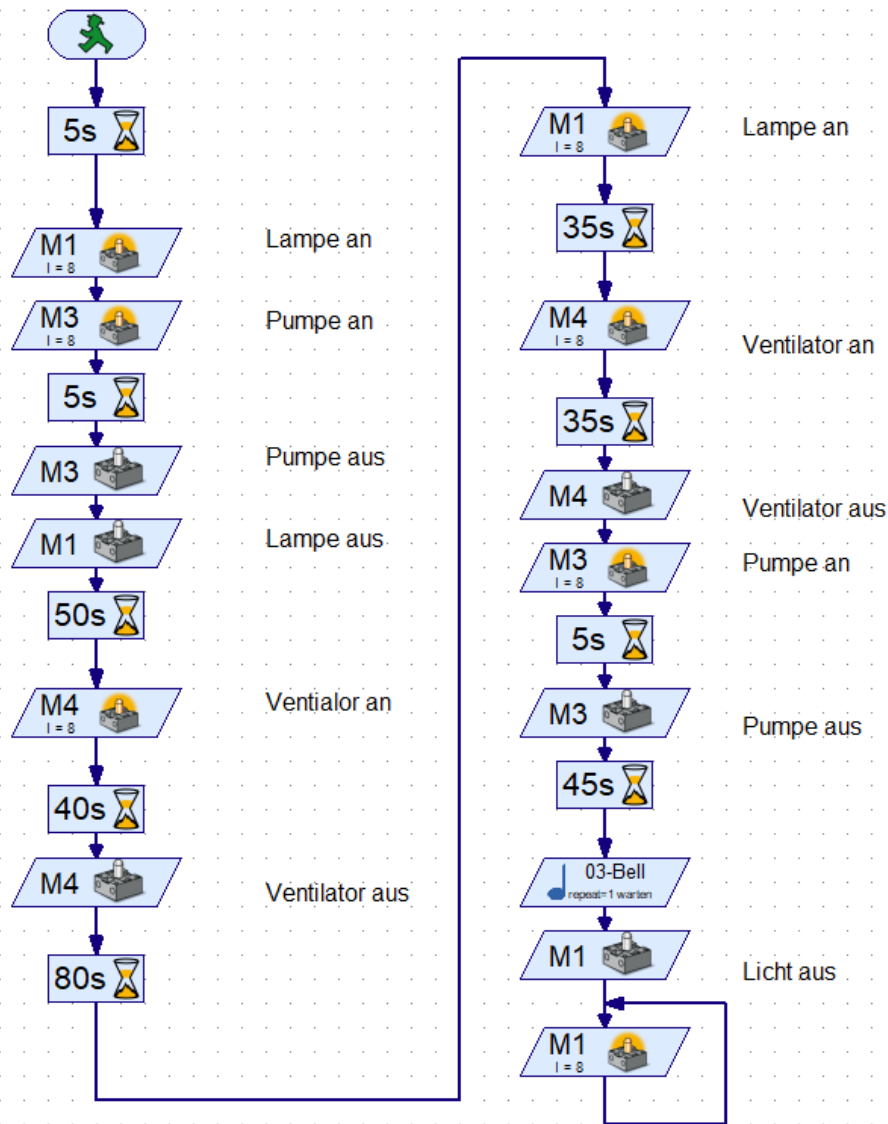


Abbildung 42: Steuerung Live-Wettbewerb

Für den Livewettbewerb wurde ein konkreter Ablauf programmiert. Der linke Block ist der Ablauf am Tag, der rechte der in der Nacht. Am Tag läuft zuerst für 5s die Pumpe (wie unter Steuerung erwähnt muss dafür auch das Relais der Lampen geschaltet werden), nach einer Pause von 50s dann für 40s der Ventilator. Später wird die Nacht simuliert, in der durchgehend die Beleuchtung eingeschaltet ist. Es wird aber nochmals für 35s ventiliert und 5s gepumpt. Nach exakt 5min ertönt eine Klingel, die Lampen bleiben allerdings eingeschaltet, sodass eine zu kurze oder zu lange Zeit erkennbar ist.

