

## MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

**„Entwicklung eines Steueralgorithmus für  
die Klimatisierung  
eines energieautarken Kühlhauses“**

verfasst von

Nassima Hfassa

Merseburg, 13.08.2021

Immatrikulationsnummer: 25106

Betreut von: Prof. Dr. Andreas Ortwein und Prof. Dr. Ingo Chmielewski

**Aufgabenstellung**  
**für die Masterarbeit (M. Eng.)**  
**von Frau Nassima Hfassa**  
**(Matrikel 25106)**

**Thema:**           **Entwicklung eines Steueralgorithmus für die Klimatisierung eines energieautarken Kühlhauses**

**Betreuer:**       Prof. Dr.-Ing. Andreas Ortwein  
                  Prof. Dr.-Ing. Ingo Chmielewski (Hochschule Anhalt)

**Aufgabenstellung**

Ziel des Projektes SilaaCooling ist die Entwicklung eines Kühlhausprototyps zur Langzeitlagerung von ungerösteten Kaffeebohnen im südasiatischen Raum (Thailand). Den lokalen Bauern soll die Möglichkeit geschaffen werden, besser auf Preisfluktuationen des Marktes reagieren zu können und somit höhere Gewinne einzufahren. Um die Kaffeebohnen vor Pilz- oder Schimmelbildung zu schützen, muss das System ein konstantes Innenklima in zuvor festgelegten Bereichen für Temperatur- und Luftfeuchtigkeit sicherstellen. Hauptbestandteil der autarken Energieversorgung ist eine Photovoltaikanlage bestehend aus Solarpaneele, Laderegler und Wechselrichter. Zusätzlich dienen Blei-Säure Batterien zur Speicherung überschüssiger Sonnenenergie. Somit wird eine elektrische Versorgung der Komponenten zu jeder Tageszeit und Witterungssituation sichergestellt. Verschiedenste Sensorik dient dem System zur Bereitstellung notwendiger Informationen über Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Ladezustand der Batterien sowie CO<sub>2</sub>-Gehalt. Der Aufbau der Technik erfolgt zunächst an der Hochschule Anhalt in Köthen. Ein zweites Abbild (inklusive Kühlzelle) des Systems wird vor Ort in Thailand realisiert. Der finale Prototyp wird dann unter realen Witterungsbedingungen getestet und analysiert.

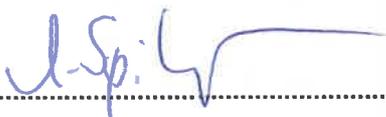
Ein wichtiger Kernpunkt dieses Projektes ist die Entwicklung hocheffizienter Algorithmen zur Steuerung der verwendeten Komponenten. Das Gesamtsystem soll in Abhängigkeit von Innen- und Außenklima sowie unter Berücksichtigung des aktuellen Ladezustandes der Batterien, so energieeffizient wie möglich arbeiten. Eine zusätzliche Berücksichtigung und Implementierung von Daten aus Wettervorhersagen ist denkbar.

Im Zuge dieser Masterarbeit soll die Studentin den aktuellen schwellwertbasierten Steuerungsalgorithmus mit drei weiteren Möglichkeiten der Regelung vergleichen. Dabei spielt neben der Geschwindigkeit der zu erreichenden Arbeitspunkte auch die Genauigkeit der Algorithmen eine wesentliche Rolle. Final soll ein optimierter Ansatz in der Testanlage in Köthen umgesetzt und mögliche Anpassungen vorgenommen werden.

## Schwerpunkte der Arbeit

1. Ausführliche Literaturrecherche zu verschiedenen Möglichkeiten der Steuerung des Klimasystems (Schwellwert, Regler)
2. Einarbeitung und Analyse Testaufbau an der Hochschule Anhalt (Komponenten, Vernetzung, Kommunikation, etc.)
3. Analyse Programmcode (Python Programme) des aktuellen schwellwertbasierten Steueralgorithmus und Erarbeitung möglicher Verbesserungen
4. Entwurf einer eigenen Programmstruktur (Programmablaufplan) unter Berücksichtigung aller Eingangs- und Ausgangsgrößen (Berücksichtigung der Wetterdaten oder Wettervorhersagen)
5. Erstellung einer Simulation zur Nachbildung der verschiedenen Algorithmen
6. Durchführung von Tests zur Untersuchung von Geschwindigkeit und Genauigkeit
7. Berücksichtigung verschiedener Systemzustände (Ladezustand Batterien) und unterschiedliche Wetterbedingungen (Wolken, Regen, Sonneneinstrahlung)
8. Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse verschiedener Algorithmen (Genauigkeit, Geschwindigkeit, Vor- und Nachteile, etc.) im Vergleich zu schwellwertbasierten Steuerungen
9. Finale Umsetzung eines optimierten Ansatzes in der Testanlage an der Hochschule Anhalt in Köthen und Durchführung möglicher Anpassungen am bisherigen System
10. Der Programmcode soll unter Verwendung der Programmiersprache Python auf einem Raspberry Pi umgesetzt werden.

abzugebende Exemplare: 2 + PDF-Datei



Prof. Dr. Andreas Spillner  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses



Prof. Dr.-Ing. Andreas Ortwein  
Themenstellender Hochschullehrer

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „**Entwicklung eines Steueralgorithmus für die Klimatisierung eines energieautarken Kühlhauses**“ selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

# I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	I
II.	Abbildungsverzeichnis.....	III
III.	Tabellenverzeichnis .....	V
IV.	Abkürzungsverzeichnis.....	VI
V.	Formelzeichenverzeichnis.....	VIII
1.	Einleitung und Aufgabenstellung .....	1
2.	Hintergrund und Theorie.....	3
2.1.	Lagerung von Kaffeebohnen .....	3
2.2.	Beschreibung der untersuchten Thermodynamik .....	4
2.3.	Beschreibung der untersuchten Raumluftechnik.....	5
2.4.	Beschreibung des untersuchten gerätetechnischen Aufbaus .....	6
2.4.1.	Klimasplitgerät .....	6
2.4.2.	Entfeuchter .....	7
2.4.3.	Kreuzgegenstromwärmetauscher .....	7
2.4.4.	Lüfter.....	8
2.5.	Beschreibung des untersuchten Inselnetzes.....	8
2.5.1.	Photovoltaik .....	9
2.5.2.	Batterien .....	11
2.5.3.	Laderegler.....	11
2.5.4.	Wechselrichter.....	12
2.6.	Im Projekt erforderliche Regelungstechnik.....	12
3.	Methodik .....	18
3.1.	Versuchsaufbau .....	18
3.2.	Bestehende Software und Programmablaufpläne.....	24
3.3.	Modell.....	28
3.4.	Algorithmen.....	37

3.4.1.	Verbesserter Schwellwertalgorithmus.....	37
3.4.2.	Sonneneinstrahlungsalgorithmus .....	41
3.4.3.	Regleralgorithmus .....	44
3.4.4.	Kombination aus Sonneneinstrahlungsalgorithmus und Regleralgorithmus .....	48
3.5.	Tests.....	49
3.6.	Vergleich .....	54
4.	Auswertung .....	64
5.	Zusammenfassung und Ausblick .....	65
VI.	Literaturverzeichnis .....	XIII

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SilaaCooling-System-Konzept [2] .....	2
Abbildung 2: Wärmeleitung in einer ebenen Wand [11] .....	5
Abbildung 3: Klimageräte SilaaCooling (Eigene Zeichnung angelehnt an [12]) .....	6
Abbildung 4: Schema des Kaltdampfkompressionsprozesses [13].....	6
Abbildung 5: Kreuzgegenstromwärmetauscher [15] .....	8
Abbildung 6: Aufbau eines Inselnetzes (Eigene Zeichnung angelehnt an [18]).....	9
Abbildung 7: Aufbau einer Solarzelle [18] .....	10
Abbildung 8: Verhältnis von Globalstrahlung, direkter Strahlung und diffuser Strahlung [20] .....	10
Abbildung 9: 4-stufige Ladekennlinie [23].....	11
Abbildung 10: Grundprinzip Wechselrichter [24] .....	12
Abbildung 11: Regelkreis [25].....	13
Abbildung 12: Sprungantwort eines P-Gliedes [27] .....	14
Abbildung 13: Sprungantwort eines I-Gliedes [28] .....	14
Abbildung 14: Aufnehmen einer Wendetangente [30] .....	15
Abbildung 15: Kennlinie eines Zweipunktreglers ohne und mit Hysterese [32].....	17
Abbildung 16: typischer Verlauf Zweipunktregelung mit Hysterese [32].....	17
Abbildung 17: Schema Kaffeekühlhaus (Eigene Zeichnung).....	19
Abbildung 18: Photovoltaik-Module TZK [36].....	19
Abbildung 19: Laderegler und Wechselrichter TZK [36].....	20
Abbildung 20: Batteriestränge TZK [36].....	20
Abbildung 21: Zusammenhang Entladung und Lebensdauer [37].....	21
Abbildung 22: KSG innen und außen TZK [36].....	21
Abbildung 23: Entfeuchter TZK [36].....	22
Abbildung 24: Kreuzgegenstromwärmetauscher TZK [36].....	22
Abbildung 25: Lüfter Helios AV 100 [38].....	22
Abbildung 26: Batterie-Steuer-Gerät und Batterie-Spannungs-Messgerät [39] .....	23
Abbildung 27: Steuer-Gerät und Steuergeräteerweiterung [40] .....	23
Abbildung 28: SilaaCooling Architektur [41].....	24
Abbildung 29: maincontrol .....	25
Abbildung 30: Steuerung .....	26
Abbildung 31: Programmablaufplan Klimatisierung Schwellwertalgorithmus [42] .....	26

Abbildung 32: Programmablaufplan Energiesystem [43].....	27
Abbildung 33: Skizze Modell (Eigene Zeichnung).....	29
Abbildung 34: Kennlinienfeld Entfeuchter [45] .....	34
Abbildung 35: Verbesserter Schwellwertalgorithmus .....	40
Abbildung 36: Batteriemangement allgemein Sonneneinstrahlungsalgorithmus .....	42
Abbildung 37: Batteriemangement Batteriesatz1 für den Sonneneinstrahlungsalgorithmus.	43
Abbildung 38: Batteriemangement Batteriesatz2 für den Sonneneinstrahlungsalgorithmus.	44
Abbildung 39: Temperaturregelkreis und Feuchtigkeitsregelkreis (Eigene Zeichnung) .....	45
Abbildung 40: Batteriemangement für Batterie1 für den Regleralgorithmus .....	46
Abbildung 41: Batteriemangement für Batterie2 für den Regleralgorithmus .....	46
Abbildung 42: Klimatisierung für den Regleralgorithmus .....	48
Abbildung 43: Batteriemangement für Batterie1 für den Kombinationsalgorithmus .....	51
Abbildung 44: Testoberfläche (Screenshot axxeo GnbH) .....	52
Abbildung 45: erzeugte Energie PV-Module .....	55
Abbildung 46: Außentemperatur.....	55
Abbildung 47: Vergleich Algorithmen Lagerraumtemperatur einzeln .....	56
Abbildung 48: Vergleich Algorithmen Lagerraumtemperatur zusammen .....	57
Abbildung 49: Vergleich Algorithmen relative Feuchtigkeit einzeln .....	58
Abbildung 50: Vergleich Algorithmen relative Feuchtigkeit zusammen .....	59
Abbildung 51: Vergleich Algorithmen SOC einzeln .....	60
Abbildung 52: Vergleich Algorithmen SOC zusammen.....	61
Abbildung 53: Beispielhafte Kennlinie (Eigene Zeichnung).....	65

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lagerbedingungen Kaffeebohnen [5].....	3
Tabelle 2: Wahl der Reglerstruktur [31] .....	15
Tabelle 3: Einstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick [31] .....	16
Tabelle 4: Kühlleistung KSG in Abhängigkeit von Außentemperatur und Innentemperatur [46] .....	33
Tabelle 5: Kennlinienfeld Entfeuchter [47].....	34
Tabelle 6: Dichte von Wasser [48].....	35
Tabelle 7: Elektrische Leistung der Verbraucher (Eigene Tabelle).....	36
Tabelle 8: Logiktable (Eigene Tabelle).....	38
Tabelle 9: Obere und untere Grenzwerte (Eigene Tabelle).....	39
Tabelle 10: Vergleich (Eigene Tabelle) .....	62

## IV. Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom
ADLSR	Sonneneinstrahlungssensor
AM2315	Temperatur- und Feuchtigkeitssensor
API	Programmierschnittstelle
ASYG12LMCE	Eigename Klimasplitgerät
AV 100	Eigename Lüfter
axx	axxeo GmbH
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSG	Batteriesteuergerät
BSM	Batteriesteuermessmodul
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
D	Differentiell
DC	Gleichstrom
DH 25 S	Eigename Entfeuchter
D.O.D	Depth of discharge
DS18B20	Temperatursensor
efa	efa Leipzig GmbH
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HSA	Hochschule Anhalt
I	Integral
IBC MonoSol 195 CS	Eigename PV-Modul
IP	Internet Protocol
K	Kondensator
KIE	Koralewski Industrieelektronik oHG
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KSG	Klimasplitgerät
KWL EC 170 W	Eigename Kreuzgegenstromwärmetauscher
MySQL	Datenbankverwaltungssystem
n	negativ
oHG	Offene Handelsgesellschaft
OTA	Ochratoxin A

