

Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

## **Aufbau eines Laborversuchsstandes zur Simulation von Umwelteinflüssen auf die Effizienz von Solaranlagen**

Masterarbeit

von

Florian Senft

geb. am 23.04.1996

in Mühlhausen / Thür.

Matrikelnummer 72252

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Mathias Rudolph

M. Sc. Paul Gallin (HTWK Leipzig)

Leipzig, 05.10.2020 – 22.03.2021

***Thema für eine Masterarbeit:***

**„Aufbau eines Laborversuchsstandes zur Simulation von Umwelteinflüssen auf die Effizienz von Solaranlagen“**

***Bearbeiter: B. Eng. Florian Senft***

In heutzutage gängigen Konzepten für Photovoltaikanlagen werden mehrere Module seriell zu sogenannten Strängen fest zusammengeschaltet, um die gewünschte Anlagenleistung zu realisieren. Der Strangstrom, und damit auch die Strangleistung, werden stets durch das leistungsschwächste Modul begrenzt, was insbesondere bei inhomogen bestrahlten Dachanlagen von Nachteil ist.

Ein Ansatz zur Umgehung dieses Problems besteht darin, anstelle einer festen Modulkonstellation eine variable Verschaltung der Einzelmodule zu realisieren, die von den jeweils aktuellen Bestrahlungsszenarien und den daraus resultierenden Moduleinzelleistungen abhängt. Somit können beispielsweise die leistungsstärkeren Module zu einem „guten“ und die schwächeren zu einem „schlechten“ Strang entsprechend neu konfiguriert und damit die Gesamtleistung der Anlage optimiert werden

Das Ziel der studentischen Arbeit ist die Erweiterung eines entsprechenden Laborversuchsstandes um Versuchsszenarien inhomogener Bestrahlung. Hierzu wird eine miniaturisierte Photovoltaikanlage, bestehend aus mehreren auf zwei Strings verschalteten Solarzellen, um eine regelbare Lichtquelle (Sonnensimulator) ergänzt. Mittels der so individuell ansteuerbaren Beleuchtung der Solarzellen sollen sich verschiedene Effekte, wie z. B. vorüberziehende Wolken, auf die Leistung der Photovoltaikanlage simulieren lassen. Weiterhin soll im Zuge der multimedialen Aufbereitung des Versuchsstandes dieser an einen Webservice angeschlossen und per Fernzugriff nutzbar gemacht werden. Die diesbezüglichen Arbeitsschritte umfassen insbesondere die drahtlose Anbindung der Versuchstandelektronik sowie die softwaretechnische Implementierung eines Webserver mit entsprechender Benutzerführung.

Die studentische Arbeit lässt sich in folgende Schwerpunkte untergliedern:

- mechanischer und elektrischer Zusammenbau der Versuchstand-Hardware (Lichtquelle)
- Auswahl und Implementierung geeigneter Funkelektronik zur Anbindung an einen Webservice
- Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster für dachbasierte Solaranlageninstallationen
- Implementierung eines Webserver mit Benutzerführung zum drahtlosen Zugriff auf den Versuchstand
- Diskussion der Ergebnisse und Optimierung der gefundenen Lösungen
- Dokumentation der Ergebnisse

Als Ergebnis der Arbeit wird ein Versuchsstand zur Darstellung von Verschattungseffekten auf Solaranlagen erwartet. Als Hauptkriterium zur Bewertung der Lösung wird die Handlichkeit und Robustheit des applizierten Aufbaus herangezogen. Die entwickelte Software zur Webanbindung ist anwenderfreundlich (Dialogeingabe mit Benutzerführung) so aufzubereiten, dass ein weitergehender Einsatz zu Demonstrationszwecken in den Bereichen Lehre und Forschung möglich ist. Zur Bedienung ist eine Benutzeranleitung vorzulegen.

Im schriftlichen Teil der Arbeit sind die theoretischen Grundlagen in komprimierter Form auf-zubereiten sowie die erzielten Untersuchungsergebnisse in anschaulicher Form dar-zulegen.

**Hochschulbetreuer:** Prof. Dr.-Ing. M. Rudolph, FING  
Tel. 0341 3076-4150  
E-Mail: [mathias.rudolph@htwk-leipzig.de](mailto:mathias.rudolph@htwk-leipzig.de)

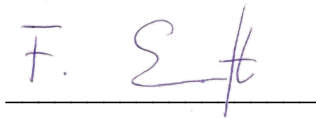
**Zweitbetreuer:** M. sc. Paul Gallin, FING  
Tel. 0341 3076-4252  
E-Mail: [paul.gallin@htwk-leipzig.de](mailto:paul.gallin@htwk-leipzig.de)

## **Eigenständigkeitserklärung**

### Erklärung

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Masterarbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde.

Leipzig, den 22.03.2021

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'F. Senft', is written over a horizontal line.

Florian Senft



## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                      |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Eigenständigkeitserklärung                                                                                           | IV     |
| Abbildungsverzeichnis                                                                                                | VII    |
| Tabellenverzeichnis                                                                                                  | IX     |
| Formelzeichenverzeichnis                                                                                             | X      |
| Abkürzungsverzeichnis                                                                                                | XII    |
| 1 Einleitung                                                                                                         | - 13 - |
| 2 Stand der Wissenschaft und Technik                                                                                 | - 15 - |
| 3 Theoretische Grundlagen                                                                                            | - 19 - |
| 3.1 elektrische Beschreibung einer idealen Solarzelle                                                                | - 19 - |
| 3.2 Charakteristische Merkmale der Sonneneinstrahlung                                                                | - 22 - |
| 3.2.1 Unterscheidung in lichttechnische und strahlungstechnische Größen                                              | - 22 - |
| 3.2.2 Einflussfaktoren der Sonneneinstrahlung                                                                        | - 22 - |
| 3.2.3 Sonneneinstrahlung in Leipzig                                                                                  | - 31 - |
| 3.3 Einfluss der Solarmodul-Montage                                                                                  | - 36 - |
| 4 Aufbau des Versuchsstandes                                                                                         | - 43 - |
| 4.1 Bestehende Vorarbeiten                                                                                           | - 43 - |
| 4.2 Mechanischer Aufbau                                                                                              | - 44 - |
| 4.3 Elektronischer Aufbau                                                                                            | - 47 - |
| 4.4 Kommunikationstechnischer Aufbau                                                                                 | - 55 - |
| 4.4.1 Eingesetzte Kommunikationsprotokolle                                                                           | - 55 - |
| 4.4.2 kommunikationstechnische Komponenten                                                                           | - 57 - |
| 4.5 Zusammenfassung Gesamtkonzept                                                                                    | - 62 - |
| 5 Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster                                                                      | - 64 - |
| 5.1 Erläuterung der nachgebildeten Beleuchtungsmuster                                                                | - 64 - |
| 5.1.1 Auswahl der Verschattung einzelner LED-Lampen                                                                  | - 64 - |
| 5.1.2 Szenarienbasierte Nachbildung exemplarischer<br>Beleuchtungsmuster für dachbasierte Solaranlageninstallationen | - 65 - |
| 5.2 Realisierung mittels Node-Red                                                                                    | - 71 - |
| 6 Evaluierung und Diskussion der Ergebnisse                                                                          | - 77 - |

|     |                                                           |        |
|-----|-----------------------------------------------------------|--------|
| 7   | Optimierungsansätze                                       | - 84 - |
| 7.1 | Optimierungsansätze des kommunikationstechnischen Aufbaus | - 84 - |
| 7.2 | Optimierungsansätze der nachgebildeten Beleuchtungsmuster | - 84 - |
| 8   | Zusammenfassung und Ausblick                              | - 86 - |
| 9   | Literaturverzeichnis                                      | - 88 - |
| 10  | Anhang                                                    | - 92 - |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                       |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Abbildung 1 – Prinzipskizze Masterarbeit [37]                                                                                                         | - 14 - |
| Abbildung 2 – Übersicht der möglichen Anlagentopologien [25]                                                                                          | - 17 - |
| Abbildung 3 – Kennlinie, Symbol und vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Solarzelle [22]                                                              | - 19 - |
| Abbildung 4 – Einfluss der Bestrahlungsstärke $E$ auf die Kennlinie einer Solarzelle [34]                                                             | - 21 - |
| Abbildung 5 – Einfluss der Temperatur auf die Kennlinie einer Solarzelle [34]                                                                         | - 21 - |
| Abbildung 6 – Monatsmittelwerte der Linke-Trübungsfaktoren                                                                                            | - 23 - |
| Abbildung 7 – Zusammensetzung und Entstehung der Globalstrahlung [22]                                                                                 | - 24 - |
| Abbildung 8 – Stunden-Strahlungssummen eines sonnigen (links) und bedeckten (rechts) Sommertages in Braunschweig [22]                                 | - 24 - |
| Abbildung 9 – Sonnendeklination $\delta$ im Jahresverlauf [22]                                                                                        | - 25 - |
| Abbildung 10 – Winkelbeziehungen des Sonnenstandes mit Sonnenhöhe $\gamma_S$ und Sonnenazimut $\alpha_S$ ; Definition Sonnenazimut [34]               | - 26 - |
| Abbildung 11 – Sonnenbahndiagramm für Leipzig nach [21]                                                                                               | - 27 - |
| Abbildung 12 – Durchqueren der Globalstrahlung durch die Atmosphäre bei auftretender Bewölkung [38]                                                   | - 29 - |
| Abbildung 13 – horizontale Beleuchtungsstärken bei klarem Himmel für verschiedene Linke-Trübungsfaktoren in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe nach [7]- | 30 -   |
| Abbildung 14 – horizontale Globalstrahlung bei bedecktem Himmel für $51^\circ$ nördliche Breite in Abhängigkeit von Jahres- und Tageszeit [7]         | - 31 - |
| Abbildung 15 – Vergleich realer Messwerte mit theoretisch zu erwartenden Werten bei ganztägig bedecktem Himmel in Leipzig                             | - 34 - |
| Abbildung 16 – Vergleich der realen Messwerte mit theoretisch zu erwartenden Werten bei ganztägig klarem Himmel in Leipzig                            | - 35 - |
| Abbildung 17 – Mittelwerte aus realen Messdaten von 2007 – 2018 sowie theoretische Werte bedeckter/ klarer Himmel für Leipzig                         | - 36 - |
| Abbildung 18 – Zusammensetzung der Strahlung bei geneigt montierten Solarmodule nach [22]                                                             | - 37 - |
| Abbildung 19 – Einfluss der Solarmodul-Neigung auf die Direktstrahlung nach [22]                                                                      | - 37 - |

|                                                                                                                                         |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Abbildung 20 – Tagesgänge der Globalstrahlung bei klarem Himmel im Juni<br>für eine Neigung von 30° und verschiedene Ausrichtungen [38] | - 39 - |
| Abbildung 21 – relative jährliche Summe der Globalstrahlung in Berlin in<br>Abhängigkeit von Ausrichtung                                | - 40 - |
| Abbildung 22 – Bestimmung des Sonneneinfallswinkels auf eine geneigte Ebene [34]                                                        | - 41 - |
| Abbildung 23 – Orientierungsverteilung in 1°-Schritten der Dachfläche<br>von Ein-Wohneinheiten-Häusern in Sachsen [2]                   | - 42 - |
| Abbildung 24 – Prinzipskizze einer einzelnen Beleuchtungseinheit nach [43]                                                              | - 43 - |
| Abbildung 25 – Konstruktion des Versuchsstandes                                                                                         | - 45 - |
| Abbildung 26 – realisierter Versuchsstand mit elektronischem und mechanischem<br>Aufbau                                                 | - 45 - |
| Abbildung 27 – Baugruppe zur Lichtemission und Fokussierung                                                                             | - 46 - |
| Abbildung 28 – Dimmen mittels 1-10 V-Schnittstelle und Potentiometer                                                                    | - 48 - |
| Abbildung 29 – SPI-Verbindung als Daisy-Chain-Konfiguration [23]                                                                        | - 50 - |
| Abbildung 30 – Prinzipskizze Ansteuerung LED-Treiber mittels externem<br>Spannungssignal                                                | - 50 - |
| Abbildung 31 – Ausschnitt aus der Ansteuer-Schaltung für eine LED<br>mit Digital-Potentiometer und OPV-Schaltung                        | - 52 - |
| Abbildung 32 – Zusammenhang Steuerspannung UT und Potentiometer-Stufe n                                                                 | - 53 - |
| Abbildung 33 – Prinzipskizze kommunikationstechnischer Aufbau                                                                           | - 58 - |
| Abbildung 34 – Grundprinzip Kommunikation über MQTT                                                                                     | - 59 - |
| Abbildung 35 – Ablaufdiagramm Mikrocontroller-Skript                                                                                    | - 62 - |
| Abbildung 36 – GUI zur Auswahl der Verschattung einzelner LED-Lampen                                                                    | - 65 - |
| Abbildung 37 – GUI zur Auswahl der implementierten Szenarien                                                                            | - 66 - |
| Abbildung 38 – Tagesgänge der normierten Globalstrahlung für<br>verschiedene Himmelszustände und Zeitpunkte im Jahr                     | - 68 - |
| Abbildung 39 – Node-Red-Programmfluss zur Verschattung einzelner LED-Lampen                                                             | - 73 - |
| Abbildung 40 – 1. Teil Node-Red-Programmfluss zur szenarienbasierten<br>Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster                   | - 74 - |
| Abbildung 41 – 2. Teil Node-Red-Programmfluss zur szenarienbasierten<br>Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster                   | - 75 - |

|                                                                                                                          |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Abbildung 42 – 3. Teil des Programmflusses: kommunikationstechnische<br>Verarbeitung der berechneten Potentiometer-Werte | - 76 - |
| Abbildung 43 – Lichtspots bei abgedunkeltem Raum und Verschattungsgrad 90 %                                              | - 78 - |
| Abbildung 44 – Messaufbau zur Ermittlung der Solarmodulkennlinien                                                        | - 79 - |
| Abbildung 45 – Kennlinien des vermessenen Solarmoduls in<br>Abhängigkeit des Verschattungsgrads                          | - 80 - |
| Abbildung 46 – Kennlinien des vermessenen Solarmoduls in Abhängigkeit<br>von der Betriebsdauer                           | - 82 - |

## **Tabellenverzeichnis**

|                                                                                                                                                     |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Tabelle 1 – Erläuterungen verschiedener Bedeckungsgrade nach [5]                                                                                    | - 29 - |
| Tabelle 2 – Jahre mit ganztägigen Idealzuständen klarer bzw. bedeckter Himmel<br>am 21. März/ 21. Juni/ 21. September/ 21. Dezember                 | - 32 - |
| Tabelle 3 – Albedo-Werte für verschiedenen Materialien [22]                                                                                         | - 38 - |
| Tabelle 4 – benötigter Verstärkungsfaktor $v$ in Abhängigkeit von $R1$                                                                              | - 51 - |
| Tabelle 5 – Überblick über die verwendete elektronischen Komponenten                                                                                | - 54 - |
| Tabelle 6 – DoD-Schichtenmodell nach [8]                                                                                                            | - 55 - |
| Tabelle 7 – Prozesskette zum Ausführen eines Dimmbefehls                                                                                            | - 63 - |
| Tabelle 8 – ermittelte MPP-Parameter, Kurzschlussstrom und<br>Leerlaufspannung für verschiedene Verschattungsgrade des<br>vermessenen Solarmoduls   | - 80 - |
| Tabelle 9 – ermittelte MPP-Parameter, Kurzschlussstrom und<br>Leerlaufspannung in Abhängigkeit von der Betriebsdauer                                | - 82 - |
| Tabelle 10 – ermittelte MPP-Parameter, Kurzschlussstrom und<br>Leerlaufspannung für verschiedene Verschattungsgrade der<br>benachbarten Solarmodule | - 83 - |

## Formelzeichenverzeichnis

|                |     |                                                                                                |
|----------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_H$          | ... | Flächeninhalt einer horizontalen Fläche [m <sup>2</sup> ]                                      |
| $A_{gen}$      | ... | Flächeninhalt einer geneigten Fläche [m <sup>2</sup> ]                                         |
| $ALB$          | ... | Albedo-Wert                                                                                    |
| $E_0$          | ... | extraterrestrische Solarstrahlung (1367 W/m <sup>2</sup> )                                     |
| $E_{Diff,hor}$ | ... | Diffusstrahlung auf horizontaler Fläche [W/m <sup>2</sup> ]                                    |
| $E_{Diff,gen}$ | ... | Diffusstrahlung auf geneigter Fläche [W/m <sup>2</sup> ]                                       |
| $E_{Diff}$     | ... | Diffusstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]                                                            |
| $E_{Dir,gen}$  | ... | Direktstrahlung auf geneigter Fläche [W/m <sup>2</sup> ]                                       |
| $E_{Dir,hor}$  | ... | Direktstrahlung auf horizontaler Fläche [W/m <sup>2</sup> ]                                    |
| $E_{Dir}$      | ... | Direktstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]                                                            |
| $E_{G,gen}$    | ... | Globalstrahlung auf geneigter Fläche [W/m <sup>2</sup> ]                                       |
| $E_e$          | ... | Bestrahlungsstärke [W/m <sup>2</sup> ]                                                         |
| $E_G$          | ... | Globalstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]                                                            |
| $E_{Gbedeckt}$ | ... | Globalstrahlungsstärke bei bedecktem Himmel [W/m <sup>2</sup> ]                                |
| $E_{norm}$     | ... | auf maximal auftretende Globalstrahlung normierter Wert der nachzubildenden Globalstrahlung    |
| $E_{Ref,gen}$  | ... | reflektierte Strahlung auf geneigter Fläche [W/m <sup>2</sup> ]                                |
| $E_v$          | ... | Beleuchtungsstärke [lm/m <sup>2</sup> ]                                                        |
| $I$            | ... | Zellstrom [A]                                                                                  |
| $I_D$          | ... | Strom durch die Diode [A]                                                                      |
| $I_K$          | ... | Kurzschlussstrom [A]                                                                           |
| $I_{MPP}$      | ... | Strom am MPP einer Solarzelle [A]                                                              |
| $I_{Ph}$       | ... | Photostrom [A]                                                                                 |
| $I_S$          | ... | Sättigungsstrom in Sperrrichtung [A]                                                           |
| $K_m$          | ... | Höchstwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents                                            |
| $m$            | ... | Idealitätsfaktor (zur besseren Nachbildung realer Solarzellen, übliche Werte zwischen 1 und 2) |
| $n$            | ... | Potentiometer-Stufe                                                                            |

|                     |     |                                                         |
|---------------------|-----|---------------------------------------------------------|
| $P_{MPP}$           | ... | Leistung am MPP einer Solarzelle [W]                    |
| $T_L$               | ... | Linke-Trübungsfaktor                                    |
| $U$                 | ... | Zellspannung [V]                                        |
| $U_1$               | ... | Potentiometer-Spannung [V]                              |
| $U_L$               | ... | Leerlaufspannung [V]                                    |
| $U_{MPP}$           | ... | Spannung am MPP einer Solarzelle [V]                    |
| $U_T$               | ... | Steuerspannung zur Dimmansteuerung LED-Treiber [V]      |
| $U_{Th}$            | ... | thermische Diodenspannung (bei 25°C $U_{Th} = 25,7$ mV) |
| $V$                 | ... | Augenempfindlichkeit                                    |
| $v$                 | ... | Verstärkungsfaktor                                      |
| $\Phi_e$            | ... | Bestrahlungsleistung [W]                                |
| $\Phi_v$            | ... | Lichtstrom [lm]                                         |
| $\alpha_S$          | ... | Sonnenazimut [°]                                        |
| $\gamma_{S_{max}}$  | ... | maximale jährliche Sonnenhöhe [°]                       |
| $\gamma_{S_{min}}$  | ... | minimale jährliche Sonnenhöhe [°]                       |
| $\gamma_E$          | ... | Neigungswinkel [°]                                      |
| $\gamma_{S,Mittag}$ | ... | mittägliche Sonnenhöhe [°]                              |
| $\gamma_S$          | ... | Sonnenhöhe (Elevation) [°]                              |
| $\theta_{gen}$      | ... | Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung                   |
| $\delta$            | ... | Sonnendeklination [°]                                   |
| $\lambda$           | ... | Wellenlänge [nm]                                        |
| $\varphi$           | ... | geografische Breite (Breitengrad) [°]                   |
| $\Lambda$           | ... | geografische Länge (Längengrad) [°]                     |

## **Abkürzungsverzeichnis**

|       |                                                                |
|-------|----------------------------------------------------------------|
| BLE   | Bluetooth Low Energy                                           |
| CS    | Chip Select                                                    |
| CSS   | Cascading Style Sheets                                         |
| CSV   | Comma-separated values                                         |
| DoD   | Department of Defense – Verteidigungsministerium der USA       |
| DWD   | Deutscher Wetterdienst                                         |
| EWEH  | Ein-Wohneinheiten-Haus                                         |
| GUI   | graphical user interface – grafische Benutzeroberfläche        |
| HTML  | Hypertext Markup Language                                      |
| HTTP  | Hypertext Transfer Protocol                                    |
| HTTPS | Hypertext Transfer Protocol Secure                             |
| MEZ   | Mitteleuropäische Zeit                                         |
| MPP   | Maximum-Power-Point – optimaler Betriebspunkt einer Solarzelle |
| MQTT  | Message Queuing Telemetry Transport                            |
| OPV   | Operationsverstärker                                           |
| PDIP  | Plastic Dual in-line package                                   |
| SCK   | Serial Clock                                                   |
| SI    | Serial Data Input                                              |
| SMD   | Surface-mounted device – oberflächenmontiertes Bauelement      |
| SMTP  | Simple Mail Transfer Protocol                                  |
| SMU   | Source Measure Unit – elektronisches Multifunktionsgerät       |
| SO    | Serial Data Output                                             |
| SPI   | Serial Peripheral Interface                                    |
| WLAN  | Wireless Local Area Network – drahtloses lokales Netzwerk      |
| WOZ   | wahre Ortszeit                                                 |



# 1 Einleitung

## Ausgangssituation

Der aktuell übliche Ansatz zur Realisierung der gewünschten Anlagenleistung von Photovoltaikanlagen besteht in der seriellen Verschaltung mehrerer Solarmodule zu sogenannten Strängen. In einer solchen Reihenschaltung ist der Strangstrom konstant. Durch die feste Verschaltung wird der Strangstrom auf den Strom des leistungsschwächsten Solarmoduls begrenzt und die gesamte Strangleistung reduziert. Insbesondere bei inhomogen bestrahlten Dachanlagen entstehen durch die großen Leistungsunterschiede zwischen den einzelnen Solarmodulen erhebliche Ertragsminderungen der Solaranlage.

## Problemstellung

Ein Ansatz zur Umgehung dieser Problemlage stellt, anstatt dem Einsatz einer fixen Konfiguration, die Realisierung einer variablen Verschaltung der Solarmodule dar, welche abhängig von der momentanen Einzelleistung des Solarmoduls verändert werden kann. Auf dieser Basis können bspw. die leistungsstärkeren Solarmodule zu einem „guten“ und die leistungsschwächeren Solarmodule zu einem „schlechten“ Strang kombiniert werden, wodurch eine Optimierung der Gesamtleistung der Solaranlage erfolgt. Diese Problemstellung soll multimedial als Laborversuchsstand aufbereitet werden.

## Zielstellung

Das Ziel dieser Masterarbeit besteht in der Erweiterung eines Laborversuchsstandes zur Darstellung von Verschattungseffekten auf Solaranlagen. Dazu wird eine bestehende miniaturisierte Photovoltaikanlage, welche aus mehreren, variabel auf zwei Strängen verschaltbaren Solarmodulen besteht, um eine regelbare Lichtquelle als Sonnensimulator ergänzt.

Anhand der individuell steuerbaren Lichtzufuhr und des damit verbundenen Energieeintrags der Beleuchtung sollen unterschiedliche Effekte inhomogener Bestrahlung wie z.B. die Verschattung einzelner Solarmodule auf die Leistung der Gesamtanlage nachgebildet werden. Zudem soll der Versuchsstand an einen Webservice angeschlossen werden und über einen Fernzugriff inklusive Benutzerführung verfügen.

Abbildung 1 veranschaulicht den Fokus dieser Masterarbeit auf die individuell ansteuerbare Beleuchtung. Die restlichen dargestellten Elemente stellen die Teile des zuvor bestehenden Versuchsstands zur variablen Modulverschaltung dar.

## Lösungsansatz

Die Realisierung des Versuchsstandes lässt sich in die folgenden Arbeitsschritte untergliedern: Zunächst hat eine Konstruktion des Versuchsstandes aufbauend auf den Vorarbeiten im Rahmen des Masterprojekts zu erfolgen. Des Weiteren ist eine elektronische Schaltung zur individuellen Ansteuerung der Beleuchtung der miniaturisierten Solarmodule zu erstellen. Auf dieser Basis kann der mechanische und elektrische Zusammenbau der Versuchstand-Hardware realisiert werden.

Es ist eine geeignete Funkelektronik zur Anbindung der Beleuchtungsansteuerung an einen Webservice zu implementieren. Für einen drahtlosen Fernzugriff auf den Versuchsstand soll zudem die softwareseitige Einrichtung eines Webserver inklusive entsprechender Benutzerführung erfolgen.

Auf Grundlage dieser Arbeiten sollen abschließend exemplarische Beleuchtungsmuster für dachbasierte Solaranlageninstallationen nachgebildet werden.

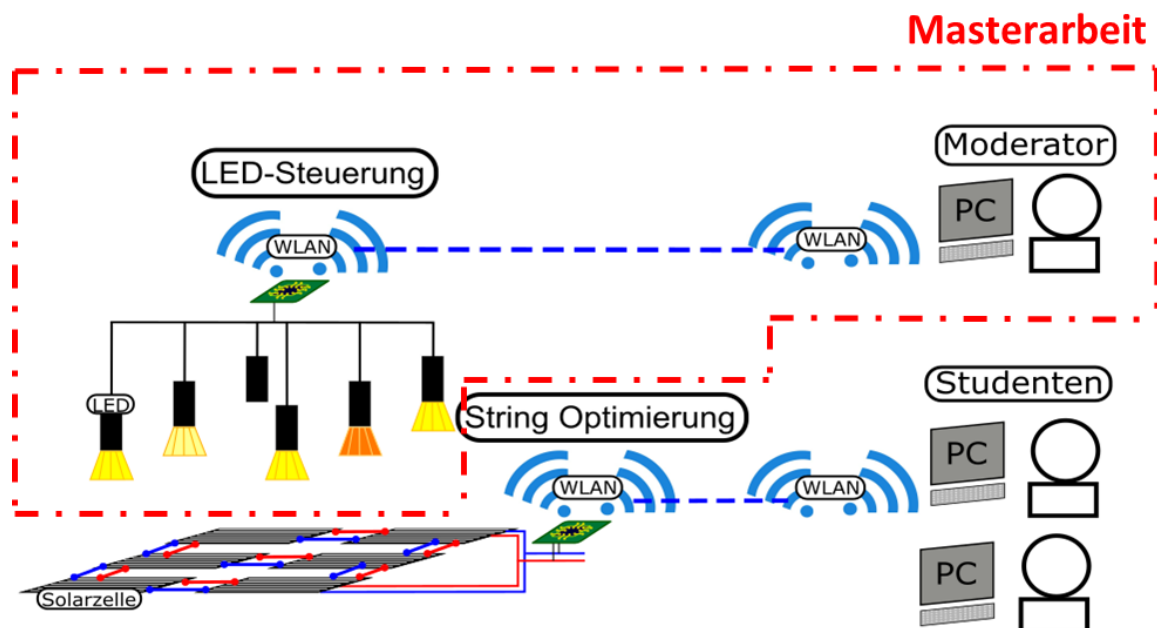


Abbildung 1 – Prinzipskizze Masterarbeit [37]

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Eine Solaranlage besteht aus mehreren Solarmodulen, welche in der am einfachsten denkbaren Konfiguration in Reihe zu einem Strang zusammengeschaltet sind. Bei einer solchen Reihenschaltung wird der Strangstrom und damit direkt zusammenhängend die Strangleistung durch das leistungsschwächste Modul begrenzt. Das bedeutet, dass bei inhomogenen Leistungsverteilungen ein einzelnes, leistungsschwaches Solarmodul deutliche Ertragseinbußen der gesamten Solaranlage verursacht.

Die Leistungsreduktion eines einzelnen Solarmoduls kann durch eine Vielzahl verschiedener Ursachen hervorgerufen werden. Es können zum einen Fehler durch Planung, Fertigung oder Montage entstehen. So ist es denkbar, dass eine Anlage mit einer suboptimalen Anlagenkonfiguration sowie mit Material-, Bauteil- oder Montagefehlern installiert wird. Geringe Leistungsunterschiede zwischen den Solarmodulen können des Weiteren durch Fertigungstoleranzen, dem sogenannten Mismatching, bedingt sein. [47] [14]

Andererseits können betriebsbedingte Faktoren zu einer inhomogenen Minderung der Solarmodulleistungen einer Anlage führen. Die Ursache besteht zumeist in einer teilweisen oder kompletten Verschattung einzelner Solarmodule, welche die lokalen Bestrahlungsstärken unterschiedlich stark verringert. [34]

Ein einzelnes Solarmodul besteht üblicherweise aus 36 bis 72 in Reihe geschalteten Solarzellen. Wird nur eine dieser Solarzellen verschattet, wird der gesamte Modulstrom auf die Stromstärke der verschatteten Solarzelle begrenzt. Um die aus der Verschattung einzelner Solarzellen resultierenden Leistungsverluste zu minimieren, werden Bypassdioden eingesetzt, welche die entsprechenden Solarzellen überbrücken. Ein weiterer Grund zum Einsatz von Bypassdioden besteht in der Verhinderung einer thermischen Zerstörung der Solarzellen, welche bei starker Verschattung einzelner Solarzellen bei gleichzeitig hohen Bestrahlungsstärken auftreten würde. [22] [34]

Die Teilverschattung eines Solarmoduls kann durch Verschmutzungen wie bspw. Vogelexkrementen, Moos- und Algenbewuchs oder witterungsbedingt durch Schnee hervorgerufen werden. Eine Verschattung kann zudem durch Objekte in der Umgebung der Solaranlage verursacht werden. Nahe Objekte, z.B. Schornsteine, Dachgauben oder Blitzschutzstangen, werfen einen harten Kernschatten, welcher zu einer lokal starken Verringerung der Bestrahlungsstärke führt. Weiter entfernte Objekte, wie bspw. Bäume oder benachbarte Häuser, können hingegen einen diffusen Schatten verursachen. Dieser resultiert in einer vergleichsweise großflächigen und weniger starken Reduzierung der Bestrahlungsstärke. [34] [47] [22]

All die zuvor beschriebenen Faktoren können dazu führen, dass die Solarzellen nicht an ihrem idealen Betriebspunkt, dem Maximum-Power-Point (MPP), arbeiten und nicht den, bei den

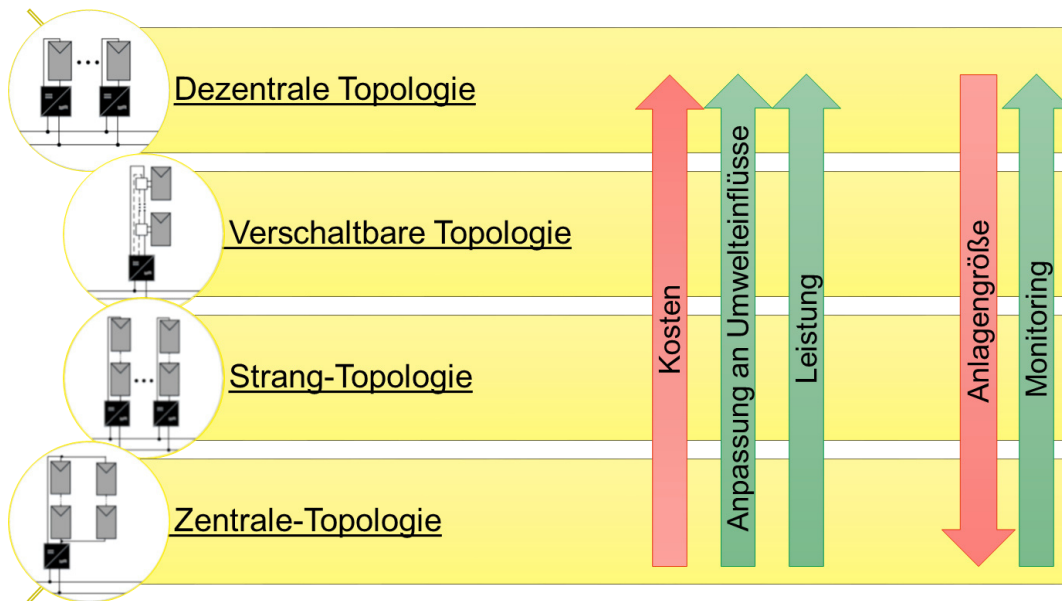
vorliegenden Bestrahlungsstärken, maximal möglichen Ertrag erbringen. Eine Erläuterung der charakteristischen Solarzellen-Kennlinien inklusive des MPPs erfolgt in Kapitel 3.1.

Abbildung 2 zeigt verschiedene Anlagentopologien, nach denen Solarmodule zu einer gesamten Solaranlage verschaltet werden können. Die Gemeinsamkeit aller Topologien besteht darin, dass mindestens ein Wechselrichter die Einspeisung des Gleichstroms der Solaranlage in das mit Wechselstrom betriebene öffentliche Stromnetz ermöglicht. Eine weitere Aufgabe des Wechselrichters stellt das Betreiben der angeschlossenen Solarmodule an deren jeweiligen MPPs dar. [34]

Die zuverlässigste und kostengünstigste Verschaltung bezüglich der Investitionskosten weist die zentrale Topologie auf. Dabei werden die Solarmodule zu einem Strang in Reihe geschaltet oder auf mehrere parallele Teilstränge verteilt und mit einem zentralen Wechselrichter verbunden. Der Nachteil dieser Variante besteht in großen Ertragseinbußen bei inhomogenen Leistungsverteilungen zwischen den Solarmodulen eines Stranges. [24]

Eine weitere Möglichkeit zur Verschaltung der Solarmodule besteht mit der Strang-Topologie, bei der die Stränge entkoppelt werden und jeweils einen eigenen Wechselrichter besitzen. Eine inhomogene Leistungsverteilung der Solarmodule beeinflusst bei der Strang-Topologie nur den Ertrag des Strangs, sodass die Auswirkungen auf den Gesamtertrag der Solaranlage verringert werden. Zudem können unterschiedliche Modulleistungen bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden und Solarmodule gleicher Leistungsklassen zu einem Strang zusammengefasst werden. Auf diese Weise können Solaranlagen mit zeitweise teilverschatteten Solarmodulen sowie voneinander abweichenden Ausrichtungen und Neigungswinkeln realisiert werden. [24]

Die optimale Anpassung an eine inhomogene Leistungsverteilung der Solarmodule wird durch die dezentrale Topologie erreicht, bei der jedes Solarmodul einen eigenen Wechselrichter besitzt. Dadurch werden eine sehr flexible Anlagenplanung und eine einfache Erweiterbarkeit einer bestehenden Solaranlage ermöglicht. Jedes Modul wird am MPP betrieben, sodass die negativen Effekte einer inhomogenen Leistungsverteilung eliminiert werden. Zudem kann ein Monitoring jedes einzelnen Solarmoduls erfolgen. Der Nachteil besteht in hohen zusätzlichen Investitionskosten und eines geringeren Wirkungsgrads der Wechselrichter. [24] [34]



**Abbildung 2 – Übersicht der möglichen Anlagentopologien [25]**

Die bisher vorgestellten Anlagentopologien und Optimierungsmöglichkeiten stellen den aktuellen Stand der Technik bei der Installation von Solaranlagen dar. Darüber hinaus sind verschaltbare Anlagentopologien wie bspw. ein Zwei-Leiter-System möglich, welche einen Gegenstand der Forschung darstellen und nicht im Praxiseinsatz verbreitet sind. [24]

Bei dem Zwei-Leiter-System können die Solarmodule variabel auf einen von zwei Strängen geschaltet werden. Damit kann in Abhängigkeit von den aktuellen Modulleistungen ein „guter“ Strang der leistungstärkeren Solarmodule und ein „schlechter“ Strang der schwächeren Module gebildet werden. Der theoretische Vorteil besteht in geringeren Kosten gegenüber der dezentralen Topologie bei gleichzeitig höheren Erträgen im Vergleich mit der Strang-Topologie. Der Nachteil besteht in dem zusätzlichen Verkabelungsaufwand für den zweiten Strang. Zudem muss ein geeignetes Verfahren implementiert werden, welches die Solarmodule vermisst, anhand der momentanen Leistung sortiert und die Verschaltung auf die Stränge ermöglicht. Im Rahmen des Forschungsprojekts „String Optimization“ wird an der HTWK Leipzig eine solche variable Verschaltung von Solarmodulen zur Ertragssteigerung von Solaranlagen untersucht. [1] [36]

Inhomogene Leistungsverteilungen zwischen den Solarmodulen besitzen je nach Anlagentopologie unterschiedlich große Auswirkungen auf die Gesamtleistung der Solaranlage. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Laborversuchsstand erstellt, welcher eine dauerhafte Nachbildung unterschiedlicher Bestrahlungszustände ermöglicht und auf diese Weise verschiedene Modulleistungen realisiert. Es können in einem miniaturisierten Maßstab die bei einer Solaranlage aufgrund von individueller Modulverschattung entstehenden Effekte untersucht werden.

Kommerziell erhältliche Sonnensimulatoren, auch Flasher genannt, sind zur Vermessung von Solarmodulen unter vergleichbaren Standardtestbedingungen konzipiert. Als Anforderungen bestehen eine möglichst hohe Übereinstimmung der emittierten Strahlung mit dem Sonnenspektrum sowie eine Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$ . Zudem soll eine homogene Bestrahlung über die gesamte Messfläche und Messdauer hinweg erfolgen. [34] [22]

Als Strahlungsquellen kommen Xenon-Blitzlampen, Xenon-Bogenlampen oder LED-Lampen zum Einsatz. Xenon-Blitzlampen ermöglichen einen Einsatz nur für sehr kurze Zeitspannen als Lichtblitze. Sonnensimulatoren mit Xenon-Bogenlampen oder LED-Lampen können bei konstruktiver Berücksichtigung der hohen Wärmeentwicklung dauerhaft betrieben werden. [34] [49]

Sonnensimulatoren weisen aufgrund der hohen Anforderungen bezüglich des Spektrums sowie der Homogenität der Strahlung große Investitionskosten auf. Es erfolgt eine homogene Bestrahlung der Testfläche. Die Zielstellung des mit dieser Masterarbeit realisierten Versuchsstandes bestand in einem dauerhaft betreibbaren Sonnensimulator für miniaturisierte Solarmodule, welcher über einen Webzugriff eine einzelne Ansteuerung der Bestrahlung jedes einzelnen Solarmoduls ermöglicht.

Deshalb erfolgte der Aufbau eines eigenständig entwickelten Laborversuchsstandes, welcher sich durch die unterschiedlichen Anforderungen im Aufbau deutlich von einem Flasher unterscheidet. Als Strahlungsquellen kommen LED-Lampen aus der gewerblichen Beleuchtungstechnik zum Einsatz.

### 3 Theoretische Grundlagen

#### 3.1 elektrische Beschreibung einer idealen Solarzelle

Eine Solarzelle besteht aus einem n- sowie einem p-dotierten Halbleiter inklusive einer sich dazwischen befindlichen Raumladungszone. Eine unbestrahlte Solarzelle verhält sich wie eine Diode und ist deshalb vereinfacht als Diode beschreibbar. Das Ersatzschaltbild einer idealen bestrahlten Solarzelle wird durch eine parallel zur Diode geschalteten Stromquelle ergänzt und ist in Abbildung 3 ersichtlich. Die Stromquelle erzeugt einen Photostrom  $I_{Ph}$ , der über den Koeffizienten  $c_0$  von der Bestrahlungsstärke  $E_e$  abhängig ist: [34]

$$I_{Ph} = c_0 * E_e \quad (3.1)$$

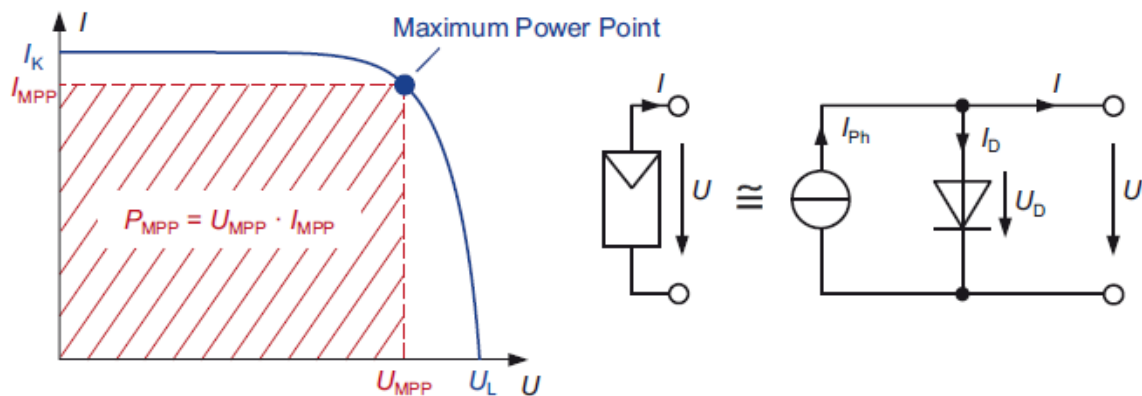


Abbildung 3 – Kennlinie, Symbol und vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Solarzelle [22]

Die typische Kennlinie einer Solarzelle ist in Abbildung 3 dargestellt, welche das Erzeugerzählpfeilsystem verwendet. Dazu wird die Spannung  $U$  an der Energiequelle gemessen und der von der Energiequelle zum Verbraucher fließende Strom positiv gezählt. Die Kennliniengleichung einer idealen Solarzelle lautet wie folgt: [22] [14]

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S * (e^{\frac{U}{m * U_{Th}}} - 1) \quad (3.2)$$

|          |     |                                                                                                |
|----------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I$      | ... | Zellstrom                                                                                      |
| $I_{Ph}$ | ... | Photostrom                                                                                     |
| $I_D$    | ... | Strom durch die Diode                                                                          |
| $I_S$    | ... | Sättigungsstrom in Sperrrichtung                                                               |
| $U$      | ... | Zellspannung                                                                                   |
| $m$      | ... | Idealitätsfaktor (zur besseren Nachbildung realer Solarzellen, übliche Werte zwischen 1 und 2) |
| $U_{Th}$ | ... | thermische Diodenspannung (bei 25°C $U_T = 25,7$ mV)                                           |

Anhand von Abbildung 3 werden einige charakteristische Punkte der Kennlinie ersichtlich:

- Kurzschlussstrom  $I_K$

Wird die Solarzelle kurzgeschlossen, beträgt die Klemmenspannung 0 V und es fließt der Kurzschlussstrom  $I_K$ . Mit Gleichung (3.2) ergibt sich damit:

$$I_K = I(U = 0) = I_{Ph} - I_S(e^0 - 1) = I_{Ph} \quad (3.3)$$

Somit ist der Kurzschlussstrom  $I_K$  gleich dem Photostrom  $I_{Ph}$  und nach Gleichung (3.1) direkt proportional zur Bestrahlungsstärke  $E$ :

$$I_K \sim E. \quad (3.4)$$

- Leerlaufspannung  $U_L$

Beträgt der Strom null, sodass sich die Solarzelle im Leerlauf befindet, liegt die Leerlaufspannung  $U_L$  an. Diese lässt sich durch Umstellen der Gleichung (3.2) und einsetzen von  $I = 0$  wie folgt ermitteln:

$$U_L = U(I = 0) = m * U_T * \ln\left(\frac{I_K}{I_S} + 1\right) \quad (3.5)$$

Unter Berücksichtigung der Formeln (3.1), (3.4) und (3.5) wird erkennbar, dass die Leerlaufspannung abhängig ist vom natürlichen Logarithmus der Bestrahlungsstärke  $E$ :  $U_L \sim \ln E$ . (3.6)

- Maximum-Power-Point (MPP)

Die Leistungsabgabe einer Solarzelle ist nicht immer gleich, sondern es besteht eine Abhängigkeit zum Arbeitspunkt, an dem diese betrieben wird. Der Punkt mit der maximalen Leistung wird als Maximum Power Point (MPP) bezeichnet. Die an einem Arbeitspunkt abgegebene Leistung wird durch die Fläche  $U * I$  repräsentiert. Diese Fläche weist am MPP ihre maximale Größe auf und wird in Abbildung 3 rot hervorgehoben. Sie wird durch die dazugehörigen Strom- und Spannungswerte  $I_{MPP}$  und  $U_{MPP}$  charakterisiert. [22]

Formel (3.1) zeigt die Abhängigkeit des Photostroms und die damit zusammenhängende Solarzellenleistung von der Bestrahlungsstärke. Abbildung 4 verdeutlicht beispielhaft diese Abhängigkeit zwischen der Bestrahlungsstärke  $E_e$  und der Kennlinie einer Solarzelle. Zudem besitzt die Temperatur einen Einfluss auf die Solarzellen-Kennlinie, da u.a. die



Temperaturspannung  $U_{Th}$ , der Sättigungsstrom  $I_s$ , der Photostrom  $I_{ph}$ , die Leerlaufspannung  $U_L$ , sowie der Idealitätsfaktor  $m$  je nach Temperatur verschiedene Werte annehmen. Vereinfacht formuliert, lässt sich feststellen, dass sich mit steigender Temperatur die Leerlaufspannung verringert und der Kurzschlussstrom vergrößert. Die Position des MPPs verändert sich. Dabei weist der Temperaturkoeffizient der Spannung größere Werte als der Koeffizient des Stromes auf, sodass die MPP-Leistung mit wachsender Temperatur sinkt. Diese Leistungsreduktion beträgt bei Silizium-Zellen typischerweise etwa  $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$ . Abbildung 5 zeigt den üblichen Verlauf einer Kennlinie für verschiedene Temperaturen.