**Aufgrund des in dem Vorwort erwähnten Zeitmangels kann es vorkommen, dass sich diese Steuerung bis zum Live-Wettbewerb leicht ändern könnte, wenn sich dies durch Test-Versuche ergibt. Die Pumpdauer wurde allerdings bereits bewusst gekürzt, da das Gewächshaus nach einem 30s-Pumpvorgang überflutet war.*

Aufgabe 12

Um die benötigte Wasserstoffmenge zu berechnen, wird die in Aufgabe 10 aufgestellte Formel verwendet:

$$S_{P_D, V_D}(t_N) = \frac{0,8056W * t_N + 0,20301W * P_D + 0,0758556W * V_D}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608}$$

Die Parameter lassen sich aus dem Steuerungsprogramm entnehmen:

- Dauer der Nacht $t_N = 120s$
- Gesamtbewässerungsdauer $P_D = 10s$
- Gesamtventilationsdauer $V_D = 75s$

$$S_{10,75}(120) = \frac{0,8056W * 120s + 0,20301W * 10s + 0,0758556W * 75s}{10,782 \frac{Ws}{cm^3} * 0,3608} \approx 26,83cm^3$$

Für den Live-Wettbewerb benötigen wir theoretisch etwa $26,83cm^3$ Wasserstoff. Dieses muss im Falle einer Teilnahme am Livewettbewerb durch intensive, praktische Tests optimiert werden.

Verbesserungsvorschläge

Während der Experimentierphase sind uns einige Dinge aufgefallen, die man in einem fortgeschrittenen Modell verbessern sollte. Diese möchten wir kurz auflisten:

- Das dem Gewächshaus beiliegende Tröpfchen-Bewässerungssystem erfüllt seinen Zweck ganz und gar nicht. Die vorderen Pflanzen erhalten deutlich mehr Wasser, die mittleren so gut wie gar keins.
- Sensoren, die den gesuchten Messwert ausgeben würden, würden die automatische Steuerung deutlich verbessern. Den NTC-Widerstand für die Bodenfeuchtigkeit zu nutzen ist eigentlich suboptimal.
- In einem vollständigen Modell wäre es mit den Fischertechnik-Brennstoffzellen-Elektrolyse-Einheiten nicht möglich gewesen, ein autarkes System zu schaffen. Nur wenn man Elektrolyseur und Brennstoffzellen getrennt voneinander hätte, könnten die Solarzellen den Elektrolyseur mit Strom versorgen und das entstehende Gas über einen Tank zu der Brennstoffzelle geleitet werden. So müsste immer manuell umgesteckt werden.
- Wie bereits erwähnt sind die Relais auf den Breadboards nicht sicher befestigt. Relais der richtigen Größe hätten den Prozess des „Zusammenbastelns“ erspart.
- Um die Kennlinien aufzunehmen, lagen ungünstige Widerstände bei. Mit einer Widerstandsdekade wäre es sehr komfortabel gewesen, aber auch mehr unterschiedliche und vor allem kleinere Widerstandswerte hätten die Arbeit erleichtert. 33.000 und 1.000.000 Ohm sind sehr groß gewesen, so auch der Sprung von 10 zu 470 Ohm. So entstanden durch das Verschalten der Widerstände größere Abweichungen und das Fehlerpotential war größer.
- Die Solarzellen der namentlich nicht bekannten Hersteller (2V und 6V) erreichten nur sehr kleine Stromstärken und somit Leistungen. Praktisch konnte mit ihnen die Elektrolyse nicht betrieben werden, sodass die Brennstoffzellen an einer externen Spannungsquelle geladen wurden.
- Ein letzter, uns aber sehr wichtiger Punkt, ist das Weitergeben von Informationen. Datenblätter zu den einzelnen Aktoren mit Betriebsspannung, Betriebsstrom und weiterem wären sicher nicht verkehrt gewesen ;)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Befestigung Brennstoffzellen	4
Abbildung 2: Externe Spannungsquelle	4
Abbildung 3: Konditionierung Brennstoffzellen	4
Abbildung 4: Verschaltung von Widerständen	5
Abbildung 5: U-I-Kennlinie Elektrolyseur	6
Abbildung 6: Leistungskurve Elektrolyseur	6
Abbildung 7: U-I-Kennlinie Brennstoffzelle	7
Abbildung 8: Leistungskurve Brennstoffzelle	8
Abbildung 9: U-I-Kennlinie 3 Brennstoffzellen parallel	8
Abbildung 10: Leistungskurve 3 Brennstoffzellen parallel	9
Abbildung 11: U-I-Kennlinie 3 Brennstoffzellen seriell	10
Abbildung 12: Leistungskurve 3 Brennstoffzellen seriell	10
Abbildung 13: Vergleich Reihen- und Parallelschaltung der Brennstoffzellen	11
Abbildung 14: Aufbau der Lichtkeimungsstation	11
Abbildung 15: Fotowiderstand	13
Abbildung 16: NTC-Widerstand	13
Abbildung 17: Umweltsensor	13
Abbildung 18: Steuerung der Aktoren	14
Abbildung 19: rechtes Breadboard/Pumpensteuerung	14
Abbildung 20: linkes Breadboard/Hauptsteuerung	14
Abbildung 21: Breadboard	15
Abbildung 22: Relais Schaltplan	15
Abbildung 23: TXT-Controller Anschlüsse	16
Abbildung 24: Bedienfeld	17
Abbildung 25: Hauptprogramm	17
Abbildung 26: Licht_Bedienung	18
Abbildung 27: Licht_auto	19
Abbildung 28: Licht_man	20
Abbildung 29: Wasser_Bedienung	21
Abbildung 30: Wasser_auto	21
Abbildung 31: Wasser_man	22
Abbildung 32: Personen_Erkennung	22
Abbildung 33: Umwelt_Bedienung	23
Abbildung 34: Ventilator_auto	24
Abbildung 35: Ventilator_man	24
Abbildung 36:: U-I-Kennlinie 1V Solarmodul	25
Abbildung 37: Leistungskurve 1V Solarmodul	25
Abbildung 38: U-I-Kennlinie 2V Solarmodul	26
Abbildung 39: Leistungskurve 2V Solarmodul	26
Abbildung 40: U-I-Kennlinie 6V Solarmodul	27
Abbildung 41: Leistungskurve 6V Solarmodul	27
Abbildung 42: Steuerung Live-Wettbewerb	35

Gleichungsverzeichnis

Formel 1: Wirkungsgrad Solarzelle generell	28
Formel 2: ausgegebene elektrische Energie	28
Formel 3: Faktor F als Referenz für die Lichtleistung	28
Formel 4: eingestrahlte Sonnenenergie	28
Formel 5: Wirkungsgrad einer Solarzelle	28
Formel 6: Energetischer Wirkungsgrad Elektrolyseur	30
Formel 7: Faradayscher Wirkungsgrad Elektrolyseur	30
Formel 8: Energetischer Wirkungsgrad Brennstoffzelle	31
Formel 9: Faradayscher Wirkungsgrad Brennstoffzelle	31
Formel 10: Wasserstoffbedarf für einzelne Aktoren	32
Formel 11: Volumen eines Tag/Nacht-Speichers	33
Formel 12: benötigte Energie des Elektrolyseurs	34
Formel 13: Leistung pro Solarmodul.....	34
Formel 14: Solarfläche generell	34
Formel 15: benötigte Solarfläche pro Quadratmeter Gewächshausfläche.....	35