P	Proportional
p	positiv
PN	Positiv-negativ
PT1	Verzögerungsglied erster Ordnung
PT2	Verzögerungsglied zweiter Ordnung
$PT_n$	Verzögerungsglied n-ter Ordnung
PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
py	Pythondateiendung
SiRS485	Strahlungssensor mit RS 485 Schnittstelle
SoC	System on a Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
STG-48_G	Steuergerät
STG-48_EW/1	Steuergerät Erweiterungsmodul 1
STG-48_EW/2	Steuergerät Erweiterungsmodul 2
TC	Temperaturregler
tun_tzk	Verbindung Server mit Raspberry Pi
txt	Textdateiendung
TZK	Technologiezentrum Köthen
V	Wärmeübertrager
VRLA-GEL	Valve Regulated Lead-Acid-Gel
VT-65	Eigenname Laderegler
WLAN	Wireless Local Area Network
XCOM	Kommunikationsprotokoll
XTM 2600-48	Eigenname Wechselrichter
XWT	Kreuzgegenstromwärmetauscher

## V. Formelzeichenverzeichnis

$A$	Querschnittsfläche Wand
$A_A$	Fläche der Wand
$A_D$	Fläche des Dachs
$A_{PV}$	Fläche eines Solarmoduls
$A_T$	Fläche der Tür
$c_{p,D}$	spezifischen Wärmekapazität Wasserdampf
$c_{p,L}$	spezifischen Wärmekapazität trockene Luft
$d(t)$	Störgröße
$e(t)$	Regelabweichung
$E_v$	Verbrauch der Klimageräte
$E_{v_k}$	Verbrauch der Klimageräte zu einem Zeitschritt k
$E_{v_{KSG}}$	Verbrauch des KSGs
$E_{v_{Gesamt}}$	Gesamtverbrauch der Klimageräte
$E_z$	Erzeugte Energie der PV-Module
$E_{z_k}$	Erzeugte Energie der PV-Module zu einem Zeitschritt k
$G$	Tastgrad
$g(t)$	Übertragungsfunktion
$h$	Spezifische Enthalpie
$h_{innen_k}$	Spezifische Enthalpie Lagerraum zu einem Zeitschritt k
$h_{innen_{k+1}}$	Spezifische Enthalpie Lagerraum zu einem Zeitschritt k+1
$H$	Enthalpie
$H_{innen_k}$	Enthalpie im Lagerraum zu einem Zeitschritt k
$H_{innen_{k+1}}$	Enthalpie im Lagerraum zu einem Zeitschritt k+1
$\dot{H}_{E_k}$	Entfeuchterenthalpieänderung zu einem Zeitschritt k
$\dot{H}_{\text{Übergang}_k}$	Enthalpieübergang von außen über Wand zu einem Zeitschritt k
$\dot{H}_{zu_k}$	zugeführte Enthalpie durch Lüfter zu einem Zeitschritt k
$\dot{H}_{K_k}$	Enthalpieänderung durch das Klimasplitgerät zu einem Zeitschritt k
$h_{zu_k}$	spezifischen Enthalpie der zugeführten Luft zu einem Zeitschritt k
$k$	Zeitschritt

$k_A$	Wärmeübertragungsparameter Wand
$k_B$	Wärmeübertragungsparameter Boden
$K_D$	Faktor D-Glied
$k_D$	Wärmeübertragungsparameter Dach
$K_I$	Faktor I-Glied
$K_{IF}$	Faktor I-Glied Feuchtigkeitsregler
$K_{IT}$	Faktor I-Glied Temperaturregler
$K_P$	Faktor P-Glied
$K_{PF}$	Verstärkung Feuchtigkeitsregler
$K_{PS}$	stationäre Verstärkung
$K_{PT}$	Verstärkung Temperaturregler
$k_T$	Wärmeübertragungsparameter Tür
$m$	Magnusparameter
$MaxLadung_{Batterien}$	Maximal speicherbare Energie in den Batterien
$m_D$	Masse Dampf
$m_{D,innen_k}$	Masse des Dampfes zu einem Zeitschritt k
$m_{D,innen_{k+1}}$	Masse des Dampfes zu einem Zeitschritt k+1
$m_{f,innen_k}$	Masse feuchte Luft zu einem Zeitschritt k
$m_L$	Masse trockene Luft
$m_{L,innen_k}$	Masse der trockenen Luft zu einem Zeitschritt k
$m_{L,innen_{k+1}}$	Masse der trockenen Luft zu einem Zeitschritt k+1
$\dot{m}_{D,E_k}$	Massenänderung des Dampfes hervorgerufen vom Entfeuchter zu einem Zeitschritt k
$\dot{m}_{D,zu_k}$	Masse des von außen zugeführten Dampfes zu einem Zeitschritt k
$\dot{m}_{D,K_k}$	Massenänderung des Dampfes hervorgerufen vom Klimasplitgerät zu einem Zeitschritt k
$\dot{m}_{f,zu_k}$	Massenstrom der von außen zugeführten feuchten Luft zu einem Zeitschritt k
$\dot{m}_{L,E_k}$	Massenänderung der trockenen Luft hervorgerufen vom Entfeuchter zu einem Zeitschritt k
$\dot{m}_{L,K_k}$	Massenänderung der trockenen Luft hervorgerufen vom Klimasplitgerät zu einem Zeitschritt k

$\dot{m}_{L,zu_k}$	Masse der von außen zugeführten trockenen Luft zu einem Zeitschritt k
$n$	Anzahl
$P$	Puffer
$P$	Elektrische Leistung
$p$	Druck
$p_{außen_k}$	Druck der Umgebung zu einem Zeitschritt k
$p_{innen_k}$	Druck im Lagerraum zu einem Zeitschritt k
$p_s$	Sättigungsdruck
$p_{s,außen_k}$	Sättigungsdruck der Umgebung zu einem Zeitschritt k
$p_{s,innen_k}$	Sättigungsdruck Lagerraum zu einem Zeitschritt k
$p_{s,innen_{k+1}}$	Sättigungsdruck Lagerraum zu einem Zeitschritt k+1
$P_V$	Leistung des Verdichtermotors
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$Q_0$	Kühlleistung
$Q_c$	Wärmeleistung des Verflüssigers
$\dot{Q}_{K_k}$	Wärmestrom Klimasplitgerät zu einem Zeitschritt k
$\dot{Q}_{\text{Übergang}_k}$	Wärmestrom von der Umgebung über die Wand zu einem Zeitschritt k
$r$	Rückführgröße
$R_D$	spezifische Gaskonstante des Dampfs
$R_L$	spezifische Gaskonstante der Luft
$r_o$	Startwert Rückführgröße
$r_o$	Verdampfungswärme
$S_k$	Sonneneinstrahlung zu einem Zeitschritt k
$s$	Dicke der Wand
$s_{PB}$	Dicke Porenbeton
$s_{XPS}$	Dicke extrudiertes Polystyrol
$SOC_k$	Ladezustand der Batterien zu einem Zeitschritt k
$SOC_{k+1}$	Ladezustand der Batterien zu einem Zeitschritt k+1
$t$	Zeit
$T_g$	Ausgleichszeit

$T_i$	Zeit bis I-Glied 1 erreicht
$t_i$	Impulsdauer
$T_n$	Nachstellzeit
$T_n$	Magnusparameter
$T_{NT}$	Nachstellzeit Temperaturregler
$T_{NF}$	Nachstellzeit Feuchtigkeitsregler
$T_P$	Periodendauer
$T_S$	Zeit zum ersten Ausschalten
$T_u$	Verzugszeit
$T_v$	Vorhaltezeit
$u(t)$	Stellgröße
$\dot{V}$	Volumenstrom
$V_{f,innen_k}$	Volumen feuchte Luft zu einem Zeitschritt k
$w$	Schwellwert Zweipunktregler
$w(t)$	Führungsgröße
$W_{F,high}$	Oberer Sollwert für Lagerraumluftfeuchtigkeit
$W_{F,Lr}$	Sollwert für Lagerraumluftfeuchtigkeit
$W_{F,low}$	Unterer Sollwert für Lagerraumluftfeuchtigkeit
$W_{T,high}$	Oberer Sollwert für Lagerraumtemperatur
$W_{T,low}$	Unterer Sollwert für Lagerraumtemperatur
$W_{T,Lr}$	Sollwert für Lagerraumtemperatur
$W_{T,Tr}$	Sollwert für Technikraumtemperatur
$x$	Regelgröße
$x$	Wasserbeladung
$x_a$	Ausgangssignal
$x_e$	Eingangssignal
$x_{innen_k}$	Wasserbeladung Lagerraum zu einem Zeitschritt k
$x_{innen_{k+1}}$	Wasserbeladung Lagerraum zu einem Zeitschritt k+1
$x_{max}$	maximaler Wert der Regelgröße
$x_{ob}$	Ausschaltpunkt
$x_{SD}$	Schaltabstand
$x_{un}$	Einschaltpunkt

$x_{zu_k}$	Wasserbeladung der Umgebung zu einem Zeitschritt k
$y_{max}$	Maximum Reglerausgang
$y$	Stellgröße
$y(t)$	Regelgröße
$y_R$	Eingangssignal Regler
$y_{R_0}$	Startwert Eingangssignal Regler
$\alpha$	Wärmeübergangszahl
$\alpha_a$	konvektive Wärmetransport an der Außenwand
$\alpha_i$	konvektive Wärmetransport an der Innenwand
$\beta$	Zusammenfassung Konstanten Wärmestrom
$\Delta h$	Überschwingweite
$\Delta t$	Länge eines Zeitschritts
$\Delta y_r$	Unterschied Reglerausgang
$\eta$	Wirkungsgrad Photovoltaikmodule
$\vartheta$	Temperatur
$\vartheta_1$	Temperatur der heißen Wandseite
$\vartheta_2$	Temperatur der kalten Wandseite
$\vartheta_{au\beta en_k}$	Außentemperatur zu einem Zeitschritt k
$\vartheta_{innen_k}$	Innentemperatur zu einem Zeitschritt k
$\vartheta_{innen_{k+1}}$	Innentemperatur zu einem Zeitschritt k+1
$\vartheta_{innen_{Technik}}$	Innentemperatur im Technikraum
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{Pb}$	Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton
$\lambda_{XPS}$	Wärmeleitfähigkeit von extrudiertem Polystyrol
$\rho_{f,innen_k}$	Dichte feuchte Luft zu einem Zeitschritt k
$\rho_{D_k}$	Dichte von Wasser zu einem Zeitschritt k
$\varphi$	Relative Luftfeuchtigkeit
$\varphi_{au\beta en_k}$	Relative Feuchtigkeit der Umgebung zu einem Zeitschritt k
$\varphi_{innen_k}$	Relative Feuchtigkeit im Lagerraum zu einem Zeitschritt k
$\varphi_{innen_{k+1}}$	Relative Feuchtigkeit im Lagerraum zu einem Zeitschritt k+1

# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Heutzutage gibt es viele Möglichkeiten Lebensmittel zu lagern. Man kann sie zuhause im Kühlschrank aufbewahren, oder direkt vom Markt konsumieren. Vor dem Verkauf an den Kunden werden die Konsumgüter in der Kühlkette transportiert. Die Preise orientieren sich dabei an Angebot und Nachfrage. Der Erzeuger kann seine Erlöse erhöhen, wenn er seinen Ertrag zu Zeiten niedrigen Angebots verkauft. Dafür kann bei verderblichen Produkten eine Lagerung notwendig sein.

Findet die Landwirtschaft in urbanem Gebiet statt, kann es sein, dass es einen Vorteil hat, die Lagerhäuser unabhängig von der lokalen Stromversorgung zu betreiben. Es bietet sich an in dem Fall der eigenständigen Energieversorgung auf erneuerbare Energie zu setzen, da keine fossilen Brennstoffe benötigt werden, die immer wieder gekauft werden müssen. Es gibt verschiedene Gründe für eine autarke Energieversorgung: Inseln, unwegsames Gelände, Wald, Wüste u.a.. Unwegsames Gelände kann z.B. unerschlossenes Gebirge sein, in dem noch keine Stromversorgung vorhanden ist. Gebirge ist aber auch prädestiniert für verschiedene Landwirtschaft z.B. Weintrauben oder Kaffeebohnen. Ein solches Anbaugebiet ist Thailand. Hier werden Kaffeebohnen von Bauern in einer Bergregion ohne Spannungsversorgung angebaut. Um den Bauern in der Region Mae Lai eine Möglichkeit zu geben bessere Verkaufspreise zu erzielen, wurde das Projekt SilaaCooling initiiert. Dabei handelt es sich um einen Prototyp eines Kaffeekühlhauses mit Photovoltaikanlage, das auch in anderen Regionen Anwendung finden soll. [1]

Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Steueralgorithmus für die Klimatisierung eines energieautarken Kühlhauses. Die Klimatisierung wird benötigt, um die Bildung schädlicher Stoffe bei der Lagerung von Kaffeebohnen auszuschließen. [1]

In Abbildung 1 ist das Konzept der Klimatisierung für SilaaCooling dargestellt. Die Firmen axxeo GmbH (axx), efa Leipzig GmbH (efa), Koralewski Industrieelektronik oHG (KIE) und die Hochschule Anhalt (HSA) sind an diesem Projekt beteiligt [2]. Im Kapitel 2.1 werden die Parameter für die Lagerung von Kaffeebohnen erläutert. In den Kapiteln 2.2, 2.3 und 2.4 wird auf die thermodynamischen Aspekte der Wärmebilanz und Feuchtigkeitsbilanz im Raum und der Kühlaggregate eingegangen. Dies wird dann im Kapitel 3.3 als Modell beschrieben. Im Kapitel 2.5 werden die verschiedenen Bestandteile des autarken Systems erläutert. Die Theorie auf dem das SoC-System mit Steuern, Optimieren und Monitoren aus dem Gebiet der

Regelungstechnik aufbaut, wird im Kapitel 2.6 erläutert. Im Kapitel 3.4 wird dann auf die in der Praxis implementierten Algorithmen eingegangen.