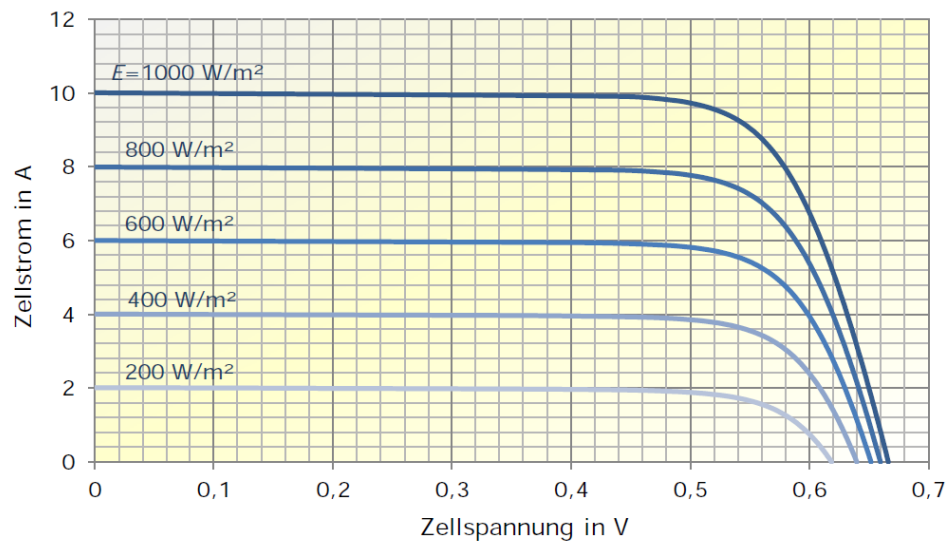


Abbildung 4 – Einfluss der Bestrahlungsstärke  $E$  auf die Kennlinie einer Solarzelle [34]

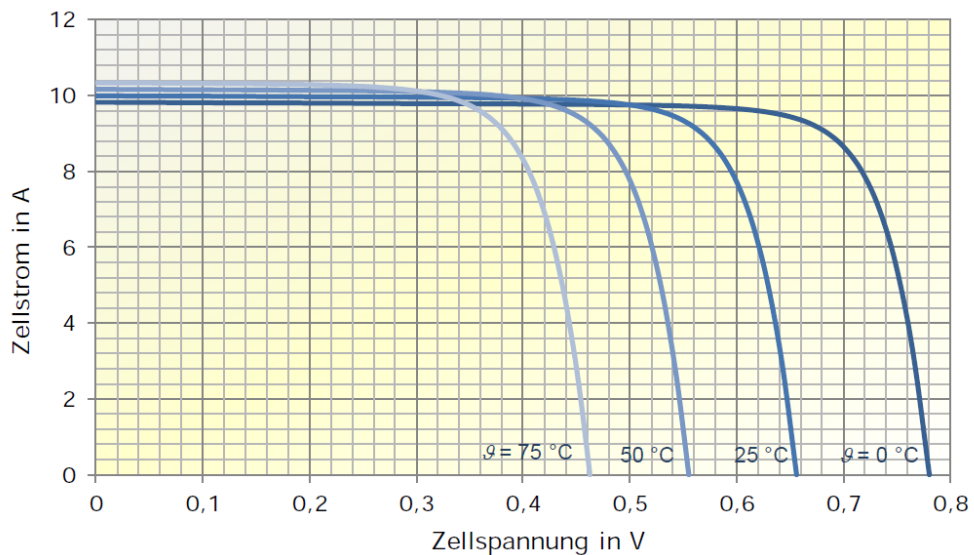


Abbildung 5 – Einfluss der Temperatur auf die Kennlinie einer Solarzelle [34]

## 3.2 Charakteristische Merkmale der Sonneneinstrahlung

### 3.2.1 Unterscheidung in lichttechnische und strahlungstechnische Größen

Als Vorbereitung zu dieser Masterarbeit wurde im Rahmen des Masterprojekts zur Nachbildung der einfallenden Sonneneinstrahlung eine konkrete Auswahl der Beleuchtungstechnik getroffen. Dabei wurden LED-Lampen ausgewählt, welche für den Einsatz als Spot-Beleuchtung in Verkaufsräumen und Museen konzipiert sind. Bei solchen Produkten der kommerziellen Beleuchtungstechnik ist es üblich, Angaben in lichttechnischen Größen wie bspw. den Lichtstrom  $\Phi_v$  in Lumen (lm) oder der Beleuchtungsstärke  $E_v$  in Lux ( $lx = lm/m^2$ ) zu treffen. Im Zusammenhang mit der Sonneneinstrahlung und der Photovoltaik-Technik werden zumeist strahlungstechnische Größen wie Strahlungsleistung  $\Phi_e$  in Watt (W) oder Bestrahlungsstärke  $E_e$  in  $W/m^2$  verwendet. Soweit möglich werden deshalb im weiteren Verlauf der Masterarbeit für einen Sachverhalt sowohl lichttechnische als auch strahlungstechnische Angaben getroffen. [34]

Der Unterschied zwischen dem lichttechnischen und dem strahlungstechnischen Ansatz besteht in der Bewertung der Strahlung. Während bei strahlungstechnischen Größen absolute Werte herangezogen werden, erfolgt bei lichttechnischen Größen eine Wichtung anhand des spektralen Hellempfindlichkeitsgrades des Auges. Zwischen Strahlungsleistung  $\Phi_e$  und Bestrahlungsstärke  $E_e$  besteht für eine monochromatische Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  folgender Zusammenhang: [40]

$$\Phi_v = K_m * V(\lambda) * \Phi_e \quad (3.7)$$

$K_m$  gibt den Höchstwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents wieder, welcher bei Tagessehen 683 lm/W beträgt und bei einer Wellenlänge von 555 nm erreicht wird.  $V(\lambda)$  bildet die Augenempfindlichkeit ab. Eine Strahlungsleistung von 1 W entspricht bei einer Wellenlänge von 555 nm einem Lichtstrom von 683 lm. Mit zunehmender Differenz zur Wellenlänge von 555 nm nimmt der zu einem 1 W äquivalente Lichtstrom ab. Bei Wellenlängen unterhalb von 380 nm oder oberhalb von 780 nm nimmt der Lichtstrom unabhängig von der Strahlungsleistung immer Werte von null an. [40]

### 3.2.2 Einflussfaktoren der Sonneneinstrahlung

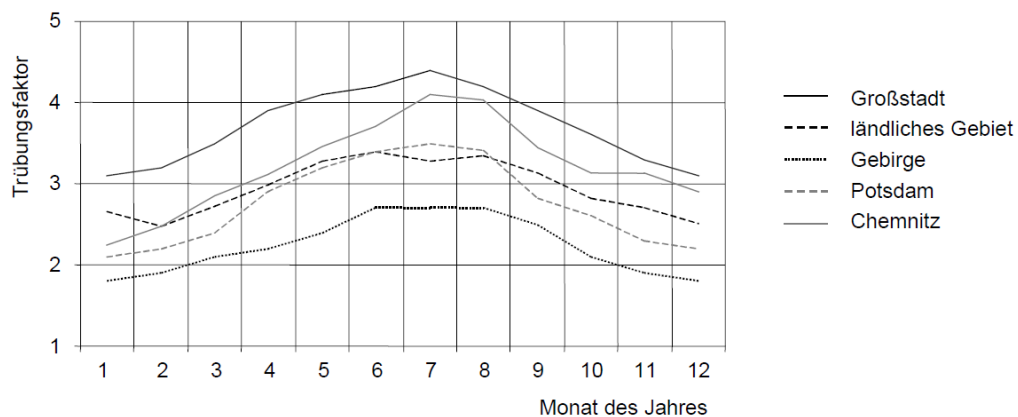
Tritt die Sonnenstrahlung in die Erdatmosphäre ein, wird die Intensität der Strahlung aufgrund von Streuungs-, Reflexions- und Absorptionsvorgängen verringert. Etwa 61% der ursprünglich vor Eintritt in die Atmosphäre vorhandenen Strahlung erreicht die Erdoberfläche als sogenannte Direktstrahlung  $E_{Dir}$ . Ein Teil des restlichen Lichts wird von der Lufthülle reflektiert und von Gasteilchen wie z.B. Wasserdampf, Sauerstoff-Molekülen, Ozon oder Kohlenstoffdioxid absorbiert. Weitere Anteile der Globalstrahlung werden von molekularen

Luftbestandteilen, Staubteilchen oder Verunreinigungen gestreut. Den Erdboden erreichen deshalb aus allen Himmelsrichtungen weitere Strahlungsanteile, welche zur Diffusstrahlung  $E_{\text{Diff}}$  aufsummiert werden. [22] [38]

Die Wirkung der zuvor erwähnten Absorptions- und Streuvorgänge lässt sich mit dem Linke-Trübungsfaktor  $T_L$  beschreiben. Dabei unterliegt der Trübungsfaktor im Jahresverlauf zeitlichen sowie ortsabhängigen Schwankungen, wie Abbildung 6 für verschiedene Siedlungsgebiete und Standorte zeigt. Die auf eine horizontale Ebene eintreffende Bestrahlungsstärke  $E_G$  wird unter Vernachlässigung der Bewölkung nach folgendem Zusammenhang nur durch die Sonnenhöhe  $\gamma_S$  und dem Linke-Trübungsfaktor  $T_L$  beeinflusst: [38]

$$E_G = 0,84 E_0 * \sin \gamma_S * e^{\frac{-0,027 * T_L}{\sin \gamma_S}} \quad (3.8)$$

Es wird dabei eine konstante extraterrestrische Solarstrahlung  $E_0$  in Höhe der Solarkonstante von  $1367 \text{ W/m}^2$  angenommen, welche unter Realbedingungen im Jahresverlauf leichten Schwankungen unterworfen ist. [38]



**Abbildung 6 – Monatsmittelwerte der Linke-Trübungsfaktoren für die Regionen Großstadt, ländliches Gebiet und Gebirge sowie für die Standorte Potsdam und Chemnitz [38]**

Die gesamte Strahlung, welche am Erdboden detektiert werden kann und die für die abgegebene Leistung des Solarmoduls relevant ist, wird als Globalstrahlung  $E_G$  bezeichnet. Diese besteht aus den beiden Komponenten Direktstrahlung  $E_{\text{Dir}}$  und Diffusstrahlung  $E_{\text{Diff}}$ :

$$E_G = E_{\text{Dir}} + E_{\text{Diff}} \quad (3.9)$$

Abbildung 7 verdeutlicht die Zusammensetzung und Entstehung der Globalstrahlung nach den zuvor beschriebenen Vorgängen. [22]

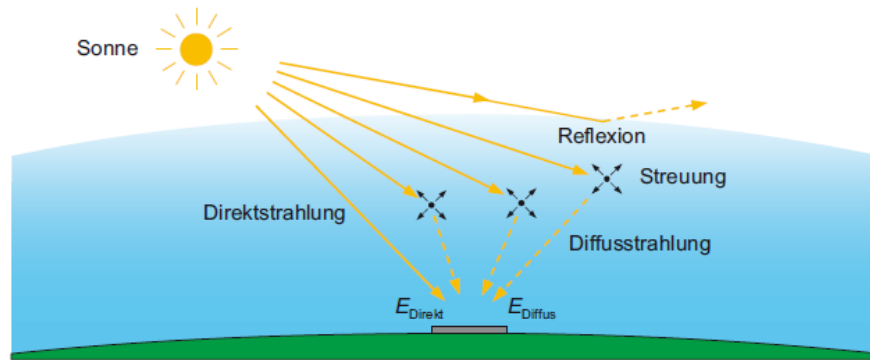


Abbildung 7 – Zusammensetzung und Entstehung der Globalstrahlung [22]

In Deutschland trägt die Diffusstrahlung mit ca. 54 % bis 60 % den etwas größeren Anteil zur Jahressumme der Globalstrahlung bei. Dabei unterscheiden sich die Beiträge der diffusen und direkten Strahlung in Abhängigkeit von der Bewölkung enorm. Abbildung 8 zeigt beispielhaft Tagesgänge von Diffus- und Direktstrahlung für einen sonnigen und einen bedeckten Sommertag. An dem sonnigen Tag steuert die Direktstrahlung etwa 74 % zur Gesamtstrahlung bei, an dem bewölkten Tag hingegen nur etwa 8 %. Dennoch erreicht die Globalstrahlung des bedeckten Tages Werte von ungefähr der Hälfte des sonnigen Sommertages. [22]

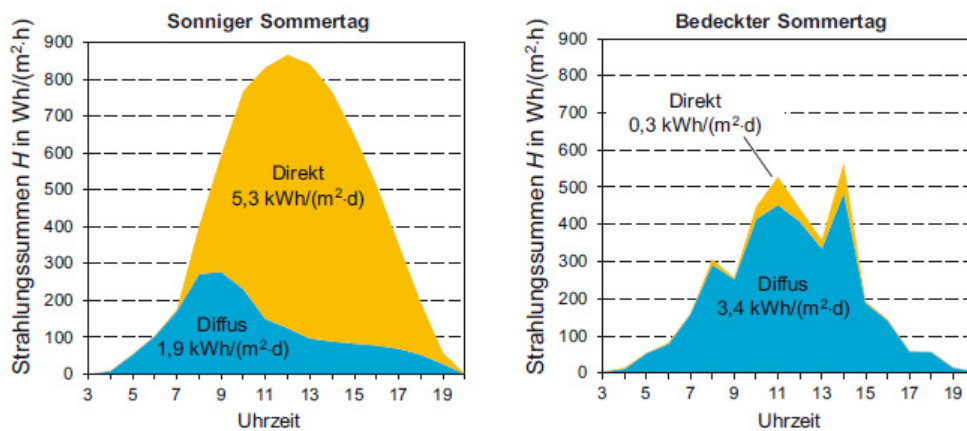


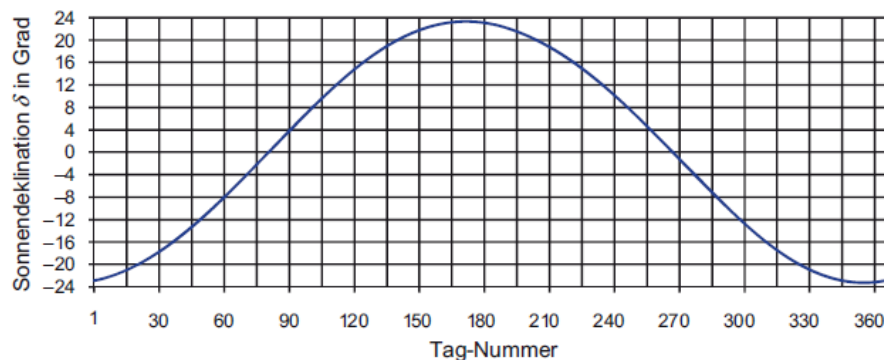
Abbildung 8 – Stunden-Strahlungssummen eines sonnigen (links) und bedeckten (rechts) Sommertages in Braunschweig [22]

Es existiert eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Sonneneinstrahlung. Eine Unterteilung in konkrete Kategorien gestaltet sich schwierig, da die Auswirkungen der Faktoren oft miteinander verbunden sind. So besitzt der Breitengrad eines Ortes als geografischer Parameter eine erhebliche Auswirkung auf die Höhe der Globalstrahlung. Die Ursache dieses Effektes liegt aber in der Neigung der Erdachse und der Bewegung der Erde um die Sonne begründet, welche wiederum, im Zusammenspiel mit der geografischen Breite, Auswirkungen auf die Höhe des Sonnenstandes und die maximale Länge der Sonnenscheindauer eines Tages besitzen. [32]

Dieser Zusammenhang lässt sich folgendermaßen erklären: Die Erde verläuft in einer annähernden Kreisbahn um die Sonne. Da die Erdachse geneigt ist, variiert die Sonnenhöhe eines Ortes im Jahresverlauf. Zwischen astronomischen Frühlings- und Herbstbeginn auf der Nordhalbkugel ist der Nordpol der Sonne zugeneigt, im Herbst und Winter ist der Nordpol von der Sonne abgewandt. Die Mittagshöhe  $\gamma_{S,Mittag}$  der Sonne lässt sich ermitteln durch: [15]

$$\gamma_{S,Mittag} = 90^\circ - \varphi + \delta \quad (3.10)$$

$\varphi$  stellt dabei den Breitengrad eines Ortes.  $\delta$  repräsentiert die Sonnendeklination, welche als Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Himmelsäquator definiert wird. Der Himmelsäquator kann als Kreisfläche und Fortsetzung des Erdäquators nach außen angesehen werden. Er teilt die Himmelskugel in eine nördliche und in eine südliche Halbkugel. Die Erdachse befindet sich im rechten Winkel zum Himmelsäquator. Innerhalb eines Jahres verändert sich die Sonnendeklination  $\delta$ , wie Abbildung 9 zeigt, kontinuierlich. [7] [12] [9]



**Abbildung 9 – Sonnendeklination  $\delta$  im Jahresverlauf [22]**

Die beiden Extremfälle der Sonnendeklination werden zur Sommersonnenwende am 21. Juni mit  $\delta = 23,4^\circ$  und zur Wintersonnenwende am 21. Oder 22. Dezember mit  $\delta = -23,4^\circ$  erreicht. Dadurch ergibt sich mittags zur Sommersonnenwende die maximale jährliche Sonnenhöhe  $\gamma_{S,max}$ , welche folgendermaßen ermittelt werden kann: [8] [22]

$$\gamma_{S,max} = 90^\circ + 23,4^\circ - \varphi = 113,4^\circ - \varphi \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

Zur Wintersonnenwende wird die minimale Sonnenhöhe eines Jahres erreicht. Diese beträgt mittags:

$$\gamma_{S,min} = 90^\circ - 23,4^\circ - \varphi = 66,4^\circ - \varphi \quad (3.12)$$

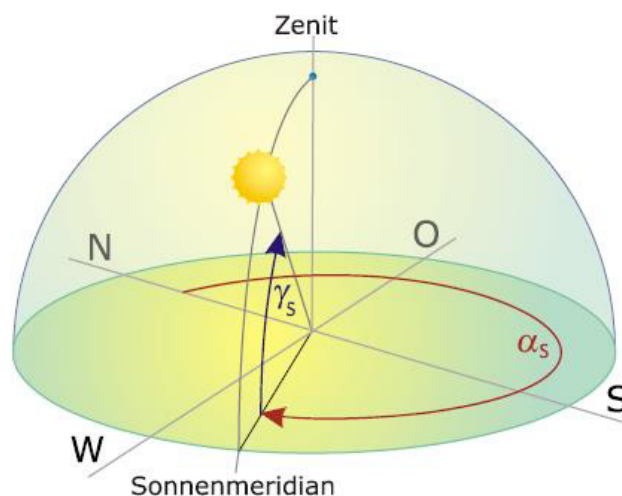
Leipzig besitzt einen Breitengrad  $\varphi$  von etwa  $51,3^\circ$ . Damit beträgt die maximale mittägliche Sonnenhöhe  $62,1^\circ$ , die minimale  $15,1^\circ$ .

Die Bestrahlungsstärke einer horizontalen Fläche nimmt mit steigender Sonnenhöhe zu. Deshalb sinkt nach Formel (3.10) mit steigender geografischen Breite die tägliche Globalstrahlung eines Ortes. Dieser Effekt wird im Winter durch die geringeren Tageslängen

verstärkt und in den Sommermonaten abgeschwächt, wobei die größeren Tageslängen im Sommer in Nordeuropa teilweise durch die verstärkte Bewölkung kompensiert werden. [32] [8]

Die Sonnenhöhe gibt Hinweise auf die Größe der Bestrahlungsstärke. Um den Verlauf der Globalstrahlung innerhalb eines Tages und mögliche Verschattungen zu bestimmen, kann ein Sonnenbahndiagramm hilfreich sein. Der Sonnenstand eines Ortes kann durch die beiden Winkel Sonnenhöhe (Elevation)  $\gamma_s$  und Sonnenazimut  $\alpha_s$  eindeutig bestimmt werden. Diese Winkelbeziehungen werden mit Abbildung 10 verdeutlicht. [34]

Die Sonnenhöhe  $\gamma_s$  ist als Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Horizont definiert. Für den Sonnenazimut existieren verschiedene Betrachtungsweisen. Abbildung 10 zeigt den Azimut als Winkel  $\alpha_s$  zwischen der geografischen Nordrichtung und dem Vertikalkreis durch den Sonnenmittelpunkt. Damit entspricht Norden  $0^\circ$ , Osten  $90^\circ$ , Süden  $180^\circ$  und Westen  $270^\circ$ . Eine solche Definition richtet sich nach DIN 5034. Es ist allerdings auch üblich, Süden als  $0^\circ$  zu setzen oder eine Zählrichtung entgegen des Uhrzeigersinns zu wählen. Deshalb muss vor einem Vergleich verschiedener, im Zusammenhang mit dem Sonnenazimut stehender Berechnungen unbedingt die Definition des Azimutwinkels betrachtet werden. [7] [34]



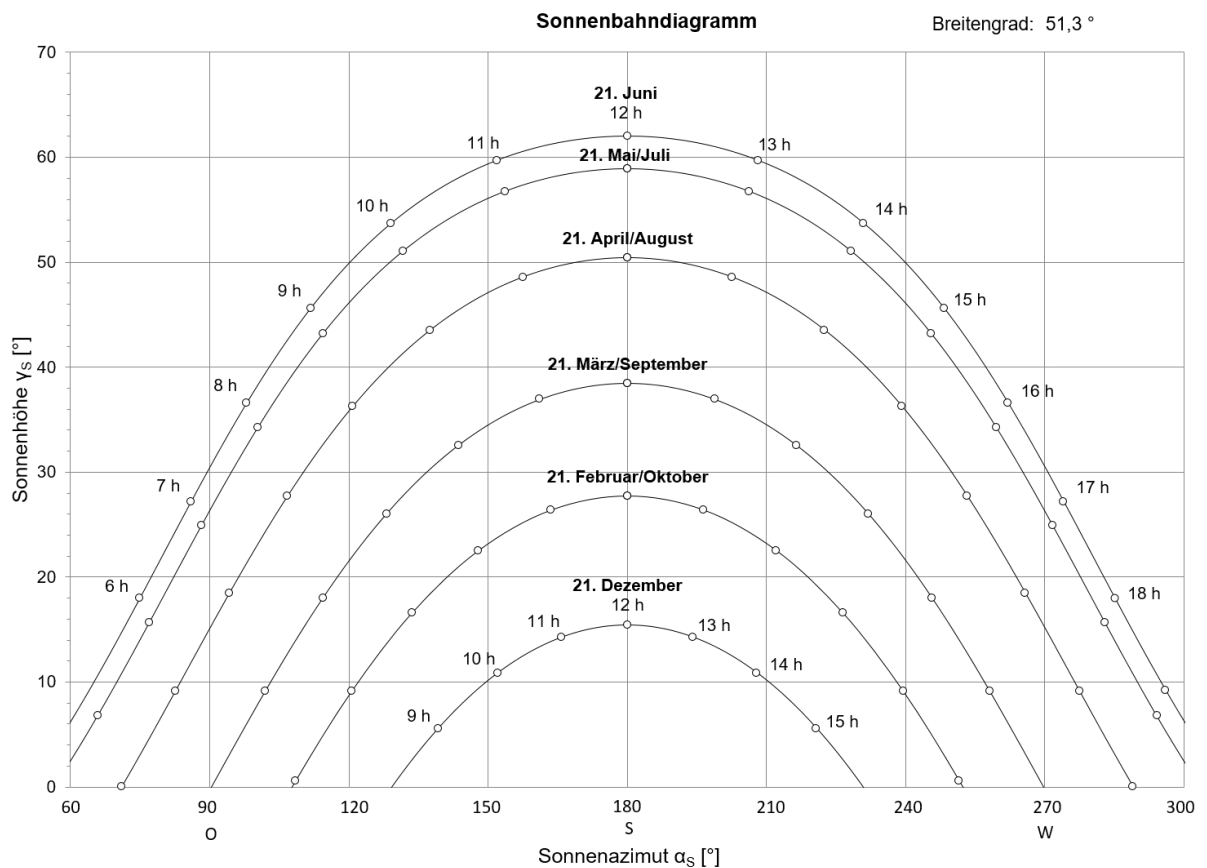
**Abbildung 10 – Winkelbeziehungen des Sonnenstandes mit Sonnenhöhe  $\gamma_s$  und Sonnenazimut  $\alpha_s$ ; Definition Sonnenazimut nach DIN 5034-2 [34]**

In einem Sonnenbahndiagramm werden die Sonnenhöhe  $\gamma_s$  und der Sonnenazimut  $\alpha_s$  im Tagesverlauf für verschiedene Tage des Jahres dargestellt. Für einfache Darstellungen wird die Uhrzeit als wahre Ortszeit (WOZ) angegeben. Beträgt die WOZ 12 Uhr, wird der Sonnenhöchststand des Tages am jeweiligen Ort erreicht. Die übliche Zeitangabe in Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) entspricht der WOZ nur für Positionen entlang des 15. östlichen Längengrades, wie bspw. in Görlitz. Die WOZ eines Standortes kann näherungsweise mit Kenntnis des Längengrades  $\Lambda$  folgendermaßen berechnet werden: [22]

$$WOZ = MEZ - 1 \text{ h} * \left(1 - \frac{\Lambda}{15^\circ}\right) \quad (3.13)$$

Für Leipzig mit dem Längengrad  $\Lambda$  von  $12,4^\circ$  ergibt sich um 12 Uhr MEZ nach Formel (3.13) eine WOZ von 11:49:30 Uhr. Die Abweichung zwischen MEZ und WOZ beträgt folglich 10,5 Minuten.

Abbildung 11 zeigt ein Sonnenbahndiagramm für Leipzig. In diesem finden sich bspw. die oben berechneten maximalen und minimalen Sonnenhöhen des Jahres wieder. Es kann weiterhin der Tagesverlauf der Sonne für ausgewählte Tage direkt abgelesen und für weitere Tage durch Interpolation ermittelt werden. Zudem kann die Kombination aus Tag und Uhrzeit abgeschätzt werden, an dem die Sonne an einer bestimmten Himmelsposition steht. Mittels dieser Information kann aus Abbildung 13 und Abbildung 14 die Beleuchtungsstärke bei klarem und bedecktem Himmel für jeden beliebigen Zeitpunkt abgelesen werden.



**Abbildung 11 – Sonnenbahndiagramm für Leipzig nach [21]**

Als meteorologischer Einflussfaktor auf die Sonneneinstrahlung können Variationen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre über Europa und dem benachbarten Abschnitt des Atlantiks angesehen werden, welche ein unterschiedliches Auftreten maritimer und kontinentaler Luftmassen verursachen. Die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Bewölkung und Trübung bewirken im Zeitverlauf Unterschiede der, an der Erdoberfläche

empfangenen, Globalstrahlung. Zudem wird die Wolkenbildung, der Wolkenzug sowie Niederschlag durch Küstenlinien und die Topografie der Landschaft beeinflusst. In Mitteleuropa schwanken die täglichen Globalstrahlungsdaten eines Ortes im Jahresvergleich um etwa 30 bis 40 % in den Sommermonaten und um ca. 55 bis 75 % im Winter. Die Variation der Bewölkung trägt dabei zu einem Großteil dieser Abweichungen bei. [32]

Ein anderer Einfluss der Topografie entsteht durch die Höhe eines Ortes. Die in die Erdatmosphäre eintretende Sonneneinstrahlung erfährt dort Reflexions-, Absorptions- und Streuvorgänge, welche die Bestrahlungsstärke umso stärker verringern, desto größer der durch die Atmosphäre zurückgelegte Weg ist. Durch diesen Effekt nimmt die Globalstrahlung eines höher gelegenen Ortes, unter der Voraussetzung ansonsten gleicher Bedingungen, größere Werte an. So beträgt bspw. die direkte Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche am 15. Juni um 12 Uhr WOZ in den Ostalpen (48° N) auf 200 m Höhe 810 W/m<sup>2</sup>, auf 1000 m Höhe 885 W/m<sup>2</sup> und auf 3000 m 997 W/m<sup>2</sup>. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass ein Teil der durch die Streuung des Lichts verursachten Verluste durch eine Erhöhung der Diffusstrahlung kompensiert wird. [15]

Wie zuvor festgestellt wurde, besitzen Wolken als meteorologischer Faktor einen großen Einfluss auf die Höhe der Globalstrahlung eines Ortes für einen spezifischen Zeitpunkt. Anhand dieser Masterarbeit sollen die Bestrahlungsstärken charakteristischer Tage nachgebildet werden. Deshalb wurde neben dem exakten Tag, welcher entscheidend für den Tagesgang der Sonnenhöhe und Elevation ist, zudem die Bewölkung zu betrachten.

Grundsätzlich existieren zwei Möglichkeiten, verschiedene Bewölkungszustände zu unterscheiden. Zum einen kann ein lichttechnischer Ansatz gewählt werden, welcher mittels der Leuchtdichte den Helligkeitseindruck berücksichtigt. Des Weiteren kann mit dem Bedeckungsgrad des Himmels eine meteorologische Größe herangezogen werden. [38] [8]

Bewölkung tritt in der Troposphäre auf, welche die unterste Schicht der Atmosphäre darstellt und bis in etwa 10 km Höhe reicht. Abbildung 12 zeigt eine mögliche und einfache Aufteilung in tiefe, mittlere und hohe Wolken. Zur Beschreibung der Bewölkung kann der Gesamtbedeckungsgrad verwendet werden. Dieser trifft eine Aussage über den Anteil des Himmelsgewölbes, welcher insgesamt von Wolken bedeckt ist. Es wird für jede einzelne der Wolkenschichten oder für die Gesamtheit aller Schichten ein Wert in Achteln angegeben. D.h. 0 Achtel entsprechen keinerlei Anzeichen von Wolken. 4 Achtel bedeuten, dass maximal die Hälfte des Himmels mit Wolken bedeckt ist. 8 Achtel repräsentiert einen vollständig mit Wolken zugezogenen Himmel. Kondensstreifen, welche länger als 15 Minuten existieren, gelten als Bewölkung. Nebel hingegen wird nicht unter Bewölkung klassifiziert. Tabelle 1 ordnet den Bedeckungsgraden der verschiedenen Wolkenschichten verbale Bezeichnungen zu, welche eine bessere Vorstellung über die Aussage dieser Angabe ermöglichen. Für einen



wolkenlosen Himmel dürfen in keiner Schicht Wolken existieren. Ein bedeckter Himmel setzt eine vollständige Gesamtbedeckung aller Schichten voraus. Alle anderen Zustände werden nur durch die tiefen und mittelhohen Wolken bestimmt. [38] [6]

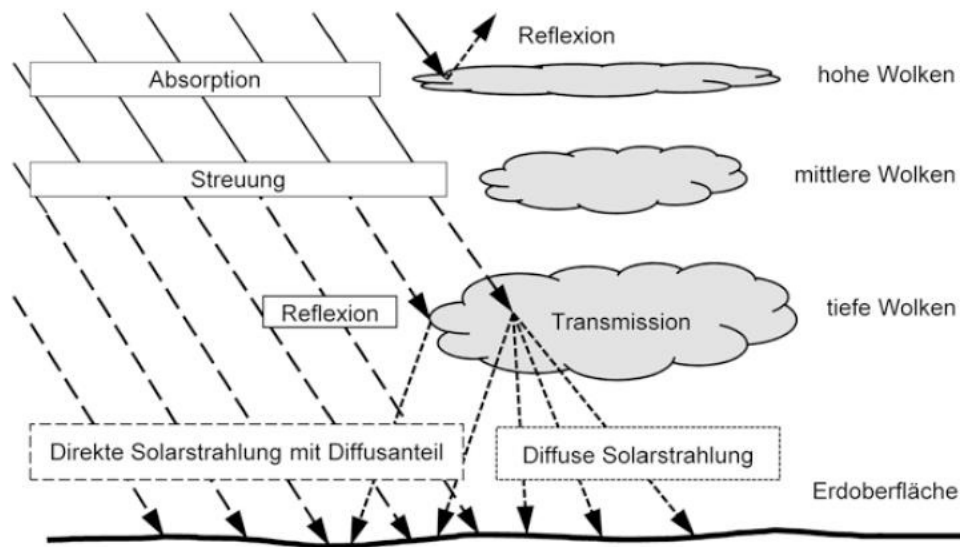


Abbildung 12 – Durchqueren der Globalstrahlung durch die Atmosphäre bei auftretender Bewölkung [38]

Tabelle 1 – Erläuterungen verschiedener Bedeckungsgrade nach [6]

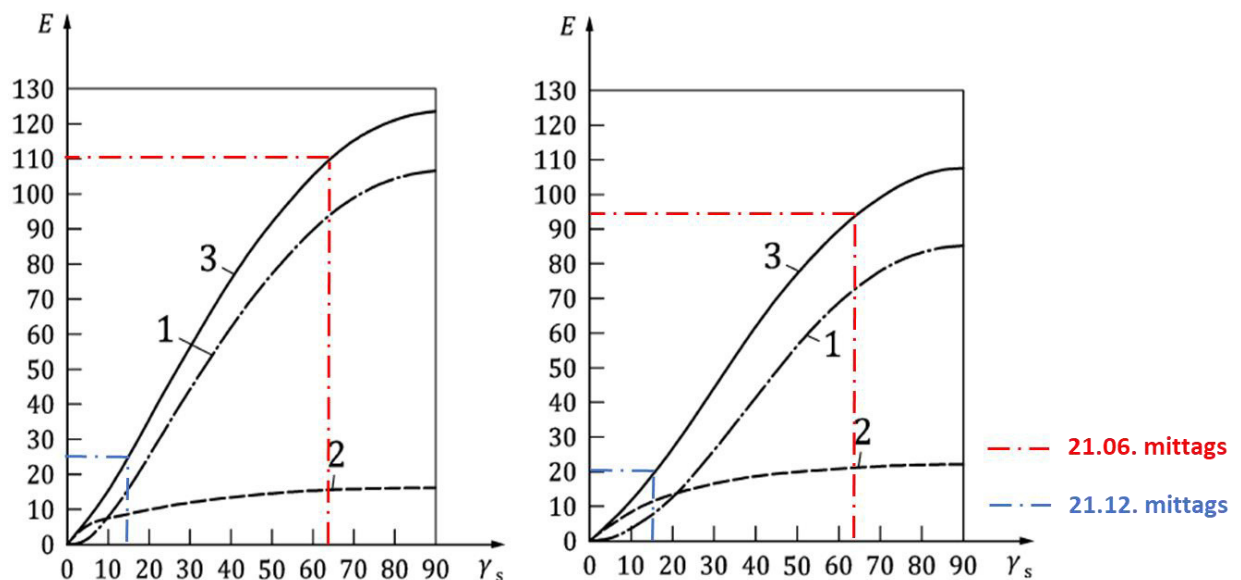
| Bezeichnung            | Gesamtbedeckungsgrad        |             |
|------------------------|-----------------------------|-------------|
|                        | Tiefe und mittelhohe Wolken | Hohe Wolken |
| Wolkenlos, sonnig      | 0/8                         | 0/8         |
| Leicht bewölkt, heiter | 1/8 bis 3/8                 | 0/8 bis 8/8 |
| Wolkig                 | 4/8 bis 6/8                 |             |
| Stark bewölkt          | 7/8                         |             |
| Bedeckt, trüb          | 8/8                         | 8/8         |

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Wolkenbedeckung stellt ein lichttechnischer bzw. strahlungsphysikalischer Ansatz dar, welcher bspw. in DIN 5034 herangezogen wird. Es werden dort die beiden Extremfälle klarer und bedeckter Himmel berücksichtigt. Dabei wird die Leucht- bzw. Strahldichte als bestimmende Größe verwendet, welche die Intensität von Licht abbildet. Die dafür eingesetzten Werte basieren auf der mathematischen Modellierung verschiedener Himmelszustände. Zudem wird mit dem mittleren Himmel ein theoretischer Wert angegeben, welcher sich anhand bestimmter Zeitabschnitte der Idealfälle klarer und bedeckter Himmel zusammensetzt und damit ein langjähriges Mittel aller Himmelszustände

darstellt. Die Verteilung der Zeitabschnitte richtet sich nach statistischen Daten über die Sonnenscheindauer eines Ortes. [8] [18]

Wie zuvor beschrieben, hängt die Höhe der Globalstrahlung bei klarem Himmel unter Annahme einer konstanten extraterrestrischen Strahlung von der Sonnenhöhe  $\gamma_s$  und der atmosphärischen Trübung ab, welche mittels des Linke-Trübungsfaktors  $T_L$  berücksichtigt werden kann. Die Sonnenhöhe kann durch ein Sonnenbahndiagramm, welches für Leipzig in Abbildung 11 dargestellt ist, oder Webseiten wie bspw. <https://www.sonnenverlauf.de/>, ermittelt werden. So kann für den 21. Juni mittags eine Sonnenhöhe von etwa  $62^\circ$  und für den 21. Dezember von  $15,3^\circ$  festgestellt werden.

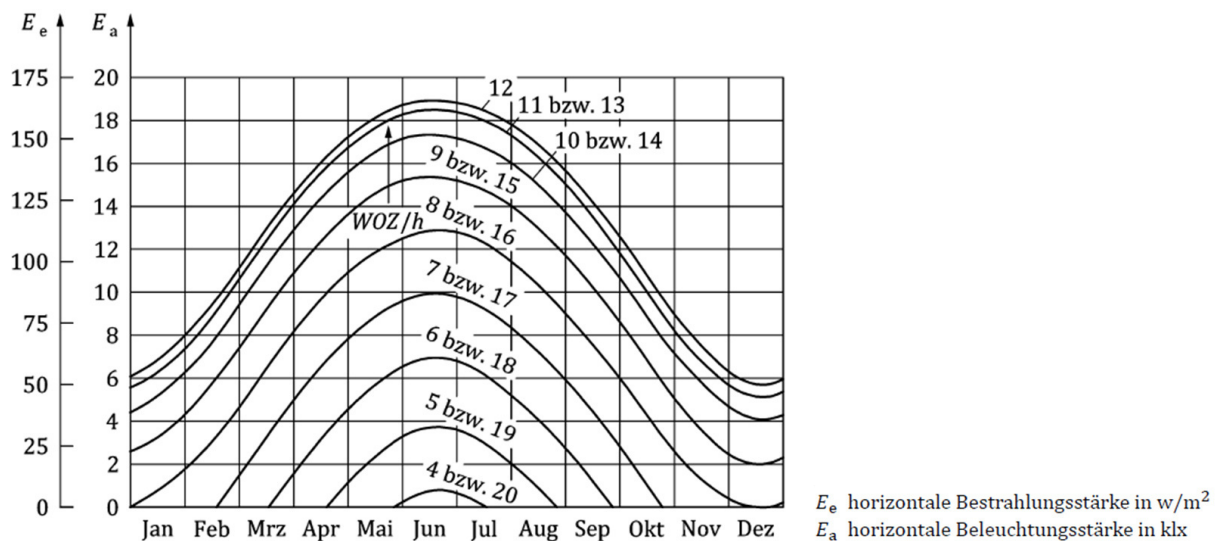
Abbildung 13 zeigt die horizontale Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel für verschiedene Linke-Trübungsfaktoren  $T_L$  in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe  $\gamma_s$ . In Kombination mit den Informationen zur Sonnenhöhe, kann bspw. abgelesen werden, dass im Jahresverlauf bei geringer Trübung (am 21.06.) eine maximale globale Beleuchtungsstärke von ca. 110.000 lx und (am 21.12.) eine minimale Globalstrahlung von etwa 25.000 lx erreicht werden kann. Bei verschmutzter Atmosphäre verringert sich die globale mittägliche Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel auf 95.000 lx am 21. Juni und auf 20.000 lx am 21. Dezember. In Anhang 1 wird die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe  $\gamma_s$  für verschiedenen Linke-Trübungsfaktoren dargestellt.



- 1 ... direkte Beleuchtungsstärke
- 2 ... diffuse Beleuchtungsstärke
- 3 ... globale Beleuchtungsstärke

**Abbildung 13 – horizontale Beleuchtungsstärken in [klx] bei klarem Himmel für Linke-Trübungsfaktor  $T_L = 2,75$  (links; geringe Trübung) und  $T_L = 4,9$  (rechts; verschmutzte Atmosphäre) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe  $\gamma_s$  in  $^\circ$  nach [8]**

Abbildung 14 stellt sowohl die globale horizontale Bestrahlungs- als auch Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in Abhängigkeit von der WOZ und der Jahreszeit dar. Die Angaben werden für 51° nördlicher Breite getroffen, was dem Breitengrad von Leipzig entspricht. Anhand der Skalierung kann erkannt werden, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke besteht. Es kann bspw. aus dem Diagramm abgelesen werden, dass bei trübem Wetter mittags im Juni eine Beleuchtungsstärke von etwa 19.000 lx erreicht werden kann. Dies entspricht laut Abbildung 13 etwa der Größenordnung der mittäglichen Beleuchtungsstärke im Dezember bei klarem Himmel.



**Abbildung 14 – horizontale Globalstrahlung bei bedecktem Himmel für 51° nördliche Breite in Abhängigkeit von Jahres- und Tageszeit [8]**

Die Diagramme von Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die zu erwartenden Werte der Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke auf Basis von Berechnungen modellhafter Himmelszustände. Die im folgenden Kapitel 3.2.3 gezeigten Diagramme basieren auf realen Daten der Wetterstation Leipzig-Holzhausen aus den Jahren 2007 bis 2018.

### 3.2.3 Sonneneinstrahlung in Leipzig

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt Daten der Wetterstation Leipzig-Holzhausen zur Verfügung, u.a. der globalen und diffusen Solarstrahlung sowie des Gesamtbedeckungsgrades. Werte von stündlichen und 10-minütlichen Messungen zur Bestrahlungsstärke können als Datensatz aller zwischen dem 02. Oktober 1998 und dem 31. Mai 2019 aufgezeichneter Messungen im \*.txt-Format abgerufen werden. Stündliche Messungen des Bedeckungsgrades des Himmels stehen vom 01. Januar 2004 bis zum 31. Dezember 2019 zur Verfügung. Eine Weiterverarbeitung der Daten erfolgte mittels Excel. [5]

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels erfolgt eine Konzentration auf den jeweils 21. März, Juni, September und Dezember der verschiedenen Jahre. Zur Sommersonnenwende am 21. Juni jeden Jahres erreicht die Sonne ihre maximale Sonnenhöhe im Jahresverlauf, weshalb dieser Tag repräsentativ für die maximal auftretende Bestrahlungsstärke steht.

Die weiteren charakteristischen Zeitpunkte im Umlauf der Erde um die Sonne schwanken zwischen den verschiedenen Jahren im Bereich von maximal drei Tagen um den jeweils 21. herum. Für eine vereinfachte Betrachtung wurde ebenfalls der 21. der Monate März, September und Dezember berücksichtigt. Im März und September erfolgt die Tag-und-Nacht-Gleiche, an welcher der Neigungswinkel der Erdachse gegen die Sonne  $0^\circ$  beträgt. Sonnenaufgang und Sonnenuntergang erfolgen an diesem Tag nahezu exakt im Osten bzw. Westen. Zur Wintersonnenwende am 21. oder 22. Dezember tritt die minimale Sonnenhöhe jeden Jahres auf. [15] [14]

Die Messdaten der Jahre vor 2007 sind relativ unvollständig und weisen oft Datenlücken von mehreren Stunden auf. Deshalb wurde die Auswertung auf die Jahre 2007 bis 2018 beschränkt.

Auch bei Tagen, bei denen die geringste aufsummierte Globalstrahlung eines Tages im betrachteten Zeitraum auftritt, ist nicht zwingend der Idealfall eines im ganzen Tagesverlauf vollständig bedeckten Himmels vorhanden. Definiert man einen Gesamtbedeckungsgrad des Himmels von 8/8 als vollständig bedeckten Himmel und von 0/8 als klaren Himmel, traten in den in Tabelle 2 abgebildeten Jahren diese Zustände am jeweiligen 21. der betrachteten Monate ganztägig auf.

Wie Tabelle 2 zeigt, sind diese idealisierten Himmelszustände, und dabei insbesondere der vollständig klare Himmel, in Leipzig-Holzhausen relativ selten zu detektieren. Eine Ausnahme stellt der 21. Dezember dar, an dem in drei von zwölf betrachteten Jahren ganztägig ein Gesamtbedeckungsgrad von 0/8 oder 8/8 vorlag. Zudem sollte bei einer solchen Betrachtung berücksichtigt werden, dass die Erfassung des Bedeckungsgrades nur zu jeder vollen Stunde erfolgt. Die Himmelszustände in der Zwischenzeit werden nicht erfasst. [10]

**Tabelle 2 – Jahre mit ganztägigen Idealzuständen klarer bzw. bedeckter Himmel am 21. März/ 21. Juni/ 21. September/ 21. Dezember**

| Tag           | klarer Himmel<br>(Gesamtbedeckungsgrad<br>ganztägig 0/8) | bedeckter Himmel<br>(Gesamtbedeckungsgrad<br>ganztägig 8/8) |
|---------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 21. März      |                                                          | 2007 (9 – 17 Uhr)                                           |
| 21. Juni      |                                                          | 2007 (6 – 23 Uhr), 2012                                     |
| 21. September |                                                          | 2009 (7 – 16 Uhr)                                           |
| 21. Dezember  | 2016                                                     | 2010, 2013                                                  |

Anschließend wurden die realen Messwerte der Tage, welche die meisten Übereinstimmungen mit den Idealzuständen des vollständig klaren oder bedeckten Himmels aufwiesen, mit denen laut Literatur theoretisch zu erwartenden Werten verglichen. Die Auswahl der entsprechenden Jahre erfolgte anhand Tabelle 2. Beim 21. Dezember lagen zwei mögliche Tage mit einem ganztägigen Gesamtbedeckungsgrad des Himmels von 8/8 vor. Es wurde der 21. Dezember 2010 zur weiteren Betrachtung herangezogen, da die Tagessumme der Globalstrahlung geringer als am 21. Dezember 2013 war. Bei den fehlenden Tagen mit vollständig klarem Himmel wurde analog verfahren und das Jahr anhand der größten Tagessumme der Globalstrahlung ausgewählt.

Die Ermittlung der theoretischen Globalstrahlungsstärke bei bedecktem Himmel erfolgte nach DIN 5034-2: [8]

$$E_{G_{bedeckt}} = (2,609 + 182,609 * \sin \gamma_S) \frac{W}{m^2} \quad (3.14)$$

Die Ermittlung der Sonnenhöhe  $\gamma_S$  erfolgte sowohl für die Berechnung der Globalstrahlung bei klarem als auch bei bedecktem Himmel mittels des Excel-Templates von [21].

Abbildung 15 ermöglicht einen Vergleich zwischen den realen Messwerten, welche an den zuvor beschriebenen Tagen aufgenommen wurden, mit den theoretisch zu erwartenden Globalstrahlungsstärken für den Idealfall des vollständig bedeckten Himmels.

Für Juni und Dezember zeigen die theoretischen Werte bezüglich der Abbildung qualitativer Größenordnungen und Änderungen im Tagesverlauf eine gute Annäherung an die Realität.