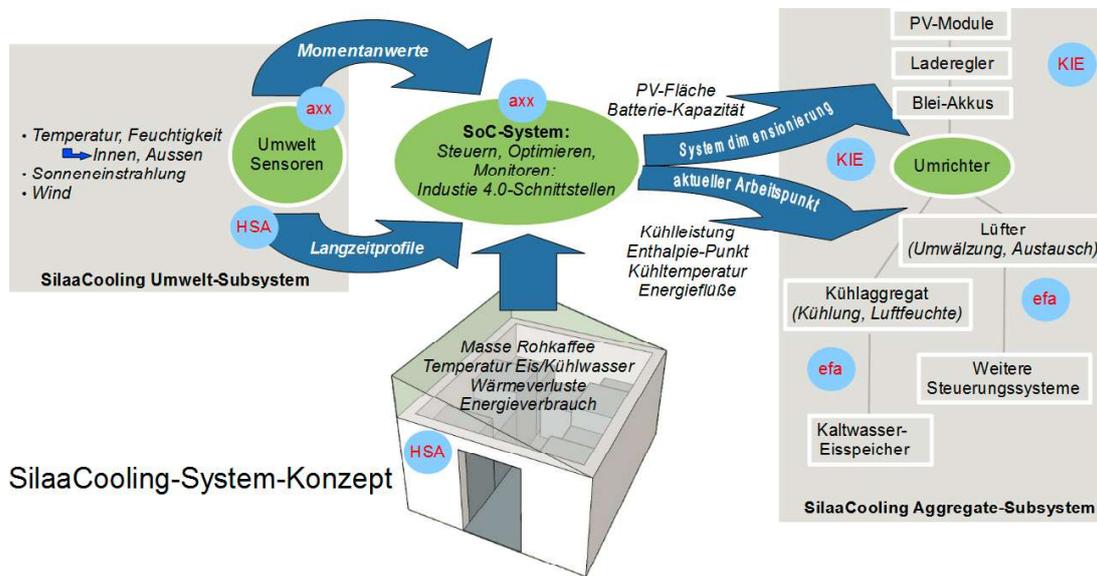


Abbildung 1: SilaaCooling-System-Konzept [2]

Der in Abbildung 1 dargestellte Aufbau wird in Kapitel 3.1 detailliert dokumentiert. Des Weiteren wird im Kapitel 3.2 die bestehende Software mit den dazugehörigen Programmablaufplänen zur Steuerung des Versuchsaufbaus beschrieben. Die durchgeführten Tests werden im Kapitel 3.5 erklärt und im Kapitel 3.6 werden die verschiedenen Algorithmen verglichen. Vor der Zusammenfassung und dem Ausblick im Kapitel 5 findet im Kapitel 4 eine Auswertung statt.

## 2. Hintergrund und Theorie

Inhalt dieser Arbeit ist die Lagerung von Kaffeebohnen in Thailand, wobei keine Stromversorgung für die Geräte vorhanden ist. Um dieses Ziel zu erreichen müssen die verwendeten Klimageräte effizient gesteuert werden. Die dafür notwendigen theoretischen Hintergründe der korrekten Lagerbedingungen, der thermodynamischen Modellgleichungen, der Aufbau des autarken Systems und die regelungstechnischen Grundlagen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

### 2.1. Lagerung von Kaffeebohnen

Kaffeebohnen werden größtenteils in tropischen und subtropischen Regionen Afrikas, Südostasiens und Südamerikas angebaut. Die Qualität der Kaffeebohnen wird durch verschiedene Faktoren, vor und nach der Ernte, beeinflusst. Vor der Ernte kommt es auf die Beschaffenheit und die chemische Zusammensetzung der Bohne an. Nach der Ernte durchlaufen Kaffeebohnen verschiedene Veredelungsschritte, wie Trocknung und Lagerung, um beim Transport nicht an Qualität zu verlieren. [3]

In dieser Arbeit wird speziell das Thema der Lagerung von Kaffeebohnen bearbeitet. Bei der Lagerung von Kaffeebohnen muss auf verschiedene Risikofaktoren geachtet werden. Diese sind u.a.: Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Lüftung, Gase, Toxizität und Schädlingsbefall. Bekannte Schädlinge sind der Kaffeekäfer, Schaben, Ratten und Mäusen. Es werden Begasungsmittel eingesetzt, um die Schädlinge zu bekämpfen, dabei wird bei der Nutzung der korrekten Mittel die Qualität nicht vermindert. Um die Kaffeebohnen korrekt zu lagern müssen die in Tabelle 1 genannten Bedingungen erfüllt werden. [4]

*Tabelle 1: Lagerbedingungen Kaffeebohnen [5]*

<b>Parameter</b>	<b>Bereich</b>
Temperatur	0 ... 20 °C
Relative Luftfeuchtigkeit	50 ... 70 %

Der Grund für diese Bedingungen ist, dass die Entstehung des Stoffs Ochratoxin A (OTA) unterbunden werden soll. OTA ist ein Schimmelpilzgift, das zu Leber- und Nierenschäden führen kann. Die Bildung dieses Gifts kann verhindert werden, wenn die Lebensbedingungen für die Schimmelpilze ausgeschlossen werden können. [6], [7]

## 2.2. Beschreibung der untersuchten Thermodynamik

Um die Temperatur  $\vartheta$  und die relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  bei der Lagerung von Kaffeebohnen in den in Tabelle 1 gezeigten Bereichen zu halten, müssen die Gesetze der Thermodynamik herangezogen werden. Das hat den Ursprung in der Energieübertragung zwischen Kühlgut, Kühlhaus und Umgebung. Zur Klimatisierung des Kühlhauses mit Klimageräten wird durch Energieumwandlung Wärme- und Stofftransport durchgeführt. Die Energieübertragung und die Energieumwandlung sind Themen der Thermodynamik. [8]

Der Stofftransport im Kühlhaus ist die Bewegung und die Veränderung der Zusammensetzung der feuchten Luft. Der Wärmeinhalt eines Körpers, und somit auch der feuchten Luft, wird als Enthalpie  $H$  bezeichnet. Bezogen auf die Masse von 1 kg ergibt sich die spezifische Enthalpie  $h$  mit der Formel (1). [9]

$$h = c_{p,L} \cdot \vartheta + x \cdot (c_{p,D} \cdot \vartheta + r_0) \quad (1)$$

Die spezifischen Wärmekapazitäten  $c_{p,L} = 1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  und  $c_{p,D} = 1,863 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  geben an wie viel Wärme benötigt wird, um 1 kg trockene Luft bzw. Wasserdampf um 1 K zu erwärmen. [9]

Die Wasserbeladung  $x$  bezeichnet die Wassermenge  $m_D$  in der Luft  $m_L$ . Die Berechnung erfolgt mit der Formel (2). [9]

$$x = \frac{m_D}{m_L} \quad (2)$$

Die Verdampfungswärme  $r_0$  beschreibt wie viel Energie zur Verdampfung von 1 kg eines Stoffes notwendig ist. Für Wasser beträgt die Verdampfungswärme  $2500,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . [9]

Ein weiterer Stofftransport ist die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit. Sie beschreibt den Anteil der Wassermenge an der feuchten Luft bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck. Die relative Luftfeuchtigkeit lässt sich mit der Formel (3) berechnen. [9]

$$\varphi = \frac{p \cdot \varphi + x}{p_s \cdot (0,622 + x)} \quad (3)$$

Der Druck  $p$  beschreibt die Kraft, die Luft auf eine Fläche im Raum wirkt. Der Sättigungsdruck  $p_s$  beschreibt den maximalen Druck des Dampfes bei der herrschenden Temperatur  $\vartheta$  [10]. Er wird mit der Magnusformel (4) berechnet.

$$p_s = 6,112 \text{ hPa} \cdot e^{\frac{m \cdot \vartheta}{T_n + \vartheta}} \quad (4)$$

$m$  und  $T_n$  sind die spezifischen Parameter der Magnusformel. Die relative Luftfeuchtigkeit ist nach (3) und (4) von der Temperatur abhängig. Diese Abhängigkeit wird im  $h,x$ -Diagramm dargestellt.

### 2.3. Beschreibung der untersuchten Raumluftechnik

Die Energieübertragung zwischen der Umgebung und einem Kühlhaus hängt von verschiedenen Parametern ab. In Abbildung 2 ist die Übersicht für den Wärmestrom  $\dot{Q}$  durch eine ebene Wand dargestellt. Die Berechnung erfolgt mit der Formel (5).

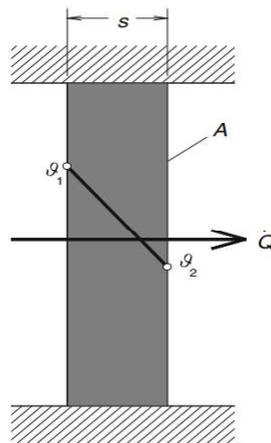


Abbildung 2: Wärmeleitung in einer ebenen Wand [11]

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (5)$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines Stoffes gibt an, wieviel Wärmestrom durch diesen Stoff bei einer bestimmten Temperatur möglich ist.  $s$  gibt die Dicke der Wand an und  $A$  ist die Querschnittsfläche der Wand.  $\vartheta_1$  ist die Temperatur von der heißen Wandseite und  $\vartheta_2$  ist die Temperatur der kalten Seite. Wenn die Wärmeleitfähigkeit an der ganzen Wand konstant gleich ist, kann  $\frac{\lambda}{s}$  zu  $\alpha$ , der Wärmeübergangszahl, zusammengefasst werden. [11]

Wenn die Außentemperatur größer als die Kühlhaustemperatur ist, findet ein Wärmeübergang von der Umgebung zum Kühlhaus statt. Eine Temperaturerhöhung im Kühlhaus ist in der Regel nicht gewünscht. Deswegen muss mit Klimageräten gearbeitet werden, um die von der Umgebung zugeführten Wärme wieder abzuführen. Des Weiteren sind bei Temperaturänderungen relative Luftfeuchtigkeitsänderungen zu verzeichnen. Diese Luftfeuchtigkeitsänderung müssen durch Klimageräte abgefangen werden, um die relative Luftfeuchtigkeit im Kühlhaus zwischen 50 % und 70 % zu halten. Auch die  $CO_2$ -Konzentration im Kühlhaus muss bei Veränderungen mit Hilfe von Klimageräten auf einem adäquaten Niveau gehalten werden.

## 2.4. Beschreibung des untersuchten gerätetechnischen Aufbaus

Die Verhältnisse des Kühlhauses werden, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, durch verschiedene Einflüsse verändert. Um problematische Veränderungen zu beherrschen, stehen verschiedene Klimageräte zu Verfügung. In dieser Arbeit wird auf folgende Klimageräte eingegangen, deren Aufbau in Abbildung 3 dargestellt ist:

- Klimasplitgerät
- Entfeuchter
- Lüfter
- Kreuzgegenstromwärmetauscher

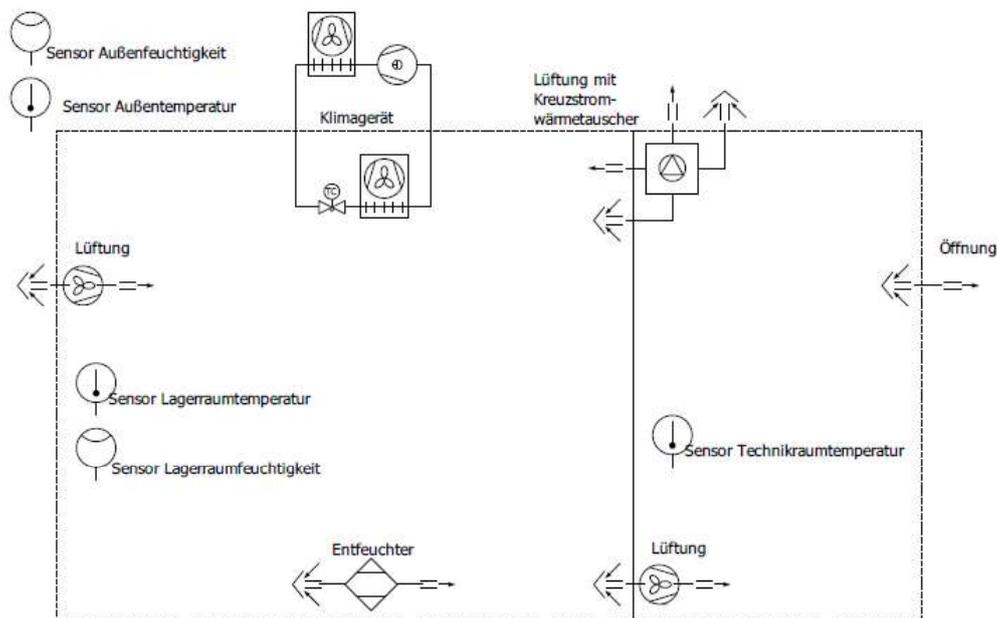


Abbildung 3: Klimageräte SilaaCooling (Eigene Zeichnung angelehnt an [12])

### 2.4.1. Klimasplitgerät

Um den Temperaturänderungen entgegenzuwirken, spielt das Klimasplitgerät (KSG) eine wichtige Rolle. Bei einer Klimaanlage handelt es sich um einen Kreisprozess, bei dem ein Kältemittel wiederholt verdampft, komprimiert, kondensiert und entspannt wird. In Abbildung 4 ist das Schema des Kaltdampfkompressionsprozesses dargestellt, welcher bei Klimaanlage Anwendung findet.

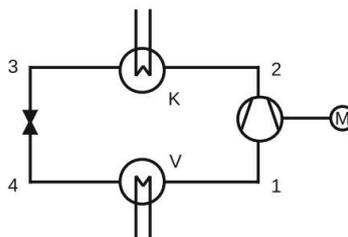


Abbildung 4: Schema des Kaltdampfkompressionsprozesses [13]

Über den Wärmeübertrager (V) wird das gasförmige Kältemittel bei niedrigem Druck, dem Zustand 1, ausgegeben. Danach wird es vom Verdichtermotor angesaugt. Durch den Verdichter wird das Kältemittel im Zustand 2 verdichtet. Am Kondensator (K) gibt das Kältemittel Energie an die Umgebung ab und besteht dort aus einem Gleichgewicht aus flüssiger und gasförmiger Phase. Es tritt im Zustand 3 als siedende Flüssigkeit auf. Durch ein Expansionsventil wird die Flüssigkeit entspannt, wodurch eine starke Temperaturverminderung erreicht wird, worin sich die Kühlung der Klimaanlage äußert. Im Zustand 4 liegt das Kältemittel als Nassdampf vor, welcher wieder V zugeführt wird. [13]

Die Kühlleistung  $Q_0$  einer Klimaanlage lässt sich berechnen mit der Formel (6).

$$Q_0 + P_V = Q_c \quad (6)$$

Wobei  $P_V$  die Leistung des Verdichtermotors ist und  $Q_c$  die Wärmeleistung des Verflüssigers [14]. Die Kühlleistung des KSGs steht dem Wärmeübergang aus Formel (5) gegenüber. Um im Kühlhaus eine Temperaturverringern zu erreichen, muss die Kühlleistung größer als die Wärmeänderung durch die Wand und andere Wärmeeinträge in das Kühlhaus sein.

#### **2.4.2. Entfeuchter**

Die relative Luftfeuchtigkeit im Kühlhaus kann durch einen Entfeuchter verändert werden. Es gibt verschiedene Verfahren Luft zu entfeuchten. Der im Projekt genutzte Trockner kühlt zunächst die Luft ab, sodass am Wärmetauscher (Verdampfer) das Wasser aus der Luft auskondensiert. Anschließend wird die Luft am zweiten Wärmetauscher (Kondensator) wieder erwärmt, sodass die Temperatur der Luft steigt und die relative Luftfeuchte sinkt. Insgesamt ist die Luft nach dem gesamten Trocknungsprozess trockener, aber auch wärmer.

#### **2.4.3. Kreuzgegenstromwärmetauscher**

Um die  $CO_2$ -Konzentration in einem Raum zu verringern, kann ein Kreuzgegenstromwärmetauscher (XWT) benutzt werden. Der Aufbau eines XWTs ist in Abbildung 5 dargestellt. Mit Hilfe dieses Geräts kann die Luft aus dem Raum mit der Luft der Umgebung getauscht werden. Das heißt, der XWT bewirkt, wenn die  $CO_2$ -Konzentration im Raum höher als in der Umgebung ist, durch die Vermischung, eine  $CO_2$ -Konzentrationsverringern im Raum. Zusätzlich wird die Außenluft vorgekühlt, wenn die Temperatur im Raum geringer als in der Umgebung ist.

Ein XWT besteht aus dünnen Kunststoff- oder Metallplatten, die in mehreren Schichten übereinander angeordnet sind. Der Ab- und Zuluftstrom wird durch die Hohlräume zwischen den Platten geführt.

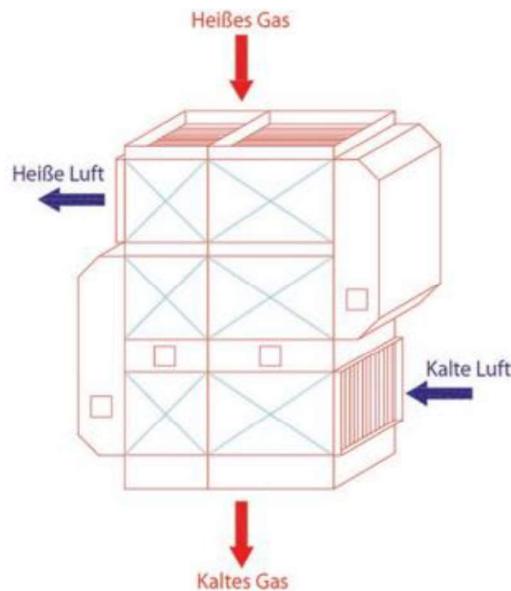


Abbildung 5: Kreuzgegenstromwärmetauscher [15]

Es kann zu Problem kommen, wenn der Abluftstrom größere Mengen relative Luftfeuchtigkeit enthält und so ein Kondensat gebildet wird. Dieses Kondensat kann bei bestimmten Temperatursituationen gefrieren. [16] Der Luftaustausch könnte auch mit Lüftern durchgeführt werden, dort würde aber der Vorteil des Wärmetauschers verloren gehen.

#### 2.4.4. Lüfter

Im Gegensatz zum XWT sind Lüfter verbrauchsärmer an elektrischer Leistung. Außerdem haben Ventilatoren, ein anderes Wort für Lüfter, einen höheren Luftdurchsatz, um die Außenluft in den Raum zu leiten. Im Folgenden wird beispielsweise der Radialventilator beschrieben. Ventilatoren zählen zu den Strömungsmaschinen, d.h. mit ihnen kann ein Luftvolumenstrom erzeugt werden. Dieser Volumenstrom wird über einen Förderdruck erreicht, der von den Ventilatorschaufeln aufgebaut wird. An die Welle des Ventilators ist ein Motor angeschlossen, der über eine Regelung die Volumenstrommenge einstellen kann. Meist werden Zuluft- und Abluftventilatoren verwendet, um die Außenluft mit der Raumluft zu vermischen und die Abluft abzutransportieren. [17]

### 2.5. Beschreibung des untersuchten Inselnetzes

Es wurde beschrieben, dass bei der Lagerung von Kaffeebohnen auf die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit geachtet werden muss. Dabei wurde erarbeitet, dass dafür Klimageräte genutzt werden können. In den Betrachtungen fehlte, dass die Klimageräte elektrische Energie zum Betrieb benötigen. Im Fall von SilaaCooling ist das ein Problem, da das Kaffeekülhaus nicht an ein Stromnetz angeschlossen werden kann.

Das Kaffeeanbaugebiet Mae Lai, Thailand, liegt in einer Bergregion, in der kein Anschluss an das Stromnetz möglich ist. Die Kühllhäuser müssen eigenständig mit Strom versorgt werden, wofür ein autarkes System aufgebaut werden muss. SilaaCooling hat sich dazu entschieden eine Photovoltaik-Insulanlage aufzubauen. Das sind Anlagen, die nicht an das elektrische Versorgungsnetz angeschlossen sind, sondern sich selbst über Photovoltaikanlagen versorgen. Diese benötigen die Möglichkeit der Energiespeicherung in Batterien. In Abbildung 6 ist der Aufbau eines PV-Inselsystems skizziert.

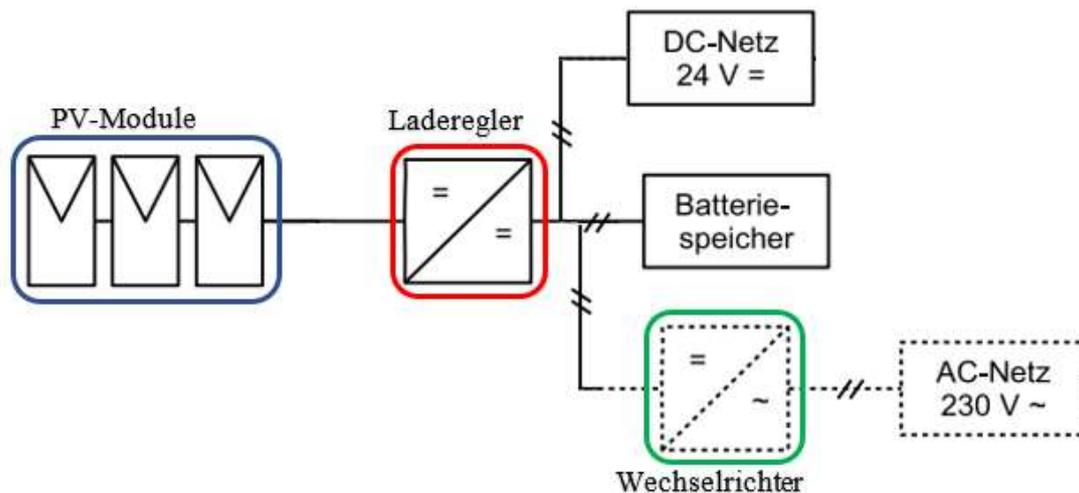


Abbildung 6: Aufbau eines Inselnetzes (Eigene Zeichnung angelehnt an [18])

Der Laderegler verbindet die Photovoltaikmodule mit den Batterien und dem Wechselrichter, welcher die Energieversorgung der Wechselstromgeräte zur Verfügung stellen kann. Dies können die PV-Module und Batterien allein nicht gewährleisten, da sie auf Gleichstromebene arbeiten. Der Laderegler schützt die Batterien vor Tiefenentladung und Überladung.

Der erste Schritt beim Betreiben einer Inselanlage ist die Auslegung der Geräte. Der begrenzende Faktor sind die sonnenarmen Zeiten in der Regenzeit. Die Batterien müssen groß genug sein, um diese Phasen zu überbrücken. Die Photovoltaikmodule müssen so dimensioniert sein, dass sie genügend Energie zum Laden der Batterien zur Verfügung stellen können. Der Laderegler ist ein DC-DC-Wandler, der die von den PV-Modulen gelieferte Spannungsebene auf die Ebene der Batterien transformiert. [18]

### 2.5.1. Photovoltaik

Mit Hilfe von PV-Modulen kann Sonnenenergie zu elektrischer Energie umgewandelt werden. Ein Modul besteht aus mehreren Solarzellen. In der Abbildung 7 ist der Aufbau einer Solarzelle dargestellt. Das zentrale Element einer Solarzelle ist der PN-Übergang eines Halbleiters, bei dem Elektronen Elektronenlöcher füllen. Der Stromfluss zwischen den leitenden Schichten kann für Verbraucher genutzt werden.

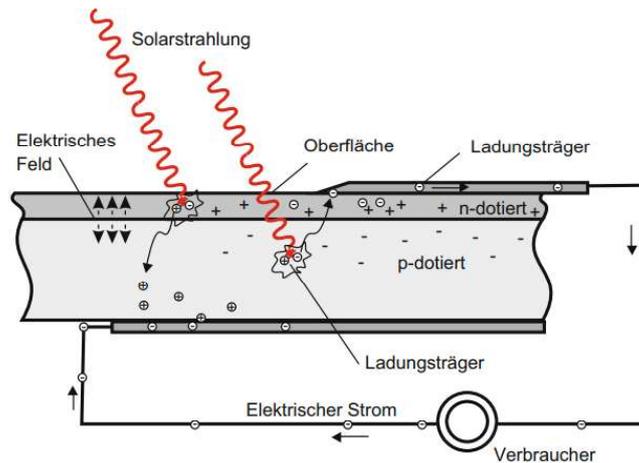


Abbildung 7: Aufbau einer Solarzelle [18]

Bei der Benutzung von PV-Modulen ist auf den Verlauf der Sonneneinstrahlung über das Jahr und während eines Tages zu achten. Bei Bewölkung kann ein PV-Modul immer noch elektrische Energie liefern. Nach Sonnenuntergang ist das nicht möglich. Zur Planung der Energieerzeugung von PV-Modulen können Wettervorhersagen und Energieprofile benutzt werden. Zusätzlich zur Sonneneinstrahlung ist der Neigungswinkel des Moduls zu betrachten.

Die Globalstrahlung auf eine Fläche ist zusammengesetzt aus direkter Strahlung und diffuser Strahlung. Das bedeutet, dass auch bei fehlender direkter Strahlung durch Wolken eine Energieversorgung mit Hilfe von PV-Modulen, durch den Effekt diffuser Strahlung, möglich ist. In Abbildung 8 ist das Ergebnis eines Experimentes dargestellt, bei dem die Globalstrahlung bei verschiedenen Wetterlagen aufgenommen wurde. [19]

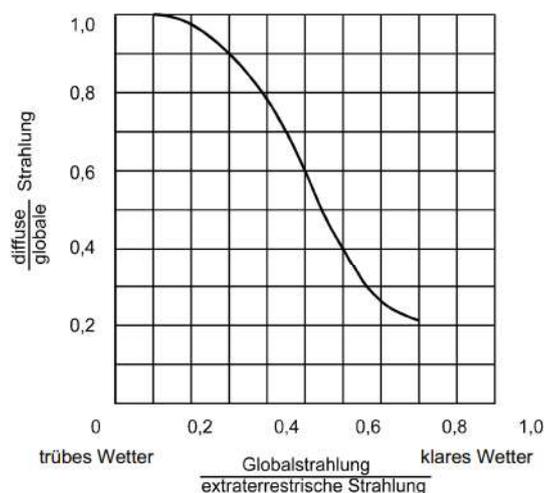


Abbildung 8: Verhältnis von Globalstrahlung, direkter Strahlung und diffuser Strahlung [20]

Aus der Abbildung lässt sich ablesen, dass selbst bei freiem Himmel 20 % der Globalstrahlung aus diffuser Strahlung besteht. Selbstredend besteht bei bedecktem Himmel die Globalstrahlung zu 100 % aus diffuser Strahlung und zu 0 % aus direkter Strahlung. Aus der Bewegung der Sonne lässt sich ableiten, dass die Ausrichtung der PV-Module dem Sonnenverlauf nachgeführt

werden könnten. Alternativ kann aber auch ein optimaler Neigungswinkel berechnet werden, der die gesamte Lebensdauer eines PV-Moduls gleichbleibt. [19]

### 2.5.2. Batterien

Die Sonnenenergienutzung stellt ein Problem dar, wenn z.B. nachts keine Sonne scheint. Deswegen müssen Energiespeicher benutzt werden, um sonnenenergiearme Abschnitte zu überbrücken. In autarken Systemen werden dazu Akkumulatoren eingesetzt. Es müssen verschiedene Eigenschaften erfüllt werden, damit sich die Batterien für den Inselbetrieb eignen. Diese Eigenschaften sind:

- Hohe Zyklenfestigkeit
- Geringe Selbstentladung
- Wartungsarmer Betrieb

Sogenannte Solarbatterien, häufig Blei-Säure- oder Blei-Gel-Akkumulatoren, erfüllen alle diese Kriterien. [18]

Die Betrachtungen zu Batterien fallen in dieser Arbeit sehr kurz aus. Es wird auf die Masterthesis mit dem Titel „Analysis of the Valve Regulated Lead-Acid (VRLA-GEL) batteries behavior and development of State of Charge determination device and algorithm for real-time applications“ verwiesen. [21]

### 2.5.3. Laderegler

Der Leistungsverlauf einer Solarzelle ist nicht konstant. Bei starker Sonneneinstrahlung liefert die Solarzelle eine Spannung und einen Strom der die Batterien überlasten würde. Um beides zu begrenzen, werden Laderegler eingesetzt. Dieser schützt die Batterien auch vor Überladung. Um eine Batterie optimal zu laden, wird der Ladestrom in Abhängigkeit der Batteriespannung geregelt [22]. In der Abbildung 9 sind die verschiedenen Stufen der Ladekennlinie dargestellt.