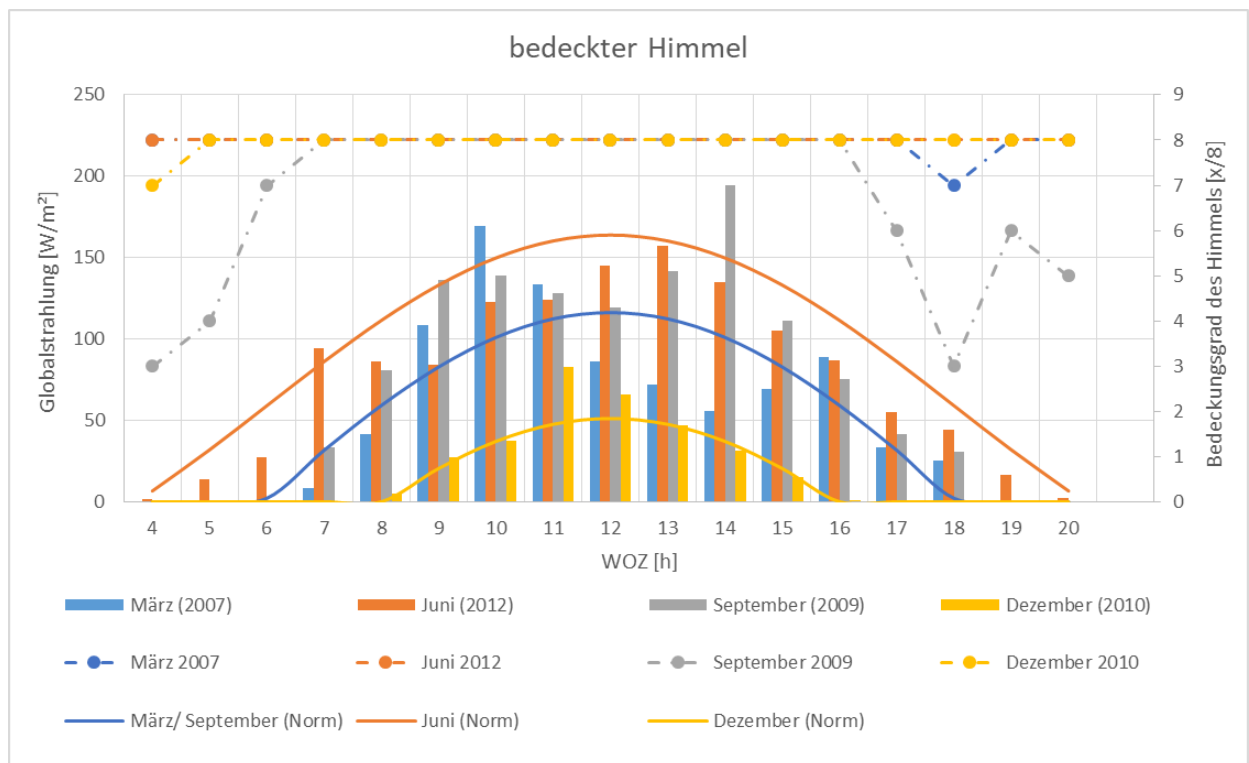
Betrachtet man die konkreten Globalstrahlungswerte, sind die theoretischen Werte für den Juni nahezu den gesamten Tag über höher als die realen Werte. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die nach Gleichung (3.14) berechneten theoretischen Werte für den Juni systematisch zu hoch sind.

Die Abweichungen im Dezember scheinen nicht systematisch bedingt zu sein, da diese nur für 11 und 12 Uhr WOZ auftreten. Für alle anderen Zeiten stimmen berechnete und reale Werte sehr gut überein. Ein Erklärungsansatz besteht darin, dass der Gesamtbedeckungsgrad des Himmels nur zur jeweils vollen Stunde ermittelt wird. Zwischenzeitliche Auflockerungen der Wolkendecke, welche zu einer erhöhten Globalstrahlung führen, sind deshalb prinzipiell möglich und werden nicht erfasst. Zudem wird bspw. eine dünne Wolkenschicht, welche den Himmel zwar komplett überspannt, aber dennoch zu einer starken Himmelsaufhellung führt, mit einem Gesamtbedeckungsgrad von 8/8 erfasst. [28]

Die Tage im März und September hingegen weisen ein stark erratisches Verhalten auf und die berechneten Werte weichen, auch bei einer rein qualitativen Betrachtung, stark von den realen Messwerten ab. Der mittels der Strich-Punkt-Linie abgebildete Bedeckungsgrad des Himmels zeigt allerdings für den gesamten Tag bzw. bis 16 Uhr für den September 2009 einen

vollständig bedeckten Himmel. Eine Ursache für die Abweichungen der theoretischen Werte nach oben hin könnte ebenfalls in den Erfassungsbedingungen des Gesamtbedeckungsgrades bestehen.

Die vergleichsweise niedrigen Werte in der späten Mittagszeit im März können mit diesem Ansatz allerdings nicht erklärt werden. In Kombination mit den Abweichungen im Juni kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die nach (3.14) berechneten Werte für den bedeckten Himmel nicht den minimal in der Realität möglichen Globalstrahlungsstärken entsprechen. Eine Ursache könnte darin gesehen werden, dass Formel (3.14) keine Unterscheidung zwischen bedecktem Himmel mit und ohne Niederschlag vorsieht. [8]

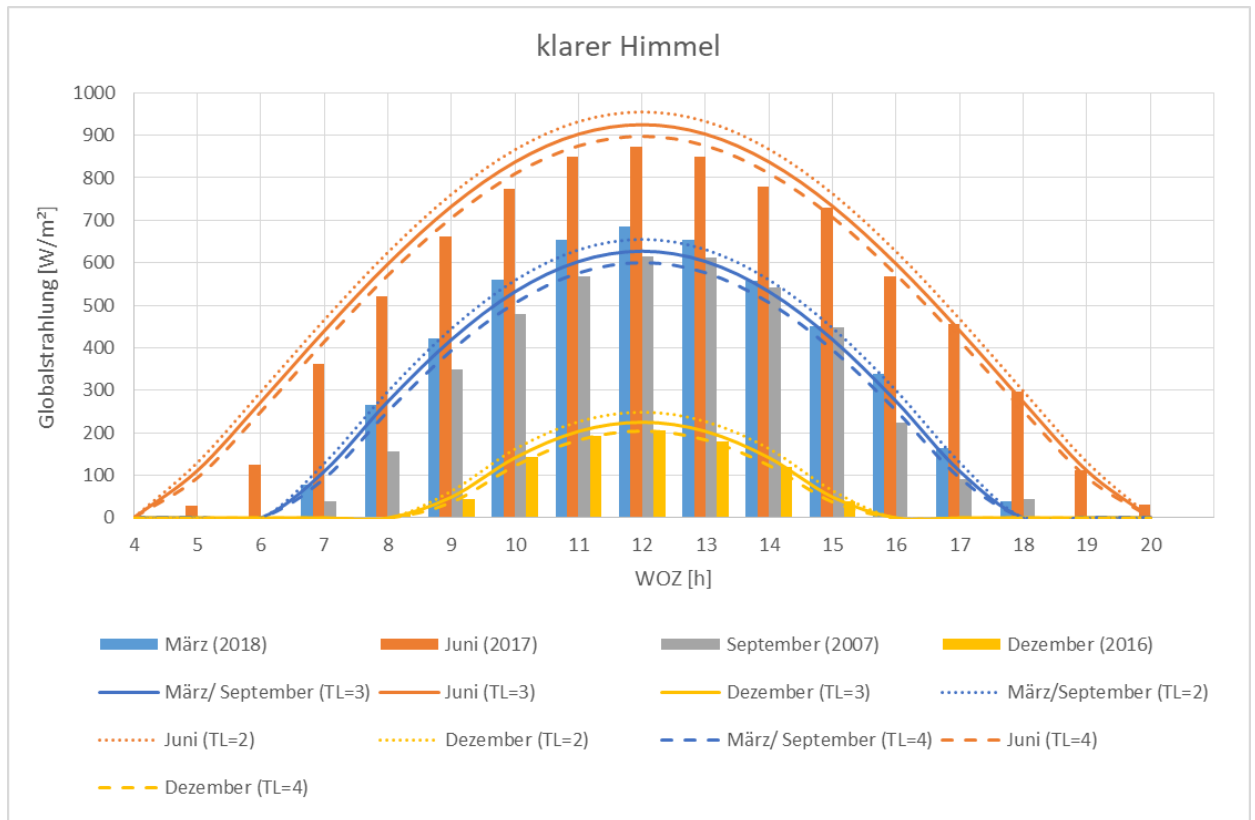


**Abbildung 15 – Vergleich realer Messwerte (Balken) mit theoretisch zu erwartenden Werten (Linie) bei ganzjährig bedecktem Himmel in Leipzig; Datengrundlage Messwerte: [5]**

Mittels der Formel (3.8) wurde die theoretische Globalstrahlung bei klarem Himmel ermittelt. Dabei wurde die extraterrestrische Solarstrahlung im Jahresverlauf mit einem Wert von  $1367 \text{ W/m}^2$  als konstant angesehen. Formel (3.8) zeigt, dass die Globalstrahlungsstärke abhängig vom Linke-Trübungsfaktor  $T_L$  als Maß für die Trübung der Atmosphäre ist. Der Linke-Trübungsfaktor  $T_L$  unterscheidet sich im Jahresverlauf und ortsbedingt. Deshalb wird in Abbildung 16 die berechnete Globalstrahlung für verschiedene Trübungsfaktoren dargestellt und mit den realen Messdaten der zuvor ausgewählten Tage verglichen.

Anhand Abbildung 16 ist ersichtlich, dass mittels Gleichung (3.8) eine sehr gute Nachbildung der realen Globalstrahlungswerte erfolgt. Zudem kann festgestellt werden, dass die im

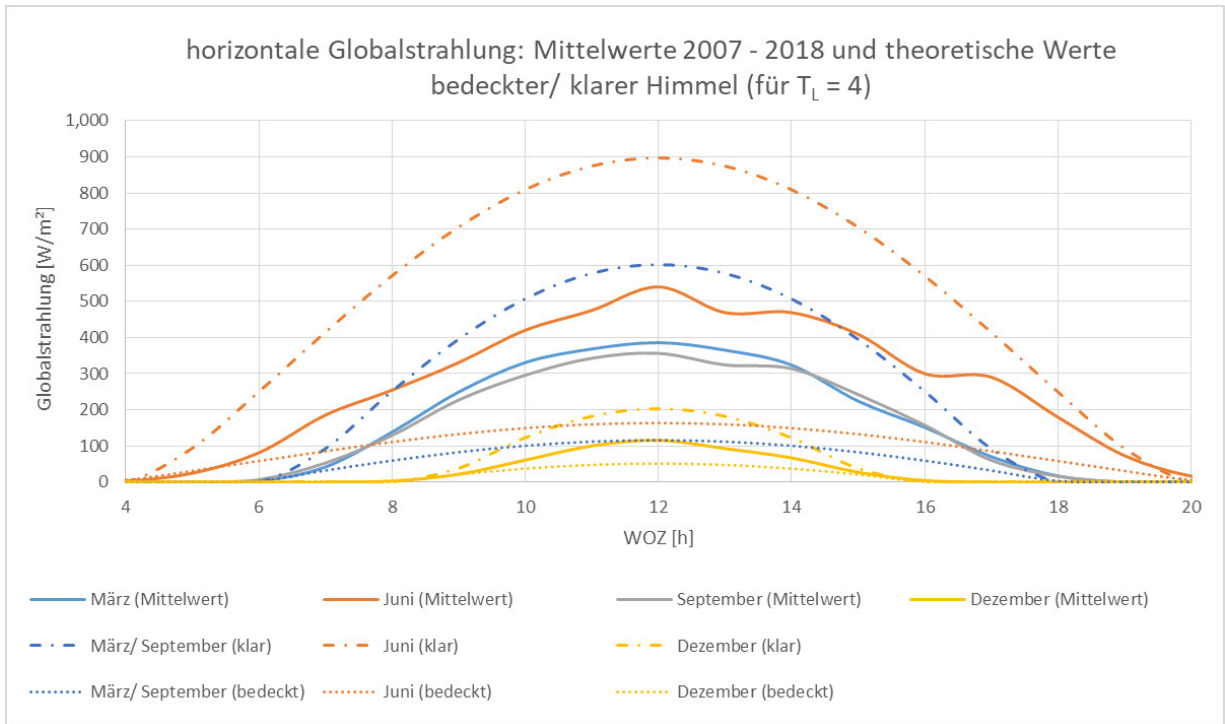
Vergleich zum März gemessenen Werte im September geringer ausfallen. Damit bestätigt sich die in Abbildung 6 aufgezeigte größere Trübung der Atmosphäre im September, welche zu einer Verringerung der den Erdboden erreichenden Globalstrahlung führt. Ebenso wie bei den Berechnungen zum bedeckten Himmel liegen die theoretischen Werte im Juni systematisch über den gemessenen Werten.



**Abbildung 16 – Vergleich der realen Messwerte (Balken) mit theoretisch zu erwartenden Werten (Linie) bei ganzjährig klarem Himmel in Leipzig; Datengrundlage Messwerte: [5]**

Abbildung 17 zeigt einen Vergleich der Mittelwerte aus den jeweils am 21. März, 21. Juni, 21. September und 21. Dezember der Jahre von 2007 bis 2018 gemessenen Werte mit den zuvor gezeigten theoretischen Globalstrahlungswerten bei bedecktem und klarem Himmel.

Der ermittelte Durchschnitt repräsentiert die auftretenden globalen Bestrahlungsstärken besser als die beiden berechneten Idealzustände. Wie zu erwarten war, liegen die Durchschnittswerte der einzelnen Monate zwischen den beiden Idealzuständen bedeckter und klarer Himmel. Die Kurven zeigen analog zu den theoretischen Werten des klaren bzw. bedeckten Himmels einen annähernd normalverteilten Verlauf und stellen deshalb eine gute Abbildung eines durchschnittlichen Bestrahlungszustandes dar. Im März treten im Mittel etwas höhere Globalstrahlungswerte als im September auf. Ein naheliegender Erklärungsansatz besteht neben der verminderten atmosphärischen Trübung im zugleich geringeren durchschnittlichen Gesamtbedeckungsgrad des Himmels im März, welcher im Diagramm in Anhang 2 veranschaulicht ist.



**Abbildung 17 – Mittelwerte aus realen Messdaten von 2007 – 2018 sowie theoretische Werte bedeckter/ klarer Himmel für Leipzig; Datengrundlage Messwerte: [5]**

### 3.3 Einfluss der Solarmodul-Montage

Der mittels dieser Masterarbeit erstellte Versuchsstand soll die Globalstrahlungsstärken nachbilden, welche an den Solarmodulen einer Dachanlage vorherrschen. Die Montage der Solaranlage beeinflusst die effektiv an dem Solarmodul ankommende Globalstrahlung durch die Neigung der Solarmodul-Fläche gegenüber der Horizontalen. Ein weiterer relevanter Faktor besteht mit der Vorzugsrichtung der Solaranlage. [14]

Abbildung 18 veranschaulicht die Strahlungsanteile, welche geneigt montierte Solarmodule erreichen. Gegenüber einer horizontal orientierten Fläche tritt zusätzlich reflektierte Strahlung auf. Die Gesamtstrahlung  $E_{G,gen}$ , welche auf eine geneigte Fläche  $A_{gen}$  auftrifft, setzt sich aus den Strahlungsanteilen direkte Strahlung  $E_{Dir,gen}$ , diffuse Strahlung  $E_{Diff,gen}$  und reflektierte Strahlung  $E_{Refl,gen}$  zusammen: [34]

$$E_{G,gen} = E_{Dir,gen} + E_{Diff,gen} + E_{Refl,gen} \quad (3.15)$$



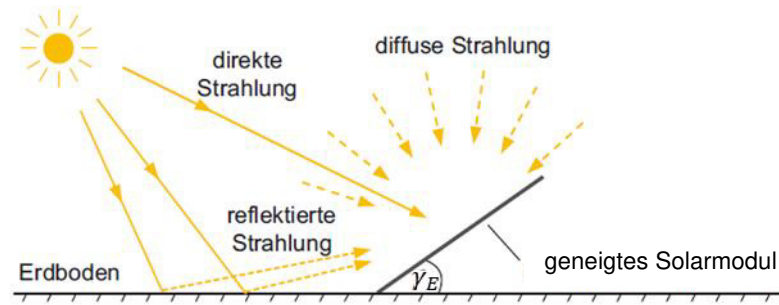


Abbildung 18 – Zusammensetzung der Strahlung bei geneigt montierten Solarmodule nach [22]

Abbildung 19 zeigt die geometrischen Zusammenhänge, welche die Höhe des direkten Strahlungsanteils beeinflussen. Die Strahlungsleistung der horizontalen Fläche  $A_H$ , der geneigten Fläche  $A_{gen}$  sowie der gestrichelt eingezeichneten Fläche, welche senkrecht zur einfallenden Solarstrahlung steht, besitzen die jeweils gleiche Höhe. Dabei nimmt der Flächeninhalt von  $A_H$  zur senkrechten Fläche hin ab. [22]

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass die Bestrahlungsstärke  $E_{Dir,gen}$  auf einer geneigten Fläche gegenüber der horizontalen Fläche um den Faktor  $\frac{A_H}{A_{gen}}$  größer ist. Qualitativ kann dieser Effekt in Abbildung 19 erkannt werden, indem die Lichtstrahlen auf der geneigten Fläche eine höhere Dichte als auf der horizontalen Fläche besitzen. Ist die direkte Bestrahlungsstärke auf der horizontalen Fläche  $E_{Dir,hor}$  bekannt, kann mit der Sonnenhöhe  $\gamma_S$  und dem Neigungswinkel des Solarmoduls  $\gamma_E$  die Bestrahlungsstärke der geneigten Fläche folgendermaßen bestimmt werden: [22]

$$E_{Dir,gen} = E_{Dir,hor} * \frac{\sin(\gamma_S + \gamma_E)}{\sin \gamma_S} \quad (3.16)$$

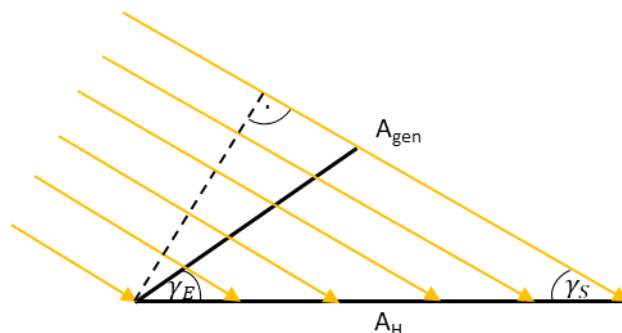


Abbildung 19 – Einfluss der Solarmodul-Neigung auf die Direktstrahlung nach [22]

Die diffuse Strahlung auf einer geneigten Ebene ist gegenüber einer horizontalen Fläche geringer. Wie in Abbildung 18 verdeutlicht wird, reduziert sich die diffuse Strahlung um den Anteil, welcher sich hinter der geneigten Fläche befindet. Die Ermittlung der diffusen

Bestrahlungsstärke  $E_{Diff,gen}$  auf einem geneigten Solarmodul kann anhand eines isotropen oder anisotropen Ansatzes erfolgen.

Eine isotrope Berechnung erfolgt unter der Annahme, dass die Diffusstrahlung über den gesamten Himmelshalbraum gleich verteilt ist. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich die diffuse Bestrahlungsstärke auf einer geneigten Ebene  $E_{Diff,gen}$  mit Kenntnis der diffusen Bestrahlungsstärke auf einer horizontalen Fläche  $E_{Diff,hor}$  und dem Neigungswinkel des Solarmoduls  $\gamma_E$  wie folgt: [34]

$$E_{Diff,gen} = E_{Diff,hor} * \frac{1}{2} * (1 + \cos \gamma_E) \quad (3.17)$$

Bei dem isotropen Ansatz handelt es sich um ein Berechnungsverfahren, welches mit größeren Ungenauigkeiten behaftet ist. Die Realität wird mittels der deutlich komplexeren anisotropen Methoden besser abgebildet, da die Helligkeit, vor allem bei klarem Himmel in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung, unterschiedlich verteilt ist und bspw. in Sonnennähe zunimmt. Aus diesem Grund verwenden Simulationsprogramme zur Planung von Solaranlagen zumeist den anisotropen Ansatz. [34] [22]

Zur Berechnung der reflektierten Bestrahlungsstärke liefern isotrope Ansätze hingegen sehr exakte Werte. Sind die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche  $E_G$  und der Neigungswinkel des Solarmoduls  $\gamma_E$  bekannt, lässt sich die vom Boden reflektierte Bestrahlungsstärke  $E_{Ref,gen}$  ermitteln: [34]

$$E_{Ref,gen} = E_G * \frac{1}{2} * (1 - \cos \gamma_E) * ALB \quad (3.18)$$

Des Weiteren beinhaltet die Gleichung (3.18) einen Albedo-Wert ALB. Dieser gibt an, wie stark reflektierend ein Bodenmaterial wirkt. Tabelle 3 zeigt Albedo-Werte für verschiedene Werkstoffe, wobei sich die Größenordnungen zum Teil stark unterscheiden. Die korrekte Wahl des Albedo-Wertes besitzt deshalb einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnung. Liegen keine Informationen über die Umgebung vor, wird üblicherweise  $ALB = 0,2$  verwendet. [22]

**Tabelle 3 – Albedo-Werte für verschiedenen Materialien [22]**

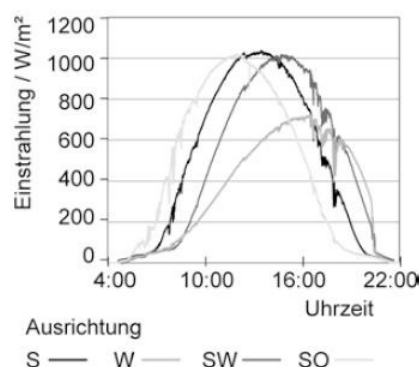
| Material            | Albedo ALB    | Material          | Albedo ALB    |
|---------------------|---------------|-------------------|---------------|
| Gras (Juli, August) | 0,25          | Asphalt           | 0,15          |
| Rasen               | 0,18 ... 0,23 | Beton, sauber     | 0,30          |
| unbestellte Felder  | 0,26          | Beton, verwittert | 0,20          |
| Wälder              | 0,05 ... 0,18 | Schneedecke, neu  | 0,80 ... 0,90 |
| Heidefläche         | 0,10 ... 0,25 | Schneedecke, alt  | 0,45 ... 0,70 |

Die Steigerung der direkten Strahlung sowie die zusätzliche reflektierte Strahlung übersteigen an den meisten Tagen die Verluste an diffuser Strahlung im Fall einer geneigten Fläche gegenüber einer horizontalen Fläche deutlich. Eine Ausnahme bilden Zeiträume mit bedecktem Himmel, welche einen hohen Anteil diffuser Strahlung aufweisen. In der Jahressumme kann der Ertrag einer Solaranlage aber durch die Wahl eines geeigneten Neigungswinkels gesteigert werden. [34]

Zudem existieren praktische Vorteile von geneigt montierten Solarmodulen. Es wird ein minimaler Winkel von  $6^\circ$  empfohlen, damit das Abfließen von Regenwasser und damit verbunden die Beseitigung von Verschmutzungen erfolgen kann. Außerdem kann mit steigendem Neigungswinkel verschattend wirkender Schnee schneller von dem Solarmodul abrutschen, sodass in den Wintermonaten der Ertrag einer Solaranlage gesteigert wird. [33]

Erfolgt die Installation der Solarmodule auf einem bestehenden Dach eines Hauses, so wird der Neigungswinkel zumeist durch die Dachform vorgegeben. Eine Ausnahme bilden bspw. Pult- oder Flachdächer, bei denen Aufständersysteme zur Implementierung eines Neigungswinkels eingesetzt werden. [33]

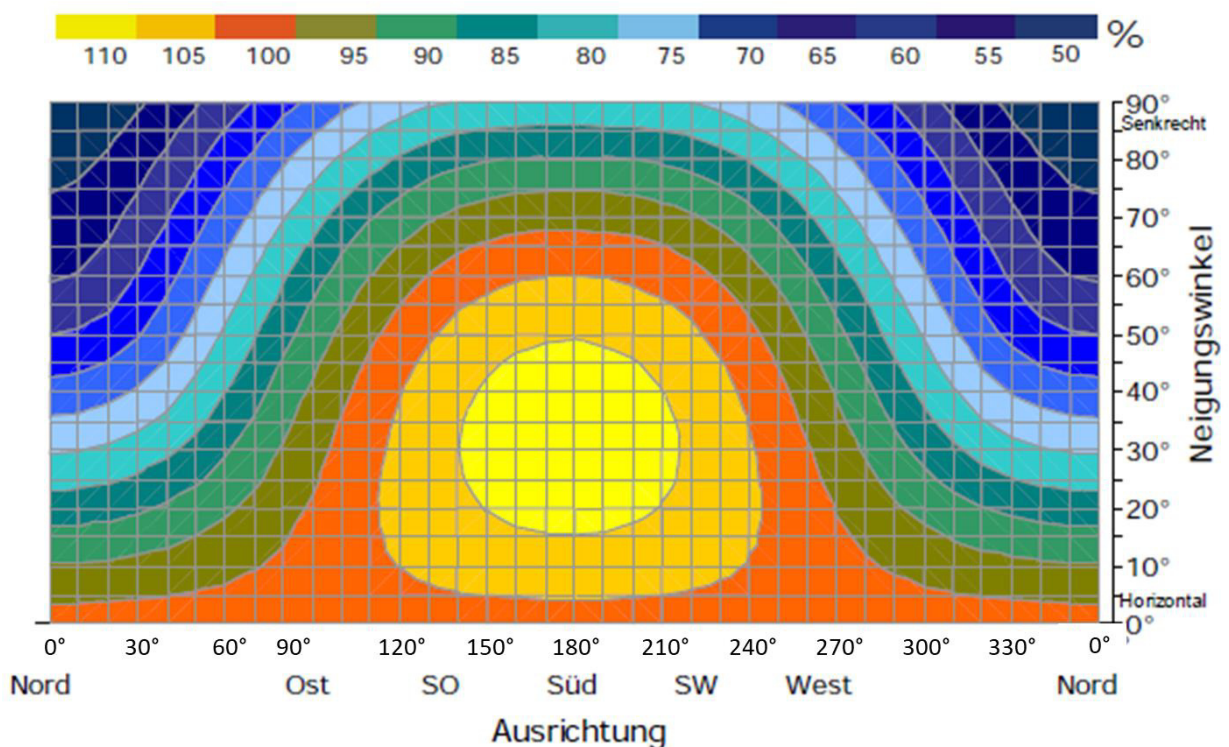
Je stärker die Ausrichtung einer Solaranlage von Süden hin nach Osten oder Westen abweicht, desto größer sind die negativen Effekte einer nicht optimalen Modulneigung. Eine Abweichung von der Südausrichtung bewirkt zumindest eine zeitliche Verschiebung des Tagesgangs der Globalstrahlung. Abbildung 20 zeigt verschiedene Tagesgänge für eine Fläche mit  $30^\circ$  Neigungswinkel in Abhängigkeit der Ausrichtung für einen Juni-Tag mit klarem Himmel. Es ist erkennbar, dass das Maximum der Strahlungsstärke bei einer Drehung nach Osten hin früher und nach Westen hin später auftritt. Der verringerte Maximalwert bei einer exakten Westorientierung verdeutlicht zudem, dass bei großen Abweichungen von der Südausrichtung die maximale Globalstrahlung sinkt. [38]



**Abbildung 20 – Tagesgänge der Globalstrahlung an einem Tag mit klarem Himmel im Juni 2011 in Merseburg für eine Neigung von  $30^\circ$  und verschiedene Ausrichtungen [38]**

Je nach Kombination aus Neigungswinkel und Ausrichtung des Solarmoduls wird die maximal auftretende Bestrahlungsstärke beeinflusst. In Abhängigkeit von der Jahreszeit ergeben sich aufgrund der verschiedenen maximalen Sonnenhöhen und Anteilen der diffusen Strahlung unterschiedliche optimale Neigungswinkel. Betrachtet man die jährlichen Strahlungssummen sind die Optima der einzelnen Monate nicht weiter relevant und es lassen sich ertragsoptimierte Kombinationen aus Neigungswinkel und Ausrichtung bestimmen.

Abbildung 21 stellt diesen Zusammenhang für den Breitengrad von Berlin und der Jahressumme der Globalstrahlung dar. Die verschiedenen Farben repräsentieren die relative jährliche Summe der Globalstrahlung der geneigten Fläche im Verhältnis zu einer horizontalen Fläche. Es zeigt sich, dass über das gesamte Jahr betrachtet, eine Vielzahl von Kombinationen aus Neigungswinkel und Ausrichtung in Ertragsgewinnen gegenüber einer horizontalen Fläche resultieren. So führen bspw. alle Neigungswinkel zwischen  $20^\circ$  und  $40^\circ$  in Verbindung mit einer Ausrichtung von  $150^\circ$  Südost bis  $210^\circ$  Südwest zu einer relativen Jahressumme der Globalstrahlung von 110%. [34]



**Abbildung 21 – relative jährliche Summe der Globalstrahlung in Berlin in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung im Vergleich zur Horizontalen nach [34]**

Wird eine isotrope Verteilung der Strahlung zur Berechnung der diffusen und reflektierten Strahlung angenommen, besitzt die Ausrichtung des Solarmoduls nur einen Einfluss auf die direkte Bestrahlungsstärke.

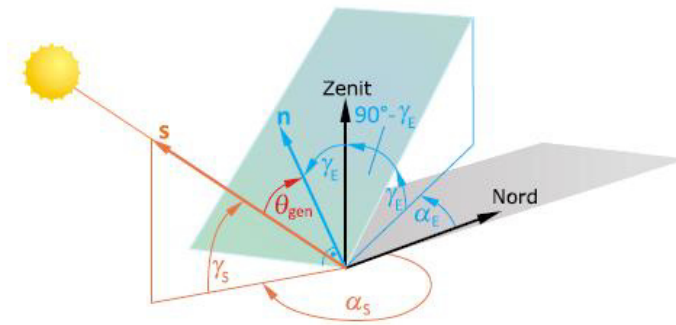
Abbildung 22 veranschaulicht die Winkelbeziehungen, welche bei einer um  $\gamma_E$  geneigten und um  $\alpha_E$  von der Südausrichtung abweichenden Ebene vorliegen. Ist die Ebene nach Westen hin ausgerichtet, nimmt  $\alpha_E$  positive Werte an. Bei einer Orientierung nach Osten ist  $\alpha_E$  negativ. Die Sonnenhöhe wird durch  $\gamma_S$  repräsentiert.  $\alpha_S$  repräsentiert den Azimutwinkel der jeweiligen Sonnenposition. [34]

Der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung  $\theta_{gen}$  befindet sich zwischen einem Vektor  $s$  in Sonnenrichtung und dem Normalenvektor  $n$  der geneigten Ebene und kann wie folgt berechnet werden: [34]

$$\theta_{gen} = \arccos(-\cos \gamma_S * \sin \gamma_E * \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \sin \gamma_S * \cos \gamma_E) \quad (3.19)$$

Die direkte Bestrahlungsstärke einer geneigten und von der Südausrichtung abweichenden Fläche kann mit Kenntnis der direkten Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen ermittelt werden mit: [34]

$$E_{Dir,gen} = E_{Dir,hor} * \frac{\cos \theta_{gen}}{\sin \gamma_S} \quad (3.20)$$



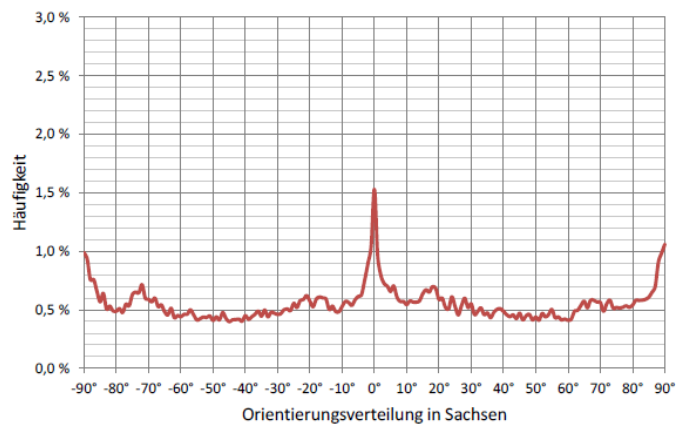
**Abbildung 22 – Bestimmung des Sonneneinfallswinkels auf eine geneigte Ebene (abgebildet: nach Südosten ausgerichtete geneigte Ebene) [34]**

16,7 Mio. bzw. 80,5 % der Gebäude in Deutschland können als Ein-Wohneinheiten-Haus (EWEH) klassifiziert werden, welches Einfamilienhäuser, Doppelhaushälften oder Reihenhäuser umfasst. Mittels empirischer Beobachtung wurde ermittelt, dass die Dachneigung eines EWEHs üblicherweise zwischen  $30^\circ$  und  $60^\circ$  beträgt. Ausnahmen bilden besondere Dachformen wie bspw. Pult- oder Flachdächer, bei welchen eine Installation von Solarmodulen zumeist auf einem Aufständersystem erfolgt. [2] [33] [3]

Deutschlandweit betrachtet existiert eine signifikante Häufung der Ausrichtung von EWEH in Süd- oder Ost-West-Ausrichtung. So weichen über 20 % der Dächer aller EWEH um weniger als  $\pm 5^\circ$  von einer solchen idealen Orientierung ab. [2]

Abbildung 23 zeigt die Orientierungsverteilung der Dachflächen von EWEH in Sachsen auf Basis einer Analyse von etwa 116.000 Gebäuden. Die Darstellung erfolgt in  $1^\circ$ -Schritten. Bei der Interpretation muss beachtet werden, dass die Randklassen nur eine Breite von  $0,5^\circ$

besitzen. Auffällig ist, dass etwa 2 % der EWEH in Sachsen eine exakte Ost-West-Ausrichtung aufweisen. Weitere 1,5 % der untersuchten Gebäude besitzen eine perfekte Süd-Orientierung. [3]



**Abbildung 23 – Orientierungsverteilung in 1°-Schritten der Dachfläche von Ein-Wohneinheiten-Häusern in Sachsen [2]**

## 4 Aufbau des Versuchsstandes

### 4.1 Bestehende Vorarbeiten

Es wurden Voruntersuchungen für diese Masterarbeit im Rahmen einer Projektarbeit durchgeführt. Der Fokus lag auf der Realisierung einer geeigneten Beleuchtungseinheit, welche gedimmt werden kann sowie eine externe und möglichst frei programmierbare Ansteuerung ermöglicht. Es wurde das schematisch in Abbildung 24 dargestellte Beleuchtungskonzept entwickelt und anhand eines provisorischen Aufbaus getestet. Des Weiteren wurde eine Teileauswahl vorgenommen. Die Nachbildung der Sonne bzw. der realen Beleuchtungsszenarien soll über das Erreichen einer Beleuchtungsstärke gleicher Intensität auf der Fläche des miniaturisierten Solarmoduls realisiert werden. Es wird keine vollständige Abbildung des Sonnenspektrums erreicht. [43]

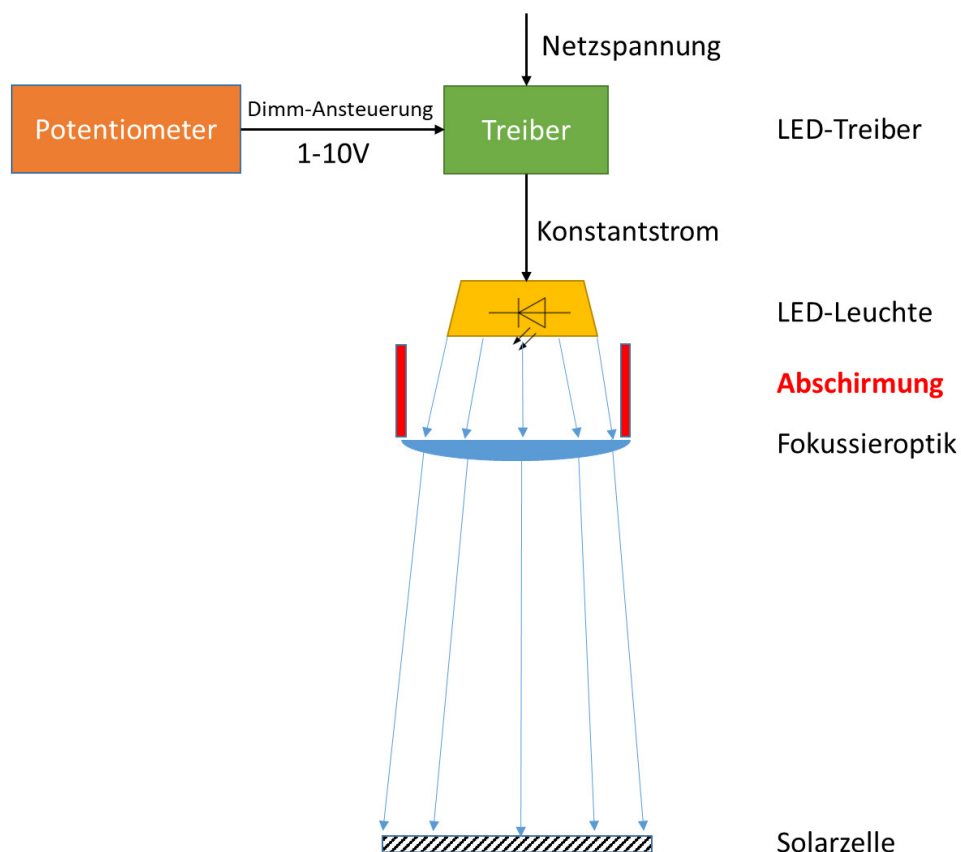


Abbildung 24 – Prinzipskizze einer einzelnen Beleuchtungseinheit nach [43]

Das entwickelte Beleuchtungskonzept funktioniert vereinfacht folgendermaßen: Der Treiber erzeugt aus der Netzspannung einen konstanten Gleichstrom, welcher im konkreten Fall der eingesetzten LED-Leuchte 350 mA beträgt. Das von der LED emittierte Licht wird von einer Fokussieroptik, welche aus einer Plankonvexlinse besteht, zielgenau auf das zu bestrahlende Solarmodul gebündelt. So erfolgt zum einen eine bessere Ausnutzung des vorhandenen

Lichts. Außerdem gelangt weniger unerwünschtes Streulicht auf benachbarte Solarmodule, was zu einem Verfälschen der dort gewünschten Beleuchtungsszenarien führen würde. Zudem wird eine Abschirmung zwischen der LED-Leuchte und der Fokussieroptik benötigt, welche Streulicht eliminiert, welches sonst an der Fokussieroptik vorbeistrahlen würde. Als Abschirmung ist ein nach oben verlängerter Linsenhalter der Fokussieroptik vorgesehen. [43]

Eine Anforderung bestand in der Ausleuchtung eines Spots mit einem Durchmesser von 100 mm. Sollen parallele Lichtstrahlen das Solarmodul beleuchten, würde eine Plankonvexlinse mit mindestens 100 mm Durchmesser benötigt werden. Sowohl aus Erwägungen hinsichtlich des Bauraums als auch der Kosten wurde eine Linse mit 75 mm Durchmesser eingesetzt, welche so platziert wird, dass eine leichte Strahlauffächerung entsteht.

Der ausgewählte Treiber ermöglicht das Dimmen der LED-Leuchte. Die Dimm-Ansteuerung erfolgt mittels des 1-10V-Verfahrens, welches ein analoges Steuersignal vorsieht. 10 V entsprechen der vollen Helligkeit der LED-Leuchte. Liegt 1 V an, wird der Lichtstrom der LED auf das niedrigste mögliche Leuchtniveau reduziert. Die verschiedenen Signalgrößen können bspw. durch den Einsatz eines Potentiometers realisiert werden. Wird ein digitales Potentiometer verwendet, welches durch einen Mikrocontroller angesteuert wird, entstehen viele Möglichkeiten bezüglich der Programmierung und Vernetzung. So kann bspw. eine Netzwerkanbindung über ein WLAN (Wireless Local Area Network – drahtloses lokales Netzwerk) erfolgen. [43]

Abbildung 24 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer einzelnen Beleuchtungseinheit. Im finalen Gesamtaufbau werden insgesamt 8 Solarmodule beleuchtet, sodass 8 jeweils identisch aufgebaute Beleuchtungseinheiten bestehend aus Treiber, Potentiometer, LED-Leuchte und Fokussieroptik benötigt werden.

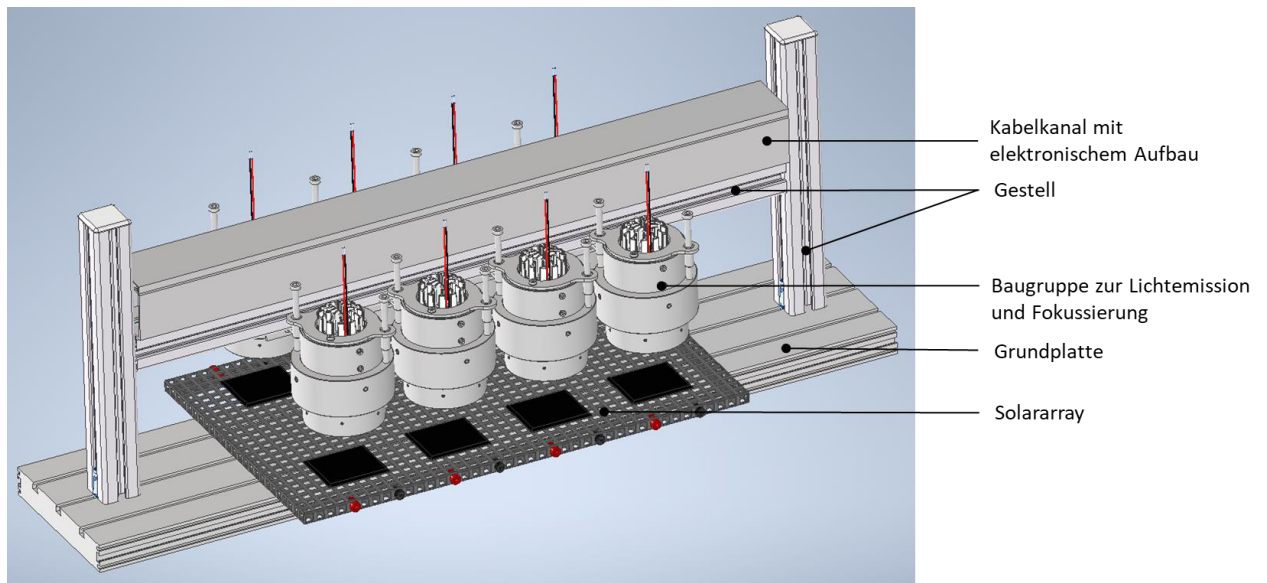
## **4.2 Mechanischer Aufbau**

Auf Basis der zuvor durchgeführten (und in Kapitel 4.1 zusammengefassten) Projektarbeit wurde eine finale Konstruktion des Versuchsstandes erstellt, welche in Abbildung 25 dargestellt ist. Abbildung 26 sowie Anhang 3 zeigen den final realisierten Aufbau.

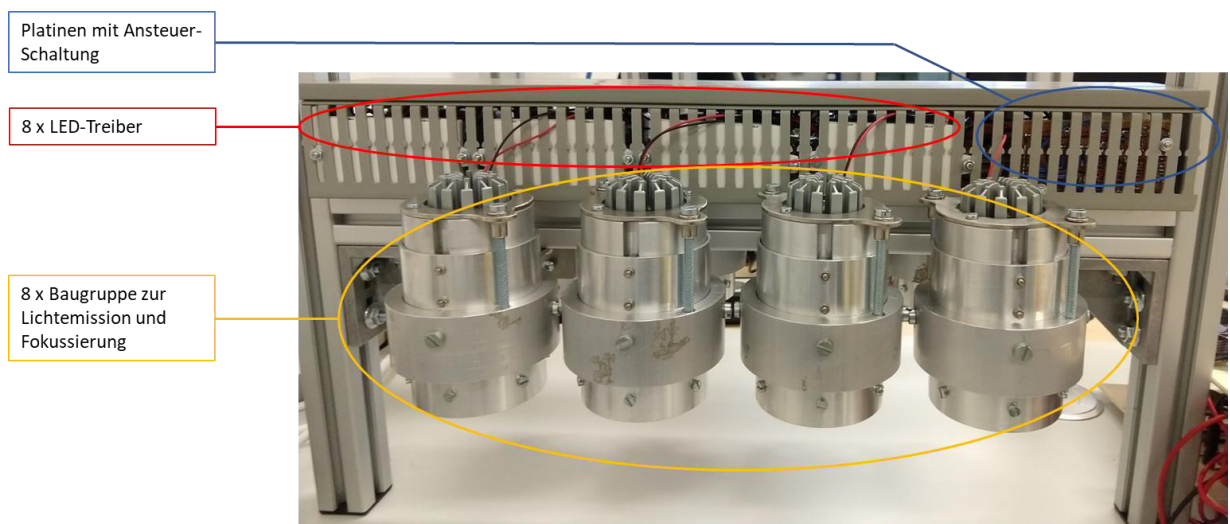
Die Hauptbestandteile bilden

- die Grundplatte,
- das Solararray,
- das Gestell,
- acht der jeweils identischen Baugruppen zur Lichtemission und Fokussierung sowie
- der Kabelkanal, welcher den elektronischen Aufbau beinhaltet.





**Abbildung 25 – Konstruktion des Versuchsstandes**



**Abbildung 26 – realisierter Versuchsstand mit elektronischem und mechanischem Aufbau**

Die Verwendung der Grundplatte und des Solararrays, welche aufgrund eines anderen Projektes erstellt werden sollen, sind als Bedingung vorgegeben. Eine weitere Anforderung bestand im, soweit möglich, Einsatz standardisierte Teile, welche einen simplen, kostengünstigen und einfach erweiterbaren Aufbau ermöglichen.

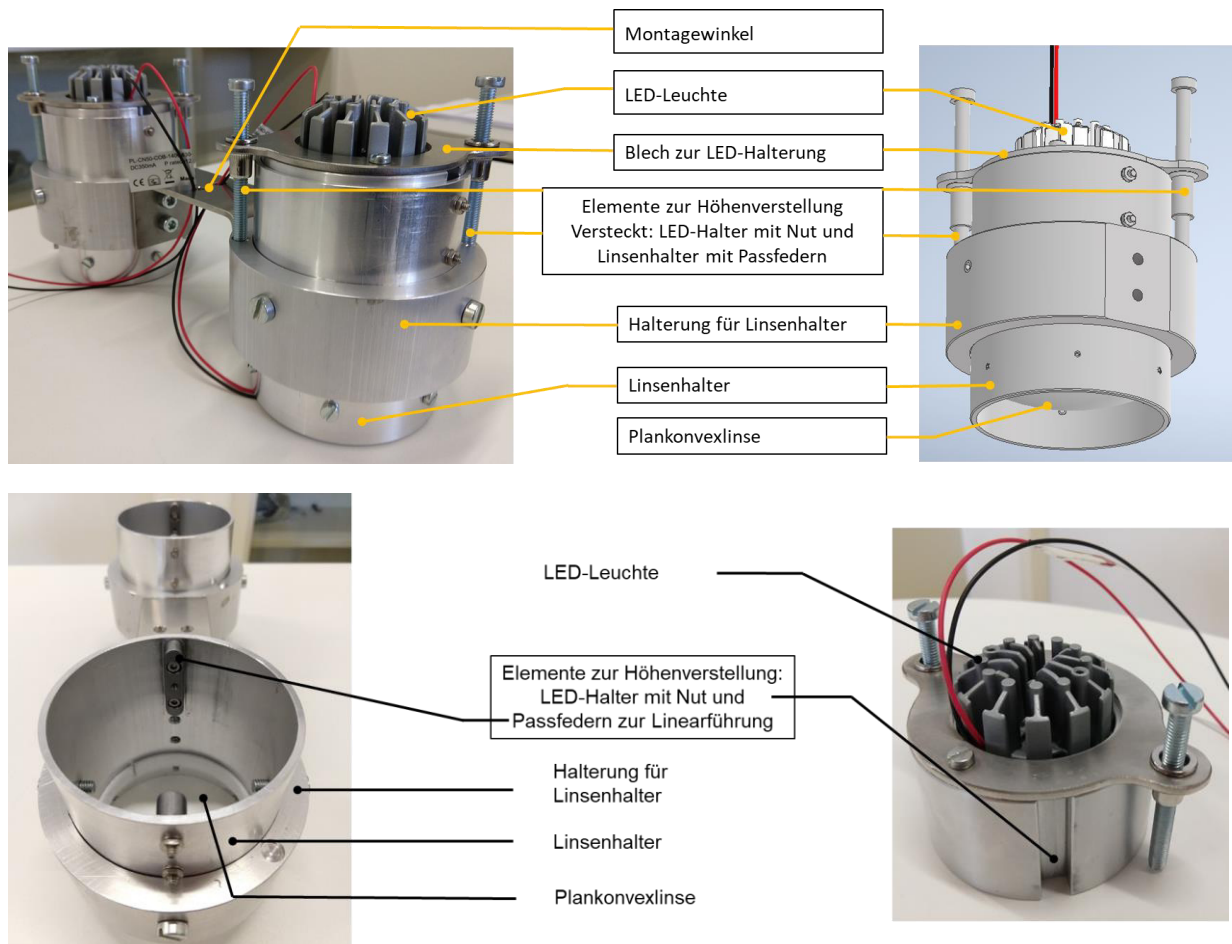
Es soll auf Ebene des Solararrays ein Lichtspot mit einem Durchmesser von 100 mm erzeugt werden. Die Größe des Lichtspots ist sowohl vom Abstand zwischen LED-Leuchte und Linse als auch von der Distanz zwischen LED-Leuchte und Solararray abhängig.