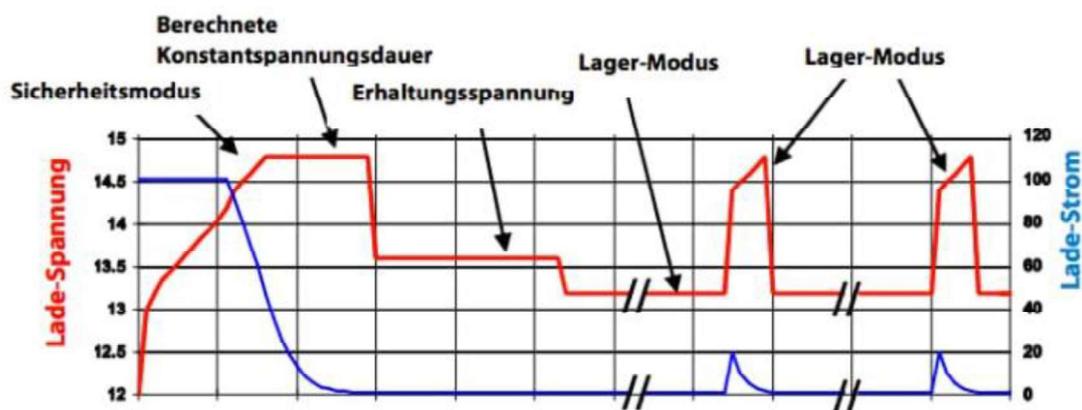


Abbildung 9: 4-stufige Ladekennlinie [23]

Im Sicherheitsmodus wird der Spannungsanstieg begrenzt, wenn die Gasungsspannung, die jeder Batterie zugeordnet werden kann, erreicht ist. So wird die Gasentwicklung reduziert, um ein sicheres Maß dessen zu erreichen. In der Konstantspannungsphase, die eine variable Länge hat, wird in Abhängigkeit der Bulk-Stufe die Absorbionsstufe berechnet. Eine kurze Dauer der Bulk-Stufe zieht eine kurze Dauer der Absorbionsstufe nach sich. Eine lange Bulk-Phase, in der der Strom konstant ist, erfordert auch eine lange Absorbionsphase, bei der die Spannung konstant ist.

Die Erhaltungsphase wird einmal pro Woche benötigt, um die Selbstentladungs-Verluste zu kompensieren. Dabei wird die Ladespannung kurzzeitig auf Erhaltungsspannung erhöht. Schließlich wird im Lagermodus die Ladespannung zurückgenommen bis die Floatingsspannung erreicht wird. Dadurch wird die Korrosion der positiven Platten reduziert. [23]

#### 2.5.4. Wechselrichter

Die Batterien und die PV-Module arbeiten mit Gleichspannung, wobei die Klimatisierungsgeräte mit Wechselspannung arbeiten. Um Gleichspannung in Wechselspannung umzuwandeln, werden Wechselrichter eingesetzt. Das Grundprinzip eines Wechselrichters ist in Abbildung 10 dargestellt.

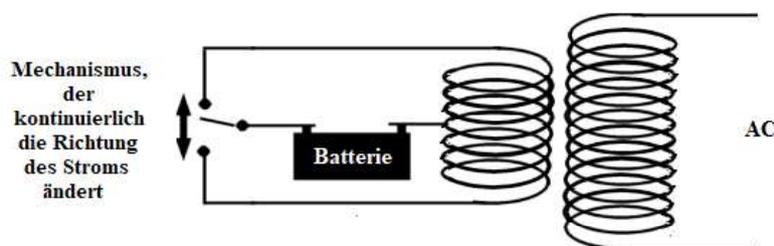


Abbildung 10: Grundprinzip Wechselrichter [24]

Dabei wird die Batterie über einen Schalter, dessen Polarität gewechselt werden kann, an eine Primärspule angeschlossen, die durch das Wechseln ihres Magnetfelds eine Spannung in die Sekundärspule induziert. Anhand der unterschiedlichen Wicklungen der Spulen kann die Spannung an der Sekundärseite eingestellt werden. Zur effizienten Wechselrichtung wird der Schalter über einen Mikrocontroller gesteuert, um die Wechselspannung an der Sekundärseite zu regeln. [24]

### 2.6. Im Projekt erforderliche Regelungstechnik

Für die Lagerung von Kaffeebohnen müssen die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit bestimmte Grenzwerte einhalten. Dies kann mit Hilfe von verschiedenen Klimageräten erreicht

werden. Um die Geräte korrekt anzusteuern, sind die Vorgehensweisen der Regelungstechnik hilfreich.

In der Regelungstechnik wird die Aufgabe bearbeitet einen Prozess, der sich in Abhängigkeit mit der Zeit verändert, so zu beeinflussen, dass dieser sich zu einem vorgegebenen Ziel bewegt. Ein Beispiel ist die Veränderung der Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur über den Tag. Es muss eine veränderbare Größe so eingestellt werden, dass das Ziel erreicht wird. So entsteht ein Regelkreis, wie er in der Abbildung 11 dargestellt ist. [25]

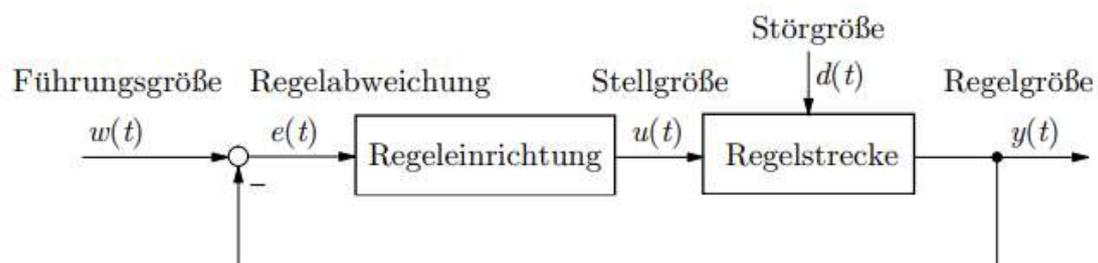


Abbildung 11: Regelkreis [25]

Die Störgröße  $d(t)$  ist nicht beeinflussbar und verändert die zu regelnde Regelgröße  $y(t)$ . In der Regelstrecke wird die Stellgröße  $u(t)$  verarbeitet und es ergibt sich die Regelgröße. Das Ziel ist es  $y(t) = w(t)$  zu erreichen.  $w(t)$  ist die Führungsgröße, also das angestrebte Ziel der Regelung. Die Regelabweichung  $e(t)$  ergibt sich mit  $e(t) = w(t) - y(t)$ . In der Regeleinrichtung wird die Stellgröße anhand der Regelabweichung berechnet. Die in der Regeleinrichtung hinterlegten Formel, die Übertragungsfunktion  $g(t)$ , bestimmt den Verlauf der Regelung. [25]

Charakteristisch für das Verhalten eines Regelkreises ist die Übertragungsfunktion der Elemente Regelstrecke und Regeleinrichtung und somit des gesamten Regelkreises. Die Übertragungsfunktion gibt an, wie ein Teil der Regelstrecke auf eine Eingangsfunktion reagiert. Es gibt proportionales, differentielles, integrales und verzögerndes Verhalten. Um das Übertragungsverhalten zu beschreiben, wird die Sprungantwort verwendet, welche die Reaktion eines Regelgliedes auf die sprunghafte Änderung der Eingangsgröße darstellt.

Das Übertragungsverhalten wird durch verschiedene Eigenschaften unterschieden. Erstens kann es eine Zeit geben die vergeht, bis ein Übertragungsglied auf eine Änderung reagiert. Zweitens gibt es eine Geschwindigkeit, mit der sich die Ausgangsgröße verändert. Drittens kann es eine Zeit geben, bei der die Ausgangsgröße  $x_a(t)$  einen gleichbleibenden Wert erreicht hat. Es kann sein, dass dieser Wert nie erreicht wird. [26]

Ein Proportionalglied verstärkt die Eingangsgröße  $x_e(t)$ . Dessen Sprungantwort ist in Abbildung 12 dargestellt.

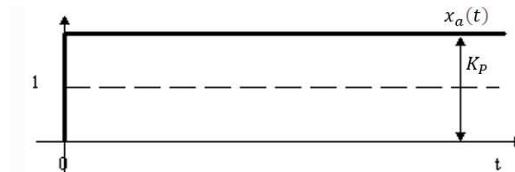


Abbildung 12: Sprungantwort eines P-Gliedes [27]

Das Verhalten eines P-Gliedes im Zeitbereich wird, wenn  $K_P$  die Verstärkung beschreibt, charakterisiert mit:

$$x_a(t) = x_e(t) \cdot K_P \quad (7)$$

In Abbildung 13 ist die Sprungantwort des I-Gliedes dargestellt.

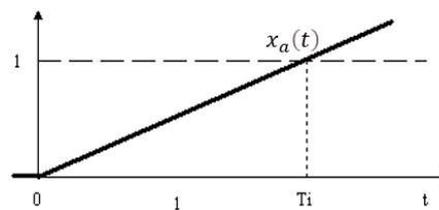


Abbildung 13: Sprungantwort eines I-Gliedes [28]

Dessen Verhalten wird mit folgender Formel charakterisiert:

$$x_a(t) = K_I \int x_e(t) dt \quad (8)$$

Der Integrierbeiwert  $K_I = \frac{1}{T_i}$  steht für die Gewichtung des Integrierens des Eingangssignals, er beschreibt wie stark die Ausgangsgröße auf das Integrieren der Eingangsgröße reagiert. Zusätzlich zum P- und I-Glied existieren auch noch das D-, PT1- und PT2-Glied [25]. Es ist möglich die P-, I- und D-Glieder zu PI-, PD- oder PID-Reglern zu kombinieren. Es werden dabei die Anteile der Glieder miteinander addiert, wobei das Verhalten über die Konstanten  $K_I$ ,  $K_P$  und  $K_D$  verändert werden kann. [29]

Es wurden nun die einzelnen Teile eines Regelkreises aus Abbildung 11 erläutert. In der Praxis besteht die Möglichkeit eines Eingriffes in den Regelkreis nur an der Regeleinrichtung, wenn die Führungsgröße nicht verändert werden soll. Dort können mehrere unterschiedliche Einstellungen vorgenommen werden. Diese sind erstens die Auswahl der Reglerstruktur und zweitens die Auswahl der Reglerparameter. Diese Einstellung erfordern entweder Erfahrung oder die Durchführung bekannter Verfahren. Fällt die Entscheidung auf die Kombination von P-, I- und D-Elementen, so sind die Parameter  $K_P$ ,  $K_I$ , und  $K_D$  zu bestimmen. Die Auswahl der Reglerstruktur ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Wahl der Reglerstruktur [30]

Erweiterte Strecke		Reglertyp				
Typ	Beispiele für typische Regelgrößen	P	I	PI	PD	PID
$PT_1$	Füllstand, Spannung, Druck, Durchfluss	-	+	++	-	+
$PT_n (n \geq 2)$	Temperatur	-	-	++	-	++

Die Parameter  $K_p$ ,  $K_I$ , und  $K_D$  können dann im zweiten Schritt bestimmt werden. Für diesen Schritt stehen unzählige Bestimmungsverfahren zur Verfügung. Im Folgenden wird das Verfahren von Chien/Hrones/Reswick erklärt. Ein weiteres mögliches Verfahren wäre Ziegler/Nichols. Das Verfahren beginnt mit dem Bestimmen einer Wendetangente, welches in Abbildung 14 dargestellt ist. Für das Aufnehmen der Wendetangente wird ein offener Regelkreis verwendet, das heißt die Verbindung von der Regeleinrichtung zur Regelstrecke wird aufgetrennt und die Stellgröße wird per Hand vorgegeben. [30]