Das Gestell ermöglicht durch Verschiebung des Querbalkens die Veränderung des Abstandes zwischen LED-Leuchte und Solararray. Des Weiteren ist ein horizontales Verschieben der einzelnen Beleuchtungseinheiten vorgesehen. Die verschiedenen Verstelloptionen

ermöglichen es außerdem, den Versuchsstand an spätere Änderungen der Anforderungen oder Anwendungen anzupassen.

Die Baugruppe zur Lichtemission und Fokussierung ist in Abbildung 27 dargestellt und umfasst die LED-Leuchte sowie die Linse. Des Weiteren sind verschiedene Armaturen integriert, die sowohl der Montage und der Verbindung mit dem Gestell als auch der Veränderung des Abstandes zwischen LED-Leuchte und Linse dienen. Dadurch kann eine Feinjustierung des LED-Linsen-Abstandes und des damit zusammenhängenden Spotsdurchmessers vorgenommen werden.

Die technischen Zeichnungen der für diesen Versuchsstand konstruierten und gefertigten Elemente LED-Halter, Blech zur LED-Halterung, Linsenhalter, Halterung für Linsenhalter und Montagewinkel befinden sich in Anhang 4. Bis auf Ausnahme der Montagewinkel und der Bleche zur LED-Halterung, welche aus nichtrostendem Stahl (V2A) bestehen, wurden die weiteren Bauteile aus Halbzeugen bestehend aus einer Aluminium-Legierung gefertigt.



**Abbildung 27 – Baugruppe zur Lichtemission und Fokussierung**

Im Rahmen des Masterprojekts erfolgte ein provisorischer Versuchsaufbau einer einzelnen Beleuchtungseinheit. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der finalen Konstruktion

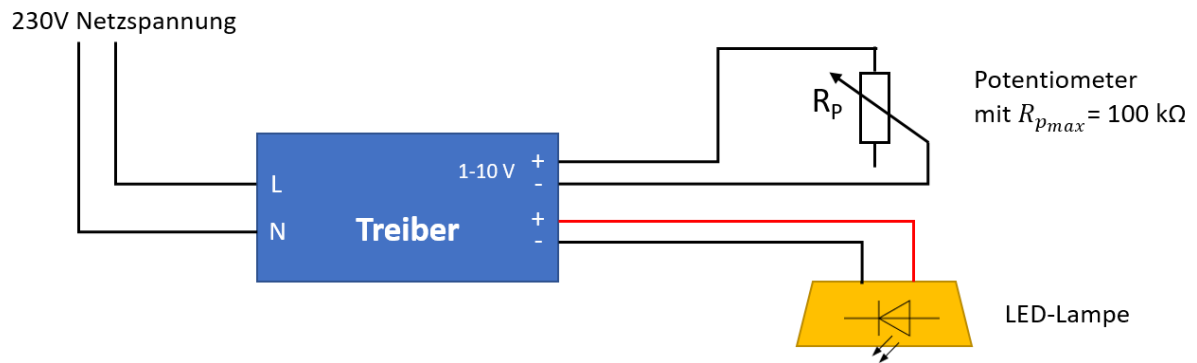
des Versuchsstandes berücksichtigt. So wurde der Linsenhalter nach oben verlängert, um unerwünschtes Streulicht auf die benachbarten Solarmodule zu eliminieren. Ohne diese Abschirmung würde ein deutlich geringerer Teil des von der LED-Leuchte emittierten Lichts durch die Linse fokussiert werden und ein signifikanter Teil des Lichts an der Fokussieroptik vorbei auf die benachbarten Solarmodule gelangen.

Zudem erfolgte eine Professionalisierung der im Masterprojekt erstellten Konstruktion. Der Abstand zwischen LED-Leuchte und Linse lässt sich nun mit einer Linearführung variieren. Außerdem wurden alle Bauteile zur Halterung so angepasst, dass weder durch die Montage noch Einstellung der Abstände eine Verkipfung der LED-Leuchte oder der Plankonvexlinse bezüglich der Solar modul-Ebene möglich ist.

### **4.3 Elektronischer Aufbau**

Anhand des in Kapitel 4.1 beschriebenen Konzepts ist es möglich, die LED-Leuchte zu dimmen. Die Ansteuerung erfolgt über die 1-10 V-Schnittstelle des ausgewählten Treibers, welche ein dauerhaft anliegendes, analoges Steuersignal vorsieht. Dabei entsprechen 10 V der vollen Helligkeit der LED-Leuchte und 1 V dem niedrigsten möglichen Leuchtniveau. Eine Kennlinie mit dem Verhältnis von Steuerspannung und Lichtniveau der LED ist durch den 1-10 V-Standard nicht festgelegt. Der eingesetzte Treiber sieht zudem ein Ausschalten der LED-Lampe bei einer Spannung unter 1V vor. Eine solche Erweiterung der Schnittstellen-Funktionen wird als 0/1-10 V bezeichnet. [44] [46]

Es existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Dimm-Ansteuerung mittels der 1-10 V-Schnittstelle. Zum einen kann der Treiber als aktive Komponente fungieren, wobei der Steuerstrom permanent durch den Treiber bereitgestellt wird. Die Leerlaufspannung beträgt 10 V, sodass ohne angeschlossene elektrische Bauelemente der maximal mögliche Lichtstrom der LED abgestrahlt wird. Ein Dimmen der LED ist durch das Anschließen eines Potentiometers möglich. Abbildung 28 zeigt schematisch einen Aufbau mit dem Treiber als aktive Komponente, welcher im Rahmen des Masterprojekts getestet wurde. Es sind ein manuelles Potentiometer und eine LED-Lampe angeschlossen. Wird ein digitales Potentiometer verwendet, welches durch einen Mikrocontroller angesteuert wird, entstehen vielfältige Möglichkeiten bezüglich Programmierung und Vernetzung mit anderen Geräten. [46]



**Abbildung 28 – Dimmen mittels 1-10 V-Schnittstelle und Potentiometer**

Eine weitere Option besteht darin, ein externes Spannungssignal auf die 1-10V-Schnittstelle zu geben. Als Signalquelle könnte bspw. ein PC mit Messkarte und analogem Ausgang oder eine Mikrocontroller-Schaltung mit Digital-Potentiometer dienen. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Applikation ein analoges Steuersignal mit einem minimalen Wert unter 1 V und maximal 10 V zur Verfügung stellt. [31]

An den mittels dieser Masterarbeit zu erstellenden Versuchsstand bestehen als Anforderungen u.a. das Nachbilden unterschiedlicher Beleuchtungsmuster und die Anbindung an einen Webservice. Zur Umsetzung werden eine Programmierbarkeit der Ansteuerung und die Implementierung einer Funkelektronik inklusive eines geeigneten Übertragungsprotokolls benötigt. Es wurde deshalb entschieden, eine Mikrocontroller-Schaltung mit Digital-Potentiometer zu nutzen, welche kostengünstig, platzsparend und einfach integrierbar ist.

Als Mikrocontroller wurde der ESP32 ausgewählt. Dieser ermöglicht mit WLAN und BLE (Bluetooth Low Energy) alle üblichen kabellosen sowie mit I<sup>2</sup>C, SPI und UART die gängigen kabelgebundenen Kommunikationsmethoden. Außerdem weist ein Entwicklerboard mit einem ESP32 einen relativ günstigen Preis von etwa 7 € auf. Des Weiteren kann zur Programmierung die weit verbreitete Arduino-Programmierungsumgebung verwendet werden, für die eine gute Dokumentation und viele auf den ESP32 angepasste Bibliotheken zur Verfügung stehen. Zudem können die vorhandenen Programmier-Erfahrungen bezüglich der Arduino-Umgebung aus vorherigen Arbeiten genutzt werden.

An das Digital-Potentiometer wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Geringe Anschaffungskosten
- Maximaler Widerstands-Wert 100 k $\Omega$  (Empfehlung vom Datenblatt des Treibers) [44]
- Mindestens 256 Widerstands-Stufen, um relativ geringe Dimm-Abstufungen zu realisieren
- Kommunikation über ein Bussystem, welches die Ansteuerung mehrerer Digital-Potentiometer mittels eines einzelnen ESP32-Mikrocontrollers ermöglicht

- Bauform PDIP (Plastic Dual in-line package), kein SMD (Surface-mounted device – oberflächenmontiertes Bauelement), damit Testschaltungen und Platinenerstellung ohne SMD-Löt-Kenntnisse realisiert werden können
- Ein- und Ausgänge für Spannungen zwischen 0 V und 10 V geeignet, um Dimmen analog zu Abbildung 28 zu ermöglichen

Eine Recherche bezüglich geeigneter Digital-Potentiometer ergab kein Bauteil, welches alle Anforderungen erfüllt. Als Kompromiss wurde mit dem Microchip MCP42100-I/P ein Potentiometer ausgewählt, welches den ersten fünf Kriterien entspricht. Allerdings liegt der mögliche Spannungsbereich der Ein- und Ausgänge nur zwischen 0 V und der Versorgungsspannung, welche zwischen 2,7 V und 5,5 V betragen kann. [23]

Das verwendete Digital-Potentiometer beherrscht eine Kommunikation mittels des SPI-Standards (SPI – Serial Peripheral Interface), welches ein Bussystem mit separaten Verbindungen zur zeitlichen Synchronisation (SCK – Serial Clock), Datenübertragung (SO – Serial Data Output sowie SI – Serial Data Input) und Aktivierung des Zielgeräts (CS – Chip Select) darstellt. SPI arbeitet nach einer Master-/Slave-Logik, d.h. ein Controller ist als Master in der Lage, viele periphere Geräte wie z.B. Sensoren oder Digital-Potentiometer als Slaves anzusteuern. [13]

In einer standardmäßigen SPI-Konfiguration benötigt jedes Peripheriegerät eine eigene CS-Leitung. Dies bedeutet, dass zum Ansteuern von acht Digital-Potentiometern insgesamt acht CS-Ausgänge am Mikrocontroller zur Verfügung stehen müssten, was durch den ESP32 nicht erfüllt wird. Eine Lösung dieses Problems stellen externe Schieberegister zur Porterweiterung dar.

Des Weiteren existieren SPI-Komponenten wie z.B. das ausgewählte Digital-Potentiometer MCP42100-I/P, welche als periphere Geräte bzw. Slaves eine sogenannte Daisy-Chain-Konfiguration (Daisy Chain – Gänseblümchenkette) ermöglichen. Abbildung 29 zeigt eine solche SPI-Daisy-Chain-Verschaltung für eine einseitige Datenübertragung vom Master zu den Slave-Geräten. Alle Peripheriegeräte teilen sich eine CS-Verbindung, sodass nur ein CS-Ausgang am Mikrocontroller benötigt wird. Die zu übertragenden Daten erreichen als Input das erste Gerät, welches die an die weiteren Geräte zu übermittelnden Nachrichten wiederum als Output an die nächste Komponente weiterreicht. Dies setzt sich solange fort, bis alle Nachrichten ihr Zielgerät erreicht haben und durch ein über die CS-Leitung übertragenes Signal die Datenübertragung beendet wird. [13]

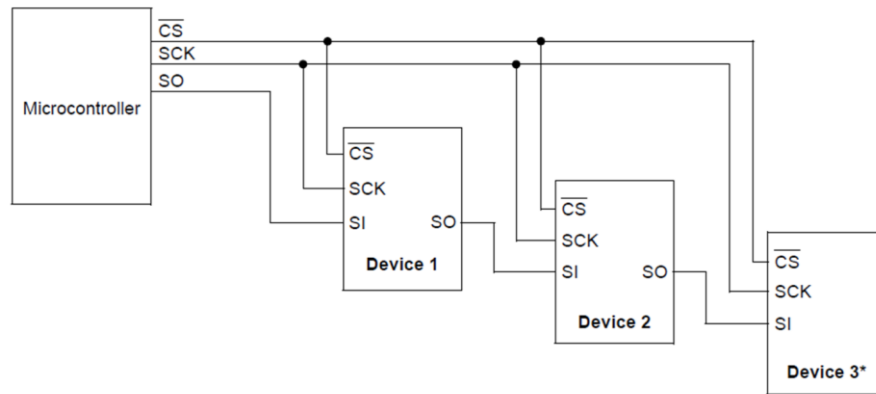


Abbildung 29 – SPI-Verbindung als Daisy-Chain-Konfiguration [23]

Da an den Ein- und Ausgängen des ausgewählten Digital-Potentiometers laut Datenblatt maximal 5,5 V anliegen dürfen, existiert nicht die Möglichkeit das Digital-Potentiometer wie in Abbildung 28 dargestellt direkt an der 1-10V-Schnittstelle des Treibers anzuschließen. Deshalb wurde die zweite Möglichkeit der 1-10V-Ansteuerung gewählt, welche in der Verwendung eines externen Spannungssignals besteht.

Es wurde der schematisch in Abbildung 30 dargestellte Aufbau umgesetzt. Dabei wird eine Spannung von 5 V, welche der Versorgungsspannung des Mikrocontrollers entspricht, an den Potentiometer-Eingang angelegt. Um den benötigten Spannungsbereich von bis zu 10 V zu erreichen, wird die über das Digital-Potentiometer abgenommene Spannung anschließend von einem Operationsverstärker (OPV) verstärkt. Das Digital-Potentiometer wird über ein SPI-Bussystem von dem Mikrocontroller ESP32 angesteuert und kann in 256 Abstufungen Widerstands-Werte zwischen 125  $\Omega$  und 100 k $\Omega$  annehmen. [23]

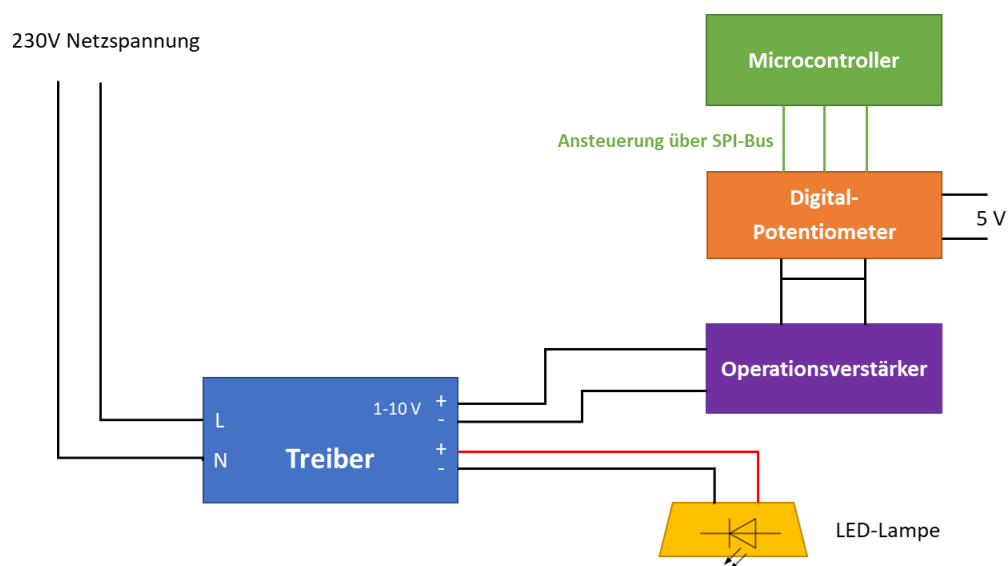


Abbildung 30 – Prinzipskizze Ansteuerung LED-Treiber mittels externem Spannungssignal

Die in Abbildung 30 prinzipiell ersichtliche Ansteuerung wurde zunächst als provisorischer Versuchsaufbau für eine einzelne Beleuchtungseinheit realisiert, welcher in Anhang 5 ersichtlich ist. Es wurde die prinzipielle Eignung des oben beschriebenen Dimm-Ansatzes mittels extern erzeugten 1-10V-Steuersignals überprüft.

Dabei wurde die Erkenntnis gewonnen, dass ein zusätzlicher Widerstand im Potentiometer-Stromkreis benötigt wird. Andernfalls erfolgt keine Veränderung des Dimmniveaus und die LED-Lampe verhält sich, als ob sich die 1-10V-Schnittstelle im Leerlauf befinden würde. Es liegen keine Informationen oder Schaltpläne vor, wie der Treiber intern die durch die 1-10V-Schnittstelle empfangenen Signale auswertet. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass zur Berücksichtigung eines solchen externen Signals eine gewisse Höhe der Stromstärke erforderlich ist.

Abbildung 31 zeigt einen Ausschnitt aus der Ansteuer-Schaltung für eine einzelne Beleuchtungseinheit. Es sind verschiedene Kombinationen aus der Größe des vorgeschalteten Widerstandes  $R_1$  und den Potentiometer-Werten möglich. Dabei gilt bei einer Eingangsspannung von 5 V für die vom Potentiometer abgegriffene Spannung  $U_1$  folgender Zusammenhang zwischen  $R_1$  und dem Widerstand des Potentiometers  $R_p$ :

$$U_1 = \frac{R_p}{R_p + R_1} * 5 \text{ V} \quad (4.1)$$

Die Spannung  $U_1$  wird anschließend durch die OPV-Schaltung mit einem Verstärkungsfaktor  $v$  verstärkt, damit beim maximalen Potentiometer-Wert  $R_{p_{max}} = 100 \text{ k}\Omega$  eine Steuerspannung  $U_T$  von 10 V vorhanden ist:

$$U_T = v * U_1 \quad (4.2)$$

Diese Spannung  $U_T$  dient als externes Steuersignal zum Dimmen der LED-Leuchte. Tabelle 4 zeigt für ausgewählte Werte von  $R_1$  die nach Formel (4.1) und (4.2) berechneten nötigen Verstärkungsfaktoren  $v$ , um eine Spannung  $U_T$  von 10 V zu erreichen.

**Tabelle 4 – benötigter Verstärkungsfaktor  $v$  in Abhängigkeit von  $R_1$**

| $R_1$ [k $\Omega$ ] | 10  | 20  | 30  | 40  | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| $v$                 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3  | 4   | 5   | 6   | 7   |

Die Größe des Widerstandes  $R_1$  stellt einen Kompromiss aus feiner Auflösung bei kleinen Dimmniveaus ( $R_1$  hoch) und Erreichen der vollen Steuerspannung  $U_T$  von 10 V bzw. der Höhe des Verstärkungsfaktors  $v$  dar. Ein größerer Verstärkungsfaktor führt zu einer steigenden Sensitivität der Steuerspannung  $U_T$  auf kleinere Abweichungen der Spannung  $U_1$ .

Das Verhalten des OPVs und der dadurch entstehende Verstärkungsfaktor  $v$  ist abhängig von der Beschaltung des OPVs. Für den vorliegenden Anwendungsfall einer nicht-invertierenden

Verstärkerschaltung ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Verstärkungsfaktor  $v$  und der Größe der Widerstände  $R_2$  und  $R_3$ : [19]

$$v = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (4.3)$$

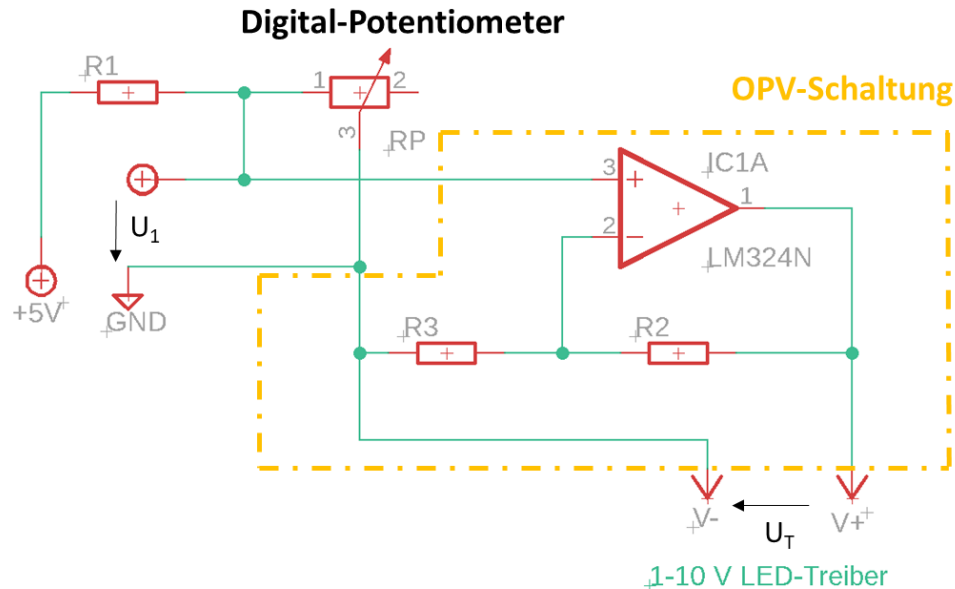


Abbildung 31 – Ausschnitt aus der Ansteuer-Schaltung für eine LED mit Digital-Potentiometer und OPV-Schaltung

Anhand des provisorischen Versuchsaufbaus wurden verschiedene Widerstandswerte für  $R_1$  getestet. Dabei wurde festgestellt, dass bei Werten ab  $150\text{ k}\Omega$  keine volle Helligkeit der LED-Leuchte erreicht werden kann. Es kam beim Messen der Spannung  $U_T$  zu großen Abweichungen zwischen den theoretisch zu erwartenden und den tatsächlichen Spannungswerten. Da der interne Schaltungsaufbau des LED-Treibers unbekannt ist, können keine validen Erklärungen für diesen Effekt vorgenommen werden.

Aus diesem Grund wurde für den Widerstand  $R_1$  ein Wert von  $100\text{ k}\Omega$  gewählt, welcher eine feine Abstufung der kleinen Spannungsbereiche bei gleichzeitigem Sicherstellen der vollen Beleuchtungsstärke der LED-Lampe ermöglicht. Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass ein Verstärkungsfaktor  $v = 4$  benötigt wird. Deshalb wurden Werte von  $R_2 = 30\text{ k}\Omega$  und  $R_3 = 10\text{ k}\Omega$  verwendet, welche nach Gleichung (4.3) einen entsprechenden Verstärkungsfaktor von  $v = 4$  erzeugen.

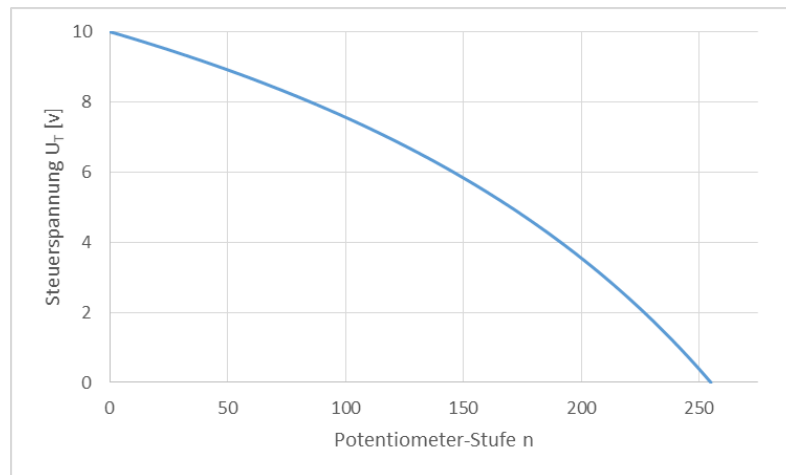
Wie zuvor beschrieben, kann das Digital-Potentiometer 256 verschiedene Werte  $R_p$  bis maximal  $100\text{ k}\Omega$  annehmen. In Verbindung mit den Formeln (4.1) und (4.2) ergibt sich mit den konkreten Widerstandswerten von  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  in Abhängigkeit von der jeweiligen Potentiometer-Stufe  $n$  die folgende Steuerspannung  $U_T$  des Treibers:



$$U_T = v * \frac{R_p}{R_p + R_1} * 5 \text{ V} = v * \frac{\frac{100 \text{ k}\Omega}{255} * (255 - n)}{\frac{100 \text{ k}\Omega}{255} * (255 - n) + 100 \text{ k}\Omega} * 5 \text{ V} = 4 * \left( \frac{255}{n - 510} + 1 \right) * 5 \text{ V} \quad (4.4)$$

n kann Werte zwischen 0 und 255 annehmen. Es wird ein gleichmäßiger Abstand zwischen den Stufen angenommen. Bei n = 0 nimmt R<sub>p</sub> einen Wert von 100 kΩ an. Bei n = 128 beträgt R<sub>p</sub> 49,8 kΩ. Anhang 6 zeigt eine Auswahl nach (4.4) berechneter Werte für U<sub>T</sub>. Eine Ausnahme stellt der kleinste Wert des Potentiometers dar, welcher laut Datenblatt 125 Ω beträgt. [23]

Gleichung (4.1) zeigt, dass aufgrund des Spannungsabfalls über den Widerstand R<sub>1</sub> der Zusammenhang zwischen der Potentiometer-Spannung U<sub>1</sub> sowie dem Potentiometer-Wert R<sub>p</sub> und damit der Potentiometer-Stufe n nicht-linear ist. Bei der Steuerspannung U<sub>T</sub> handelt es sich nach (4.2) um die v-fache verstärkte Potentiometer-Spannung U<sub>1</sub>, sodass sich U<sub>T</sub> ebenfalls nicht-linear zur Potentiometer-Stufe n verhält. Abbildung 32 zeigt diese Abhängigkeit auf Basis mittels Gleichung (4.4) berechneter Werte.



**Abbildung 32 – Zusammenhang Steuerspannung U<sub>T</sub> und Potentiometer-Stufe n**

Tabelle 5 gibt eine Übersicht zu allen Komponenten inklusive ihrer konkreten Produktbezeichnungen und einem ungefähren Verkaufspreis, welche nach dem zuvor erläuterten Konzept zum Dimmen und Ansteuern des Versuchsstandes erforderlich sind. Zur Realisierung des Versuchsstandes werden insgesamt acht LED-Lampen benötigt, weshalb ebenfalls jeweils acht Treiber benötigt werden. Die verwendeten Digital-Potentiometer beinhalten je Gehäuse zwei Potentiometer, sodass insgesamt vier MCP 42100-I/P eingesetzt werden. Es sind zwei OPVs vom Typ LN324 vorgesehen, welche jeweils vier OPVs in einem Gehäuse vereinen.

Anhang 7 beinhaltet die Schaltpläne der gesamten Ansteuer-Schaltung. In Anhang 8 sind die realisierten Platinen der Ansteuer-Schaltung abgebildet. Aufgrund des begrenzten Bauraums sowie der unterschiedlichen Versorgungsspannungen der Potentiometer-Schaltung und der

OPV-Schaltung wurden zwei getrennte Platinen erstellt. Anhang 9 zeigt die finale Montage der elektronischen Komponenten im Verdrahtungskanal.

**Tabelle 5 – Überblick über die verwendete elektronischen Komponenten**

| <b>Komponente</b>         | <b>Produkt-<br/>Bezeichnung</b>         | <b>Gesamt-<br/>anzahl</b> | <b>Anmerkungen</b>                                                                                                                                               | <b>Preis<br/>(ca.)</b> |
|---------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| LED-Treiber               | TCI DC<br>MINIJOLLY BI                  | 8                         | Dimm-Ansteuerung mittels 1-<br>10V-Verfahren;<br><br>Konstantstrom von 250 bis 900<br>mA möglich                                                                 | 24 €                   |
| LED-Leuchte               | Ledvance<br>COIN 50 1400-<br>830-24D-G1 | 8                         | Lichtstrom: 1430 lm;<br><br>Abstrahlwinkel: 24°<br><br>Lichtfarbe: 3000 K                                                                                        | 12 €                   |
| Digital-<br>Potentiometer | MCP 42100-I/P                           | 4                         | Kommunikation über SPI,<br>ermöglicht Daisy-Chaining<br>mehrerer Bauteile;<br><br>Beinhaltet 2 Potentiometer je<br>Gehäuse;<br><br>256 Werte;<br><br>Max. 100 kΩ | 2 €                    |
| OPV                       | LN 324                                  | 2                         | beinhaltet 4 OPVs je Gehäuse                                                                                                                                     | 0,30 €                 |
| Mikrocontroller           | ESP 32                                  | 1                         | Entwicklerboard                                                                                                                                                  | 7 €                    |
| Widerstände               | 10 kΩ, 30 kΩ,<br>100 kΩ                 | je 8                      |                                                                                                                                                                  | je 0,10 €              |
| Netzteil 5 V              | MeanWell<br>APV-8-5                     | 1                         | für Versorgungsspannung<br><br>Mikrocontroller + Digital-<br>Potentiometer                                                                                       | 5 €                    |
| Netzteil 12 V             | MeanWell RS-<br>15-12                   | 1                         | Für Versorgungsspannung<br><br>OPVs                                                                                                                              | 10 €                   |

## 4.4 Kommunikationstechnischer Aufbau

### 4.4.1 Eingesetzte Kommunikationsprotokolle

Eine Möglichkeit zur Erklärung der Kommunikations-Vorgänge in der Netzwerktechnik stellt das DoD-Schichtenmodell (DoD – Department of Defense – Verteidigungsministerium der USA) dar, welches in den 1970er-Jahren auf Anregung des US-Verteidigungsministeriums entwickelt wurde. Es handelt sich um das simpelste der üblichen Erklärungsmodelle, ist aber ausreichend zur Einordnung der in dieser Arbeit beschriebenen Protokolle. Tabelle 6 zeigt das DoD-Schichtenmodell. Es besteht aus vier Schichten, welche die unterschiedlichen Aufgaben der Netzwirkommunikation repräsentieren. [4]

**Tabelle 6 – DoD-Schichtenmodell nach [4]**

| Nr. | DoD-Schicht | Beispiele             |
|-----|-------------|-----------------------|
| 4   | Anwendung   | HTTP, MQTT, SMTP, ... |
| 3   | Transport   | TCP, UDP              |
| 2   | Netzwerk    | IP                    |
| 1   | Netzzugang  | WLAN, Ethernet, ...   |

In der Netzzugangs-Schicht als unterste Schicht wird das Übertragungsmedium wie bspw. Lichtwellenleiter oder Funkwellen definiert. Zudem werden der Netzzugang sowie die Datenübertragung zwischen den Endgeräten geregelt. Beispiele hierfür stellen WLAN oder Ethernet dar. In der Netzwerkschicht wird zumeist auf das IP-Protokoll zurückgegriffen. Die einzelnen Datenpakete werden dort in ihrer Größe an das System angepasst und bekommen eine Adresse zugewiesen. Es wird sichergestellt, dass die Daten vom Startpunkt an das Ziel zugestellt werden können. Die Transportschicht dient der Steuerung des Datenflusses zwischen der Netzwerkschicht und der Anwendung. Außerdem findet eine Verbindungsüberwachung und Fehlerbehandlung statt. [4] [39]

Die konkrete Verwendung der Daten erfolgt in der Anwendungsschicht, wobei eine Vielzahl von Möglichkeiten besteht. So kann bspw. eine E-Mail über SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) gesendet, eine Webseite über HTTP (Hypertext Transfer Protocol) ausgeliefert oder Sensordaten mittels MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) übertragen werden. [4]

In der konkreten Realisierung dieser Masterarbeit wird in der Anwendungsebene zur Kommunikation zwischen dem Moderatoren-Endgerät und dem Server das HTTPS-Protokoll (HTTPS – Hypertext Transfer Protocol Secure) eingesetzt. Die Datenübertragung zwischen dem Server und dem Mikrocontroller der Applikation erfolgt mittels MQTT.

HTTPS wird zur sicheren Übermittlung von Daten im World Wide Web verwendet, wobei die Hauptanwendung in der verschlüsselten Kommunikation zwischen dem Webbrowser eines Nutzers und einem Webserver besteht. Es baut auf dem HTTP-Protokoll auf, welches zwischen Transport- und Anwendungsschicht um eine zusätzliche Schicht zur Authentifizierung mittels Sicherheits-Zertifikaten ergänzt wird. Dadurch besteht für beide Kommunikationspartner bei Verbindungsaufbau die Möglichkeit, die Identität des jeweils anderen zu überprüfen. [20]

Bei HTTP handelt es sich um ein im World Wide Web zur Auslieferung von Webseiten sehr weit verbreitetes und seit bald fast 30 Jahren eingesetztes Protokoll. Es basiert auf einem Request-Response-Verfahren. Dabei wird von einem Client eine Anfrage (request) an den Server gestellt, welche anschließend beantwortet (reponse) wird, indem bspw. die angeforderte Webseite an den Client übermittelt wird. [29] [42]

HTTP und insbesondere HTTPS gelten als zuverlässige und sichere Protokolle. Allerdings ist eine Informationsübertragung mit einer Vielzahl von Kommunikationsschritten und verhältnismäßig großen zusätzlichen Datenmengen, dem sogenannten Kommunikationsoverhead, verbunden. Aus diesem Grund ist die Echtzeitfähigkeit der Kommunikation eingeschränkt. Zudem werden im Vergleich zu anderen Protokollen wie z.B. MQTT mehr Übertragungs- und Speicherressourcen benötigt. [17]

MQTT hingegen wurde für Geräte mit limitierten Ressourcen sowie unzuverlässige Netzwerke entwickelt und verursacht deshalb nur einen geringen Kommunikationsoverhead. Es ermöglicht eine echtzeitfähige Kommunikation und arbeitet nach einer Publish/Subscribe-Logik. Ein Client veröffentlicht als sogenannter Publisher Daten unter einem bestimmten Topic, welches von anderen Clients als Subscriber abonniert werden kann. Wird nun eine Nachricht unter diesem Topic veröffentlicht, wird diese an jeden Client versendet, welcher dieses Topic abonniert hat. Ein Broker verwaltet die Kommunikation. Jeder Client, welcher einen Zugriff auf das Netzwerk besitzt, in welchem sich der Broker befindet, kann Topics abonnieren und die entsprechend veröffentlichten Nachrichten erhalten. [29] [42]

Die Auswahl des HTTPS-Protokolls zur Kommunikation zwischen dem Moderatoren-Endgerät und dem Server erfolgte aufgrund der hohen Sicherheit und Zuverlässigkeit des Protokolls. Zudem stellt HTTPS einen üblichen Standard im Internet dar, sodass auf Seite des Moderators zum Aufruf der Benutzeroberfläche und zum Senden des Dimmbefehls nur ein Webbrowser benötigt wird.

Zur Datenübertragung zwischen Server und der Applikation wurde aufgrund der besonderen Eignung für Geräte mit begrenzten Ressourcen wie bspw. Mikrocontrollern auf das MQTT-Protokoll zurückgegriffen. Aus dem Aufbau des Protokolls leiten sich mit der geringeren benötigten Datenmenge sowie der Echtzeitfähigkeit der Kommunikation weitere Vorteile ab.

Bei der Kommunikation zwischen Server und Applikation wurde auf Maßnahmen zur Übertragungssicherheit verzichtet, da diese als nicht kritisch angesehen wurde. Prinzipiell könnte eine unbefugte Person das Passwort vom lokalen WLAN besitzen und das Netzwerk sowie den MQTT-Broker für eine eigene, separate Kommunikation nutzen. Im Worst Case ist denkbar, dass die unbefugte Person Kenntnisse über die verwendeten MQTT-Topics und den Nachrichtenaufbau erlangt hat. Damit ließe sich die Ansteuerung der Dimmzustände der LED-Lampen übernehmen. Schäden können allerdings nicht verursacht werden. Es kann maximal Verwirrung erzeugt werden. Ein Zugriff auf das Hochschul-Netzwerk ist nicht möglich.

#### 4.4.2 kommunikationstechnische Komponenten

Der kommunikationstechnische Aufbau lässt sich prinzipiell auf zwei Hauptkomponenten reduzieren:

- Die **Applikation**, welche aus dem Mikrocontroller, der Ansteuer-Schaltung, den Treibern und den LED-Lampen besteht, sowie
- ein **Server**, der als Schnittstelle zwischen Applikation und Moderator verschiedene Funktionen vereint.

Abbildung 33 verdeutlicht dieses Grundprinzip.

Der Mikrocontroller der Applikation empfängt und verarbeitet die Dimmbefehle eines Moderators, welcher den Versuchsstand bedient. Auf dieser Basis erfolgt die Ansteuerung des Digital-Potentiometers durch den Mikrocontroller zur Umsetzung der Dimmbefehle. Der Server ermöglicht die Kommunikation zwischen Moderator und Applikation. Der Zugriff auf den Versuchsstand erfolgt durch den Moderator mittels einer GUI (graphical user interface – grafische Benutzeroberfläche), wofür lediglich ein Internet-fähiges Endgerät mit einem Webbrowser benötigt wird. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden zwei verschiedene GUIs realisiert, welche in Kapitel 5.1 erläutert werden.

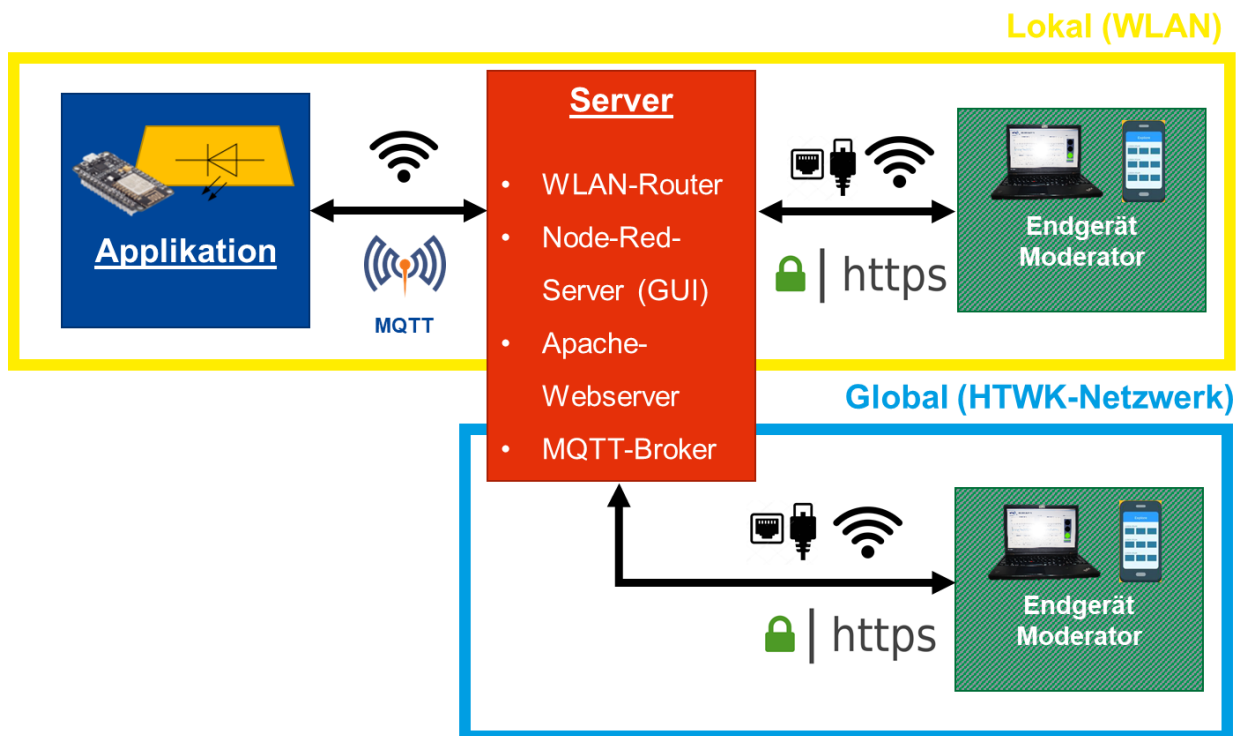


Abbildung 33 – Prinzipskizze kommunikationstechnischer Aufbau

Der für den Einsatz von MQTT zur Kommunikation zwischen dem Server und der Applikation benötigte MQTT-Broker wird ebenfalls auf dem Server implementiert. Die Übermittlung der Information an den Mikrocontroller, mit welchen Werten die LED-Lampen angesteuert werden sollen, erfolgt je nach verwendeter GUI über eine Nachricht mit dem Topic „Verschattung“ oder „Szenario“. Die unter diesen Topics veröffentlichten Nachrichten enthalten acht ganzzahlige Werte zwischen 0 und 255, welche wie in Kapitel 4.3 erläutert die Potentiometer-Stufe und damit den Dimmzustand aller LED-Lampen repräsentieren. „0“ bedeutet die volle Beleuchtungsstärke. Je größer der Zahlenwert der Nachricht ist, desto geringer ist die Beleuchtungsstärke der entsprechend angesteuerten LED-Lampe.

Abbildung 34 zeigt beispielhaft eine mögliche Kommunikation über MQTT. Die GUI veröffentlicht (publish) als MQTT-Client unter dem Topic „Verschattung“ eine Nachricht, welche einen Zahlenwert von in diesem Fall „0“ enthält. Der Mikrocontroller der Applikation teilte im Voraus als Subscriber dem Broker mit, dass Nachrichten des Topics „Verschattung“ abonniert werden sollen. Der Broker empfängt die Nachricht „0“ unter dem Topic „Verschattung“ und stellt fest, dass vom MQTT-Client Applikation dieses Topic abonniert wurde. Die Nachricht wird anschließend vom Broker an den Mikrocontroller übertragen.

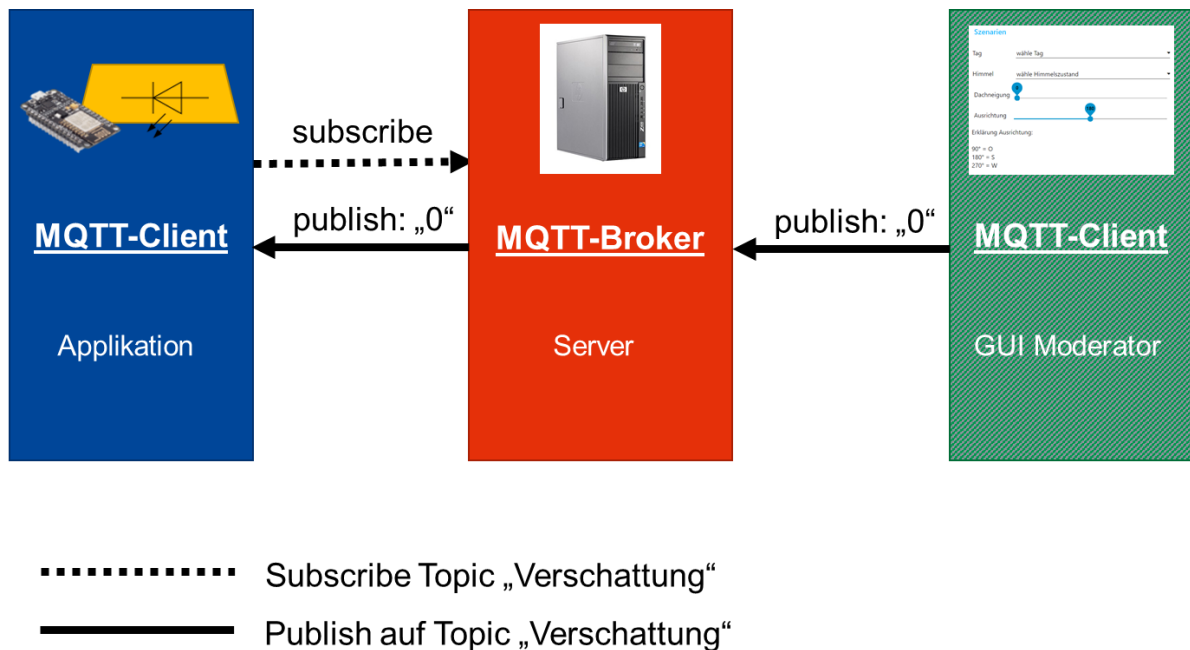


Abbildung 34 – Grundprinzip Kommunikation über MQTT

## Server

Der Server dient als Schnittstelle zwischen Applikation und Moderator. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Funktionalitäten des Servers auf einen Raspberry Pi und einen Desktop-PC mit dem Betriebssystem Ubuntu Server 20.04 aufgeteilt.

Der Raspberry Pi fungiert zum einen als WLAN-Router, welcher ein lokales Netzwerk erzeugt. Des Weiteren übernimmt der Raspberry Pi mittels der Open-Source-Lösung Mosquitto die Funktion als MQTT-Broker. Dadurch kann eine Kommunikation zwischen lokalen Moderatoren-Endgeräten, dem Server und dem Mikrocontroller der Applikation erfolgen.

Eine weitere Aufgabe des Servers stellt das Bereitstellen der GUIs und das Verarbeiten der dort getroffenen Eingaben dar. Die GUIs ermöglichen einen browserbasierten Fernzugriff des Moderators, sodass es sich im Prinzip um Websites handelt.