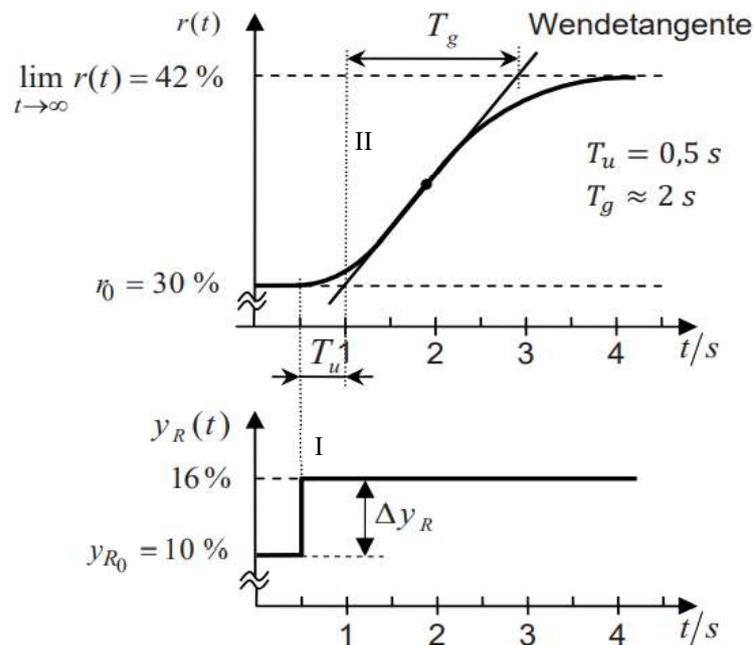


Abbildung 14: Aufnehmen einer Wendetangente [30]

In Abbildung 14 ist ein Sprung der Reglerausgangsgröße  $y_R(t)$  vom Startwert  $y_{R0}$ , der 10 % des Eingangssignalmaximums beträgt, auf 16 % des Eingangssignalmaximums dargestellt. Der Sprung findet bei  $t = 0,5$  s (I) statt. Es ergibt sich der Verlauf der Rückführgröße  $r(t)$  im oberen Teil der Abbildung. Es wurde die Wendetangente eingezeichnet. Die Rückführgröße erreicht bei 4 s einen konstanten Wert von 42 % des Maximums, ausgehend von einem Startpunkt  $r_0$  von 30 %. Nun können die Kennwerte  $T_u$ ,  $T_g$  und  $K_{Ps}$  bestimmt werden. [30]

$$T_u = 1 \text{ s} - 0,5 \text{ s} = 0,5 \text{ s} \quad (9)$$

$$T_g = 3 \text{ s} - 1 \text{ s} = 2 \text{ s} \quad (10)$$

$$K_{P_S} = \frac{42\% - 30\%}{16\% - 10\%} = 2 \quad (11)$$

Mithilfe der Parameter  $T_u$ ,  $T_g$  und  $K_{P_S}$  wurden nun, anhand der Einstellregeln von Chien/Hrones/Reswick aus Tabelle 3, die Parameter  $K_P$ ,  $K_I$ , und  $K_D$  bestimmt. [30] Am Beispiel eines PID-Reglers mit Versorgungsstörung und einer Überschwingweite  $\Delta h = 0$  ergibt sich:

$$K_P = \frac{0,95}{2} \cdot \frac{2 \text{ s}}{0,5 \text{ s}} = 1,9 \quad (12)$$

$$T_n = 2,4 \cdot 0,5 \text{ s} = 1,2 \text{ s} \quad (13)$$

$$T_v = 0,42 \cdot 0,5 \text{ s} = 0,21 \text{ s} \quad (14)$$

Tabelle 3: Einstellregeln nach Chien/Hrones/Reswick [30]

	Versorgungsstörungen		Führungsgrößenänderungen bzw. Laststörungen	
	$\Delta h = 0$	$\Delta h = 20\%$	$\Delta h = 0$	$\Delta h = 20\%$
P-Regler	$K_P = \frac{0,3}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P = \frac{0,7}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P = \frac{0,3}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$K_P = \frac{0,7}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
PI-Regler	$K_I = \frac{0,6}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = 4 \cdot T_u$	$K_I = \frac{0,7}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = 2,3 \cdot T_u$	$K_I = \frac{0,35}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = 1,2 \cdot T_g$	$K_I = \frac{0,6}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = T_g$
PID-Regler	$K_P = \frac{0,95}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = 2,4 \cdot T_u$ , $T_v = 0,42 \cdot T_u$	$K_P = \frac{1,2}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = 2 \cdot T_u$ , $T_v = 0,42 \cdot T_u$	$K_P = \frac{0,6}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = T_g$ , $T_v = 0,5 \cdot T_u$	$K_P = \frac{0,95}{K_{P_S}} \cdot \frac{T_g}{T_u}$ , $T_n = 1,35 \cdot T_g$ , $T_v = 0,47 \cdot T_u$

Zum Umrechnen von  $T_n$  und  $T_v$  in  $K_I$  und  $K_D$  gilt: [31]

$$K_I = \frac{K_P}{T_n} \quad (15)$$

$$K_D = K_P \cdot T_v \quad (16)$$

Somit ergibt sich:

$$K_I = \frac{1,9}{1,2 \text{ s}} = 1,583 \frac{1}{\text{s}} \quad (17)$$

$$K_D = 1,9 \cdot 0,21 \text{ s} = 0,399 \text{ s} \quad (18)$$

Hier ist das Beispiel zur Berechnung der Parameter  $K_P$ ,  $K_I$ , und  $K_D$  abgeschlossen. Die Bestimmung der Reglerstruktur und der Reglerparameter kann, wenn spezielle Informationen zum Regelkreis bekannt sind, vom Beispiel abweichen. Es kann von Vorteil sein ein anderes Bestimmungsverfahren für die Reglerparameter zu verwenden. Sollte es nicht möglich sein die Reglerparameter zu bestimmen oder gibt der Regelkreis es vor, kann die Entscheidung auf einen Zweipunktregler mit oder ohne Hysterese fallen.

Der Zweipunktregler ist ein unstetiger Regler, bei dem die Stellgröße  $y$  nur zwei Zustände aufweist: 0 und  $y_{max}$ . Es existiert ein Wert  $w$  der Regelgröße  $x$ , bei dem der Zustand wechselt. In der Praxis werden Zweipunktregler mit Hysterese verwendet. Dieser besitzt einen Schaltabstand  $x_{SD}$ , der definiert ab welchem unteren Wert  $x_{un}$  eingeschaltet wird und bei welchem Wert  $x_{ob}$  ausgeschaltet wird. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 15 dargestellt. [32]

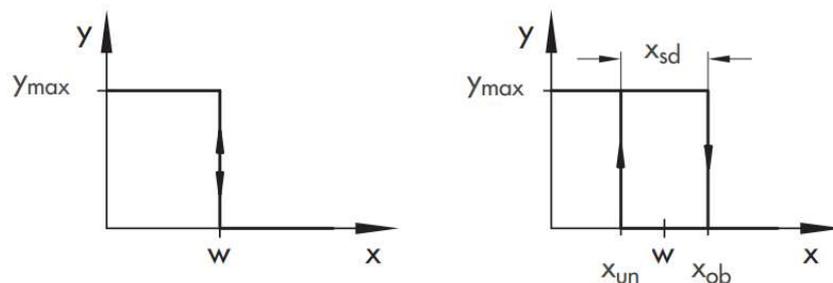


Abbildung 15: Kennlinie eines Zweipunktreglers ohne und mit Hysterese [32]

In Abbildung 16 ist der typische Verlauf der Stellgröße und Regelgröße bei einer Zweipunktregelung mit Hysterese dargestellt. Der maximale Wert der Regelgröße beträgt  $x_{max}$  und die Zeit zum ersten Ausschalten beträgt  $T_s$ . Die Dauer von Ein- und Aulselementen ist gleich lang. In der Praxis muss dies nicht immer der Fall sein. [32]

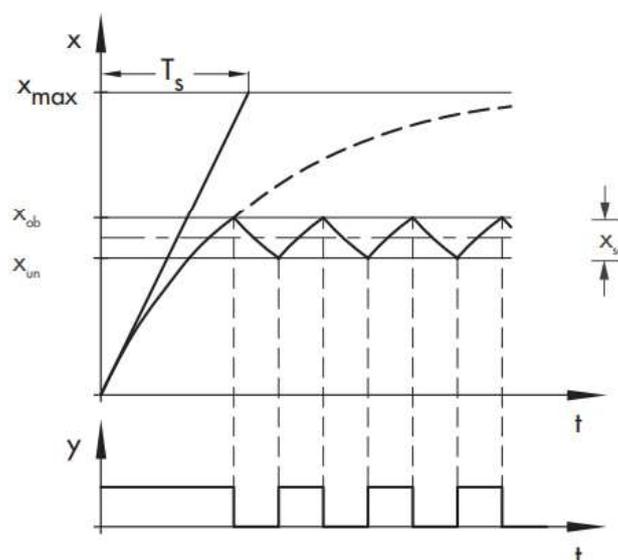


Abbildung 16: typischer Verlauf Zweipunktregelung mit Hysterese [32]

### **3. Methodik**

Die Gebiete Kaffeelagerung, Thermodynamik, autarkes System und Regelungstechnik wurden bisher theoretisch erläutert. Nun folgt die Umsetzung in die Praxis am Beispiel von SilaaCooling in Köthen und Thailand. Zu Beginn der Arbeit waren schon die Bestandteile des autarken Systems und der Klimatisierung vorhanden. Es war ein Raspberry Pi für die Steuerung verantwortlich. Der Aufbau der Geräte wird in Kapitel 3.1, dem Versuchsaufbau, geschildert. Im Kapitel 3.2 wird die Softwarearchitektur und das Programm auf dem Raspberry Pi zur Steuerung der Klimatisierung und des autarken Systems erläutert.

Teilweise haben die Geräte ein Steuergerät, das vom Raspberry Pi angesprochen wird. Die Softwarebeschreibung enthält die Programmablaufpläne für die Batteriesteuerung des autarken Systems und die Klimagerätesteuerung. Das Ergebnis der Methodik soll ein Programm zur Steuerung der Klimageräte und des autarken Systems für das Kaffeekühlhaus in Thailand sein. Da die Situation in Köthen und Thailand nicht identisch sind, wird aufbauend auf dem Versuchsaufbau ein Modell entworfen, das in einem Programm das Verhalten von verschiedenen Parametern und Geräten enthält. So kann das für Köthen erstellte Programm auf die Anlage in Thailand transferiert werden.

Der als Ausgangszustand vorhandene Algorithmus soll auf Fehler überprüft werden und es sollen offensichtliche Optimierungsmöglichkeiten genutzt werden. Danach werden im Kapitel 3.4 verschiedene Algorithmen entwickelt, die eine Verbesserung zum Ausgangszustand darstellen könnten. Um diese in Kapitel 3.6 zu vergleichen und die beste Lösung zu finden, werden im Kapitel 3.5 Tests durchgeführt, um Unterschiede in Genauigkeit, Geschwindigkeit und Effizienz feststellen zu können.

#### **3.1. Versuchsaufbau**

Diese Arbeit ist in Zusammenarbeit mit der axxeo GmbH und der Hochschule Anhalt entstanden. Der Versuchsaufbau befindet sich im Technologiezentrum Köthen (TZK) [33]. Die axxeo GmbH nimmt aktiv an Forschungs- und Entwicklungsprojekten in Kooperation mit verschiedenen Partnern teil. So erreicht die Firma einen hohen Stand der Technik. [34]

Die Hochschule Anhalt ist an verschiedenen Forschungsprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) beteiligt. Neben der Algenforschung, Agrarforschung, Lebensmittelforschung und vielen anderen Themengebieten ist auch SilaaCooling im BMBF-Programm „KMU-innovativ“ an der Hochschule Anhalt Forschungsthema. [35]

In Abbildung 17 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Er besteht aus XWT, PV-Modulen, Batterien, Laderegler, Wechselrichter, Lüfter, KSG und Entfeuchter, sowie Steuergeräten und Raspberry Pis. Zur Erfassung der Parameter stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung, um Informationen über die Außentemperatur, Außenluftfeuchtigkeit und anderen Wetterdaten sowie über die Innentemperatur und Innenluftfeuchtigkeit zu erhalten.

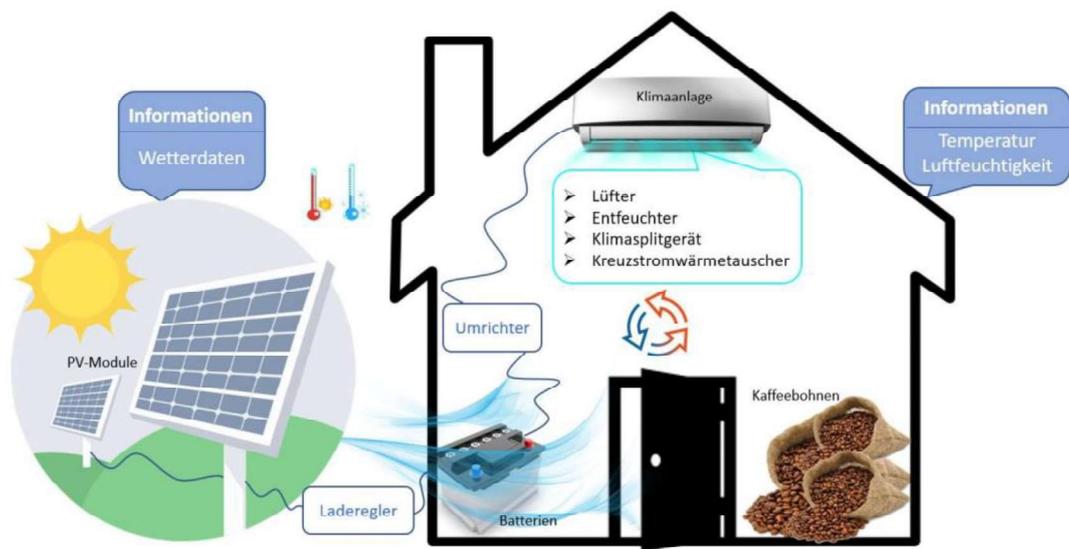


Abbildung 17: Schema Kaffeekühlhaus (Eigene Zeichnung)

Wie in der Theorie beschrieben liefern die PV-Module die elektrische Energie für die Klimageräte und überschüssige Energie wird mithilfe der Batterien gespeichert. In der Abbildung 17 sind Kaffeebohnen im Lagerraum dargestellt, die aber nicht in Köthen gelagert werden. Ziel des Versuchsaufbaus in Köthen ist die Geräte für Thailand zu testen und die wichtigen Parameter herauszuarbeiten, um die Einstellung verschiedenster Parameter vorzunehmen.

Im Testaufbau in Köthen werden die PV-Module aus Abbildung 18, IBC MonoSol 195 CS verwendet. Die PV-Module bestehen aus 18 Modulen mit einer Fläche von  $1,6 \text{ m}^2$  und ein Wirkungsgrad von 16 %.



Abbildung 18: Photovoltaik-Module TZK [36]

Zum Schutz der Batterien vor Überladung und Tiefenentladung, wird der Laderegler Studer VT-65 verwendet. Das Prinzip des Ladereglers wurde in Kapitel 2.5.3 erläutert. In Abbildung 19 ist das Gerät mit der Nummer 1 beschriftet, es arbeitet bei einer Temperatur von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  und bei jeder relativen Luftfeuchtigkeit.



Abbildung 19: Laderegler und Wechselrichter TZK [36]

Um die Verbraucher mit Wechselstrom zu versorgen, wird ein Wechselrichter benötigt, da die Photovoltaik-Module und die Batterien mit Gleichstrom arbeiten. Im Versuchsaufbau in Köthen, wie in Abbildung 19 mit der Nummer 2 zu sehen, wird dazu der Wechselrichter Studer XTM 2600-48 verwendet.

Zur Speicherung der überschüssigen Solarenergie werden zwei Batteriestränge verwendet. Ein Batteriestrang besteht aus Blei-Säure-Batterien mit einer Kapazität von 120 Ah. Für die Überbrückung der Kalibrierung des ersten Batteriestrangs steht ein zweiter Batteriestrang aus Blei-Gel-Batterien zur Verfügung. Dieser Batteriestrang, mit einer Kapazität von 55 Ah, ist in Abbildung 20 mit 1 gekennzeichnet. Die Blei-Gel-Batterien sind mit 2 gekennzeichnet. Die Kalibrierung ist notwendig um den korrekten Ladezustand des ersten Batteriestrangs zu bestimmen.

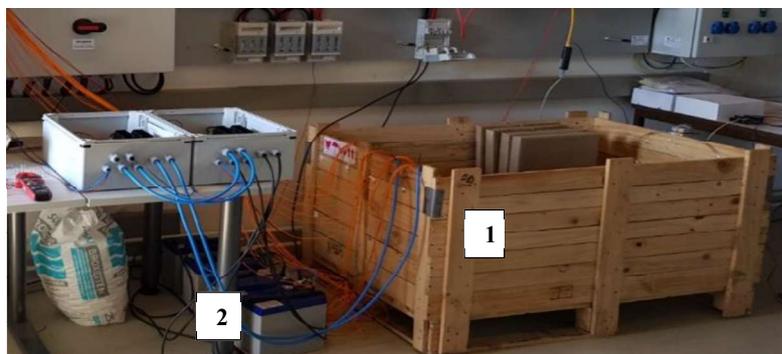


Abbildung 20: Batteriestränge TZK [36]

Die Batteriestränge dürfen nicht unter 50 % entladen werden, da sonst die Lebensdauer der Batterien zu stark abnimmt. Der Zusammenhang von Lebensdauer und Entladung ist in

Abbildung 21 dargestellt. Es lässt sich ablesen, dass bei einer Entladung um 100 % nur 600 Ladezyklen möglich sind. Bei einer Entladung um 20 % sind 3600 Ladezyklen möglich. Das Optimum von Entladung und Ladezyklen liegt bei 50 %. Mit D.O.D ist depth of discharge gemeint, das heißt wie stark die Batterien in einem Ladezyklus entladen werden.

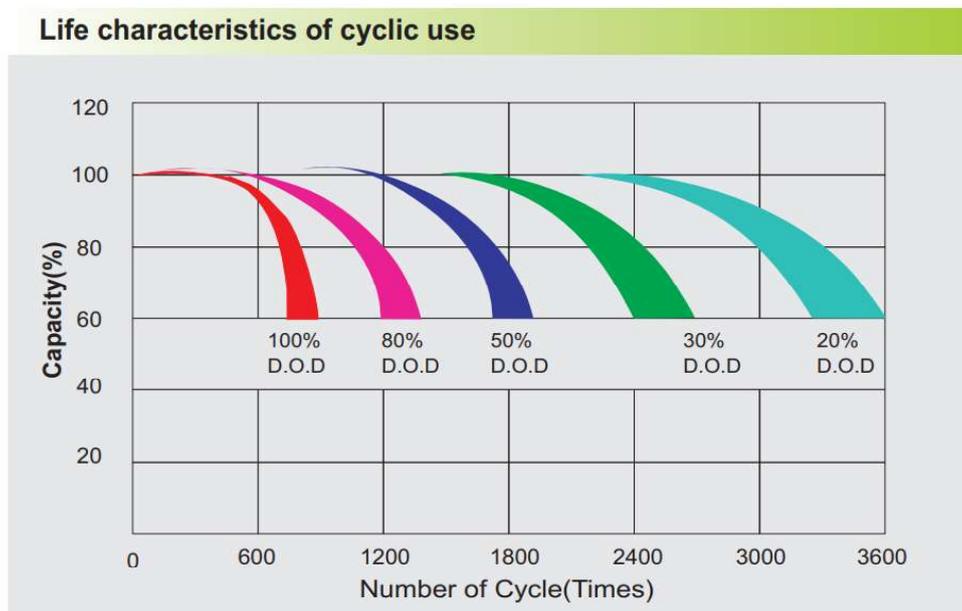


Abbildung 21: Zusammenhand Entladung und Lebensdauer [37]

Zur Einhaltung der Temperaturparameter wird ein KSG eingesetzt. Es handelt sich um ein ASYG12LMCE von Fujitsu. Dieses besteht aus einer Kombination aus Außengerät und Innengerät, die in Abbildung 22 dargestellt sind. Das KSG hat eine maximale Kühlleistung von 3,4 kW. Die durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme beträgt 0,97 kW beim Kühlen.



Abbildung 22: KSG innen und außen TZK [36]

Um die relative Luftfeuchtigkeit im Lagerraum adäquat zu halten, wird der Entfeuchter TROTEC DH 25 S verwendet. Die Abbildung 23 zeigt dieses Gerät, welches bis zu 40 Liter pro 24 Stunden entfeuchten kann. Die elektrische Nennleistung beträgt 0,77 kW. Der Arbeitsbereich des Geräts beträgt 1 bis 30 °C, das heißt hier arbeitet das Gerät von 1 % bis 100 % relative Luftfeuchtigkeit. Ab 30 °C beträgt dieser Arbeitsbereich nur noch 35 bis 90 %. Ab 32 °C arbeitet der Entfeuchter nur noch bis 70 % relative Luftfeuchtigkeit.



Abbildung 23: Entfeuchter TZK [36]

Bei der Lagerung von Kaffeebohnen in geschlossenen Lagerhäusern erhöht sich mit der Zeit die  $CO_2$ -Konzentration in der Luft. Betritt ein Mitarbeiter das Kaffeekühlhaus bei einem Zustand hoher  $CO_2$ -Konzentration besteht die Gefahr, dass der Mitarbeiter durch die hohe  $CO_2$ -Konzentration ohnmächtig wird oder gar erstickt. Um dem entgegenzuwirken, wurde im Projektverlauf die Entscheidung getroffen ein XWT zu benutzen. Die Auswahl fiel auf das Gerät Helios KWL EC 170 W, welches einen maximalen Volumenstrom von  $200 \frac{m^3}{h}$  und eine durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme von 100 W aufweist. In Abbildung 24 ist der XWT im TZK dargestellt.



Abbildung 24: Kreuzgegenstromwärmetauscher TZK [36]

Zum Luftaustausch von Lagerraum und Technikraum wird bei SilaaCooling der Lüfter Helios AV 100 verwendet, welcher in Abbildung 25 dargestellt ist. Dieser kann einen maximalen Volumenstrom von  $310 \frac{m^3}{h}$  bis zu einer maximalen Temperatur von  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  bewirken. [38]



Abbildung 25: Lüfter Helios AV 100 [38]

Nach den Geräten des autarken Systems und den Klimageräten folgen nun die Steuergeräte für beide Systeme. Um das Batteriemanagement durchzuführen, was die Messung der Batteriekennwerte und die Steuerung des aktiven Batteriestrangs betrifft, wurde speziell für SilaaCooling ein BSG-48 Steuergerät mit den Modulen BSM-48/1 und BSM-48/2 von der Koralewski Industrie-Elektronik oHG entwickelt, welche in Abbildung 26 dargestellt sind.

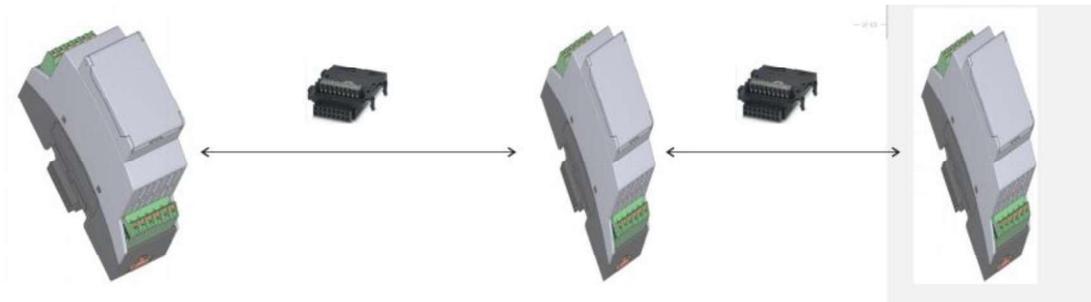


Abbildung 26: Batterie-Steuer-Gerät und Batterie-Spannungs-Messgerät [39]

Zusätzlich wurde von der Koralewski Industrie-Elektronik oHG zur Ansteuerung des KSGs das Steuergerät STG-48\_G mit den Modulen STG-48\_EW/1 und STG-48\_EW/2 entwickelt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 27 zu sehen.

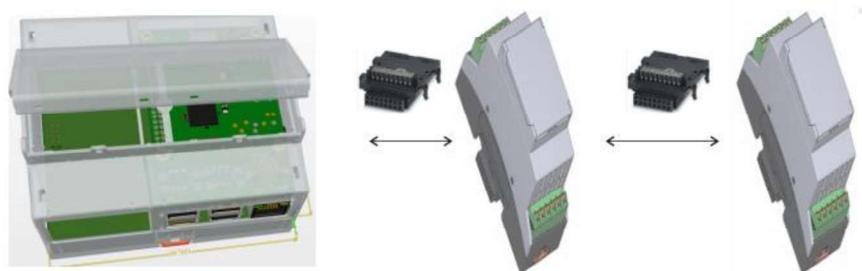


Abbildung 27: Steuer-Gerät und Steuergeräteerweiterung [40]

Zusätzlich zu den beschriebenen Bauteilen existieren weitere Kommunikationsmodule und Relais zur Verbindung der Geräte an Steuercomputer. Bei SilaaCooling wird als zentraler Steuercomputer ein Raspberry Pi eingesetzt. Außerdem existieren Raspberry Pis zur Messdatenverarbeitung und zur cloudbasierten Datenablage in Datenbanken. In der Abbildung 28 ist die Vernetzung der Geräte symbolisch dargestellt.

Durch die Nutzung des Clouddienstes Grafana können die aktuellen und vergangenen Messdaten und die errechneten Steuerbefehle angezeigt werden. Vor Beginn dieser Arbeit war die Architektur aus Abbildung 28 schon vorhanden. Der Inhalt dieser Arbeit bezieht sich auf die Entwicklung eines Programms, das auf dem Raspberry Pi läuft, an das die Steuergeräte STG-48 und BSG-48 angeschlossen sind.

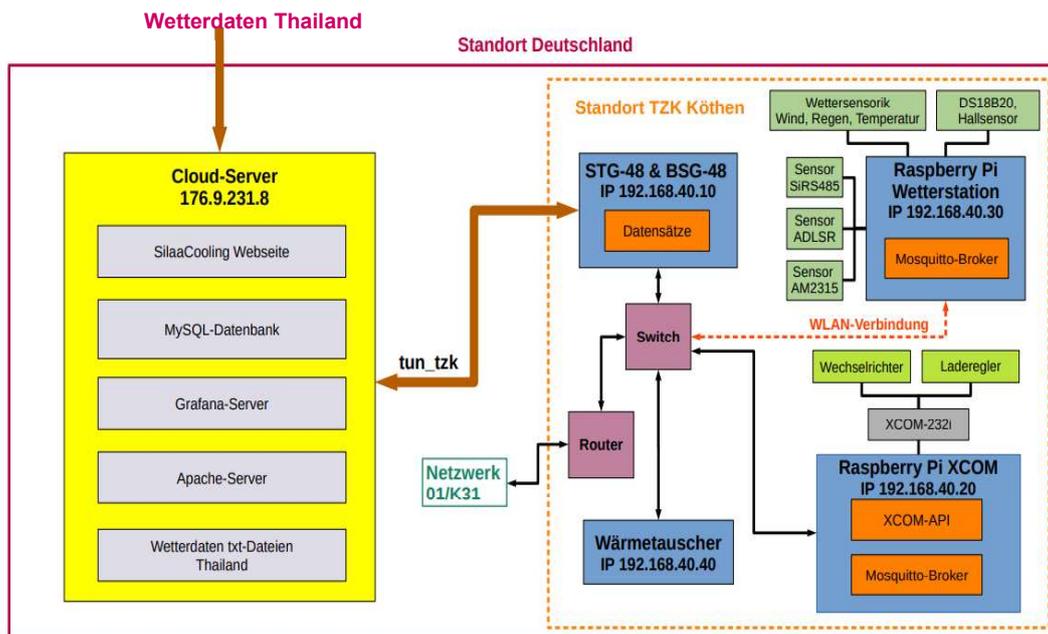


Abbildung 28: SilaaCooling Architektur [41]

Aus der Abbildung 28 lässt sich ablesen, dass die Sensoren an einem Raspberry Pi angeschlossen sind. Die Informationen, die von den Sensoren gewonnen werden sind: Lagerraumtemperatur, Technikraumtemperatur, Lagerraumluftfeuchtigkeit, Außentemperatur, Außenluftfeuchtigkeit,  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum, Regen und Sonneneinstrahlung. Dafür stehen die Sensoren DS18B20, Hallensensor, Sensor SiRS485, Sensor ADLSR, Sensor AM2315 zur Verfügung. Die gemessenen Werte werden im Cloud-Server abgelegt.