Der strukturelle Aufbau einer Website wird durch ein HTML-Dokument (HTML – Hypertext Markup Language) festgelegt. Es erfolgt eine semantische Strukturierung der Elemente der Website wie bspw. von Überschriften, Textabsätzen und Bildern. Das Aussehen dieser Elemente kann durch das Einbinden einer CSS-Datei (Cascading Style Sheets) bestimmt werden, welche z.B. Layout, Farben und Schriftgrößen bestimmt. [27] [41]

Eine solche Website, bestehend aus HTML- und CSS-Dokumenten, wird als statische Website bezeichnet. Bei jedem clientseitigem Aufruf durch den Nutzer werden die HTML- und CSS-Dateien vom Webserver ausgeliefert und im Webbrowser ein jeweils identischer Inhalt dargestellt. Es kann eine auf Texten und Bildern basierende Darstellung erfolgen. [11]

Zur Ermöglichung einer Nutzer-Interaktion werden dynamische Webseiten benötigt, bei denen zusätzlich die Einbindung einer Skriptsprache wie bspw. JavaScript erfolgt. Die Ausführung der Skripte erfolgt im Webbrowser des Nutzers. Mittels einer dynamischen Website können z.B. Buttons integriert werden oder Eingaben über Formulare, Slider und Drop-Down-Menüs erfolgen. Zudem können jederzeit Daten gesendet und empfangen werden, ohne dass der Webbrowser die Website neu laden muss. [26]

Node.js bietet eine Laufzeitumgebung für JavaScript auf einem Server. Dadurch kann JavaScript zusätzlich für die Entwicklung der im Hintergrund auf dem Webserver ablaufenden Prozesse verwendet werden. Die Open-Source-Software Node-Red stellt eine Programmierungsumgebung zur Verfügung, welche auf Node.js basiert. [35] [30]

Es wurde Node-Red zur Erstellung der GUIs eingesetzt, um eine Auswahl der Szenarien mit Slidern und Drop-Down-Menüs umzusetzen. Zudem werden mittels Node-Red alle im Hintergrund ablaufenden Prozesse wie bspw. die Datenverarbeitung und notwendige Berechnungen realisiert.

Die Implementierung der GUIs erfolgt durch den Ubuntu Server. Node-Red stellt eine webbasierte Benutzerschnittstelle zur Verfügung, welche durch einen Webbrowser aufgerufen werden kann. Es wird eine datenflussbasierte Programmierung ermöglicht mittels vorgefertigter grafischer Funktionsbausteine, welche aus einem Menü ausgewählt, auf der Weboberfläche mittels „Drag & Drop“-Aktion platziert und anschließend in einem Browserfenster konfiguriert sowie miteinander verbunden werden. [48]

Die GUIs können durch einen bestimmten Adresszusatz im Netzwerk aufgerufen werden. Dem Server wurde im HTWK-Netzwerk eine statische IP-Adresse zugewiesen. Wird diese IP-Adresse von einem Gerät innerhalb des Netzwerkes aufgerufen, erfolgt durch einen auf dem Ubuntu Server als Reverse-Proxy eingerichteten Webserver eine Weiterleitung auf die Node-Red-Programmierschnittfläche. Zudem ermöglicht der Webserver einen HTTPS-verschlüsselten Zugriff auf die GUIs. Der Webserver wurde mittels der Open-Source-Software Apache erstellt. Die Vorteile von Apache bestehen in der kostenlosen Anwendung und der weiten Verbreitung, sodass eine gute Dokumentation und viele Tutorials zur Verfügung stehen.

Node-Red bietet eine Vielzahl von Anwendungsoptionen. Es werden bspw. Node-Red-Module bereitgestellt, welche eine Kommunikation mittels MQTT oder HTTP ermöglichen. Andere Module dienen der Datenverarbeitung oder dem Erzeugen eines Nachrichteninhaltes. Außerdem kann eine freie Programmierung in JavaScript erfolgen. Zudem kann eine einfache grafische Darstellung und Eingabe von Werten mittels eines sogenannten Dashboards implementiert werden. Es stehen mit konfigurierbaren Textfeldern, Schaltflächen, Slidern und Drop-Down-Menüs verschiedene Elemente zur Gestaltung einer solchen Eingabeoberfläche zu Verfügung.



In Kapitel 5 werden die mittels des Node-Red-Dashboards implementierten GUIs und die damit nachzubildenden Beleuchtungsmuster erläutert. Es wird zum einen die konkrete Ansteuerung einer einzelnen LED-Leuchte mit einem gewünschten Dimmzustand ermöglicht, welcher eine bestimmte Verschattung repräsentiert. Des Weiteren können Szenarien zur Nachbildung realer Beleuchtungszustände aus verschiedenen Parametern erstellt werden.

Nachdem vom Moderator mittels der GUI eine Eingabe erfolgt ist, wird dieser Befehl durch den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Programmfluss in eine an den Mikrocontroller mittels MQTT-Nachricht zu übertragende Potentiometer-Stufe umgewandelt.

### **Mikrocontroller der Applikation**

Der Mikrocontroller stellt den Teil der Applikation dar, welcher die kommunikationstechnischen Aufgaben übernimmt. Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgte mittels der Arduino-Umgebung. Abbildung 35 zeigt den Ablaufplan des auf dem Mikrocontroller ausgeführten Skripts. Der konkrete Programmcode ist in Anhang 10 dargestellt.

Nach dem Programmstart wird eine Verbindung mit dem lokalen WLAN aufgebaut. Anschließend wird ein MQTT-Client erstellt und mit dem MQTT-Broker verbunden. Es werden die beiden Topics abonniert, unter denen die Nachrichten mit den Dimmbefehlen veröffentlicht werden. Zudem erfolgt eine Konfiguration der SPI-Verbindung mit den Digital-Potentiometern.

Nachdem die Initialisierung abgeschlossen ist, wird während der weiteren Skriptlaufzeit die folgende Schleife immer wieder durchlaufen. Es wird geprüft, ob eine Nachricht mit den abonnierten Topics empfangen wurde. Falls ja werden die damit übertragenen Informationen bezüglich der anzusteuernenden LED-Leuchten und der Potentiometer-Stufe in eine mittels SPI-Daisy-Chaining übertragbare Nachricht umgewandelt, welche anschließend durch das SPI-Bussystem an die Digital-Potentiometer übermittelt wird.

Außerdem wird alle 2 Sekunden die Verbindung zum WLAN und zum MQTT-Broker überprüft. Sollte die Verbindung unterbrochen sein, wird so lange ein Versuch zum Wiederaufbau unternommen, bis die Verbindung wiederhergestellt wurde.

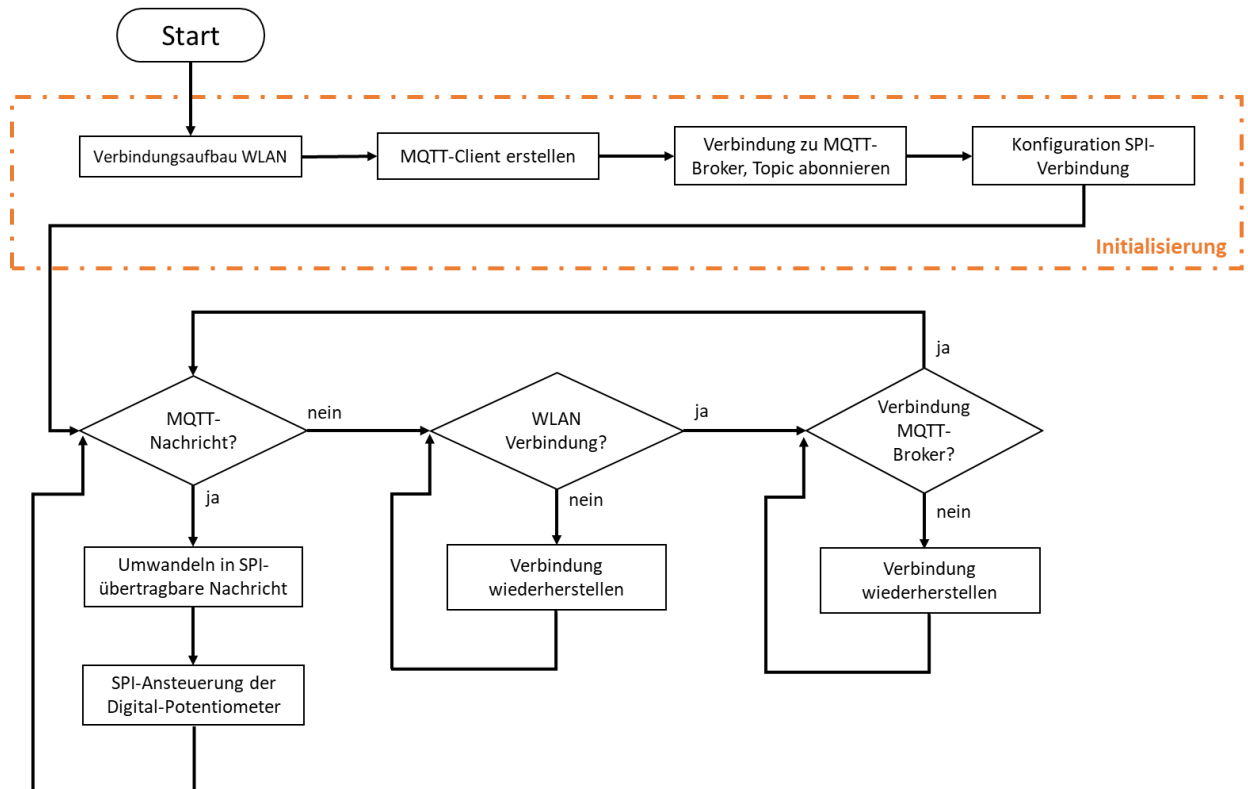


Abbildung 35 – Ablaufdiagramm Mikrocontroller-Skript

## 4.5 Zusammenfassung Gesamtkonzept

Die Nachbildung verschiedener Beleuchtungszustände basiert auf der Veränderung der Beleuchtungsstärken der einzelnen LED-Leuchten. Der eingesetzte LED-Treiber versorgt die LED-Leuchte mit dem benötigten konstanten Gleichstrom und ermöglicht das Dimmen über eine 1-10V-Schnittstelle. Die Höhe der an dieser Schnittstelle anliegenden Steuerspannung bestimmt das Dimmniveau der LED-Leuchte. Die Steuerspannung kann mittels des in Kapitel 4.3 beschriebenen elektronischen Aufbau verändert werden. In Verbindung mit dem in 4.4 aufgezeigten kommunikationstechnischen Aufbau kann anhand einer GUI ein Dimmbefehl ausgelöst werden.

Tabelle 7 veranschaulicht die gesamte Prozesskette, welche nach Auslösen eines Dimmbefehls durch den Moderator schließlich zu einer Änderung der von der LED-Leuchte emittierten Beleuchtungsstärke führt. Die Beschreibung der beteiligten Komponenten orientiert sich an den in Abbildung 33 verwendeten Bezeichnungen Moderator, Server und Applikation. Zunächst wird im Webbrowser des Moderatoren-Endgeräts eine GUI angezeigt. Dabei besteht die Voraussetzung, dass sich der Moderator im HTWK-Netzwerk befindet oder über eine VPN-Verbindung auf das Netzwerk zugreifen kann. Die Erstellung, der Betrieb und der Zugriff auf die GUI werden durch den Server gewährleistet.

Nachdem der Moderator in der GUI ein Szenario ausgelöst oder den Dimmzustand einer einzelnen LED-Leuchte ausgewählt hat, wird dieser Befehl anschließend auf dem Server mittels der Node-Red-Software verarbeitet. Es erfolgt eine Umsetzung des Befehls in konkrete Werte, welche die Potentiometer-Stufen repräsentieren. Zudem muss bei den Szenarios die Kombination aus Potentiometer-Stufen und Veröffentlichungszeitpunkten ermittelt werden.

In der weiteren Beschreibung wird von einer einzelnen Änderung der LED-Beleuchtungsstärke ausgegangen. Dazu wird vom Server eine MQTT-Nachricht mit den zuvor berechneten Potentiometer-Stufen veröffentlicht. Der Mikrocontroller der Applikation empfängt diese Nachricht und wandelt diese in ein für die SPI-Kommunikation mit den Digital-Potentiometern taugliches Format um. Anschließend erfolgt das Ansteuern der Potentiometer, welche nun die gewünschten Widerstands-Werte annehmen. Durch die Ansteuerschaltung ändert sich die Steuerspannung, welche an der 1-10V Schnittstelle des LED-Treibers anliegt und die Beleuchtungsstärke der LED-Leuchte nimmt den gewünschten Wert an.

Der mechanische Aufbau fokussiert anschließend das von der LED-Leuchte emittierte Licht auf die zu beleuchtende Fläche. Durch implementierte Verstellmöglichkeiten lässt sich der Abstand zwischen LED-Leuchte und Linse anpassen, wodurch eine Veränderung der Größe der beleuchteten Fläche ermöglicht wird.

**Tabelle 7 – Prozesskette zum Ausführen eines Dimmbefehls**

| Schritt-Nr. | Funktion                                               | beteiligte Komponente(n) |                                         |
|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| 1           | GUI bereitstellen                                      | Moderator<br>Server      | Webbrowser<br>Webserver, Node-Red       |
| 2           | Dimmzustand/ Szenario auswählen                        | Moderator                | Webbrowser                              |
| 3           | Verarbeiten des Dimmbefehls                            | Server                   | Webserver, Node-Red                     |
| 4           | Veröffentlichung einer MQTT-Nachricht                  | Server                   | Node-Red, MQTT-Broker, WLAN-Router      |
| 5           | Empfang der Nachricht                                  | Applikation              | Mikrocontroller                         |
| 6           | Verarbeiten der Nachricht                              | Applikation              | Mikrocontroller                         |
| 7           | Ansteuern des Digital-Potentiometers durch SPI         | Applikation              | Mikrocontroller, Digital-Potentiometer  |
| 8           | Ändern des Potentiometer-Wertes und der Steuerspannung | Applikation              | Digital-Potentiometer, OPV, LED-Treiber |
| 9           | Ändern der Beleuchtungsstärke der LED-Lampe            | Applikation              | LED-Treiber, LED-Leuchte                |

## **5 Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster**

### **5.1 Erläuterung der nachgebildeten Beleuchtungsmuster**

#### **5.1.1 Auswahl der Verschattung einzelner LED-Lampen**

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit sollte eine prototypische Benutzeroberfläche erstellt werden, welche einen Funktionstest ermöglicht, die prinzipielle Eignung dieses Ansatzes nachweist sowie eine geeignete Grundlage für spätere didaktische Optimierungen bezüglich eines Endnutzer-Einsatzes bietet. Für eine spätere Verwendung bspw. im Rahmen eines Laborversuchs sollte perspektivisch eine weitere Professionalisierung der GUIs hinsichtlich Benutzerführung sowie didaktischen Gesichtspunkten erfolgen.

Als Möglichkeit zur Erzeugung exemplarischer Beleuchtungsmuster wurde die Ansteuerung der Beleuchtungsstärke jeder einzelnen LED-Lampe implementiert.

Die in Abbildung 36 gezeigte GUI ermöglicht die Auswahl eines in [%] angegebenen Verschattungs-Niveaus, welches in einer homogenen Verringerung der auf das Solarmodul abgestrahlten Beleuchtungsstärke resultiert. Die angegebene Verschattung bezieht sich auf die maximal mögliche Beleuchtungsstärke der jeweiligen LED-Lampe. Dabei entspricht eine Verschattung von 0 % der maximalen Helligkeit. Bei 50 % liegt entsprechend die Hälfte der maximalen Beleuchtungsstärke vor und bei einem Wert von 100 % ist die LED-Lampe ausgeschaltet.

Mit diesem Ansatz können alle denkbaren Kombinationen der Helligkeitsniveaus der verschiedenen LED-Lampen realisiert werden. Es handelt sich um eine relativ abstrakte und theoriebasierte Nachbildung realer Beleuchtungsmuster, mit der aber im Gegenzug ein hoher Freiheitsgrad hinsichtlich darstellbarer Szenarien besteht.

So lässt sich beispielsweise anschaulich die Sinnhaftigkeit von Bypass-Dioden oder einer strangweisen Verschaltung mit einem „gutem“ und einem „schlechtem“ Strang bei inhomogenen Beleuchtungsverhältnissen durch entsprechend deutliche Unterschiede der Verschattungsgrade der Solarmodule aufzeigen.

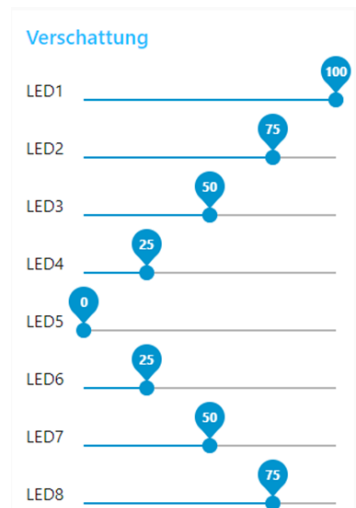


Abbildung 36 – GUI zur Auswahl der Verschattung einzelner LED-Lampen

### 5.1.2 Szenarienbasierte Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster für dachbasierte Solaranlageninstallationen

Es wurde des Weiteren eine auf Szenarien basierende Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster für dachbasierte Solaranlageninstallationen implementiert, welche sich an den Tagesgängen der Bestrahlungsstärke orientiert.

In Kapitel 3 werden die Einflussfaktoren auf die Bestrahlungsstärke beschrieben, welche bei einer dachbasierten Solaranlageninstallation auftreten. So sind einerseits astronomische Faktoren relevant. Aus dem jeweils betrachteten Zeitpunkt im Jahresverlauf ergeben sich die Sonnenhöhe, der Azimut sowie die Zeitdauer zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Des Weiteren besitzt der Bedeckungsgrad des Himmels, also ob beispielsweise ein vollständig klarer oder bedeckter Zustand vorliegt, einen deutlichen Einfluss auf die Höhe der auftretenden Bestrahlungsstärke.

Bei dachbasierten Solaranlagen erfolgt die Installation unter einem vom Dach vorgegebenen oder anhand der Aufständering ausgewählten Neigungswinkel. Zudem herrscht eine bestimmte Ausrichtung bezüglich der Himmelsrichtungen vor, welche Auswirkungen sowohl auf die Größe der Globalstrahlung als auch den zeitlichen Verlauf der Bestrahlungsstärken besitzt.

Abbildung 37 zeigt die GUI, über welche die implementierten Szenarien ausgewählt werden können. Es wird durch die zeitliche Abfolge verschiedener Helligkeitsniveaus der LED-Lampen eine Nachbildung verschiedener Tagesgänge realisiert in Abhängigkeit von den zuvor beschriebenen Parametern: Zeitpunkt im Jahresverlauf, Himmelszustand, Dachneigung und Ausrichtung.

Die Szenarien dienen neben der Veranschaulichung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Erträge dachbasierter Solaranlagen dem Aufzeigen der Möglichkeiten durch die webbasierte

Ansteuerung des Versuchsstandes. Die Nachbildung basiert auf den Globalstrahlungsstärken, welche im Bereich der Solarmodule auftreten. Auf dieser Basis ist die Implementierung aller weiteren Szenarien denkbar, für die Werte der nachzubildenden Bestrahlungsstärken vorliegen.

**Szenarien**

Tag wähle Tag ▼

Himmel wähle Himmelszustand ▼

Dachneigung  30

Ausrichtung  180

Erklärung Ausrichtung:

90° = O  
180° = S  
270° = W

**Abbildung 37 – GUI zur Auswahl der implementierten Szenarien**

Zur Nachbildung der Tagesgänge wird vom Standort Leipzig ausgegangen. Es erfolgt eine Normierung bezüglich der maximal möglichen Globalstrahlungsstärke, welche am 21. Juni um 12 Uhr WOZ sowie einer direkten Südausrichtung bei einem Neigungswinkel von 27° auftritt und 982,78 W/m<sup>2</sup> beträgt. Wenn aufgrund der gewählten Parameter beispielsweise eine Bestrahlungsstärke in Höhe von 50 % des maximal auftretenden Wertes realisiert werden soll, würde das Niveau der Beleuchtungsstärke der LED-Lampen ebenfalls 50 % bezüglich der maximalen Beleuchtungsstärken von 1430 lm annehmen.

Es wird davon ausgegangen, dass eine Verringerung der Bestrahlungsstärke adäquat durch eine prozentual gleichartige Reduzierung der Beleuchtungsstärke der LED-Lampen nachgebildet werden kann. Eine 50-prozentige Reduktion der Bestrahlungsstärke würde sich dann ebenfalls in einer 50-prozentigen Reduzierung der Beleuchtungsstärke widerspiegeln.

Ein Tagesgang der Globalstrahlungsstärke wird durch die Nachbildung der Werte zur jeweils vollen Stunde WOZ umgesetzt. Es besteht eine Intervalldauer von jeweils 10 Sekunden zwischen den nachzubildenden Stundenwerten, sodass ein gesamter Tagesgang innerhalb von 4 Minuten realisiert wird.

Abbildung 37 zeigt, dass verschiedene Werte der Parameter Tag, Himmelszustand, Dachneigung und Ausrichtung ausgewählt werden können, welche zu unterschiedlichen Szenarien kombiniert werden.

Als Tage stehen der 21. März, 21. Juni, 21. September und 21. Dezember zur Verfügung, welche charakteristische Zeitpunkte im Jahresverlauf darstellen. Am 21. Juni tritt die maximale und am 21. bzw. 22. Dezember die minimale mittägliche Sonnenhöhe eines Jahres auf und die jeweiligen Tageslängen erreichen ebenfalls ihre Extrema. Aus Gründen der Vereinfachung wird jeweils der 21. eines jeden Monats herangezogen. Im März und September tritt die Tag- und-Nacht-Gleiche auf. D.h. die Zeit, in der sich die Sonne unter dem Horizont befindet, entspricht genau der Stundenanzahl mit einer positiven Sonnenhöhe. Zudem befinden sich Sonnenaufgang und Sonnenuntergang an diesem Tag exakt im Osten bzw. Westen.

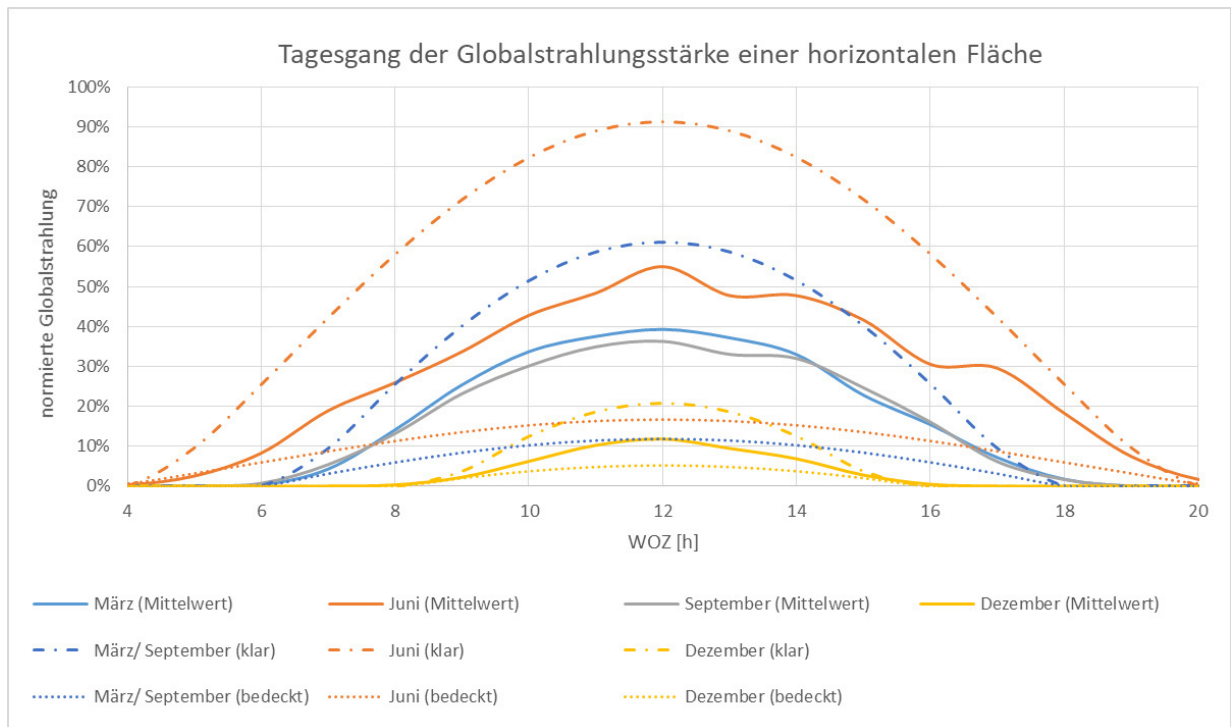
Die Auswahl der Tage beeinflusst die Sonnenhöhe und den Azimutwinkel im Tagesverlauf und besitzt damit Einfluss sowohl auf die Höhe der Globalstrahlung als auch auf den Anteil der diffusen und direkten Bestrahlungsstärken.

Als Parameter Himmel sind die in Kapitel 3.2 beschriebenen Zustände klar, bedeckt und mittel auswählbar. Die Werte der nachgebildeten Szenarien basieren für bedeckte und klare Himmelszustände auf berechneten Bestrahlungsstärken. Bei Auswahl des mittleren Himmels liegen Mittelwerte der jeweiligen Tage der Jahre 2007 bis 2018 zu Grunde, welche an der Wetterstation Leipzig-Holzhausen gemessen wurden.

In Kapitel 3.2.3 erfolgt ein Vergleich von theoretisch berechneten und real gemessenen Globalstrahlungsstärken für bedeckten und klaren Himmel, welche die beiden möglichen Extremfälle der auftretenden Globalstrahlung darstellen. Vor allem für den klaren Himmel kann mittels der verwendeten Berechnungsmethoden eine sehr gute Nachbildung der real gemessenen Globalstrahlungsstärken erreicht werden. Es wurde zur Nachbildung des klaren Himmels ein Linke-Trübungsfaktor  $T_L$  von 4 verwendet, da dieser zur höchsten Übereinstimmung zwischen berechneten und realen Werten geführt hat. Bei bedecktem Himmel können im Juni und Dezember sehr gute quantitative und im März und September zumindest qualitative Aussagen zur Globalstrahlung im Zeitverlauf des Tages getroffen werden.

Das Szenario des mittleren Himmelszustandes stellt häufiger auftretende globale Bestrahlungsstärken dar. Um einen Bestrahlungszustand nachzubilden, welcher den Durchschnitt repräsentiert, bietet sich eine Verwendung der in Abbildung 38 dargestellten normierten Mittelwerte der jeweils 21. der verschiedenen Monate an. Im Gegensatz zu den für die Idealfälle klarer und bedeckter Himmel berechneten Werten tritt ein Unterschied zwischen März und September auf. Ein Erklärungsansatz hierfür bildet der im Tagesverlauf zumeist geringere durchschnittliche Bedeckungsgrad des Himmels im März gegenüber dem September, welcher in Anhang 2 (a) dargestellt ist. Die berechneten Szenarien der Himmelszustände klar und bedeckt berücksichtigen hingegen als veränderlichen Parameter nur die Sonnenhöhe, deren Tagesverlauf am 21. März und September identisch ist.

Abbildung 38 zeigt die Tagesgänge von Globalbestrahlungsstärken der zuvor beschriebenen Tage und Himmelszustände für horizontale Flächen. Es erfolgt eine normierte Darstellung auf die in diesem Versuchsstand maximal nachzubildende Bestrahlungsstärke von  $982,78 \text{ W/m}^2$ , welche auf einer um  $27^\circ$  geneigten Ebene auftritt. Aus diesem Grund erreicht die maximale Bestrahlungsstärke in Abbildung 38 nur etwa 90 %, da der Maximalwert nicht auf einer horizontalen Fläche erreicht wird. In Abbildung 17 erfolgt eine Darstellung mit absoluten Werten der Globalstrahlung in  $\text{W/m}^2$ .



**Abbildung 38 – Tagesgänge der normierten Globalstrahlung für verschiedene Himmelszustände und Zeitpunkte im Jahr, Datengrundlage: [5]**

Auf Grundlage der zuvor in Abbildung 38 dargestellten Globalstrahlungsstärken auf horizontalen Flächen wird je nach gewählten Werten bezüglich Dachneigung und Ausrichtung ein Tagesgang der effektiven Globalbestrahlungsstärke nach den in Kapitel 3.3 beschriebenen Zusammenhängen berechnet.

Die Werte der Parameter Dachneigung und Ausrichtung sind in sinnvollen Bereichen in Stufen von jeweils  $1^\circ$  frei wählbar. Es können mittels der in Abbildung 37 ersichtlichen GUI Neigungswinkel zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  ausgewählt werden. Zur Berücksichtigung der Ausrichtung können Werte zwischen  $90^\circ$  und  $270^\circ$  verwendet werden. Dabei wird eine direkte Ost-Ausrichtung durch  $90^\circ$ , eine Süd-Ausrichtung durch  $180^\circ$  und eine West-Ausrichtung durch  $270^\circ$  repräsentiert. Damit sind alle real denkbaren Dachneigungen und Ausrichtungen einer Solaranlageninstallation nachbildbar.



Um den Einfluss des Neigungswinkels und der Ausrichtung des Solarmoduls zu ermitteln, wurden für den bedeckten sowie den mittleren und klaren Himmelszustand verschiedene Berechnungsmethoden verwendet.

Zur Berechnung der Bestrahlungsstärken bei bedecktem Himmel wurde ein Ansatz nach DIN 5034-2 gewählt, welcher von einer isotropen Verteilung der Helligkeit über das Himmelsgewölbe ausgeht. Somit besitzt die Ausrichtung des Solarmoduls bei bedecktem Himmel keine Auswirkung auf die Höhe der Globalstrahlungsstärke. Die globale Bestrahlungsstärke einer geneigten Ebene bei vollständig bedecktem Himmel  $E_{G,gen,bedeckt}$  kann bei Kenntnis der horizontalen Globalstrahlung bei vollständig bedecktem Himmel  $E_{G,bedeckt}$ , dem Neigungswinkel der Ebene  $\gamma_E$  und dem Albedo-Wert der Umgebung  $ALB$  wie folgt berechnet werden: [8]

$$E_{G,gen,bedeckt} = E_{G,bedeckt} * \left[ 0,182 * \left\{ 1,178 * (1 + \cos \gamma_E) + \left( \pi - \frac{\gamma_E}{rad} \right) * \cos \gamma_E + \sin \gamma_E \right\} + 0,5 * ALB * (1 - \cos \gamma_E) \right] \quad (5.1)$$

Albedo-Werte verschiedener Materialien sind in Tabelle 3 dargestellt.

Bei einem geneigten Solarmodul tritt gegenüber einer horizontalen Fläche eine Steigerung der direkten Bestrahlungsstärke aufgrund des größeren Einfallwinkels der Solarstrahlung im Bezug zur Solarmodulebene auf. Zudem existiert mit der reflektierten Strahlung ein zusätzlicher Strahlungsanteil. Es entstehen allerdings Verluste bei der diffusen Strahlung um den Anteil, welcher sich hinter der geneigten Fläche befindet. Da bei einem vollständig bedeckten Himmel der Anteil der diffusen Strahlung an der Globalstrahlung nahe 100 % liegt, wird bei einem geneigt montierten Solarmodul eine Verringerung der Globalbestrahlungsstärke gegenüber einer horizontalen Fläche hervorgerufen.

Bei den Szenarien mit klarem und mittlerem Himmelszustand wurden die Gleichungen (3.15) sowie (3.17) bis (3.20) verwendet, welche einen anisotropen Ansatz für den direkten Strahlungsanteil und einen isotropen Ansatz sowohl für den diffusen als auch den reflektierten Anteil der Globalstrahlung vorsehen. Sowohl der Neigungswinkel als auch die Ausrichtung der geneigten Fläche besitzen einen Einfluss auf die Höhe der Globalstrahlungsstärke.

Für diese Berechnungsmethode werden neben der Globalstrahlung auch die jeweiligen Anteile der diffusen und direkten Bestrahlungsstärke benötigt. Das Szenario mit mittlerem Bedeckungszustand des Himmels basiert auf Messdaten der Wetterstation Leipzig-Holzhausen, welche Daten zur globalen und diffusen Bestrahlungsstärke beinhalten, aus denen sich zudem die direkte Bestrahlungsstärke ermitteln lässt.

Die berechneten Werte der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel repräsentieren die Globalstrahlungsstärke, liefern aber keine Informationen zu den jeweiligen Anteilen direkter oder diffuser Strahlung. Da diese Informationen zur Berechnung des Einflusses der Neigung

und Ausrichtung der bestrahlten Fläche benötigt werden, wurde auf den folgenden, auf statistischen Zusammenhängen beruhenden, Ansatz zurückgegriffen.

Es wird zunächst mittels Gleichung (5.2) in Verbindung mit der horizontalen Globalstrahlungsstärke  $E_G$ , der Solarkonstante  $E_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$  und der Sonnenhöhe  $\gamma_S$  ein Faktor  $k_T$  berechnet: [34]

$$k_T = \frac{E_G}{E_0 \cdot \sin \gamma_S} \quad (5.2)$$

In Abhängigkeit von der Größe des Faktors  $k_T$  kann die diffuse Bestrahlungsstärke  $E_{Dif}$  wie folgt ermittelt werden: [34]

$$E_{Dif} = E_G * (1,020 - 0,254 * k_T + 0,0123 * \sin \gamma_S) \quad \text{für } k_T \leq 0,3$$

$$E_{Dif} = E_G * (1,400 - 1,749 * k_T + 0,177 * \sin \gamma_S) \quad \text{für } 0,3 < k_T < 0,78$$

$$E_{Dif} = E_G * (0,486 * k_T - 0,182 * \sin \gamma_S) \quad \text{für } k_T \geq 0,78 \quad (5.3)$$

#### Anmerkungen zur möglichen Implementierung von Verschattungsvorgängen

Kapitel 3.1 zeigt den großen Einfluss der Bestrahlungsstärke auf den Ertrag eines Solarmoduls. Ferner können darüber hinaus wie in Kapitel 2 beschrieben hohe Leistungsverluste einer Solaranlage durch die Teilverschattung einzelner Solarmodule hervorgerufen werden. Deshalb wäre eine Implementierung von Teilverschattungsvorgängen in die szenarienbasierte Nachbildung der Bestrahlungsmuster durchaus interessant.

Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten der Teilverschattung einer Solaranlage. Diese kann einerseits durch vorbeiziehende Wolken hervorgerufen werden. Eine weitere Ursache können sich in der Nähe befindende stationäre Objekte wie bspw. Bäume, benachbarte Gebäude, Schornsteine oder Dachgauben darstellen.

Die Verschattung durch vorbeiziehende Wolken tritt bei einer dachbasierten Solaranlage aufgrund der geringen Abstände zwischen allen Solarmodulen nahezu gleichzeitig und in gleicher Höhe auf. Bei großen Freiflächenanlagen hingegen verursachen herüberziehende Wolken eine wandernde Verschattung, welche zu inhomogenen Bestrahlungszuständen führt. Da in dieser Masterarbeit eine Fokussierung auf dachbasierte Solaranlagen erfolgt, ist eine Berücksichtigung einer wandernden Verschattung nicht relevant.

Die realen Schattenwürfe durch benachbarte stationäre Objekte und deren Veränderung im Tagesverlauf sind im konkreten Fall sehr individuell und komplex nachzubilden. Bei der Projektierung einer Solaranlageninstallation, für die grundsätzlich verschiedene Standorte in Frage kämen, würde anhand der Umgebungsobjekte eine Simulation zur Abschätzung der Teilverschattungen mittels einer speziellen Software erstellt werden.

Zudem könnten solche Verschattungen nicht adäquat mit dem umgesetzten Beleuchtungskonzept abgebildet werden, da dieses nur eine Veränderung der gesamten Bestrahlungsstärke auf einer Solarmodulfläche nachbildet. In der Realität hingegen werden oft nur Teile einzelner Solarmodule verschattet, was zu unterschiedlichen Effekten gegenüber einer homogenen Verringerung der Bestrahlungsstärke über das ganze Solarmodul führen kann.

Deshalb erscheint es zielführender, eine Nachbildung der Teilverschattung über reale, mechanische Miniaturnachbildungen von Schornsteinen oder Bäumen zu realisieren. Auf eine solche Implementierung der heterogenen Teilverschattung wurde aus Komplexitätsgründen verzichtet. Im Rahmen späterer Weiterentwicklungen des Versuchsstandes würde dies allerdings einen interessanten Optimierungsansatz darstellen.

Eine homogene Verschattung über die gesamten Solarmodule ist hingegen mit dem vorgestellten Ansatz möglich und wurde wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben umgesetzt.

## **5.2 Realisierung mittels Node-Red**

Mit der Open-Source-Software Node-Red, welche in Kapitel 4.4.2 beschrieben wird, wurden die in Abbildung 36 und Abbildung 37 gezeigten GUIs realisiert. Node-Red erstellt zudem einen webbasierten Zugriff auf die jeweiligen GUIs, welche vom Moderator von einem beliebigen Endgerät mit einem Webbrowser aufgerufen werden können. Anhand der in den GUIs gewählten Eingaben wird anschließend die Potentiometer-Stufe berechnet, welche die gewünschten Beleuchtungsmuster nachbildet. Node-Red dient des Weiteren als MQTT-Client, welcher Nachrichten mit den Werten der jeweiligen Potentiometer-Stufen veröffentlicht.

Die Schritte zwischen Auswahl der Parameter und der Ausgabe der berechneten Potentiometer-Stufen unterscheiden sich erheblich in der Komplexität zwischen den beiden zuvor beschriebenen implementierten Möglichkeiten zur Nachbildung verschiedener Beleuchtungsmuster.

Abbildung 39 zeigt den Node-Red-Programmfluss für die Variante zur Verschattung einzelner LED-Lampen. Die sich links befindenden türkisfarbenen Bausteine mit den Bezeichnungen „LED1“ bis „LED8“ erstellen die Slider der in Abbildung 36 dargestellten GUI, welche eine Auswahl des gewünschten Verschattungsniveaus der einzelnen LED-Lampen ermöglichen.

Node-Red arbeitet mit einem Nachrichtenfluss, welcher durch die als graue Linien dargestellten Verbindungen von einem Baustein zum anderen weitergegeben wird und von jedem Funktionsbaustein verändert werden kann. Die orange eingefärbten Funktionsbausteine ermöglichen eine freie Programmierung mit JavaScript. Der Programmcode aller verwendeten JavaScript-Funktionen ist in Anhang 11 abgebildet.

Um die Eingaben der verschiedenen Slider unterscheiden zu können, wird dem Nachrichtenobjekt im nächsten Schritt eine eindeutige Bezeichnung hinzugefügt. Zudem erfolgt eine Anpassung der Bezeichnungen an die Kommunikationsreihenfolge zwischen Mikrocontroller und Digital-Potentiometern. Mittels eines JavaScript-Bausteins werden danach anhand der in der GUI in [%] ausgewählten Verschattung die diesen entsprechenden Steuerspannungen  $U_T$  mittels Gleichung (5.4) berechnet:

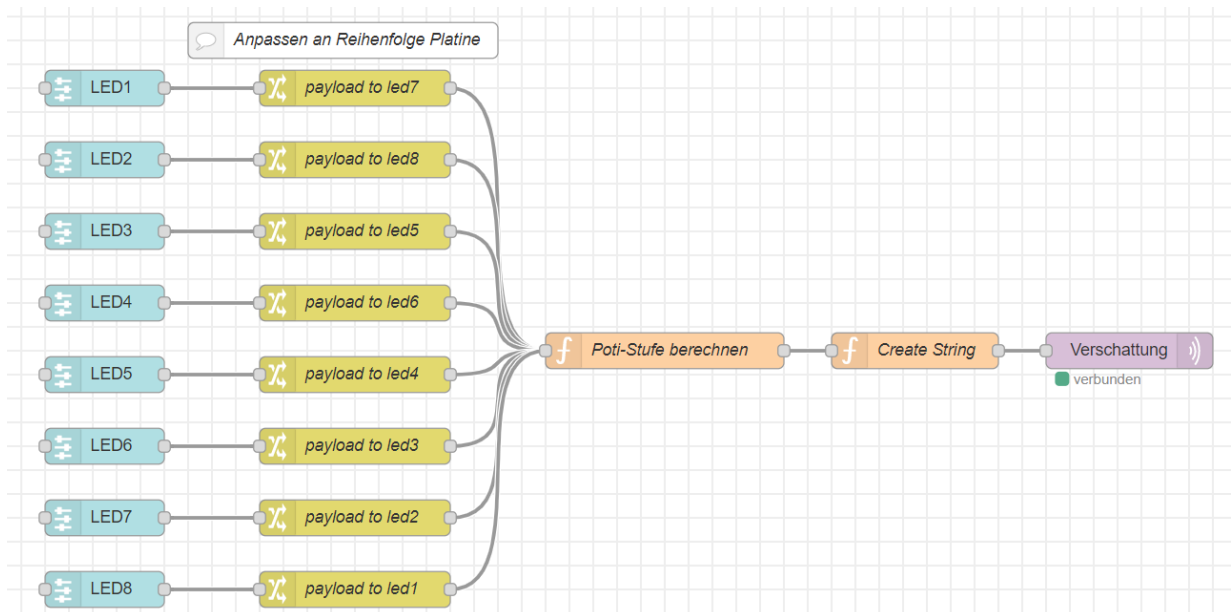
$$U_T = 0,92 \text{ V} + \frac{(100 - \text{Verschattung})}{100} * (9,55 \text{ V} - 0,92 \text{ V}) \quad (5.4)$$

Der Zusammenhang zwischen Steuerspannung  $U_T$  und Helligkeit der LED-Lampen wird in Kapitel 4.3 beschrieben. Ab einer Spannung von 9,55 V liegt die maximale Beleuchtungsstärke der LED-Lampe vor. Bei einer Steuerspannung von weniger als 0,92 V befindet sich die LED-Lampe im ausgeschalteten Zustand. Es wird davon ausgegangen, dass im Bereich zwischen 0,92 V und 9,55 V der Steuerspannung  $U_T$  die Zunahme der Beleuchtungsstärke der LED-Lampen linear erfolgt.

Anschließend werden die Potentiometer-Stufen  $n$  berechnet, welche die zuvor ermittelten Steuerspannungen  $U_T$  hervorrufen. Zwischen der Steuerspannung  $U_T$  und der Potentiometer-Stufe  $n$  herrscht ein nicht-linearer Zusammenhang, welcher durch Formel (4.4) mit einer Funktion  $U_T(n)$  dargestellt wird. Nach der Potentiometer-Stufe  $n$  umgestellt, ergibt sich die folgende Beziehung:

$$n = 510 * \frac{(U_T - 10)}{(U_T - 20)} \quad (5.5)$$

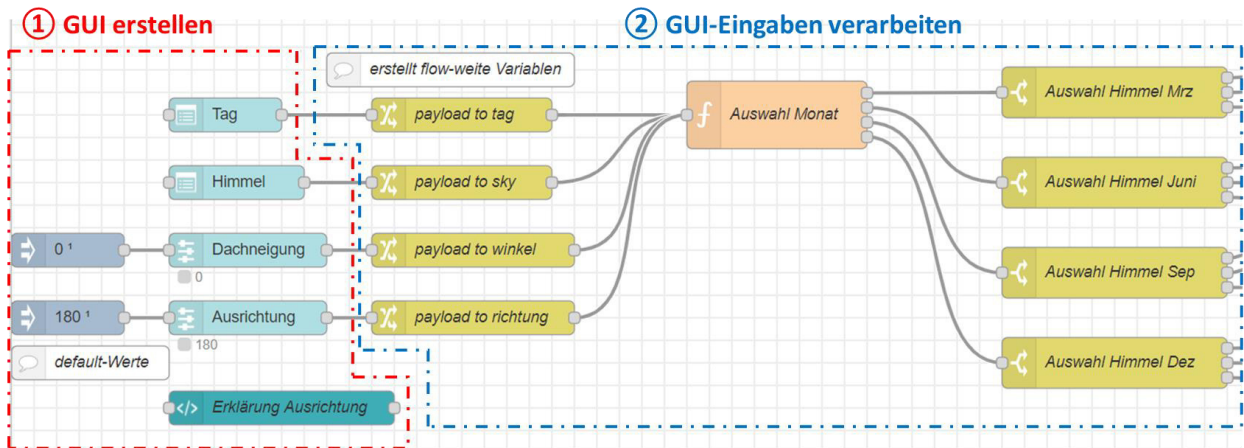
Darauffolgend werden die ermittelten Potentiometer-Stufen ganzzahlig gerundet. Mittels des nächsten Funktionsbausteins werden die numerischen Potentiometer-Werte in eine Zeichenkette umgewandelt, welche unter dem MQTT-Topic „Verschattung“ als Nachricht veröffentlicht wird



**Abbildung 39 – Node-Red-Programmfluss zur Verschattung einzelner LED-Lampen**

Der Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung exemplarischer Beleuchtungszustände weist im Vergleich mit der Variante zur Verschattung einzelner LED-Lampen eine höhere Komplexität auf. Zum einen kann mittels der in Abbildung 37 dargestellten GUI eine Auswahl verschiedener Tage, Himmelszustände, Dachneigungen und Ausrichtungen erfolgen, sodass eine größere Anzahl veränderlicher Parameter besteht. Des Weiteren basieren die Szenarien auf Berechnungen, welche Informationen bezüglich der Sonnenhöhe, des Azimutwinkels sowie der horizontalen diffusen, direkten und globalen Bestrahlungsstärke voraussetzen.

Abbildung 40 zeigt den ersten Teil des Node-Red-Programmfusses der szenarienbasierten Nachbildung. In Schritt ① werden die Elemente der in Abbildung 37 gezeigten GUI erstellt. Anschließend erfolgt im nächsten Programmteil ② die Verarbeitung der in der GUI eingegebenen Parameter. Es werden den Nachrichtenobjekten der Eingaben für einen späteren Variablen-Aufruf eindeutige Bezeichnungen hinzugefügt. Zudem wird der Nachrichtenfluss entsprechend der in der GUI gewählten Parameter Tag und Himmelszustand aufgespalten.

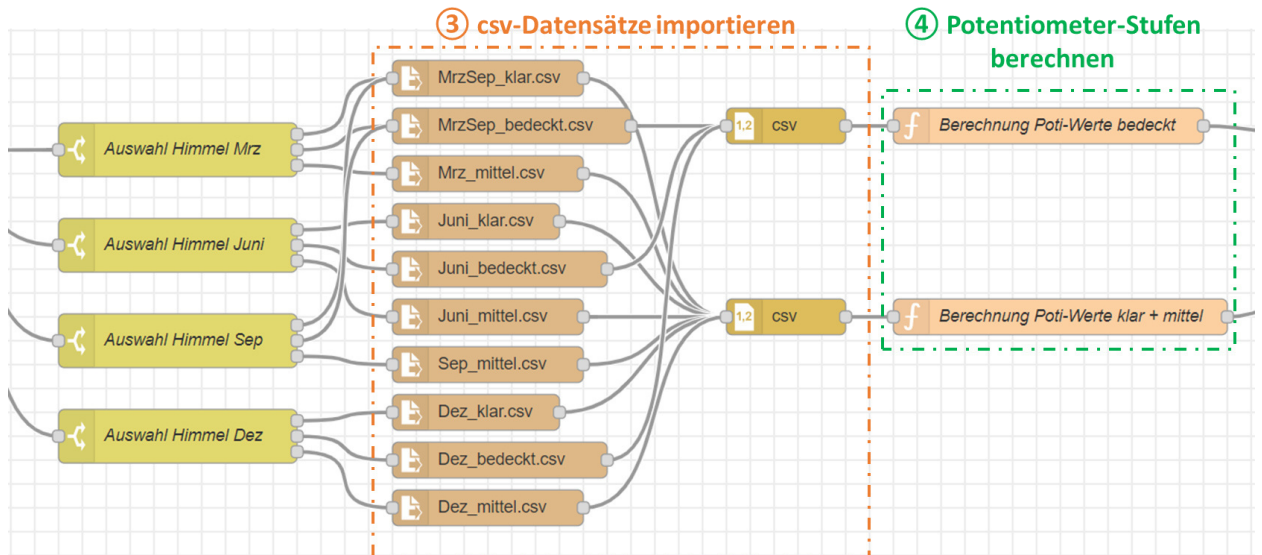


**Abbildung 40 – 1. Teil Node-Red-Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster**

Abbildung 41 stellt den nächsten Teil des Programmflusses dar. In Schritt ③ wird entsprechend der zuvor erfolgten Auswahl des Tages und des Himmelszustandes ein CSV-Datensatz (CSV – Comma-separated values) importiert. Anhang 12 zeigt exemplarisch den Inhalt der CSV-Datei des Junitages mit klarem Himmel. Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit erfolgte eine durch Microsoft Excel generierte Ansicht, welche die durch das Dateiformat gegebene Separierung der Werte mit Kommas in eine spaltenweise Darstellung transferiert.

Die eingelesenen CSV-Datensätze enthalten Angaben zur Sonnenhöhe und dem Azimutwinkel für jede volle WOZ-Stunde des jeweiligen Tages, welche unabhängig vom Himmelszustand sind. Die horizontalen Bestrahlungsstärken unterscheiden sich wie in Kapitel 3.2 beschrieben in Abhängigkeit vom Himmelszustand, weshalb für jede Kombination von Tag und Himmelszustand eigene CSV-Datensätze existieren, welche zusätzlich Informationen zur globalen, diffusen und direkten horizontalen Bestrahlungsstärke enthalten.

Aufgrund der verschiedenen, in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Berechnungsmethoden für den klaren bzw. mittleren sowie den bedeckten Himmel beinhalten die Datensätze für die Szenarien mit bedecktem Himmel keine Werte der diffusen und direkten horizontalen Bestrahlungsstärke.



**Abbildung 41 – 2. Teil Node-Red-Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster**

In Schritt ④ werden anhand der zuvor mittels des CSV-Datensatzes eingelesenen Werte sowie der in der GUI gewählten Parameter Neigung und Ausrichtung die Potentiometer-Stufen berechnet, welche eine Nachbildung des Tagesgangs der Globalstrahlung bewirken. Der verwendete Funktionsbaustein implementiert JavaScript-Programmcodes, welcher in Anhang 11 dargestellt ist.

Zunächst wird die aus der Neigung und Ausrichtung resultierende Globalstrahlungsstärke  $E_{G,gen}$  zur jeweils vollen WOZ-Stunde anhand des zuvor in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Vorgehens ermittelt. Aufgrund der Unterschiede in der Berechnung der resultierenden Globalstrahlungsstärke zwischen bedecktem sowie klarem bzw. mittlerem Himmel erfolgt die Berechnung in zwei verschiedenen Funktionsbausteinen.

Die sich anschließenden Schritte sind unabhängig vom ausgewählten Himmelszustand gleich. Es wird zunächst die zuvor ermittelte resultierende Globalstrahlung  $E_{G,gen}$  auf den maximal auftretenden Wert von  $982,78 \text{ W/m}^2$  normiert:

$$E_{norm} = \frac{E_{G,gen}}{982,78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (5.6)$$

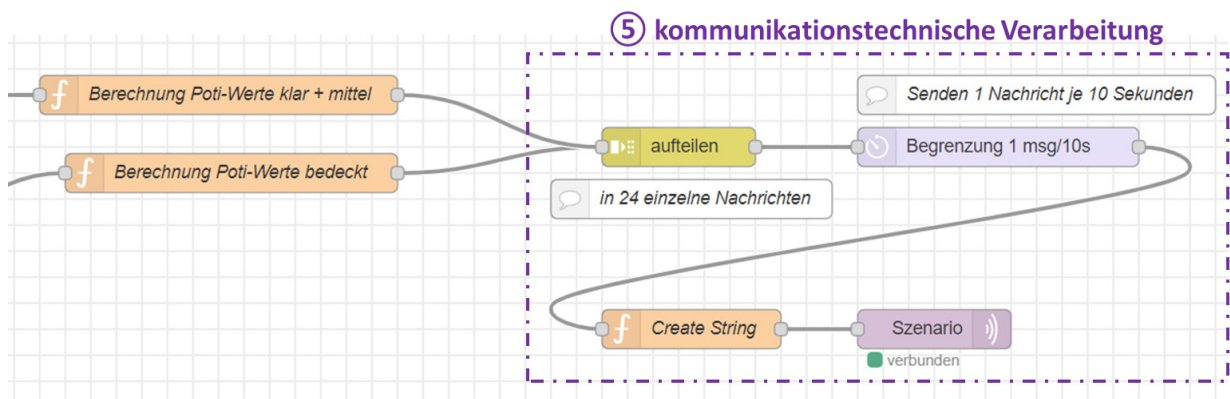
Danach erfolgt die Ermittlung einer Steuerspannung  $U_T$ , welche den normierten Globalstrahlungswertes  $E_{norm}$  repräsentiert:

$$U_T = 0,97 \text{ V} + E_{norm} * (9,55 \text{ V} - 0,97 \text{ V}) \quad (5.7)$$

Darauffolgend wird anhand von Formel (5.5) die Potentiometer-Stufe  $n$  berechnet, welche diese Steuerspannung  $U_T$  hervorruft.

Die zuvor beschriebenen Berechnungsschritte werden für jede volle WOZ-Stunde des Tages wiederholt, sodass am Ende dieses Funktionsbausteins ein Array mit 24 Werten existiert.

Abbildung 42 zeigt den anschließend zur kommunikationstechnischen Weiterverarbeitung ablaufenden Node-Red-Programmfluss. Der Tagesgang der Bestrahlungsstärke wird aus einer zeitlichen Abfolge verschiedener Dimmniveaus der LED-Lampen nachgebildet, welche jeweils die Bestrahlungsstärken zur vollen Stunde repräsentieren. Aus diesem Grund werden im nächsten Schritt 24 Einzelnachrichten erzeugt, welche jeweils einen Potentiometer-Wert enthalten. Diese Nachrichten werden im Abstand von 10 Sekunden veröffentlicht, sodass die Nachbildung eines Tagesgangs nach 4 Minuten abgeschlossen ist. Der nächste Funktionsbaustein wandelt den Nachrichteninhalt von einem numerischen Objekt in eine Zeichenkette um, was die Voraussetzung darstellt, um die Nachricht anschließend unter dem MQTT-Topic „Szenario“ zu veröffentlichen.



**Abbildung 42 – letzter Teil des Node-Red-Programmflusses: kommunikationstechnische Verarbeitung der berechneten Potentiometer-Werte**



## 6 Evaluierung und Diskussion der Ergebnisse

Es wurde eine Evaluierung des finalen Versuchsstandes durchgeführt, welcher aus den in Kapitel 4 beschriebenen mechanischen, elektronischen und kommunikationstechnischen Komponenten besteht. Dabei bestätigte sich die beabsichtigte Gesamtfunktionsweise, dass nach Auswahl eines bestimmten Verschattungsgrads mittels der GUI die jeweiligen LED-Lampen eine entsprechende Lichtintensität annehmen. Im Vergleich verschiedener Verschattungsgrade können anhand des optischen Eindrucks die gewünschten Helligkeitsunterschiede beobachtet werden.

Abbildung 43 zeigt die entstehenden Lichtspots bei abgedunkeltem Raum und einem Verschattungsgrad aller LED-Lampen von 90%. Es ist erkennbar, dass ein innerer Lichtspot mit direkter Strahlung und vergleichsweise hoher Intensität sowie ein äußerer Lichtspot mit diffuser Strahlung und verhältnismäßig geringer Intensität entstehen.

Die Größe der Lichtspots kann einerseits über die Veränderung des Abstandes zwischen LED-Lampe und Plankonvexlinse variiert werden. Dabei wird der Grad der Lichtfokussierung sowie die Größe des an der Linse gebrochenen Lichtspots beeinflusst.

Des Weiteren kann eine Anpassung des Abstandes zwischen der Beleuchtungseinheit und dem Solarmodul vorgenommen werden. Dadurch wird der Durchmesser des auf Solarmodulebene auftretenden Lichtspots verändert, wobei sich mit abnehmenden Abstand die Größe des diffusen äußeren Lichtspots erheblich stärker verringert als der Durchmesser des direkten inneren Lichtspots. Zudem kann der horizontale Abstand zwischen den einzelnen Beleuchtungseinheiten variiert werden.

Es wurden zur Evaluierung Abstände gewählt, welche sich an den Abmessungen der verwendeten Solarmodule und des ursprünglich vorgesehenen, in Abbildung 25 dargestellten, Solararrays orientieren. Der horizontale Abstand zwischen den Montagewinkeln zweier Beleuchtungseinheiten betrug 69 mm. Die Montagewinkel der äußeren Beleuchtungseinheiten befanden sich 166,5 mm entfernt von den vertikalen Aluminium-Profilen des Gestells. Die Abstände sollen später anhand des finalen und zum Zeitpunkt der Masterarbeit noch nicht realisierten Solararrays optimiert werden.



**Abbildung 43 – Lichtspots bei abgedunkeltem Raum und Verschattungsgrad 90 %**

Neben der zuvor beschriebenen qualitativen Einschätzung wurden weitere quantitative Betrachtungen anhand der Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien der bestrahlten miniaturisierten Solarmodule durchgeführt. Dazu wurde der zuvor bestehende Versuchsstand zur variablen Verschaltung von Solarmodulen um den in dieser Masterarbeit erstellten Sonnensimulator erweitert.

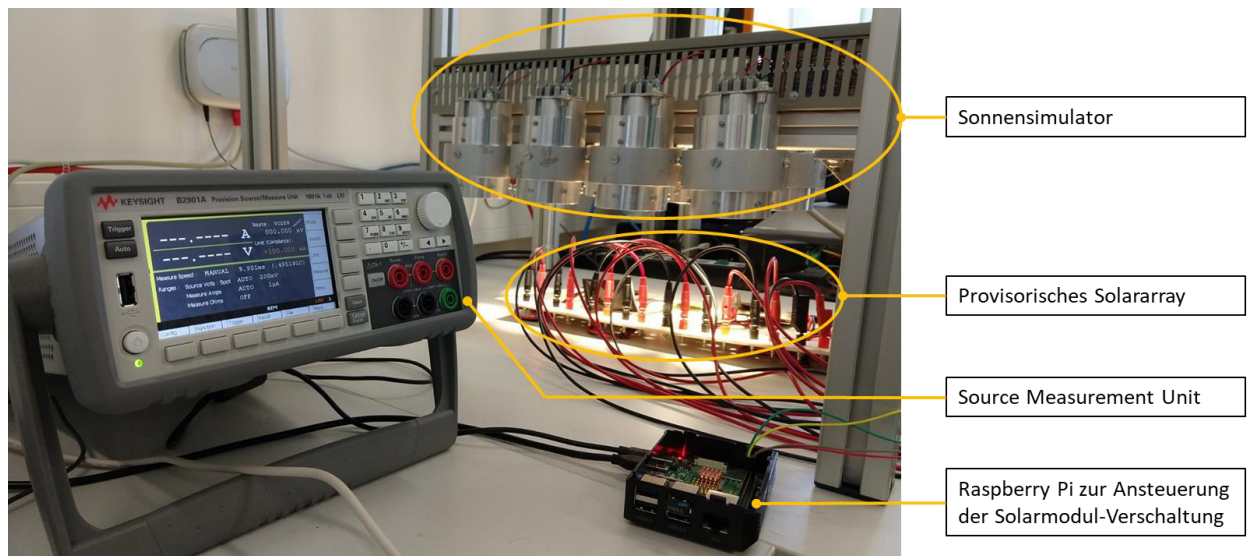
Der vorherige Stand ist in Anhang 13 abgebildet. Zur Lichtemission wurde zuvor ein LED-Strahler verwendet, welcher eine flächige Beleuchtung mit konstanter emittierter Beleuchtungsstärke ermöglicht. Zudem war die Intensität über der beleuchteten Fläche relativ inhomogen verteilt.

Abbildung 44 zeigt den verwendeten Messaufbau zur Ermittlung der Solarmodulkennlinien. Es wurde ein provisorisches Solararray eingesetzt, welches aus acht Solarmodulen vom Typ „YH-57x65“ und den Maßen (57 x 65) mm besteht. Die Solarmodule können anhand von mittels Raspberry Pi ansteuerbarer Relaisbänke variabel auf zwei Stränge geschaltet werden.

Aufgrund des vorhandenen provisorischen Solararrays mit verschiedenen, unregelmäßigen Abständen zwischen den einzelnen Solarmodulen erfolgte eine Fokussierung bei der Kennlinien-Aufnahme auf ein einzelnes Solarmodul. Dieses Solarmodul wurde im Voraus mit einem Flasher vom Typ „Wavelabs Sinus 70“ unter Standardtestbedingungen vermessen, welche u.a. eine Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$  vorsehen. Dabei wurden die in Tabelle 8 in Zeile 1 („Flasher“) dargestellten Werte ermittelt.

Zur Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien des Solarmoduls wurde die Source-Measurement-Unit (SMU) „Keysight B2901A“ verwendet. Bei einer SMU handelt es sich um

ein elektronisches Multifunktionsgerät, welches eine Spannungs- und Stromerzeugung bei gleichzeitiger Spannungs- und Strommessung ermöglicht. [45]



**Abbildung 44 – Messaufbau zur Ermittlung der Solarmodulkennlinien**

Mittels des vorliegenden Versuchsaufbaus wurden für verschiedene Verschattungsgrade Kennlinien des vermessenen Solarmoduls aufgenommen. Die Messungen erfolgten bei ausgeschaltetem Raumlicht und ohne Verdunklung des Raums.

Ein Verschattungsgrad von 0 % entspricht der maximalen Beleuchtungsstärke der LED-Lampe. Bei einem Verschattungsgrad von 100 % befindet sich die LED-Lampe im ausgeschalteten Zustand. Es wurden Kennlinien des bestrahlten Solarmoduls in jeweils 10 %-Abständen der Verschattungsgrade ermittelt. Zusätzlich wurden Werte für einen Verschattungsgrad von 99 % gemessen, was der niedrigsten möglichen Beleuchtungsstärke der LED-Lampe im eingeschalteten Zustand entspricht.

Die Aufnahme der verschiedenen Kennlinien in Abhängigkeit des Verschattungsgrad des vermessenen Moduls wurde etwa 15 Minuten nach Einschalten des Versuchstandes begonnen. Dadurch soll der in Abbildung 46 dargestellte Einfluss der Modulerwärmung nach Einschalten der LED-Lampe auf die Messergebnisse verringert werden.

Abbildung 45 zeigt die gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien. Die jeweiligen MPPs wurden anschließend mittels Matlab-Skript aus der Kennlinie bestimmt und sind als rote Punkte in Abbildung 45 eingezeichnet. Tabelle 8 enthält die ermittelten MPP-Parameter Leistung  $P_{MPP}$ , Spannung  $U_{MPP}$  und Stromstärke  $I_{MPP}$  sowie den Kurzschlussstrom  $I_K$  und die Leerlaufspannung  $U_L$  für die verschiedenen Verschattungsgrade des vermessenen Solarmoduls.

Es erfolgt eine Verschiebung der Kennlinie mit zunehmenden Verschattungsgrad und damit einhergehender abnehmender Beleuchtungsstärke, wobei sich der Kurzschlussstrom  $I_K$

deutlich stärker als die Leerlaufspannung  $U_L$  verringert. Dabei ergibt sich eine deutliche Übereinstimmung mit dem theoretisch zu erwartenden Kennlinien-Verlauf bei abnehmender Bestrahlungsstärke, welcher in Kapitel 3.1 beschrieben und Abbildung 4 dargestellt wird.

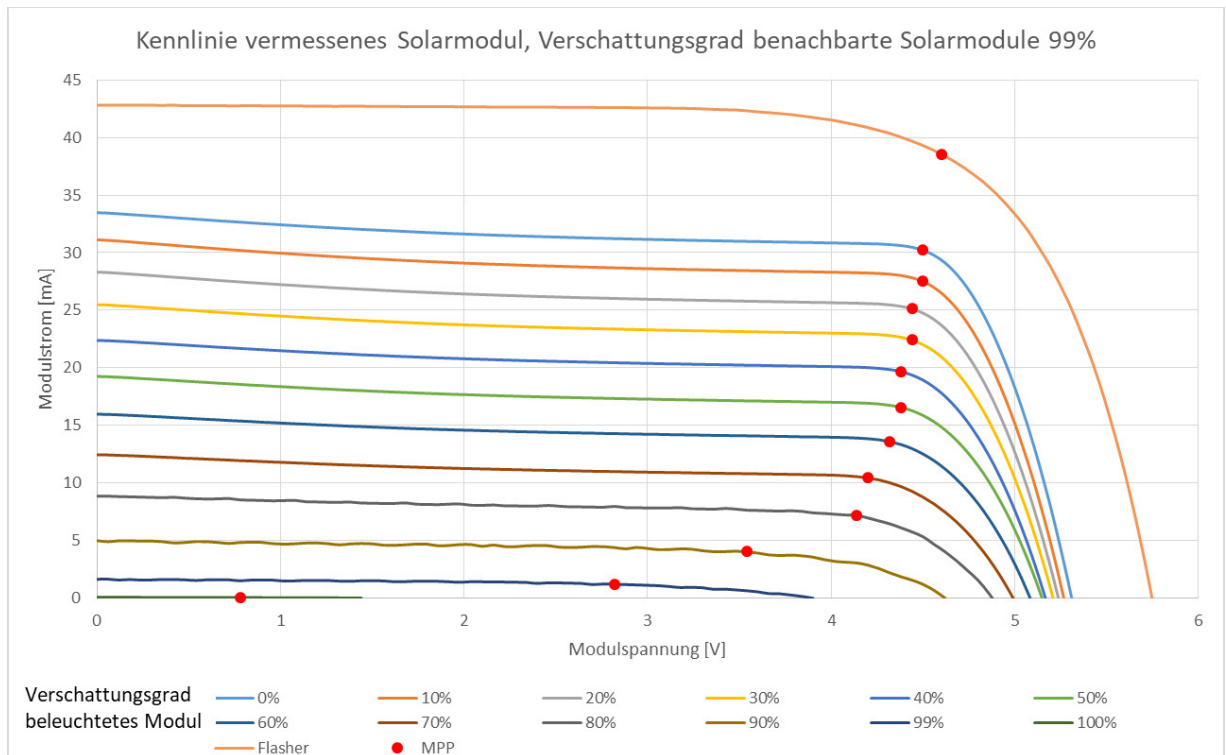


Abbildung 45 – Kennlinien des vermessenenes Solarmoduls in Abhängigkeit des Verschattungsgrads

Tabelle 8 – ermittelte MPP-Parameter sowie Kurzschlussstrom  $I_K$  und Leerlaufspannung  $U_L$  für verschiedene Verschattungsgrade des vermessenenes Solarmoduls

|                                                | Verschattungsgrad vermessenenes Solarmodul [%] | $P_{MPP}$ [mW] | $U_{MPP}$ [V] | $I_{MPP}$ [mA] | $I_K$ [mA] | $U_L$ [V] |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------|---------------|----------------|------------|-----------|
| Flasher                                        |                                                | 177.33         | 4.60          | 38.54          | 42.83      | 5.75      |
| Verschattungs-grad benachbarte Solarmodule 99% | 0                                              | 135.95         | 4.50          | 30.21          | 33.48      | 5.31      |
|                                                | 10                                             | 123.71         | 4.50          | 27.49          | 31.13      | 5.26      |
|                                                | 20                                             | 111.50         | 4.44          | 25.11          | 28.32      | 5.22      |
|                                                | 30                                             | 99.49          | 4.44          | 22.41          | 25.49      | 5.21      |
|                                                | 40                                             | 86.12          | 4.38          | 19.66          | 22.38      | 5.16      |
|                                                | 50                                             | 72.54          | 4.38          | 16.56          | 19.25      | 5.15      |
|                                                | 60                                             | 58.64          | 4.32          | 13.57          | 15.97      | 5.08      |
|                                                | 70                                             | 43.80          | 4.20          | 10.43          | 12.44      | 4.98      |
|                                                | 80                                             | 29.69          | 4.14          | 7.17           | 8.84       | 4.86      |
|                                                | 90                                             | 14.20          | 3.54          | 4.01           | 4.98       | 4.62      |
|                                                | 99                                             | 3.35           | 2.82          | 1.19           | 1.63       | 3.90      |
|                                                | 100                                            | 0.03           | 0.78          | 0.03           | 0.05       | 1.44      |

Wird das Solarmodul im Flasher bestrahlt, wurde laut Tabelle 8 eine MPP-Leistung von 177,33 mW ermittelt. Bei einem Verschattungsgrad von 0 % tritt eine um 24 % geringere MPP-

Leistung von 135,95 mW auf. Dabei sollte beachtet werden, dass das Solarmodul im Flasher einer sehr kurzzeitigen Strahlungsemission ausgesetzt ist. Somit fand im Gegensatz zum vom Sonnensimulator beleuchteten Solarmodul keine Erwärmung statt.

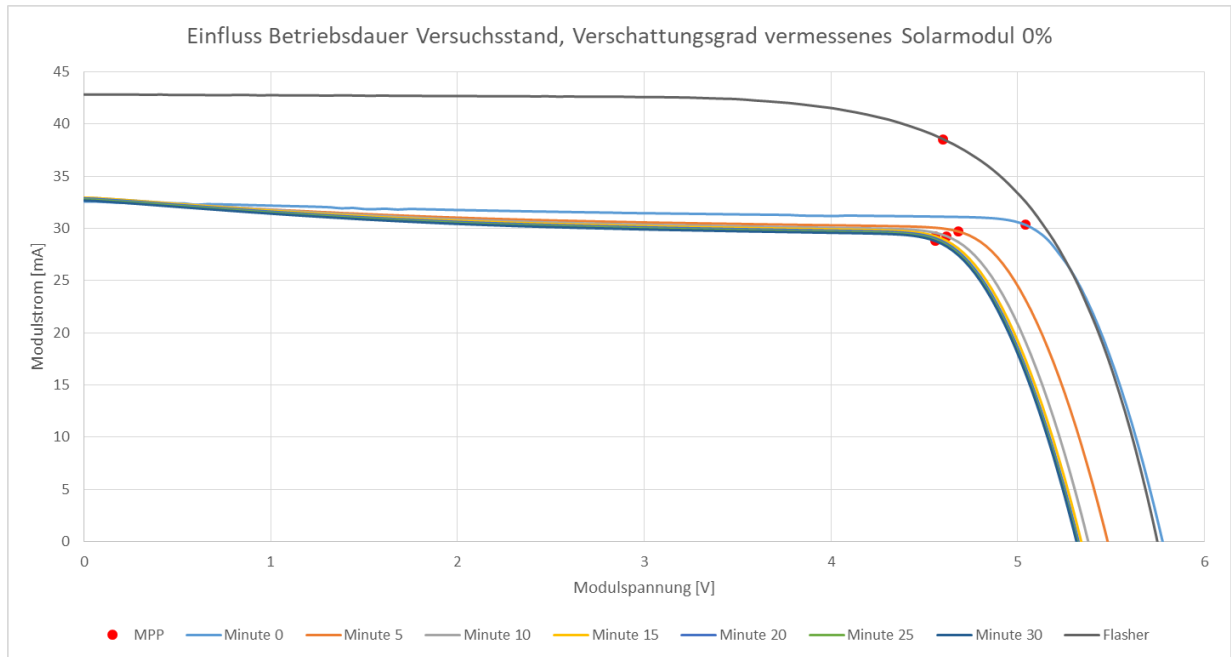
Wird die Kennlinie des Solarmoduls mit einem Verschattungsgrad von 0 % direkt nach Einschalten des Versuchsstandes aufgenommen, beträgt die MPP-Leistung 152,94 mW. Der Unterschied zur MPP-Leistung bei Bestrahlung mit dem Flasher sinkt auf 14 %.

Es wurde unter identischen Bedingungen bezüglich des Verschattungsgrads des vermessenen sowie der benachbarten Module der Einfluss der Betriebsdauer des Versuchsstandes auf die Kennlinie des Solarmoduls untersucht. Für das beleuchtete Solarmodul wurde ein Verschattungsgrad von 0 % gewählt. Der Verschattungsgrad der benachbarten Solarmodule betrug 99 %.

Abbildung 46 und Tabelle 9 zeigen die gemessenen Werte in Abhängigkeit von der Betriebsdauer des Versuchsstandes. Dabei tritt mit steigender Betriebsdauer vor allem eine Verringerung der Leerlaufspannung  $U_L$  auf. Dieses Verhalten ähnelt der in Kapitel 3.1 beschriebenen und in Abbildung 5 dargestellten Kennlinienverschiebung bei Erwärmung des Solarmoduls.

Innerhalb der ersten 5 Minuten nach Einschalten des Versuchsstands erfolgt eine Verminderung der MPP-Leistung von 152,94 mW auf 139,05 mW. Dies entspricht einem Rückgang von etwa 9,1 %. Mit steigender Betriebsdauer nimmt die weitere Kennlinienverschiebung immer weiter ab. So verringert sich die MPP-Leistung zwischen einer Betriebsdauer von 25 Minuten und 30 Minuten um lediglich 0,4 %.

Aus diesem Zusammenhang von Betriebsdauer, Erwärmung der Solarmodule und daraus resultierender Kennlinienverschiebung folgt, dass mit dem Versuchsstand einerseits Erwärmungseffekte von Solarmodulen betrachtet werden können. Des Weiteren sollte für vergleichbare Aussagen bezüglich der Verschattung einer Solaranlage der Versuchsstand zumindest 15 Minuten vorher eingeschaltet werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Veränderung der Messwerte durch die Variierung der Bestrahlungsstärke und nicht durch die Erwärmung des Solarmoduls hervorgerufen wird.



**Abbildung 46 – Kennlinien des vermessenen Solarmoduls in Abhängigkeit von der Betriebsdauer**

**Tabelle 9 – ermittelte MPP-Parameter sowie Kurzschlussstrom  $I_K$  und Leerlaufspannung  $U_L$  in Abhängigkeit von der Betriebsdauer des Versuchsstandes**

| Betriebsdauer [min] | $P_{MPP}$ [mW] | $U_{MPP}$ [V] | $I_{MPP}$ [mA] | $I_K$ [mA] | $U_L$ [V] |
|---------------------|----------------|---------------|----------------|------------|-----------|
| Flasher             | 177.33         | 4.60          | 38.54          | 42.83      | 5.75      |
| 0                   | 152.94         | 5.04          | 30.34          | 32.57      | 5.77      |
| 5                   | 139.05         | 4.68          | 29.71          | 32.74      | 5.48      |
| 10                  | 135.10         | 4.62          | 29.24          | 32.95      | 5.37      |
| 15                  | 133.32         | 4.56          | 29.24          | 32.95      | 5.34      |
| 20                  | 132.39         | 4.56          | 29.03          | 32.87      | 5.32      |
| 25                  | 131.74         | 4.56          | 28.89          | 32.77      | 5.31      |
| 30                  | 131.23         | 4.56          | 28.78          | 32.67      | 5.31      |

Des Weiteren wurde der Einfluss der benachbarten Beleuchtungseinheiten auf die Kennlinie des zu vermessenen Solarmoduls untersucht. Es wurden bei ausgeschalteter LED-Lampe des vermessenen Solarmoduls die Kennlinien für einen Verschattungsgrad von 0 %, 50 %, 99 % und 100 % der benachbarten Solarmodule gemessen. Dabei wurden die in Tabelle 10 dargestellten Werte ermittelt. Die entsprechenden Kennlinien sind in Anhang 14 abgebildet.

Die messbare Beeinflussung ist umso größer, desto geringere Verschattungsgrade die benachbarten Solarmodule aufweisen. So wurde bei einem Verschattungsgrad der benachbarten Solarmodule von 0 % eine MPP-Leistung von 2,97 mW ermittelt. Bei einem Verschattungsgrad von 50 % trat eine MPP-Leistung des vermessenen Solarmoduls von 1,23 mW auf. Der Einfluss der benachbarten Beleuchtungseinheiten mit Verschattungsgraden größer als 50 % wird als vernachlässigbar angesehen, da die MPP-Leistung des vermessenen Solarmoduls unter 1 mW liegt.

Es lässt sich eine signifikante Beeinflussung bei hohen Verschattungsgraden der vermessenen Solarmodule feststellen, wenn die benachbarten Solarmodule niedrige Verschattungsgrade aufweisen. Eine qualitative Aussage, dass sehr starke Verschattungen und somit sehr geringe Modulleistungen vorliegen, kann immer getroffen werden. Die Größenordnung der Beeinflussung durch die benachbarten Beleuchtungseinheiten auf das vermessene Solarmodul entspricht maximal der Veränderung des Verschattungsgrads um wenige Prozentstufen.

Die gewählten Abstände zwischen den einzelnen Beleuchtungseinheiten orientieren sich an den Abmessungen des ursprünglich geplanten Solararrays. Der realisierte Versuchsstand ermöglicht darüber hinaus größere horizontale Abstände, welche wahrscheinlich in einer geringeren Beeinflussung durch die benachbarten Solarmodule resultieren.

**Tabelle 10 – ermittelte MPP-Parameter sowie Kurzschlussstrom  $I_k$  und Leerlaufspannung  $U_L$  für verschiedene Verschattungsgrade der benachbarten Solarmodule bei Verschattungsgrad 100 % des vermessenen Solarmoduls**

|                                                     | Verschattungsgrad<br>benachbarte<br>Solarmodule [%] | $P_{MPP}$<br>[mW] | $U_{MPP}$ [V] | $I_{MPP}$ [mA] | $I_k$ [mA] | $U_L$ [V] |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|---------------|----------------|------------|-----------|
| Verschattungsgrad<br>vermessene<br>Solarmodule 100% | 0                                                   | 2.97              | 2.70          | 1.10           | 1.39       | 3.83      |
|                                                     | 50                                                  | 1.23              | 2.22          | 0.55           | 0.73       | 3.27      |
|                                                     | 99                                                  | 0.03              | 0.78          | 0.03           | 0.05       | 1.43      |
|                                                     | 100                                                 | 0.00              | 0.00          | 0.00           | 0.00       | 0.00      |

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der im Rahmen dieser Masterarbeit erstellte Versuchsstand eine quantitativ gute Nachbildung verschiedener Bestrahlungsstärken ermöglicht. Die Verschiebung der Strom-Spannungs-Kennlinie in Abhängigkeit des Verschattungsgrads eines Solarmoduls entspricht den real zu erwartenden Kennlinienverläufen bei Veränderung der Bestrahlungsstärke.

Der Versuchsstand ermöglicht die Nachbildung vieler verschiedener Helligkeitsniveaus. Es kann bei maximaler Helligkeit der LED-Lampe eine MPP-Leistung der verwendeten Solarmodule in Höhe von 86 % der bei Standardtestbedingungen mittels Flasher ermittelten MPP-Leistung erreicht werden.

Des Weiteren erfolgt eine Darstellung von Erwärmungseffekten der Solarmodule mit steigender Betriebsdauer des Versuchsstandes. Dies bedeutet gleichzeitig, dass für eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Verschattungseffekte die Erwärmung der Solarmodule berücksichtigt werden muss.

## **7 Optimierungsansätze**

### **7.1 Optimierungsansätze des kommunikationstechnischen Aufbaus**

Die in Kapitel 4.4 beschriebene Realisierung des kommunikationstechnischen Aufbaus erfolgte durch das Verteilen der Server-Funktionalitäten auf zwei verschiedene Geräte. Ein Raspberry Pi erstellt als WLAN-Router ein lokales Netzwerk und fungiert zudem als MQTT-Broker. Dadurch wird die Kommunikation mit dem Mikrocontroller der Ansteuer-Schaltung ermöglicht. Ein Desktop-Rechner mit dem Betriebssystem Ubuntu Server erstellt die GUIs, welche der webbasierten Ansteuerung der LED-Lampen dienen. Zudem wird ein HTTPS-verschlüsselter Zugriff auf die GUIs durch Aufrufen einer statischen IP-Adresse ermöglicht. Als Voraussetzung besteht, dass der Benutzer Zugriff auf das HTWK-Netzwerk besitzt.

Zur Optimierung des kommunikationstechnischen Aufbaus bietet sich die Reduzierung der benötigten Hardware-Komponenten an, indem die Server-Funktionalitäten von einem einzelnen Gerät erfüllt werden. Eine Möglichkeit stellt das Integrieren des WLAN-Routers und des MQTT-Brokers in den bestehenden Ubuntu Server dar.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit besteht bei der Beschränkung des GUI-Zugriffes auf Benutzer, welche sich im HTWK-Netzwerk befinden. Würde anstatt der statischen IP-Adresse eine eigene Subdomain wie bspw. [www.htwk-leipzig.de/\\*/Versuchsstand](http://www.htwk-leipzig.de/*/Versuchsstand) zur Verfügung stehen, wäre ein uneingeschränkt globaler Aufruf der GUIs möglich.

Das Ziel der in dieser Masterarbeit realisierten GUIs bestand in einer prototypischen Testmöglichkeit des webbasierten Fernzugriffs und der Ansteuerung des Versuchsstands. Daran schließt sich im nächsten Schritt eine Professionalisierung der GUI sowohl nach Gesichtspunkten der Benutzerfreundlichkeit als auch der didaktischen Einbettung in einen späteren Laborversuch an.

### **7.2 Optimierungsansätze der nachgebildeten Beleuchtungsmuster**

Mit dem realisierten Versuchsstand besteht die Möglichkeit, die Beleuchtungsstärke der einzelnen LED-Lampen über den jeweils bestrahlten Lichtspot gleichmäßig zu variieren. In der Realität können Objekte in der Umgebung der Solaranlage allerdings sehr ungleichmäßige Verschattungen über die Fläche eines Solarmoduls verursachen, wodurch ein abweichendes Verhalten des Solarmoduls gegenüber einer homogenen Intensitätsverringern hervorgerufen wird.

Ein möglicher Optimierungsansatz besteht in der Implementierung von inhomogenen Teilverschattungen einzelner Solarmodule. Teilverschattungen können bspw. durch das



Einbringen von Objekten in den Strahlengang realisiert werden, welche im miniaturisierten Maßstab die Wirkung umgebener Bäume, Schornsteine oder Dachgauben nachbilden.

Die in Kapitel 5.1.2 beschriebene szenarienbasierte Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster ermöglicht die Auswahl bestimmter Tage und Himmelszustände, für welche der Tagesgang der Bestrahlungsstärke nachgebildet wird.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit alle Tage eines Jahres zu berücksichtigen. Für die Nachbildung des vollständig klaren oder bedeckten Himmels kann auf Basis der Informationen zu Sonnenhöhe und Azimut der Tagesgang der Bestrahlungsstärke berechnet werden und als CSV-Datei in den in Kapitel 5.2 vorgestellten Programmfluss importiert werden. Zur Nachbildung des mittleren Himmelszustands werden zudem Daten zur direkten und diffusen horizontalen Bestrahlungsdaten aus der Vergangenheit benötigt, welche vom DWD zur Verfügung gestellt werden.

Des Weiteren ist auf Basis der DWD-Daten der Wetterstation Leipzig-Holzhausen die Nachbildung des Tagesgangs der Bestrahlungsstärke von spezifischen Tagen aus der Vergangenheit oder von weiteren, auf konkreten Beispielen basierenden Himmelszuständen denkbar. Mit Informationen zu direkter und diffuser Bestrahlungsstärke, Sonnenhöhe und Azimut lässt sich prinzipiell jedes Szenario nachbilden.

Zusätzlich zu der Nachbildung kompletter Tagesgänge könnte zudem eine Nachbildung der Bestrahlungsstärke von spezifischen Zeitpunkten erfolgen.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

Mit dieser Masterarbeit wurde ein bestehender Versuchsstand zur variablen Verschaltung von Solarmodulen um eine regelbare Lichtquelle als Sonnensimulator erweitert. Die Beleuchtung der insgesamt acht Solarmodule des Versuchsstands kann jeweils individuell angesteuert und in der Intensität variiert werden. So kann eine individuelle Veränderung der Modulleistungen hervorgerufen werden. Des Weiteren wird eine Nachbildung realer Tagesgänge der Bestrahlungsstärken einer dachbasierten Solaranlage für verschiedene Tage und Himmelszustände ermöglicht, bei denen der Einfluss des Neigungswinkels und der Ausrichtung der Solaranlage berücksichtigt werden.

Zur Realisierung des Versuchsstands wurde zunächst eine CAD-Konstruktion der mechanischen Bauteile sowie ein Platinenentwurf für die Ansteuer-Schaltung erstellt. Darauf aufbauend konnte der mechanische und elektrische Zusammenbau der Versuchstand-Hardware erfolgen.

Um einen webbasierten Fernzugriff zu ermöglichen, wurde in die Ansteuer-Schaltung eine geeignete Funkelektronik integriert. In Verbindung mit einem ebenfalls implementierten Webserver wurde eine drahtlose Ansteuerung des Versuchsstandes realisiert. Anhand einer browserbasierten Benutzeroberfläche kann von jedem beliebigen Endgerät aus die Steuerung der Beleuchtung erfolgen. Voraussetzungen sind lediglich der Zugriff auf das HTWK-Netzwerk und das Vorhandensein eines Webbrowsers.

Zudem erfolgten Recherchetätigkeiten bezüglich relevanter Parameter, welche die auf einer horizontalen oder geneigten Fläche vorherrschenden Bestrahlungsstärken bestimmen. Die anhand der Literatur ermittelten Bestrahlungsstärken wurden anschließend mit den realen Messwerten der Wetterstation Leipzig-Holzhausen aus den Jahren 2007 bis 2018 abgeglichen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde eine szenarienbasierte Nachbildung exemplarischer Beleuchtungsmuster für dachbasierte Solaranlagen realisiert. Es kann ein Tagesgang der Bestrahlungsstärke für verschiedene Tage und Himmelszustände nachgebildet werden. Als Bedeckungszustand des Himmels können ein vollständig klarer oder bewölkter sowie ein mittlerer Zustand nachgebildet werden. Die Neigungswinkel und die Ausrichtung der Solaranlage können innerhalb eines sinnvollen Bereiches frei gewählt werden.

Die Szenarien sollen die prinzipiellen Möglichkeiten des Versuchsstandes verdeutlichen. Denkbar ist über die umgesetzten Parameter zu Dachneigung und Ausrichtung hinaus noch die Ergänzung vieler weiterer Faktoren. Prinzipiell ist die Nachbildung aller Szenarien möglich, für welche Informationen zur resultierenden horizontalen Bestrahlungsstärke, Sonnenhöhe und Azimut vorliegen.

Neben der szenarienbasierten Nachbildung besteht zudem die Möglichkeit exemplarische Beleuchtungsmuster anhand der Auswahl von individuellen Verschattungsgraden der einzelnen Solarmodule zu erzeugen.

Die Evaluierung zeigt, dass mit dem Sonnensimulator eine gute quantitative Nachbildung der verschiedenen Bestrahlungsstärken erreicht wird. Zudem erfolgt über die Betriebsdauer des Versuchsstands eine Darstellung von Erwärmungseffekten der Solarmodule. Es wird eine Untersuchung sowohl der Auswirkungen verschiedener Verschattungen als auch der Erwärmung von Solarmodulen auf den Ertrag von Solaranlagen ermöglicht.

Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgte die Realisierung eines Sonnensimulators, welcher einen Teil des Gesamtversuchsstandes zur Untersuchung der Auswirkungen inhomogener Leistungsverteilungen zwischen Solarmodulen darstellt. Der zweite Teil besteht aus den Solarmodulen, welche sich variabel auf zwei verschiedene Stränge verschalten lassen. Zudem bietet eine SMU die Möglichkeit, Kennlinien einzelner Module oder der jeweiligen Stränge aufzunehmen.

Im nächsten Schritt soll die Zusammenführung aller Teile des Versuchsstandes erfolgen. Es soll eine gemeinsame Benutzeroberfläche erstellt werden, welche sowohl die Ansteuerung der LED-Lampen, die Verschaltung der Solarmodule als auch das Auslösen der Vermessung eines Solarmoduls oder Strangs ermöglicht. Dadurch wird ein Laborversuchsstand geschaffen, welcher sowohl in der Forschung als auch nach einer didaktischen Aufbereitung als studentisches Praktikum in der Lehre eingesetzt werden kann.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] al Diban, R., Rudolph, M., Heddergott, C., und Hofbauer, J. 2019. Potentialuntersuchung zur schaltbasierten Leistungsoptimierung von PV-Anlagen im Vergleich mit modulbasiertem MPPT. *Galvanotechnik, Heft 11*.
- [2] Corradini, R. 2013. *Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale für Gebäude mit einer Wohneinheit*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.
- [3] Corradini, R. und Schmid, T. 2013. Orientierungsanalyse von Dachflächen als Grundlage für solare Potenziale. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 12*, S. 62–66.
- [4] DATACOM Buchverlag. 2018. *DoD-Protokoll*. <https://www.itwissen.info/DoD-Protokoll-DoD-protocol.html>. Zuletzt geprüft am 03.02.2021.
- [5] Deutscher Wetterdienst. *Index of /climate\_environment/CDC/observations\_germany/climate/*. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/). Zuletzt geprüft am 26.11.2020.
- [6] Deutscher Wetterdienst. *Wetterlexikon. Gesamtbedeckungsgrad*. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100932&lv3=101016>. Zuletzt geprüft am 29.11.2020.
- [7] DIN-Normenausschuss Lichttechnik. 2019. *DIN 5034-1:2019-12. Tageslicht in Innenräumen – Teil 1: Begriffe und Mindestanforderungen*.
- [8] DIN-Normenausschuss Lichttechnik. 2019. *DIN 5034-2:2019-12. Tageslicht in Innenräumen - Teil 2: Grundlagen*.
- [9] Dudenverlag. *Himmels-äqua-tor, der*. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Himmelsaequator>. Zuletzt geprüft am 28.11.2020.
- [10] DWD Climate Data Center (CDC). 2018. *DATENSATZBESCHREIBUNG. Historische stündliche Stationsmessungen der Wolkenbedeckung für Deutschland Version v005*.
- [11] Friesenhahn, K. 2018. *statische vs. dynamische Websites*. <https://homepage-manufaktur.com/statische-vs-dynamische-websites/>. Zuletzt geprüft am 06.03.2021.
- [12] Gringmuth, V. *Koordinatensysteme am Himmel*. <https://einklich.net/rec/astro/koordinatensysteme.htm>. Zuletzt geprüft am 28.11.2020.
- [13] Grusin, M. *Serial Peripheral Interface (SPI)*. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all>. Zuletzt geprüft am 08.12.2020.
- [14] Häberlin, H. 2010. *Photovoltaik. Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen*. 2. Auflage. Electrosuisse-Verlag, Fehraltorf.
- [15] Häckel, H. 2016. *Meteorologie*. 8. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- [16] Heddergott, C. 2021. *String Optimization: 4. Projekttreffen*.

- [17] Hund, S., Senft, F., Wolf, M., Gallin, P., und Rudolph, M. 2018. Anforderungen an die Entwicklung eines verbrauchsarmen applikationsflexiblen Messkonzepts zur Realisierung einer temporären Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen. In *Smarte Produktion und Digitale Vernetzung (VPP 2018). Fachtagung Vernetzt planen und produzieren - VPP2018*, S. 89–99.
- [18] International Organization for Standardization. 2004. *ISO 15469:2004-2. Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky*.
- [19] Koß, G; Reinhold, W. 1998. *Lehr- und Übungsbuch Elektronik. Mit 82 Tabellen, 95 Beispielen und 112 Aufgaben und Lösungen*. Fachbuchverlag Leipzig.
- [20] Luber, S; Donner, A. *Was ist HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure)? Definition*. <https://www.ip-insider.de/was-ist-https-hypertext-transfer-protocol-secure-a-691192/>. Zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- [21] Mertens, K. *Sun Path Diagram 1.0*. [https://textbook-photovoltaics.org/software/sun\\_path\\_diagram\\_1.0.xls](https://textbook-photovoltaics.org/software/sun_path_diagram_1.0.xls). Zuletzt geprüft am 28.11.2020.
- [22] Mertens, K. 2018. *Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. 4. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig.
- [23] Microchip. 2003. *MCP41XXX/42XXX. Single/Dual Digital Potentiometer with SPI™ Interface*.
- [24] Mielcarek, P. 2013. *Effizienzgewinn durch verschaltbare Photovoltaik Systeme*. Dissertation. Erneuerbare Energien und Energieeffizienz Band 21. Kassel University Press, Kassel.
- [25] Möller, L. 2019. *Entwicklung eines Simulationstools. Leistungsoptimierung von Photovoltaikanlagen auf Basis eines Zwei-Leiter-Systems*. Präsentation.
- [26] Mozilla Developer Network. *JavaScript-Grundlagen*. [https://developer.mozilla.org/de/docs/Learn/Getting\\_started\\_with\\_the\\_web/JavaScript\\_basics](https://developer.mozilla.org/de/docs/Learn/Getting_started_with_the_web/JavaScript_basics). Zuletzt geprüft am 07.03.2021.
- [27] Mozilla Developer Network. 2020. *CSS-Grundlagen*. [https://developer.mozilla.org/de/docs/Learn/Getting\\_started\\_with\\_the\\_web/CSS\\_basics](https://developer.mozilla.org/de/docs/Learn/Getting_started_with_the_web/CSS_basics). Zuletzt geprüft am 06.03.2021.
- [28] Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik (NHRS) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2003. *DIN 4710:2003. Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland*.
- [29] Obermaier, D. 2015. *IoT-Protokollschungel – Ein Wegweiser*. <https://www.informatik-aktuell.de/betrieb/netzwerke/iot-protokollschungel-ein-wegweiser.html>. Zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- [30] OpenJS Foundation. *Node-RED. Low-code programming for event-driven applications*. <https://nodered.org/>. Zuletzt geprüft am 07.03.2021.

- [31] Osram GmbH. 2014. *Technical application guide. QUICKTRONIC® Intelligent DALI DIM.*
- [32] Palz, W. (Hg.). 1984. *Atlas über die Sonnenstrahlung Europas.* EUR. Verl. TÜV Rheinland, Köln.
- [33] *Photovoltaikanlage und die Dachneigung.* <https://www.rechnerphotovoltaik.de/photovoltaik/voraussetzungen/dachneigung>. Zuletzt geprüft am 16.01.2021.
- [34] Quaschnig, V. 2019. *Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Klimaschutz.* 10. Auflage. Hanser Verlag, München.
- [35] Roden, G. 2020. *Node.js vorgestellt.* <https://kiosk.entwickler.de/entwickler-magazin/entwickler-magazin-6-2020/node-js-vorgestellt/>. Zuletzt geprüft am 07.03.2021.
- [36] Rudolph, M. *Forschung - Aktuell laufende Projekte. String Optimization.* <https://fing.htwk-leipzig.de/fakultaet/professuren/prof-rudolph/forschung/>. Zuletzt geprüft am 03.03.2021.
- [37] Rudolph, M. 2020. *Projektbeschreibung Solar Web Optimization*, HTWK Leipzig.
- [38] Scheffler, J. 2016. *Verteilnetze auf dem Weg zum Flächenkraftwerk. Rechtlicher Rahmen, Erzeuger, Netze.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [39] Schnabel, P. *DoD-Schichtenmodell.* <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0907011.htm>. Zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- [40] Schröder, G; Treiber, H. 2014. *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen.* 11. Auflage. Kamprath-Reihe. Vogel Business Media, Würzburg.
- [41] selfHTML. 2021. *HTML/Tutorials/HTML5/Entstehung und Entwicklung.* [https://wiki.selfhtml.org/wiki/HTML/Tutorials/HTML5/Entstehung\\_und\\_Entwicklung](https://wiki.selfhtml.org/wiki/HTML/Tutorials/HTML5/Entstehung_und_Entwicklung). Zuletzt geprüft am 06.03.2021.
- [42] Senft, F. 2019. *Kommunikationstechnische Optimierung eines energieautarken funkbasierten Sensorkonzepts.* 1. Auflage. Open-Access-Hochschulverlag, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig.
- [43] Senft, F. 2020. *Aufbau eines Laborversuchsstandes zur Simulation von Umwelteinflüssen auf die Effizienz von Solaranlagen.* Projektarbeit, HTWK Leipzig.
- [44] TCI LED. 2020. *LED drivers. Alimentatori LED.*
- [45] Tektronix GmbH. *SMUs (Source Measure Units) von Keithley.* <https://de.tek.com/keithley-source-measure-units>. Zuletzt geprüft am 17.03.2021.
- [46] Trilux. *1...10-V SCHNITTSTELLE.* <https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/lichtmanagement/schnittstellen/110-v-schnittstelle/>. Zuletzt geprüft am 07.12.2020.
- [47] Wagner, A. 2019. *Photovoltaik Engineering. Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung.* 5. Auflage Auflage. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin.
- [48] Walter, K.-D. 2017. IoT-Schnittstellen einfach verdrahten. *Elektronikpraxis, Heft 004*, S. 36–42.

- [49] WAVELABS Solar Metrology Systems GmbH. *The SINUS-70: A flasher that goes the distance*. <https://wavelabs.de/products/sinus-70/>. Zuletzt geprüft am 03.03.2021.

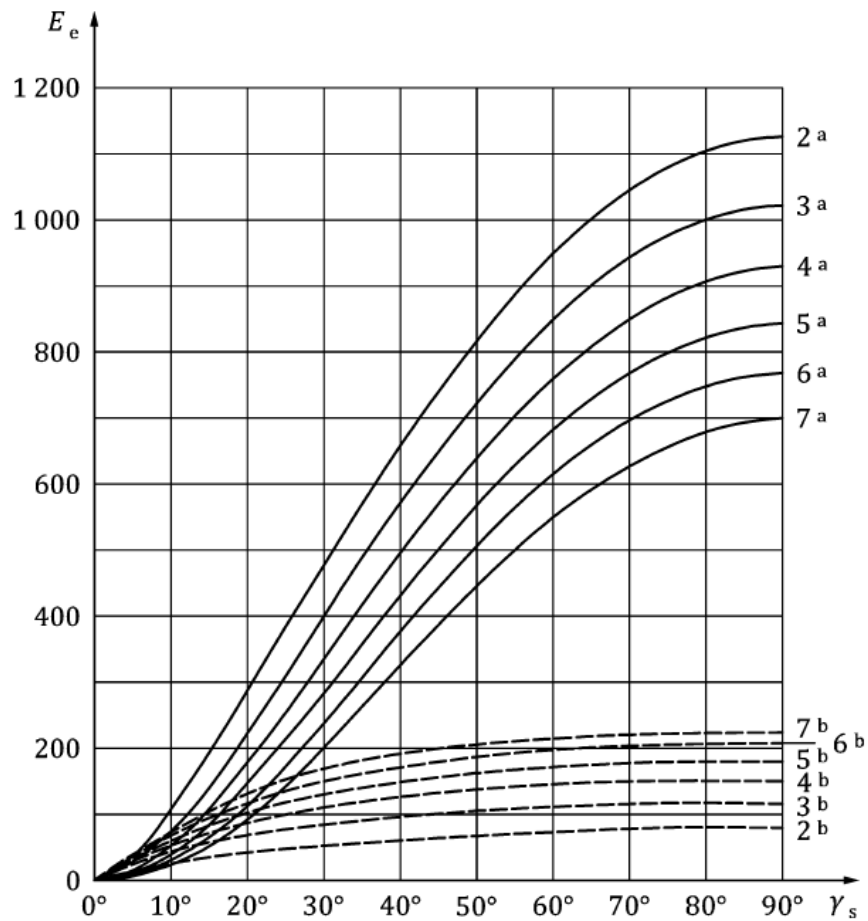
## 10 Anhang

|                                                                                                                                                 |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Anhang 1 – Zusammenhang zwischen direkter und diffuser Bestrahlungsstärke von Linke-Trübungsfaktor und Sonnenhöhe                               | - 93 -  |
| Anhang 2 – Diagramme zum Tagesgang der Globalstrahlungsstärke einer horizontalen Fläche für verschiedene Zeitpunkte im Jahr und Himmelszustände | - 94 -  |
| Anhang 3 – realisierter Versuchsstand                                                                                                           | - 95 -  |
| Anhang 4 – technische Zeichnungen der konstruierten und gefertigten Bauteile                                                                    | - 96 -  |
| Anhang 5 – provisorischer Aufbau der Ansteuer-Schaltung für eine LED                                                                            | - 103 - |
| Anhang 6 – Zusammenhang von Potentiometer-Stufe und Steuerspannung UT                                                                           | - 105 - |
| Anhang 7 – Schaltpläne Ansteuer-Schaltung                                                                                                       | - 107 - |
| Anhang 8 – realisierte Platinen der Ansteuer-Schaltung                                                                                          | - 110 - |
| Anhang 9 – in Verdrahtungskanal montierte elektronische Komponenten                                                                             | - 112 - |
| Anhang 10 – Arduino-Programmcode für Mikrocontroller ESP32 der Ansteuerschaltung                                                                | - 113 - |
| Anhang 11 – Programmcode der frei mit JavaScript programmierbaren Node-Red-Funktionsbausteine                                                   | - 118 - |
| Anhang 12 – CSV-Datensatz für einen 21. Juni mit klarem Himmel (Darstellung mit Excel)                                                          | - 123 - |
| Anhang 13 – zuvor bestehender Versuchsstand zur variablen Modulverschaltung [16]                                                                | - 124 - |
| Anhang 14 – Kennlinie vermessenenes Solarmodul bei verschiedenen Verschattungsgraden der benachbarten Solarmodule                               | - 124 - |



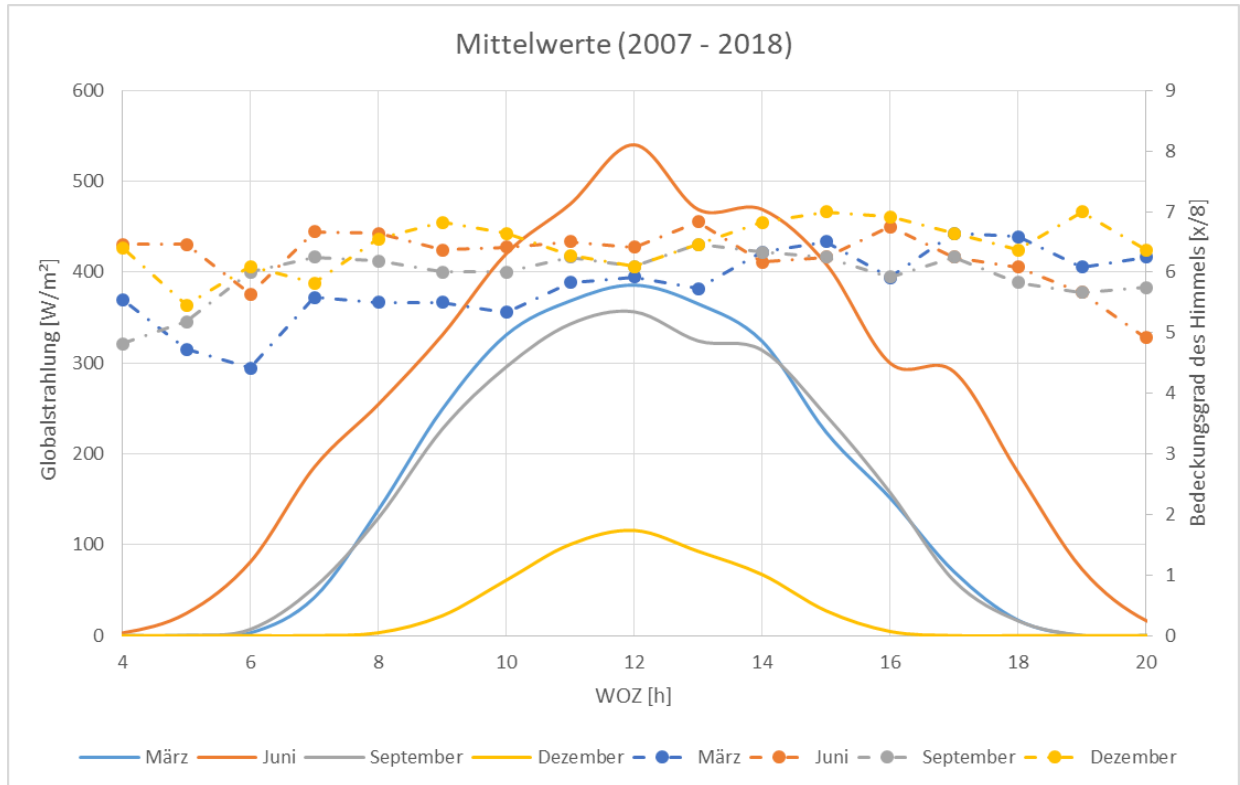
**Anhang 1 – Zusammenhang zwischen direkter und diffuser Bestrahlungsstärke von Linke-Trübungsfaktor und Sonnenhöhe**

direkte horizontale Bestrahlungsstärke [ $\text{W/m}^2$ ] (a, durchgezogene Linie) und diffuse horizontale Bestrahlungsstärke [ $\text{W/m}^2$ ] (b, gestrichelte Linie) bei klarem Himmel für Linke-Trübungsfaktoren  $T_L = 2 \dots 7$  in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe  $\gamma_s$  [8]

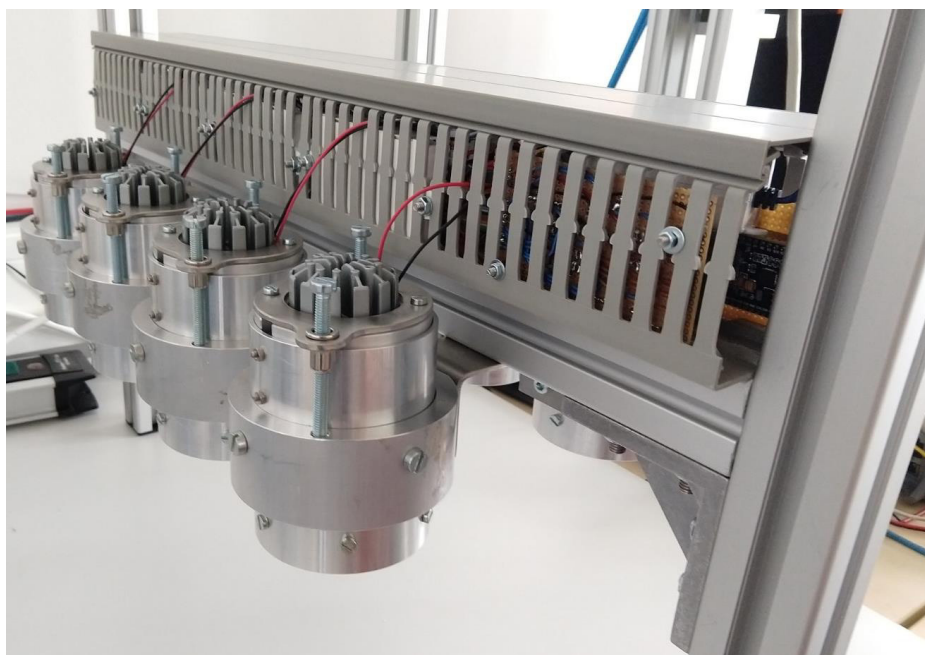


**Anhang 2 – Diagramme zum Tagesgang der Globalstrahlungsstärke einer horizontalen Fläche für verschiedene Zeitpunkte im Jahr und Himmelszustände**

Mittelwerte der Globalstrahlung (durchgezogene Linien) und des Gesamtbedeckungsgrades des Himmels (Strich-Punkt-Linien) für den 21. März, 21. Juni, 21. September, 21. Dezember der Jahre 2007 – 2018; Daten der Wetterstation Leipzig-Holzhausen



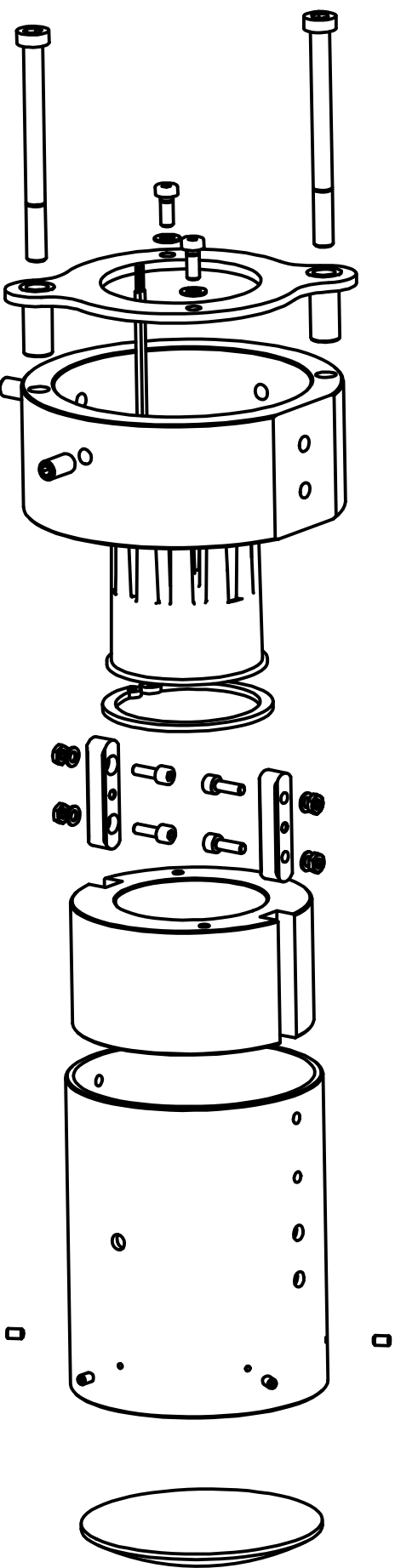
### Anhang 3 – realisierter Versuchsstand



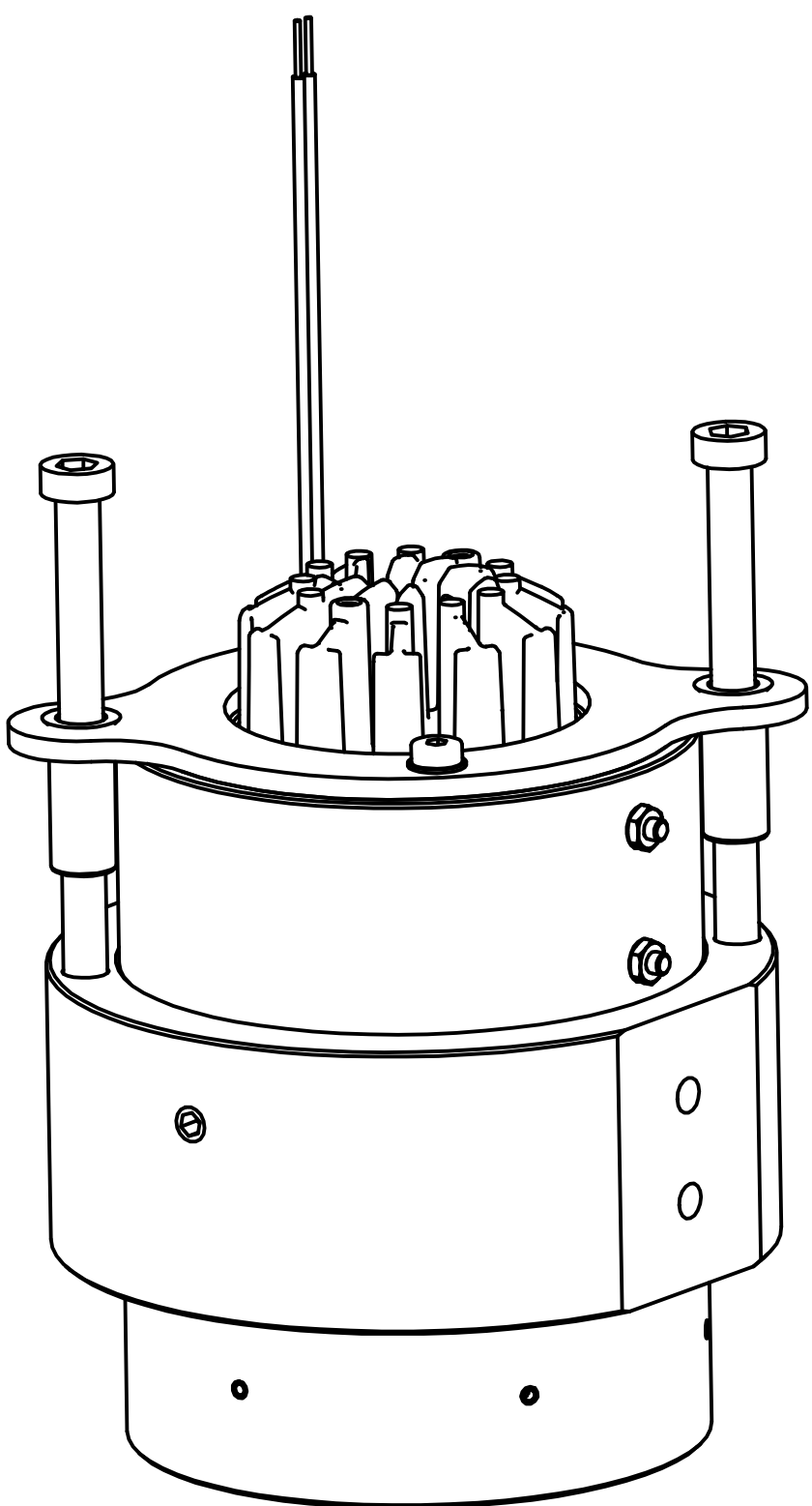
**Anhang 4 – technische Zeichnungen der konstruierten und gefertigten Bauteile**

- a) Zusammenbauzeichnung Baugruppe zur Lichtemission und Fokussierung
- b) Montagewinkel
- c) Blech zur LED-Halterung
- d) LED-Halter
- e) Halterung für Linsenhalter
- f) Linsenhalter

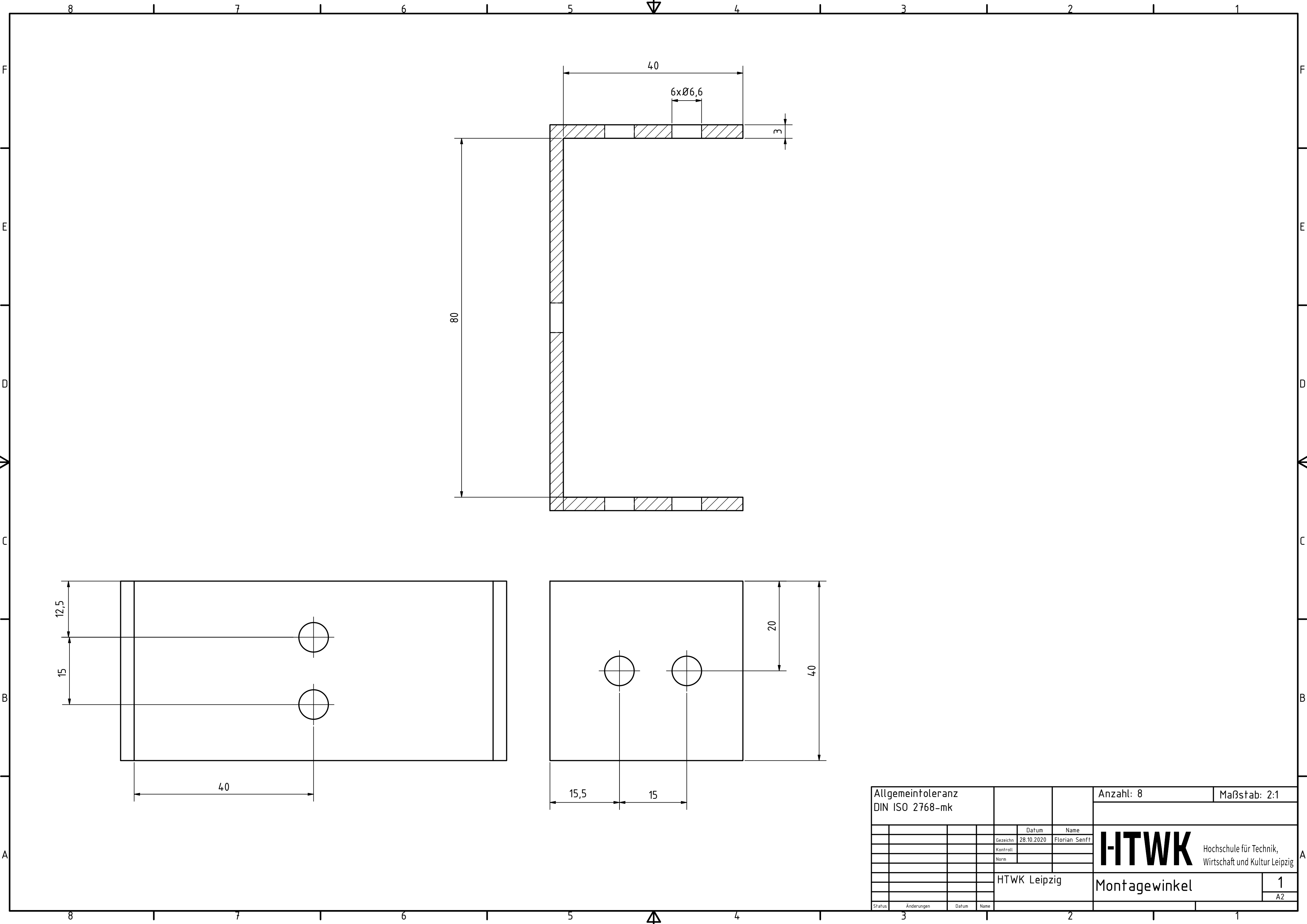
ANSICHT 1 ( 1 : 2 )



ANSICHT 2 ( 1 : 1 )

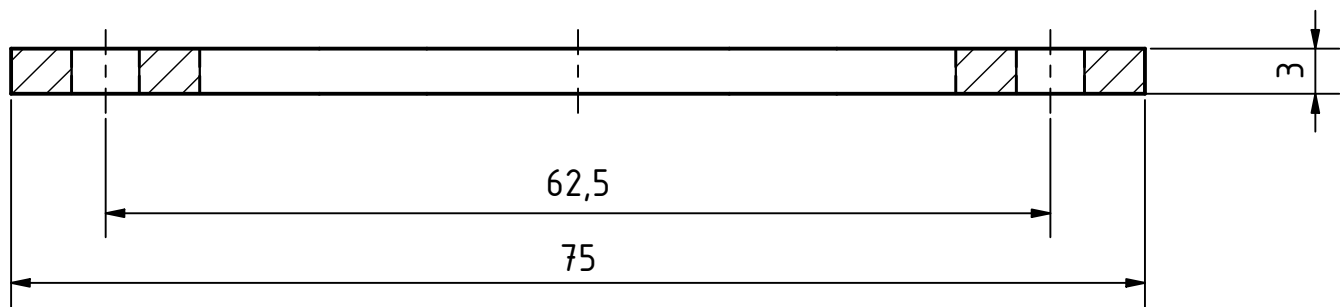
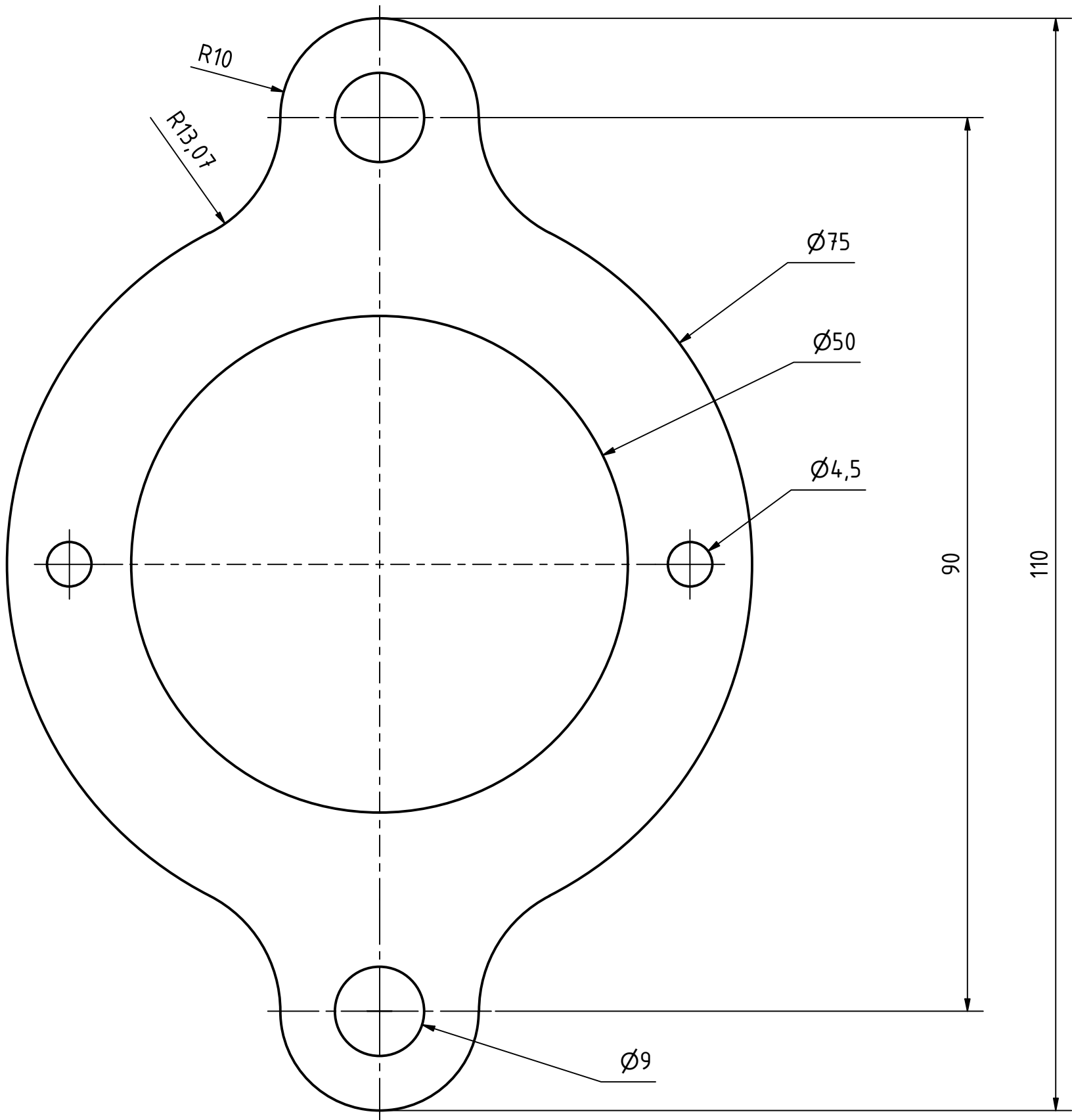


|        |            |       |      |            |            |          |  |                      |  |
|--------|------------|-------|------|------------|------------|----------|--|----------------------|--|
|        |            |       |      |            |            |          |  |                      |  |
|        |            |       |      |            |            |          |  |                      |  |
|        |            |       |      |            | Datum      | Name     |  | Zusammenbauzeichnung |  |
|        |            |       |      | Gezeichnet | 04.02.2021 | F. Senft |  |                      |  |
|        |            |       |      | Kontrollt  |            |          |  |                      |  |
|        |            |       |      | Norm       |            |          |  |                      |  |
|        |            |       |      |            |            |          |  | Baugruppe_Linse_LED  |  |
|        |            |       |      |            |            |          |  |                      |  |
| Status | Änderungen | Datum | Name |            |            |          |  | 1                    |  |
|        |            |       |      |            |            |          |  | A2                   |  |

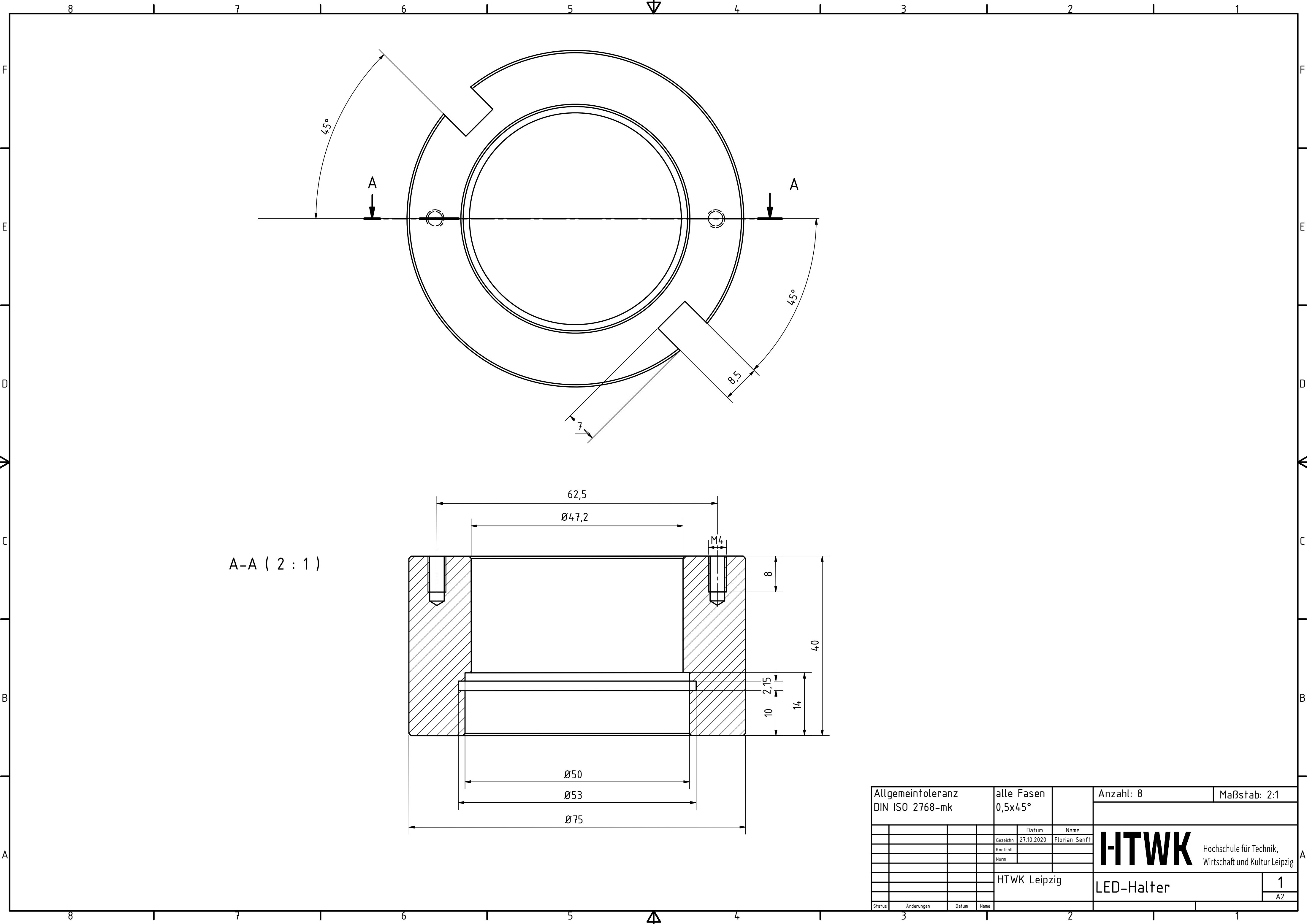


|                                      |            |       |      |              |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |
|--------------------------------------|------------|-------|------|--------------|------------|----------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------|--|
| Allgemeintoleranz<br>DIN ISO 2768-mk |            |       |      |              |            |                |  | Anzahl: 8                                                                                      |  | Maßstab: 2:1 |  |
|                                      |            |       |      |              |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |
|                                      |            |       |      |              | Datum      | Name           |  | <div><div>HTWK</div><div>Hochschule für Technik,<br/>Wirtschaft und Kultur Leipzig</div></div> |  |              |  |
|                                      |            |       |      | Gezeichnet   | 28.10.2020 | Florian Senfft |  |                                                                                                |  |              |  |
|                                      |            |       |      | Kontrollt    |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |
|                                      |            |       |      | Norm         |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |
|                                      |            |       |      |              |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |
|                                      |            |       |      | HTWK Leipzig |            |                |  | Montagewinkel                                                                                  |  |              |  |
|                                      |            |       |      |              |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |
|                                      |            |       |      |              |            |                |  | 1                                                                                              |  |              |  |
|                                      |            |       |      |              |            |                |  | A2                                                                                             |  |              |  |
| Status                               | Änderungen | Datum | Name |              |            |                |  |                                                                                                |  |              |  |



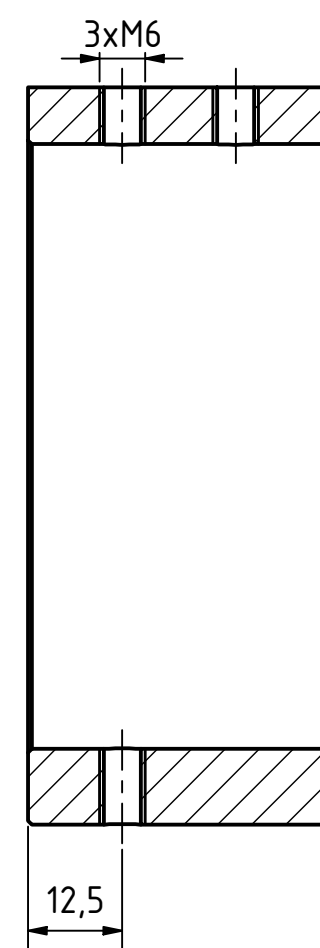
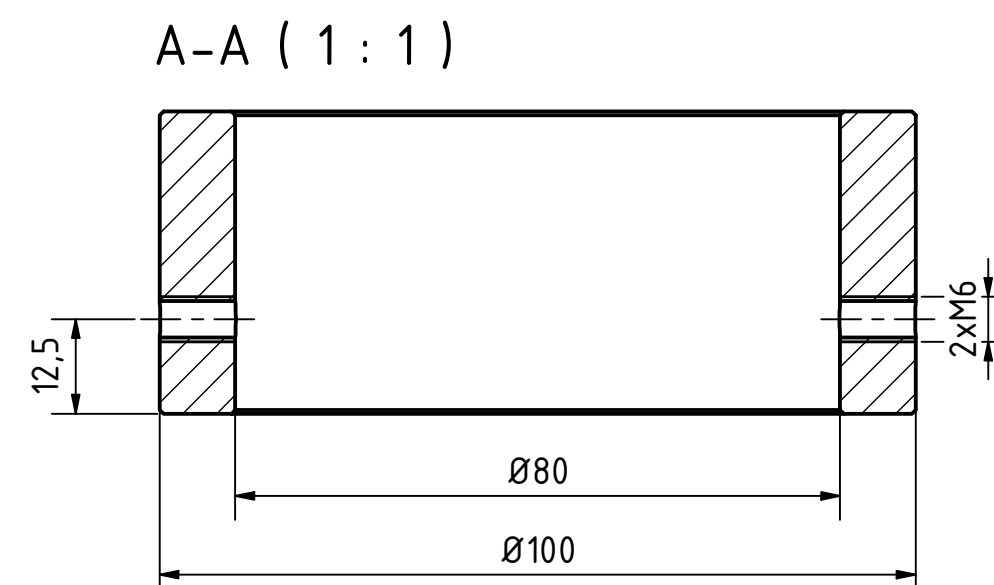
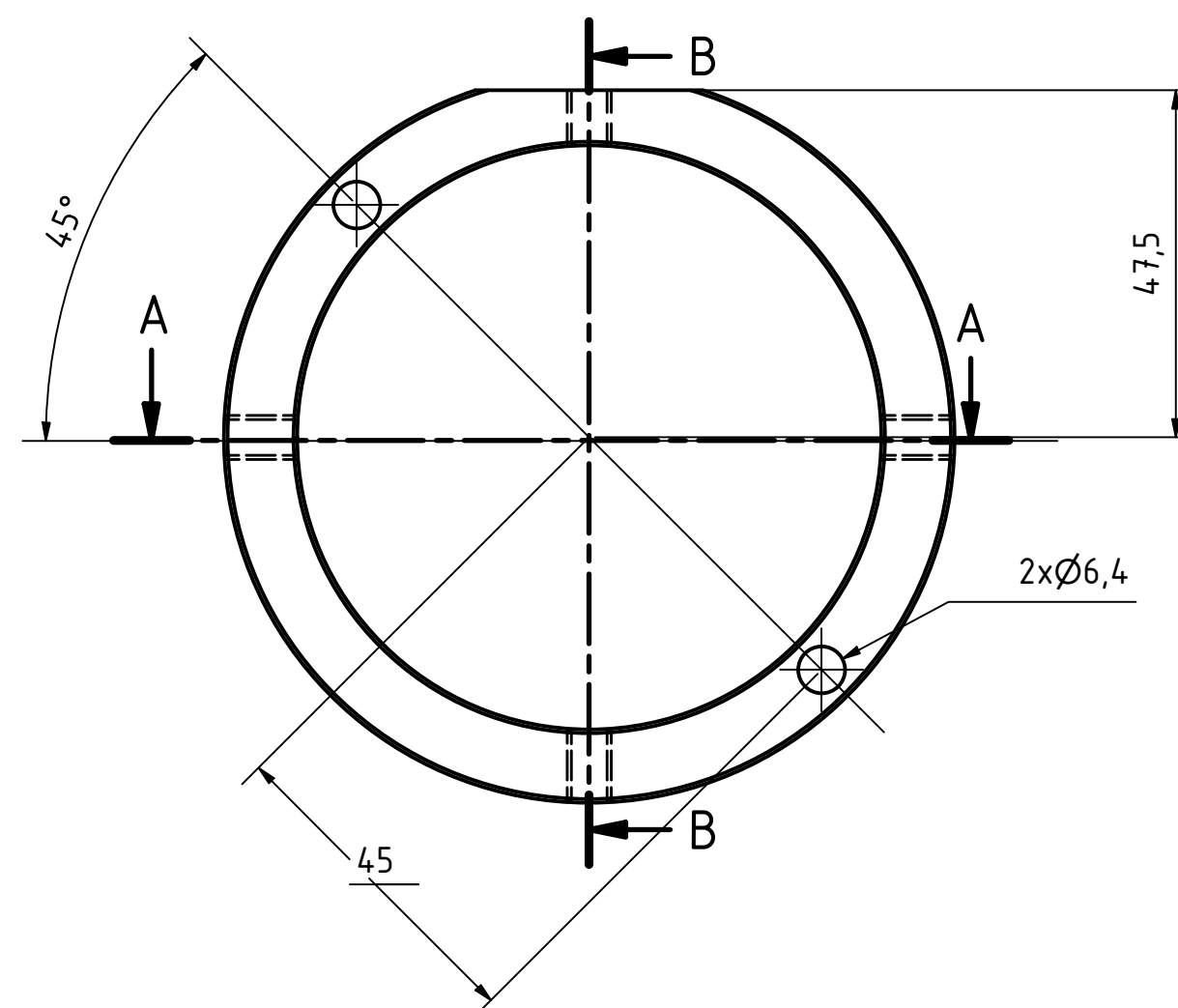
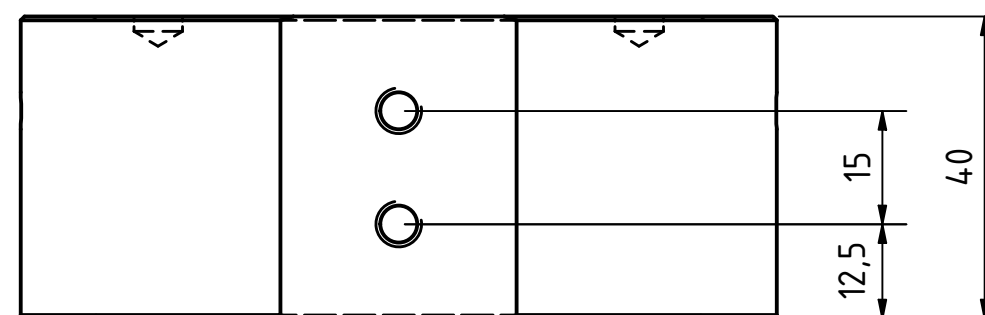


|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|--------------------------------------|--|--|--|------------|------------|-------------------|--|--------------|--|
| Allgemeintoleranz<br>DIN ISO 2768-mk |  |  |  |            |            | Anzahl: 8         |  | Maßstab: 2:1 |  |
|                                      |  |  |  |            |            | Werkstoff: 1.4301 |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            | Datum      | Name              |  |              |  |
|                                      |  |  |  | Gezeichnet | 26.10.2020 | Florian Senft     |  |              |  |
|                                      |  |  |  | Kontroll   |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  | Norm       |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |
|                                      |  |  |  |            |            |                   |  |              |  |



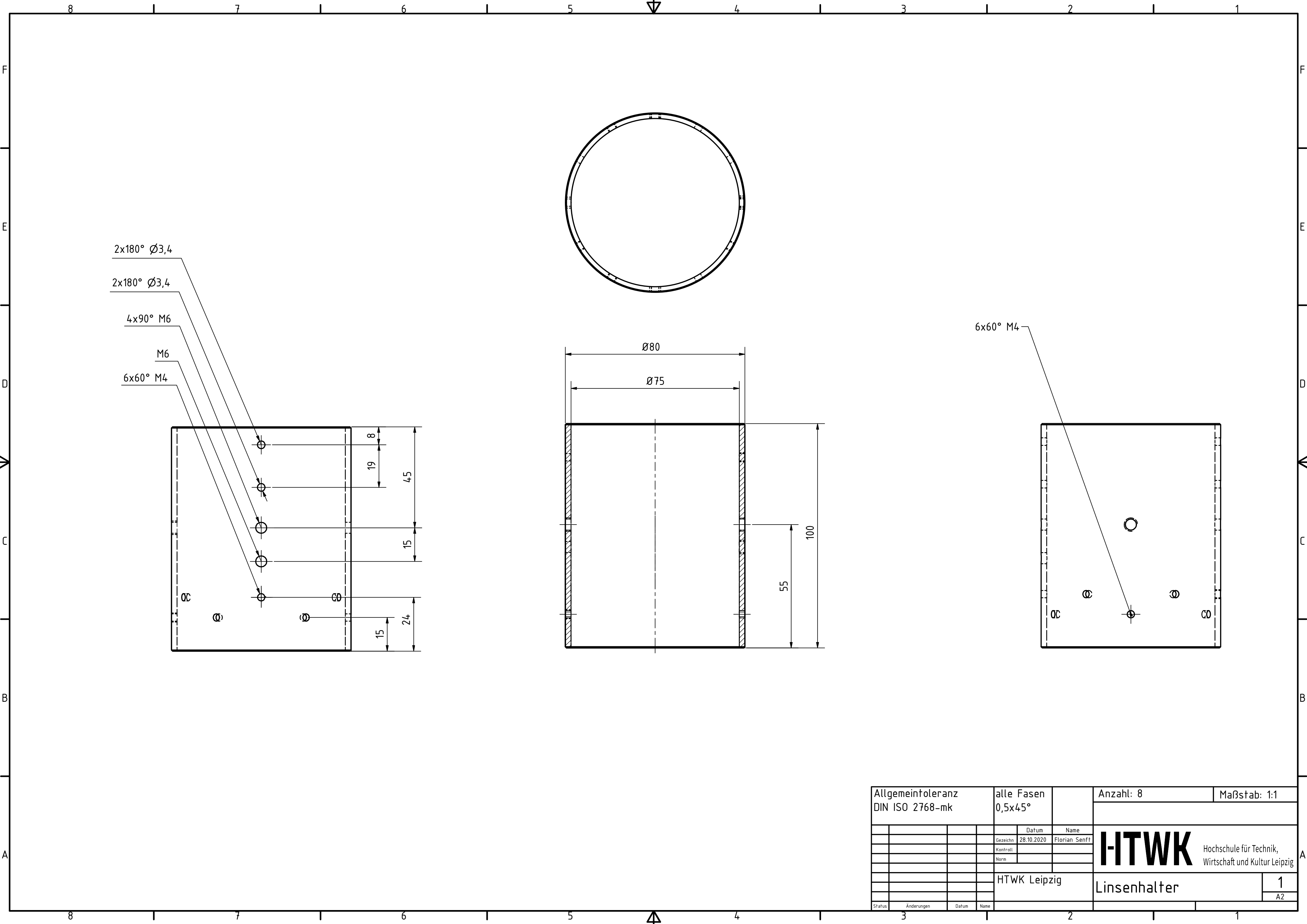
|                                      |            |       |      |                       |            |            |            |                                                                                                |  |
|--------------------------------------|------------|-------|------|-----------------------|------------|------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Allgemeintoleranz<br>DIN ISO 2768-mk |            |       |      | alle Fasen<br>0,5x45° |            | Anzahl: 8  |            | Maßstab: 2:1                                                                                   |  |
|                                      |            |       |      |                       |            |            |            |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       | Datum      | Name       |            | <div><div>HTWK</div><div>Hochschule für Technik,<br/>Wirtschaft und Kultur Leipzig</div></div> |  |
|                                      |            |       |      |                       | Gezeichnet | 27.10.2020 |            |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       | Kontroll   |            |            |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       | Norm       |            |            |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       |            |            |            |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      | HTWK Leipzig          |            |            | LED-Halter |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       |            |            |            |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       |            |            | 1          |                                                                                                |  |
|                                      |            |       |      |                       |            |            | A2         |                                                                                                |  |
| Status                               | Änderungen | Datum | Name |                       |            |            |            |                                                                                                |  |





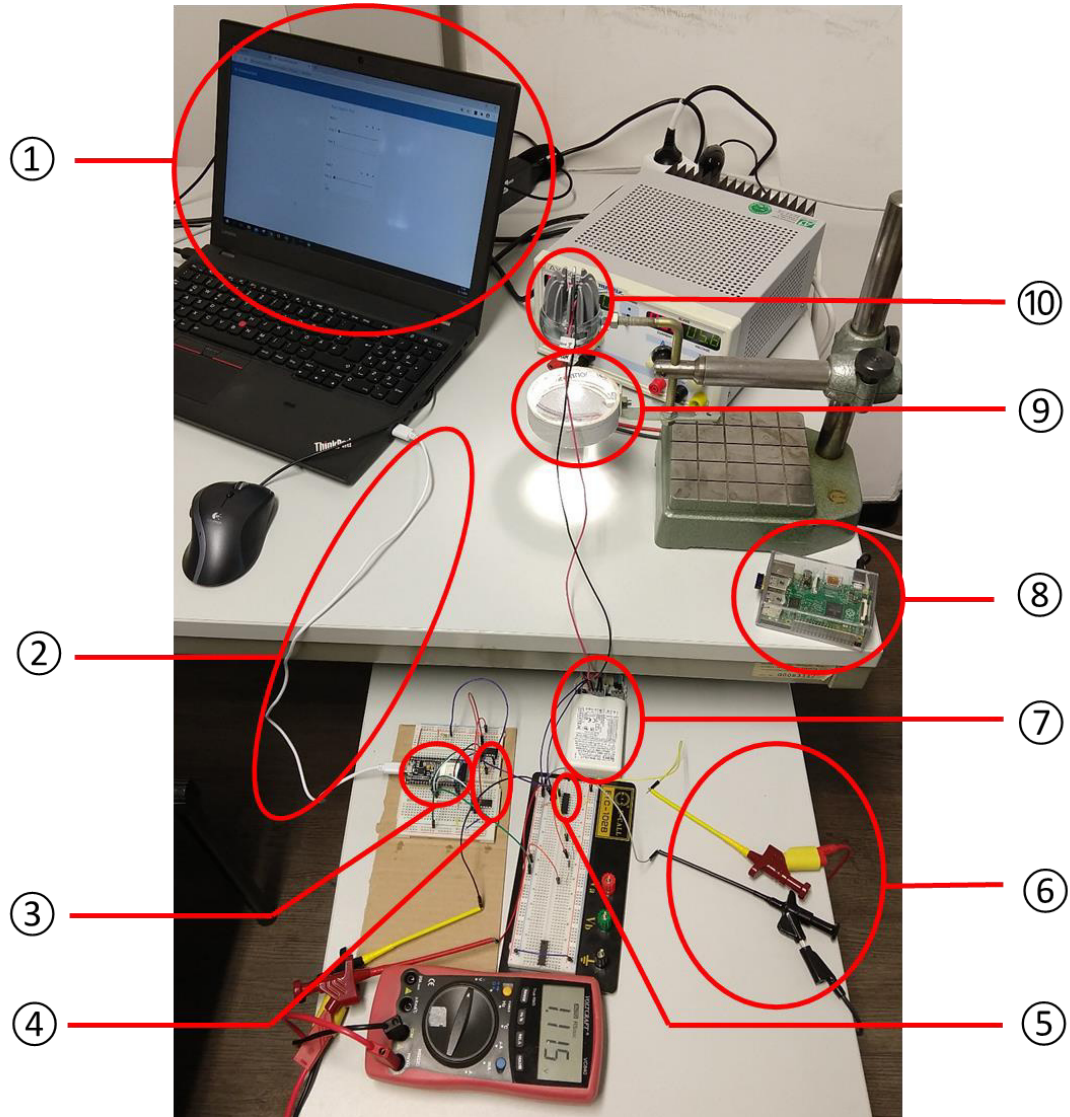
B-B ( 1 : 1 )

|                                      |  |  |  |                       |            |               |  |                        |  |
|--------------------------------------|--|--|--|-----------------------|------------|---------------|--|------------------------|--|
| Allgemeintoleranz<br>DIN ISO 2768-mk |  |  |  | alle Fasen<br>0,5x45° |            | Anzahl: 8     |  | Maßstab: 1:1           |  |
|                                      |  |  |  |                       | Datum      | Name          |  |                        |  |
|                                      |  |  |  | Gezeichnet            | 27.10.2020 | Florian Senft |  |                        |  |
|                                      |  |  |  | Kontroll              |            |               |  |                        |  |
|                                      |  |  |  | Norm                  |            |               |  |                        |  |
|                                      |  |  |  | HTWK Leipzig          |            |               |  |                        |  |
|                                      |  |  |  |                       |            |               |  |                        |  |
|                                      |  |  |  |                       |            |               |  |                        |  |
| Status                               |  |  |  | Änderungen            |            | Datum         |  | Name                   |  |
|                                      |  |  |  |                       |            |               |  | Halterung Linsenhalter |  |
|                                      |  |  |  |                       |            |               |  | 1                      |  |
|                                      |  |  |  |                       |            |               |  | A2                     |  |



|                                      |            |       |      |                       |            |               |                                                                                      |              |
|--------------------------------------|------------|-------|------|-----------------------|------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Allgemeintoleranz<br>DIN ISO 2768-mk |            |       |      | alle Fasen<br>0,5x45° |            |               | Anzahl: 8                                                                            | Maßstab: 1:1 |
|                                      |            |       |      | Gezeichnet            | 28.10.2020 | Florian Senft | <div>HTWK</div> <div>Hochschule für Technik,<br/>Wirtschaft und Kultur Leipzig</div> |              |
|                                      |            |       |      | Kontroll              |            |               |                                                                                      |              |
|                                      |            |       |      | Norm                  |            |               |                                                                                      |              |
|                                      |            |       |      | HTWK Leipzig          |            |               | Linsenhalter                                                                         | 1            |
|                                      |            |       |      |                       |            |               |                                                                                      | A2           |
| Status                               | Änderungen | Datum | Name |                       |            |               |                                                                                      |              |

Anhang 5 – provisorischer Aufbau der Ansteuer-Schaltung für eine LED



- ① Weboberfläche zur Eingabe Potentiometer-Werte
- ② Spannungsversorgung Mikrocontroller + Digital-Potentiometer (5 V)
- ③ Mikrocontroller ESP32
- ④ Digital-Potentiometer Microchip MCP42100-I/P
- ⑤ OPV Texas Instruments LM324
- ⑥ Spannungsversorgung OPV (12 V)
- ⑦ LED-Treiber
- ⑧ Raspberry Pi als WLAN-Router und MQTT-Broker zur Nachrichtenübermittlung
- ⑨ Fokussieroptik
- ⑩ LED-Lampe



**Anhang 6 – Zusammenhang von Potentiometer-Stufe und Steuerspannung  $U_T$**

Potentiometer-Wert  $R_p$ , Potentiometer-Spannung  $U_1$ , Steuerspannung  $U_T$  in Abhängigkeit von der Potentiometer-Stufe  $n$  für einen Verstärkungsfaktor  $v = 4$  und Widerstandswert  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$

| $R_p$     |                           |           |           |
|-----------|---------------------------|-----------|-----------|
| Stufe $n$ | Wert [ $\text{k}\Omega$ ] | $U_1$ [V] | $U_T$ [V] |
| 0         | 100.00                    | 2.50      | 10.00     |
| 255       | 0.00                      | 0.00      | 0.00      |
| 250       | 1.96                      | 0.10      | 0.38      |
| 245       | 3.92                      | 0.19      | 0.75      |
| 240       | 5.88                      | 0.28      | 1.11      |
| 235       | 7.84                      | 0.36      | 1.45      |
| 230       | 9.80                      | 0.45      | 1.79      |
| 225       | 11.76                     | 0.53      | 2.11      |
| 220       | 13.73                     | 0.60      | 2.41      |
| 215       | 15.69                     | 0.68      | 2.71      |
| 210       | 17.65                     | 0.75      | 3.00      |
| 205       | 19.61                     | 0.82      | 3.28      |
| 200       | 21.57                     | 0.89      | 3.55      |
| 195       | 23.53                     | 0.95      | 3.81      |
| 190       | 25.49                     | 1.02      | 4.06      |
| 185       | 27.45                     | 1.08      | 4.31      |
| 180       | 29.41                     | 1.14      | 4.55      |
| 175       | 31.37                     | 1.19      | 4.78      |
| 170       | 33.33                     | 1.25      | 5.00      |
| 165       | 35.29                     | 1.30      | 5.22      |
| 160       | 37.25                     | 1.36      | 5.43      |
| 155       | 39.22                     | 1.41      | 5.63      |
| 150       | 41.18                     | 1.46      | 5.83      |
| 145       | 43.14                     | 1.51      | 6.03      |

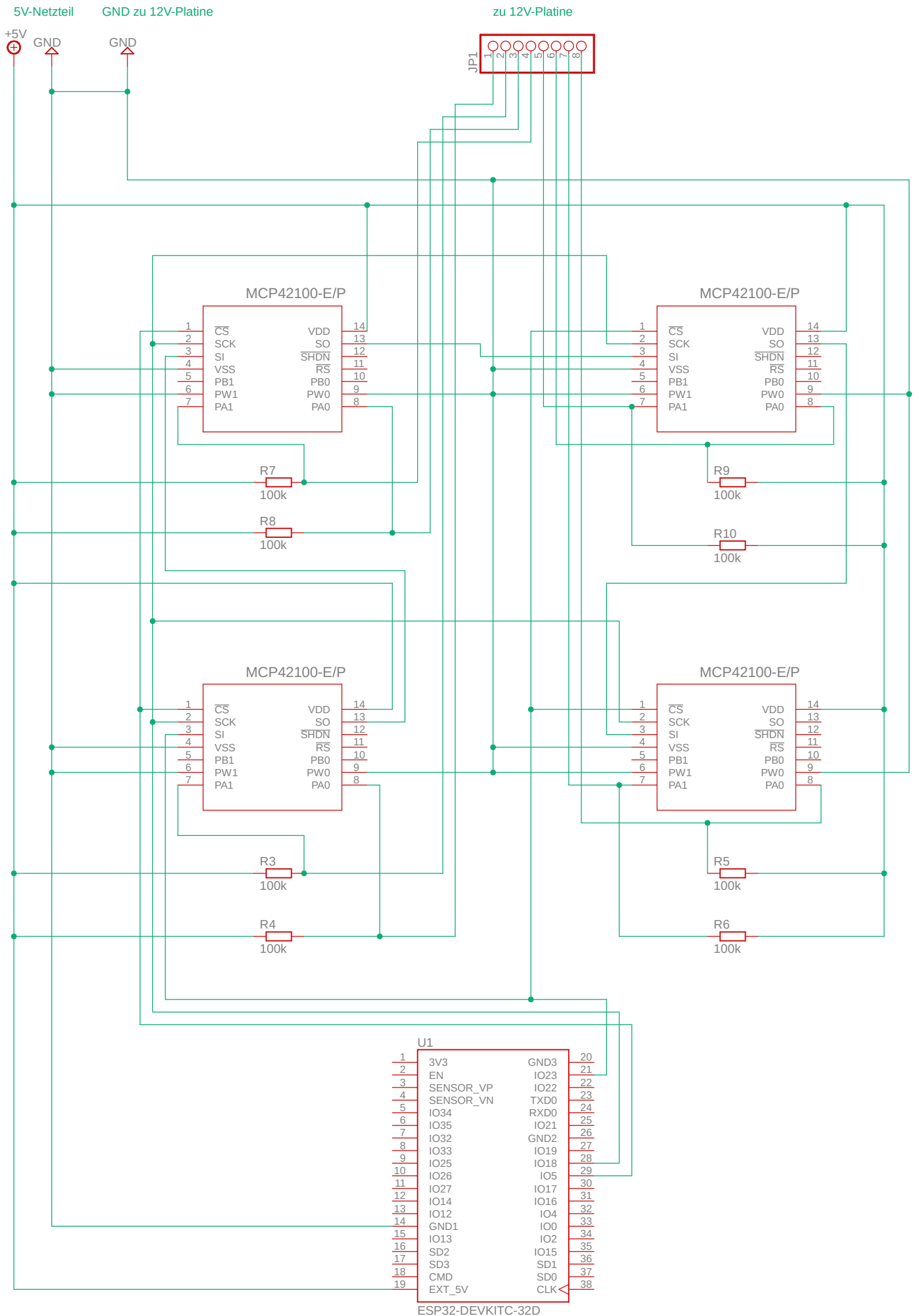
|     |        |      |       |
|-----|--------|------|-------|
| 140 | 45.10  | 1.55 | 6.22  |
| 135 | 47.06  | 1.60 | 6.40  |
| 130 | 49.02  | 1.64 | 6.58  |
| 125 | 50.98  | 1.69 | 6.75  |
| 120 | 52.94  | 1.73 | 6.92  |
| 115 | 54.90  | 1.77 | 7.09  |
| 110 | 56.86  | 1.81 | 7.25  |
| 105 | 58.82  | 1.85 | 7.41  |
| 100 | 60.78  | 1.89 | 7.56  |
| 95  | 62.75  | 1.93 | 7.71  |
| 90  | 64.71  | 1.96 | 7.86  |
| 85  | 66.67  | 2.00 | 8.00  |
| 80  | 68.63  | 2.03 | 8.14  |
| 75  | 70.59  | 2.07 | 8.28  |
| 70  | 72.55  | 2.10 | 8.41  |
| 65  | 74.51  | 2.13 | 8.54  |
| 60  | 76.47  | 2.17 | 8.67  |
| 55  | 78.43  | 2.20 | 8.79  |
| 50  | 80.39  | 2.23 | 8.91  |
| 45  | 82.35  | 2.26 | 9.03  |
| 40  | 84.31  | 2.29 | 9.15  |
| 35  | 86.27  | 2.32 | 9.26  |
| 30  | 88.24  | 2.34 | 9.38  |
| 25  | 90.20  | 2.37 | 9.48  |
| 20  | 92.16  | 2.40 | 9.59  |
| 15  | 94.12  | 2.42 | 9.70  |
| 10  | 96.08  | 2.45 | 9.80  |
| 5   | 98.04  | 2.48 | 9.90  |
| 0   | 100.00 | 2.50 | 10.00 |



**Anhang 7 – Schaltpläne Ansteuer-Schaltung**

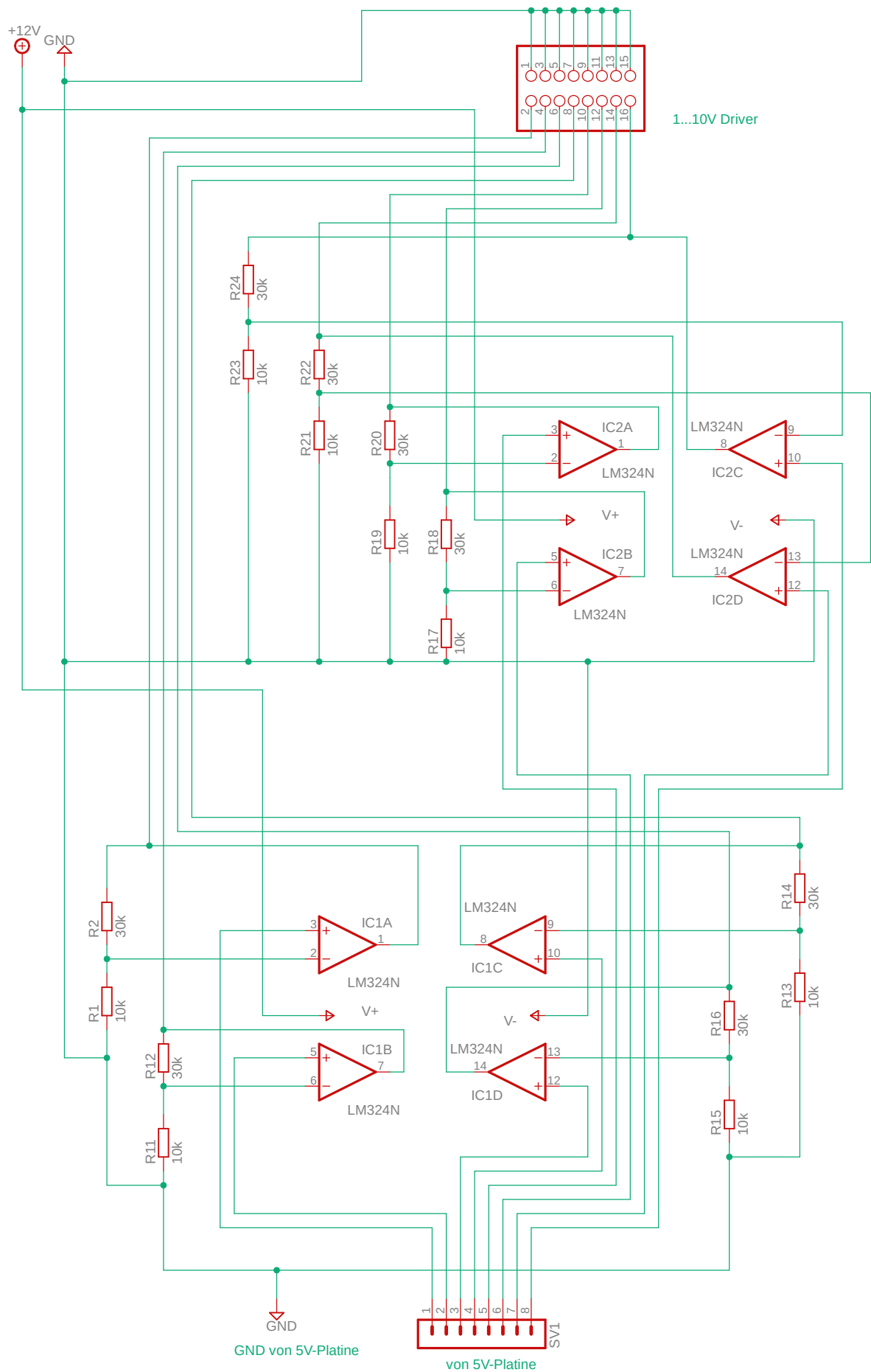
- a) Platine mit Mikrocontroller + Digital-Potentiometer (5 V)
- b) Platine mit OPV-Schaltung (12 V)

# Platine mit Mikrocontroller und Digital-Potentiometer



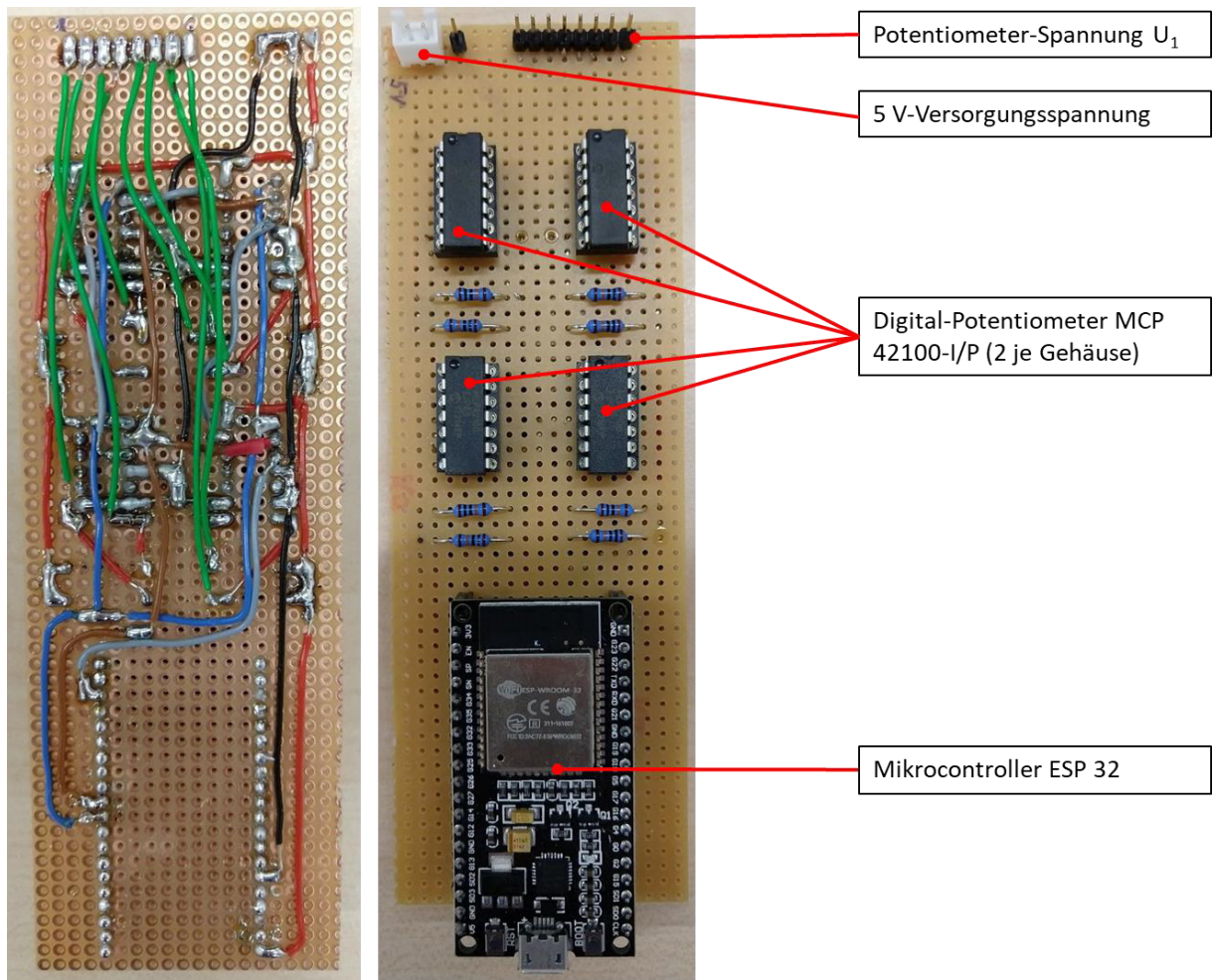


# Platine mit OPV-Schaltung



## Anhang 8 – realisierte Platinen der Ansteuer-Schaltung

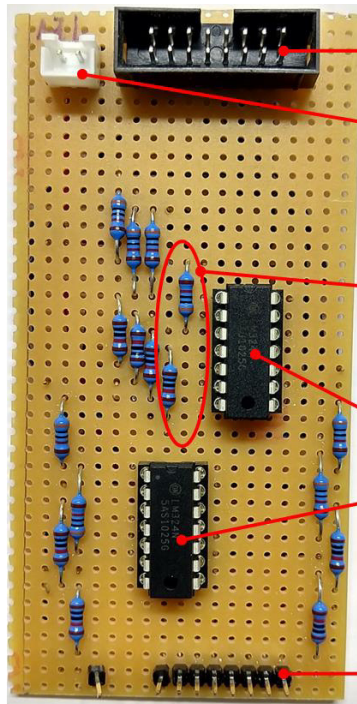
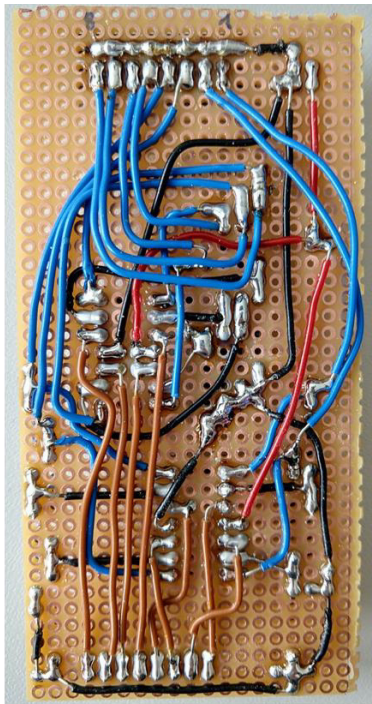
### a) Platine mit Mikrocontroller und Digital-Potentiometer



schwarz: GND  
 rot: 5V  
 blau: CS  
 braun: SCK  
 grau: SI/SO  
 grün: Potentiometer-Spannung  $U_1$

SPI-Bus

b) Platine mit OPV-Schaltung



Steuerspannung  $U_T$

12 V-Versorgungsspannung

Widerstände  $10\text{ k}\Omega$  und  $30\text{ k}\Omega$   
für Beschaltung eines  
Operationsverstärkers mit  
Verstärkungsfaktor  $v = 4$

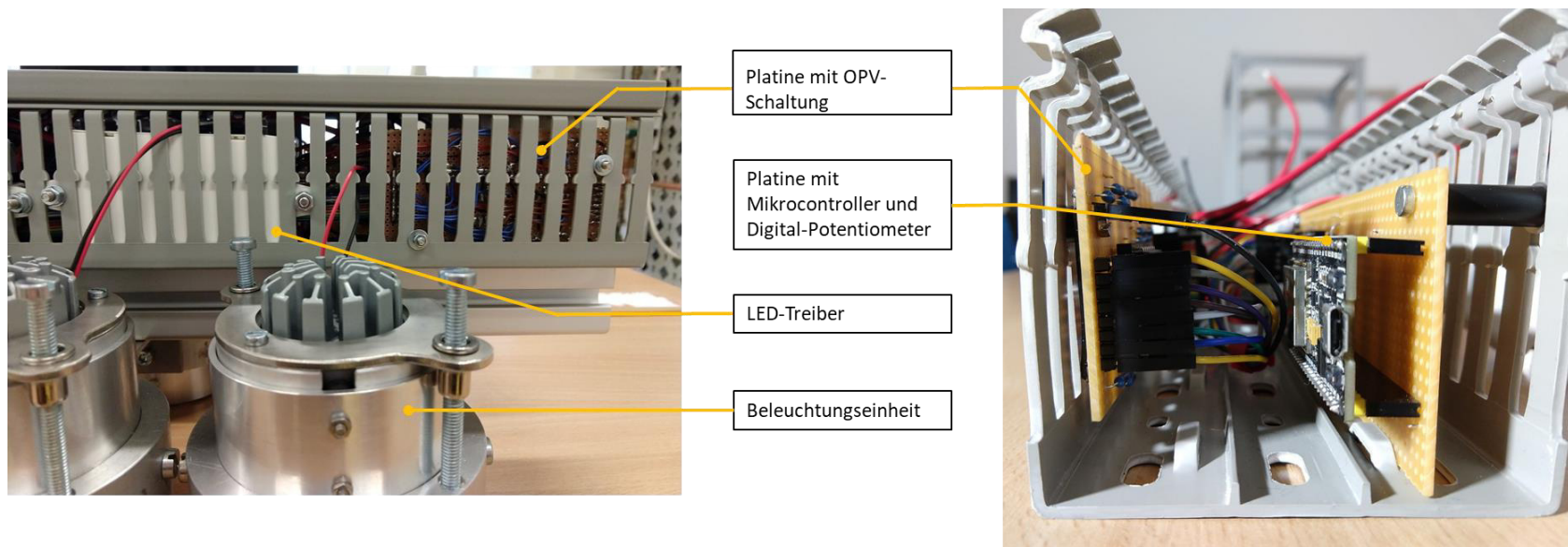
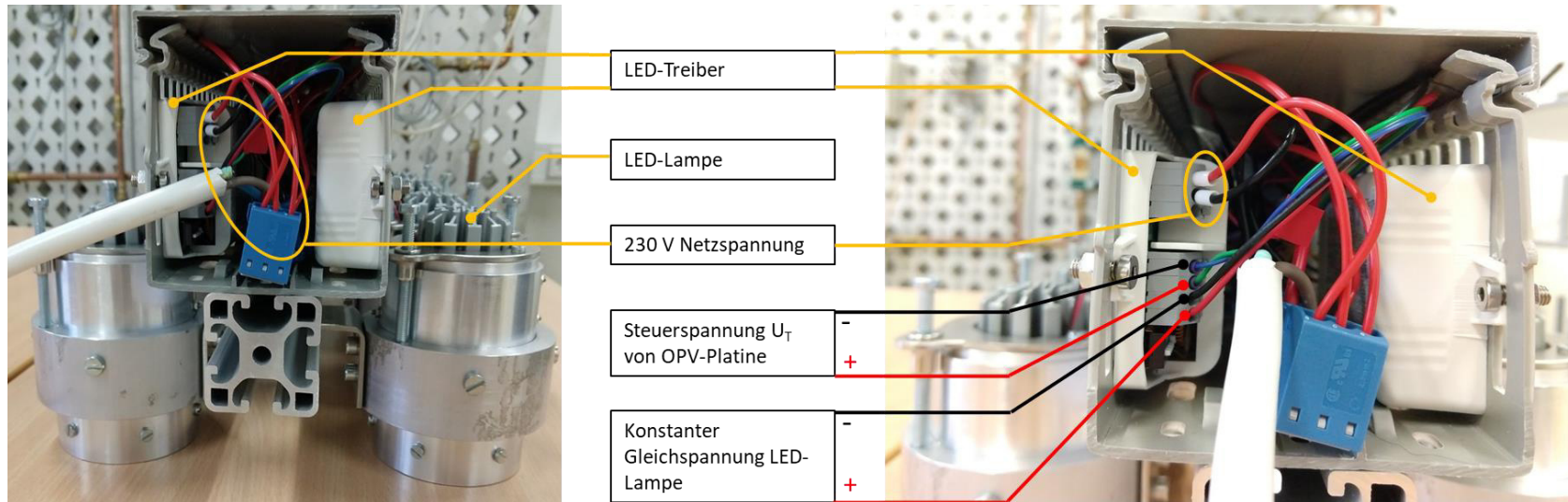
Operationsverstärker  
LM324N (4 je Gehäuse)

Potentiometer-Spannung  $U_1$

schwarz: GND + -Eingang OPV  
rot: 12V  
braun: +Eingang OPV ( $U_1$  vom Poti)  
blau: Steuerspannung  $U_T$



# Anhang 9 – in Verdrahtungskanal montierte elektronische Komponenten



## Anhang 10 – Arduino-Programmcode für Mikrocontroller ESP32 der Ansteuerschaltung

```
/*Bibliotheken einbinden*/

#include <SPI.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

/***** SPI Setup *****/

static const int spiClk = 1000000; // 1 MHz, max. 1 MHz empfohlen für daisy chaining

//uninitialised pointers to SPI objects
SPIClass * vspi = NULL;

/***** Variablen-Setup *****/

//Potentiometer-Adressen eines Poti-
Bausteins: 0x11: Poti 0; 0x12: Poti 1; 0x13: beide Potis
const int adress[3] = {0x11, 0x12, 0x13};

// Start-Werte für Potentiometer
int value[] = {128, 128, 128, 128, 128, 128, 128, 128};

/***** SPI-Write-Funktion *****/
wird durchlaufen, wenn MQTT-Nachricht der abonnierten Topics eintrifft und
sendet Poti-Werte */

void DigitalPotWrite(int value[])
{
    // SPI-Nachricht für Poti 0 der 4 Poti-Bausteine
    vspi->beginTransaction(SPISettings(spiClk, MSBFIRST, SPI_MODE0));

    // set the CS pin to low to select the chip:
    digitalWrite(5, LOW);

    for (int z = 0; z < 8; z = z + 2){
        vspi->transfer(adress[1]);
        vspi->transfer(value[z]);

        Serial.println();
        Serial.print("Write SPI: ");
        Serial.println(value[z]);
    }

    // Set the CS pin high to execute the command:
```

```
digitalWrite(5, HIGH);
vspi->endTransaction();

// SPI-Nachricht für Poti 1 der 4 Poti-Bausteine

vspi->beginTransaction(SPISettings(spiClk, MSBFIRST, SPI_MODE0));

// set the CS pin to low to select the chip:
digitalWrite(5, LOW);

for (int z1 = 1; z1 < 8; z1 = z1 + 2){
    vspi->transfer(adress[0]);
    vspi->transfer(value[z1]);

    Serial.println();
    Serial.print("Write SPI: ");
    Serial.println(value[z1]);
}

// Set the CS pin high to execute the command:
digitalWrite(5, HIGH);
vspi->endTransaction();
}

/***** WLAN + MQTT *****/

// Zugang WLAN
const char* ssid = "MQTT-Pi";
const char* password = "redraspberry";

// IP-Adresse MQTT-Server --> Pi
const char* mqtt_server = "10.10.0.1";

// zur Erstellung MQTT-Client
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// Last Will and Testament des MQTT-Clients
char lwt[50] = "connection timed out";

long lastMsg = 0;
char msg[50];

void setup_wifi() {

    delay(10);
    // We start by connecting to a WiFi network
    Serial.println();
```

```
Serial.print("Connecting to ");
Serial.println(ssid);

WiFi.begin(ssid, password);

//Verbindungsaufbau wird alle 500ms versucht, bis Verbindung erfolgreich
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.println(WiFi.status());
}

// initialisiert (Zufalls-)Nummerngenerator
//--> erstellt in Funktion reconnect Teil der MQTT-Client-Id
randomSeed(micros());

Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

// callback, wenn Nachricht aus subscribten Topic empfangen wird
void callback(const char* topic, byte* payload, unsigned int length) {

    Serial.print("topic: ");
    Serial.println(topic);
    Serial.print("Received message: ");

    char payload_string[length + 1];

    /*erstellt aus Payload der MQTT-Nachricht einen String*/
    memcpy(payload_string, payload, length);
    payload_string[length] = '\0';

    Serial.print(payload_string);
    Serial.println();

    // zerlegt String an den Kommas
    char* ptr = NULL; //NULL-Pointer

    //Initialisieren u. erster Teilstring
    value[0] = atoi(strtok(payload_string, ","));

    Serial.println(value[0]);

    for (int i = 1; i < 8; i++){
        value[i] = atoi(strtok(NULL, ",")); //Zweiter Teilstring
    }
```

```
// damit nur Werte zwischen 0 und 255
for (int j = 0; j < 8; j++){

    if (value[j] < 0){
        value[j] = 0;
    }
    else if (value[j] > 255) {
        value[j] = 255;
    }
    else {
        Serial.println(value[j]);
    }
}

DigitalPotWrite(value);

Serial.println();

}

void reconnect() {
    // Loop until we're reconnected
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("Attempting MQTT connection...");
        // Create a random client ID
        String clientId = "ESP8266Client-";
        clientId += String(random(0xffff), HEX);
        // Attempt to connect
        if (client.connect(clientId.c_str())) {
            Serial.println("connected");
            // Once connected, publish an announcement...
            client.publish("test_out", "huhu");
            // abonniert MQTT-Topics
            client.subscribe("Verschattung");
            client.subscribe("Szenario");
        } else {
            Serial.print("failed, rc=");
            Serial.print(client.state());
            Serial.println(" try again in 5 seconds");
            // Wait 5 seconds before retrying
            delay(5000);
        }
    }
}

/* wird zu Beginn des Skripts einmal durchlaufen */
void setup() {

    /***** SPI *****/
}
```



```
//initialise instance of the SPIClass attached to VSPI
vspi = new SPIClass(VSPI);

//initialise vspi with default pins
//SCLK = 18, MISO = 19, MOSI = 23, SS = 5
vspi->begin();

//set up slave select pins as outputs as the Arduino API
pinMode(5, OUTPUT); //VSPI SS

// setzt Poti-Werte
DigitalPotWrite(value);

/***** MQTT *****/
Serial.begin(115200);
setup_wifi();
client.setServer(mqtt_server, 1883);
client.setCallback(callback);
}

/* wird während der gesamten Skriptlaufzeit durchlaufen*/
void loop() {

    /***** WLAN + MQTT *****/

    // erste if-Schleife --> nur alle 2s wird Verbindung zu WLAN und MQTT-
    // Broker geprüft
    long now = millis();
    if (now - lastMsg > 2000) {
        lastMsg = now;

        // wenn WLAN-Verbindung unterbrochen --> Aufruf Funktion setup_wifi --
        // Neuaufbau der Verbindung
        if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
            setup_wifi();
        }

        // wenn Verbindung zu MQTT-Broker unterbrochen --> Aufruf Funktion reconnect -
        // Neuaufbau der Verbindung
        if (!client.connected()) {
            reconnect();
        }
        client.loop();
    }
}
```

## Anhang 11 – Programmcode der frei mit JavaScript programmierbaren Node-Red-Funktionsbausteine

- a) Funktionsbaustein „Poti-Stufe berechnen“ im Programmfluss zur Verschattung einzelner LED-Lampen

```
var math=global.get('mathjs');

var u = [];
var p = [];

var v = [flow.get("led1"), flow.get("led2"), flow.get("led3"), flow.get("led4"),
flow.get("led5"), flow.get("led6"), flow.get("led7"), flow.get("led8")];

for(var i = 0; i < v.length; i++){

    u[i] = 0.92 + ((100-v[i])*(8.63/100));
    p[i] = (510*(u[i]-10))/(u[i]-20);
    p[i] = math.round(p[i]);

}

msg.publish = p;

return msg;
```

- b) Funktionsbaustein „Create String“ im Programmfluss zur Verschattung einzelner LED-Lampen

```
var m = msg.publish;

var mqtt = m.join();

msg.payload = mqtt;

return msg;
```

- c) Funktionsbaustein „Auswahl Monat“ im Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung

```
var math=global.get('mathjs');

var tag = flow.get("tag");
var sky = flow.get("sky");
var msg0;
var msg1;
var msg2;
var msg3;
```

```
switch (tag) {
  case 0:
    msg0 = {payload : sky};
    break;
  case 1:
    msg1 = {payload : sky};
    break;
  case 2:
    msg2 = {payload : sky};
    break;
  case 3:
    msg3 = {payload : sky};
    break;
}

return [msg0, msg1, msg2, msg3];
```

- d) Funktionsbaustein „Berechnung Poti-Werte klar + mittel“ im Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung

```
// Einbinden math.js-Bibliothek
var math=global.get('mathjs');

var sonne_raw = [];
var sonne = [];
var azimut = [];
var azimut_raw = [];
var strahlung = [];
var direkt = [];
var diffus = [];
var alpha = [];
var winkel = [];
var direkt_winkel = [];
var gesamt = [];
var norm = [];
var u = [];
var poti = [];

//neigung und ausrichtung: Eingabe im Dashboard, flow-weite Variablen
var neigung_raw = flow.get("winkel");
var neigung = math.unit(neigung_raw, 'deg');

var ausrichtung_raw = flow.get("richtung");
ausrichtung_raw = ausrichtung_raw - 180;
var ausrichtung = math.unit(ausrichtung_raw, 'deg');

for(var i = 0; i < 24; i++){
```

```
//Sonnenhoehe, Azimutwinkel, horizontale globale, diffuse und direkte Strahlung aus csv-Dateien für jede volle Std. W0Z
sonne_raw[i] = msg.payload[i+1].col2;
sonne[i] = math.unit(msg.payload[i+1].col2, 'deg');
azimut_raw[i] = msg.payload[i+1].col3 + 180;
azimut[i] = math.unit(azimut_raw[i], 'deg');
strahlung[i] = msg.payload[i+1].col4;
diffus[i] = msg.payload[i+1].col5;
direkt[i] = msg.payload[i+1].col6;

// Zwischenrechnung für winkel[i]
alpha[i] = azimut_raw[i] - ausrichtung_raw;
alpha[i] = math.unit(alpha[i], 'deg');

// Einfallswinkel der Sonnenstrahlung bei geneigter und von S-
Ausrichtung abweichender Ebene
winkel[i] = math.acos((((-
math.cos(sonne[i]))*math.sin(neigung)*math.cos(alpha[i]))+(math.sin(sonne[
i])*math.cos(neigung))));
winkel[i] = math.unit(winkel[i], 'rad');

// Berechnung direkte Strahlung auf geneigte Ebene
direkt_winkel[i] = direkt[i]*math.cos(winkel[i])/math.sin(sonne[i]);

// Berechnung gesamte Strahlung auf geneigte Ebene aus direktem, diffusem
und reflektiertem Anteil
gesamt[i] = direkt_winkel[i] + (diffus[i]*0.5*(1+math.cos(neigung))) + (strahlung[i]*0.5*(1-math.cos(neigung))*0.2);

// vor Sonnenaufgang keine Bestrahlungsstärke
if(sonne_raw[i] === 0){
    gesamt[i] = 0;
}

//normiert auf maximal auftretenden Strahlungswert von 982 W/m2 (Juni, 12
W0Z, optimaler Neigungswinkel, 180 Grad Süd)
norm[i] = (gesamt[i]/982.78)*100;

//Umrechnung normierte Strahlung zu Steuerspannung: unter 9,55 V Verringerung
Helligkeit, unter 0,92 V LED aus
u[i] = 0.92 + ((norm[i])*(8.63/100));

// Umrechnung Steuerspannung u in Poti-
Wert x, Zusammenhang nicht linear:  $u(x) = 4*((255/n-1)+1)*5$ 
poti[i] = (510*(u[i]-10))/(u[i]-20);
poti[i] = math.round(poti[i]);

}
```

```
msg.payload = poti;
```

```
return msg;
```

- e) Funktionsbaustein „Berechnung Poti-Werte bedeckt“ im Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung

```
// Einbinden math.js-Bibliothek
```

```
var math=global.get('mathjs');
```

```
var sonne = [];
```

```
var strahlung = [];
```

```
var g_winkel = [];
```

```
var norm = [];
```

```
var u = [];
```

```
var poti = [];
```

```
//neigung: Eingabe im Dashboard, flow-weite Variable
```

```
var neigung_raw = flow.get("winkel");
```

```
var neigung = math.unit(neigung_raw, 'deg');
```

```
var pi = Math.PI;
```

```
for(var i = 0; i < 24; i++){
```

```
    //Sonnenhoehe und horizontale Globalstrahlung aus csv-  
    Dateien für jede volle Std. WOZ
```

```
    sonne[i] = msg.payload[i+1].col2;
```

```
    strahlung[i] = msg.payload[i+1].col3;
```

```
    // Berechnung gesamte Bestrahlungsstärke auf geneigte Ebene, isotroper Ansatz bei bedecktem Himmel --> kein Einfluss der Ausrichtung
```

```
    g_winkel[i] = strahlung[i]*(0.182*(1.178*(1+math.cos(neigung)))+(pi-neigung_raw*(pi/180))*math.cos(neigung))+math.sin(neigung))+0.5*0.2*(1-math.cos(neigung)));
```

```
    //normiert auf maximal auftretenden Strahlungswert von 982 W/m2 (Juni, 12 WOZ, optimaler Neigungswinkel, 180 Grad Süd)
```

```
    norm[i] = (g_winkel[i]/982.78)*100;
```

```
    //Umrechnung normierte Strahlung zu Steuerspannung: unter 9,55 V Verringerung Helligkeit, unter 0,97 V LED aus
```

```
    u[i] = 0.97 + ((norm[i])*(8.56/100));
```

```
    // Umrechnung Steuerspannung u in Poti-Wert x, Zusammenhang nicht linear:  $u(x) = 4*((255/n-1)+1)*5$ 
```

```
    poti[i] = (510*(u[i]-10))/(u[i]-20);
```

```
    poti[i] = math.round(poti[i]);
```

```
}  
  
msg.payload = poti;  
  
return msg;
```

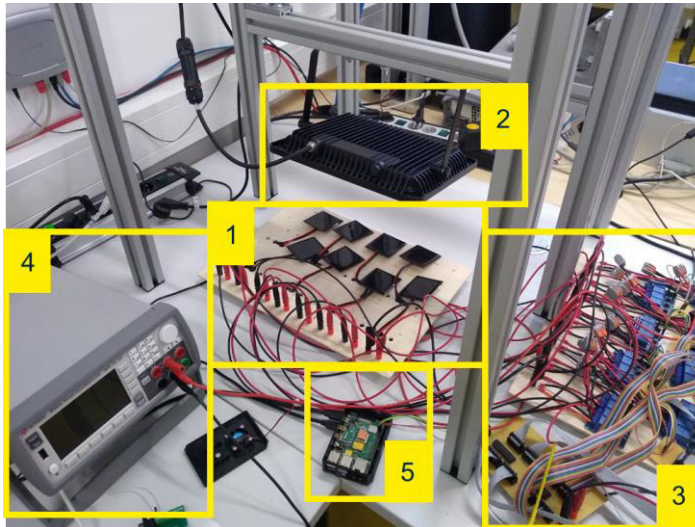
f) Funktionsbaustein „Create String“ im Programmfluss zur szenarienbasierten Nachbildung

```
var m = msg.payload;  
  
var string = [];  
  
for(var i = 0; i < 8; i++){  
    string[i] = m;  
}  
  
var mqtt = string.join();  
  
msg.payload = mqtt;  
  
return msg;
```

**Anhang 12 – CSV-Datensatz für einen 21. Juni mit klarem Himmel (Darstellung mit Excel)**

|    | A   | B           | C             | D             | E             | F             |
|----|-----|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1  | WOZ | Sonnenhoehe | Azimut yS [°] | Global [W/m2] | Diffus [W/m2] | Direkt [W/m2] |
| 2  | 0   | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 3  | 1   | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 4  | 2   | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 5  | 3   | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 6  | 4   | 1.24892777  | -127.298004   | 0.18          | 0.18          | 0.00          |
| 7  | 5   | 9.22307425  | -116.016694   | 93.82         | 63.75         | 30.07         |
| 8  | 6   | 17.9922764  | -105.081358   | 250.04        | 104.77        | 145.27        |
| 9  | 7   | 27.2258308  | -93.9963004   | 414.87        | 133.07        | 281.81        |
| 10 | 8   | 36.5826254  | -82.0628389   | 570.93        | 159.76        | 411.16        |
| 11 | 9   | 45.6349267  | -68.2312029   | 705.8         | 185.89        | 519.91        |
| 12 | 10  | 53.7212483  | -50.8957291   | 809.62        | 208.67        | 600.95        |
| 13 | 11  | 59.7129001  | -28.1176318   | 874.98        | 224.35        | 650.63        |
| 14 | 12  | 62.0154322  | 0             | 897.29        | 229.95        | 667.34        |
| 15 | 13  | 59.7129001  | 28.1176318    | 874.98        | 224.35        | 650.63        |
| 16 | 14  | 53.7212483  | 50.8957291    | 809.62        | 208.67        | 600.95        |
| 17 | 15  | 45.6349267  | 68.2312029    | 705.8         | 185.89        | 519.91        |
| 18 | 16  | 36.5826254  | 82.0628389    | 570.93        | 159.76        | 411.16        |
| 19 | 17  | 27.2258308  | 93.9963004    | 414.87        | 133.07        | 281.81        |
| 20 | 18  | 17.9922764  | 105.081358    | 250.04        | 104.77        | 145.27        |
| 21 | 19  | 9.22307425  | 116.016694    | 93.82         | 63.75         | 30.07         |
| 22 | 20  | 1.24892777  | 127.298004    | 0.18          | 0.18          | 0.00          |
| 23 | 21  | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 24 | 22  | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 25 | 23  | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             |

### Anhang 13 – zuvor bestehender Versuchsstand zur variablen Modulverschaltung [16]



1. PV-Module 8x verteilt auf zwei Strings
2. LED Strahler zur Bestrahlung
3. Relaisbänke zur variablen Verschaltung der PV-Module
4. Source Measurement Unit zur Leistungs-(MPP) und Isc-Messung
5. Raspberry Pi zur Ansteuerung
6. Labornetzteil Externe Stromversorgung (nicht im Bild)

### Anhang 14 – Kennlinie vermessenes Solarmodul bei verschiedenen Verschattungsgraden der benachbarten Solarmodule