### 3.2. Bestehende Software und Programmablaufpläne

Die beschriebenen Geräte aus dem vorherigen Kapitel befinden sich im TZK. Die Programmierung erfolgt anhand des geplanten Aufbaus von SilaaCooling in Thailand. Dieser Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

Im Lagerraum befinden sich die Kaffeebohnen, das KSG, der XWT und der Entfeuchter. In der Außenwand ist eine Vorrichtung für den Zuluflüster vorgesehen. Zusätzlich zum Lagerraum ist ein Technikraum geplant, in dem die Schaltschränke aufgestellt werden sollen. In der Wand zwischen Lagerraum und Technikraum soll ein Abluftlüfter eingebaut werden. In der Außenwand vom Technikraum soll eine Lamelle zur Luftabgabe installiert werden. Dieser Aufbau kann in Köthen nicht direkt repliziert werden. Die Geräte sind in einem Labor, im TZK, untergebracht, das als Versuchsaufbau dient. Dieser Versuchsaufbau und die im Folgenden beschriebene Programmierung war zu Beginn dieser Arbeit schon vorhanden. Im ersten Schritt erfolgt eine Beschreibung dieses Programms. Es existiert ein Programm ‚maincontrol.py‘, das

dazu dient die gewünschten Parameter im Kaffeekühlhausprototyp aufrecht zu erhalten. In Abbildung 29 ist der Programmablaufplan dieses Programms dargestellt.

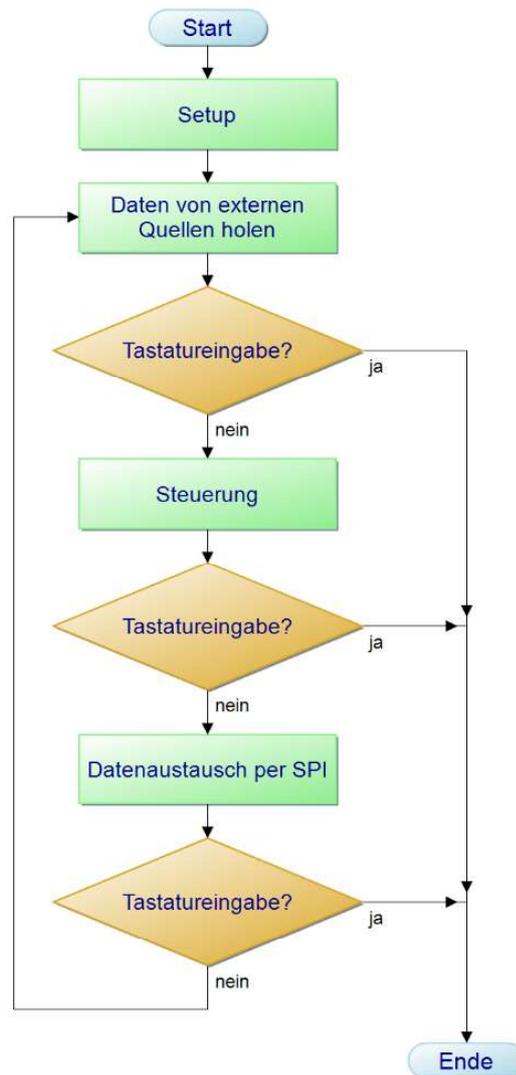


Abbildung 29: maincontrol

Am Anfang werden im Prozess „Setup“ die Kommunikationsschnittstellen initialisiert und die Sollwerte, sowie die Struktur der Textdateien zur Kommunikation zwischen den Geräten festgelegt. Nach dem Setup beginnt eine Schleife, deren Befehle immer wieder wiederholt werden. Nach Abarbeitung des Anweisungsblocks beginnt eine Wartezeit, damit alle 10 Sekunden eine neue Schleifeniteration startet. Ein Tastendruck bricht die aktuelle Schleifeniteration ab und stoppt das Programm.

Der erste Schritt einer Schleifeniteration ist die Eingabe von Messdaten der Sensoren, dem Ladezustand der Batterien aus Berechnungen und der Ströme und Spannungen von Wechselrichter und Laderegler aus externen Quellen. In der Abbildung 30 ist der zweite Schritt einer Schleifeniteration, die „Steuerung“ dargestellt.

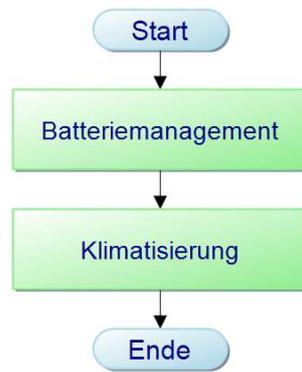


Abbildung 30: Steuerung

Diese besteht aus zwei Teilen: dem Batteriemanagement und der Klimatisierung, auf die später noch genauer eingegangen wird. Am Ende einer Schleifeniteration werden die Daten per SPI-Protokoll ausgetauscht. So werden die aktiven Batterien und die Verbraucher gesteuert. In den zwei Ablaufplänen in Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Programmablaufpläne für die Klimatisierung und das Energiesystem dargestellt.

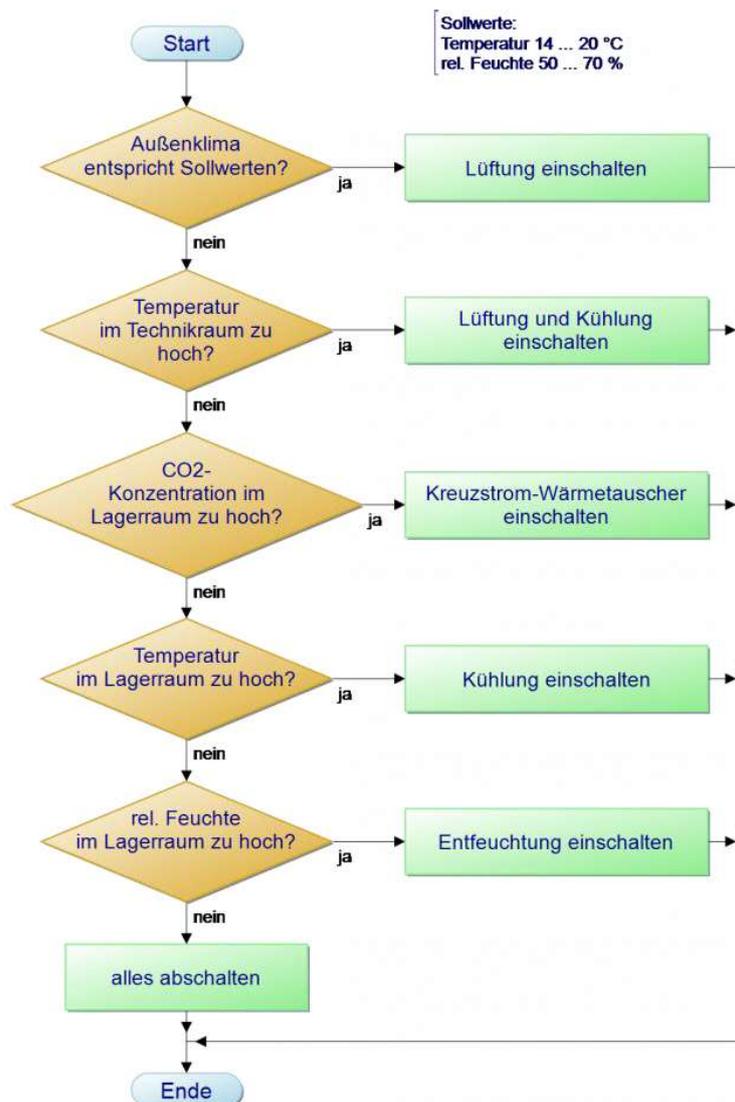


Abbildung 31: Programmablaufplan Klimatisierung Schwellwertalgorithmus [42]

Der adäquate Bereich für die Lagerraumtemperatur ist zwischen 14 °C und 20 °C. Die relative Feuchtigkeit im Lagerraum soll zwischen 50 % und 70 % liegen. Im Technikraum soll die Temperatur 25 °C nicht übersteigen und die  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum soll maximal 1000 ppm betragen.

Um diese Parameter einzuhalten wird immer wieder derselbe Ablauf wiederholt. Zuerst wird überprüft ob die aktuelle Außentemperatur und die Außenluftfeuchtigkeit den Sollwerten entspricht. Ist das der Fall, wird die Außenluft genutzt um die Parameter im Lagerraum und Technikraum in die geforderten Bereiche zu bringen. Sonst werden die Lüfter und das KSG eingeschaltet. Falls die Technikraumtemperatur in Ordnung ist, wird überprüft, ob die  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum zu hoch ist. Wenn die Bedingung erfüllt ist, wird der XWT eingeschaltet. Ist die  $CO_2$ -Konzentration im adäquaten Rahmen, wird gecheckt, ob die Lagerraumtemperatur zu hoch ist, woraufhin das KSG aktiviert wird. Schließlich wird der Zustand der relativen Luftfeuchtigkeit im Lagerraum betrachtet. Sollte sie zu hoch sein, wird der Entfeuchter eingeschaltet. Wenn alle vorherigen Überprüfungen negativ sind, werden alle Geräte abgeschaltet.

Für das Energiesystem ist zu beachten, dass kein Messgerät zur genauen Ladezustandsmessung zur Verfügung steht. Die Ermittlung des Ladezustands wird durch ein Programm durchgeführt, dessen Erläuterung nicht Teil dieser Arbeit ist, sondern als gegeben betrachtet wird. Jedoch muss dafür von dem Hauptbatteriesatz 1, für die Kalibrierung auf den Ersatzbatteriesatz 2 umgeschaltet werden. Das Programm des Energiesystems ist neben der Kalibrierung für den nachhaltigen Betrieb der Batterien zuständig.

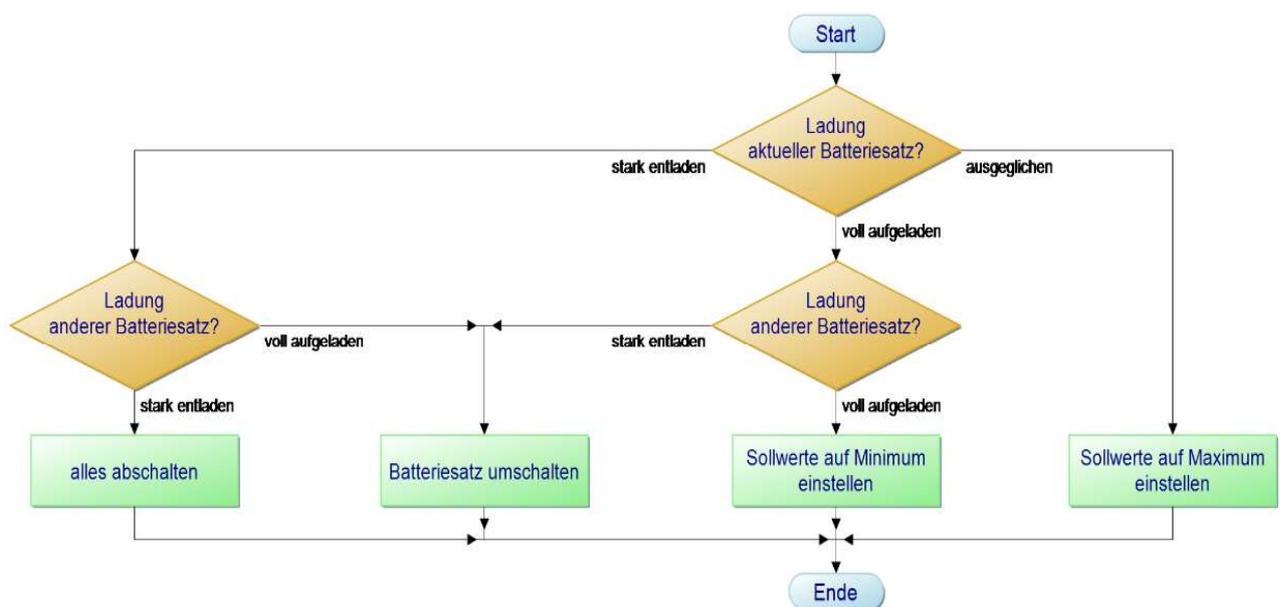


Abbildung 32: Programmablaufplan Energiesystem [43]

Dafür wird der Ablauf in Abbildung 32 immer wieder wiederholt. Zuerst wird entschieden ob die Ladung des aktiven Batteriesatzes voll aufgeladen, ausgeglichen oder stark entladen ist. Bei ausgeglichenem Zustand werden die Sollwerte auf Maximum eingestellt. Das bedeutet der Sollwert für die Lagerraumtemperatur liegt bei 20 °C und der Sollwert für die relative Luftfeuchtigkeit im Lagerraum liegt bei 70 %. Sind beide Batteriesätze stark entladen, werden die Klimageräte und der Wechselrichter abgeschaltet. Ist ein Batteriesatz aktiv und stark entladen, der andere aber voll aufgeladen, wird vom aktiven auf den anderen Batteriesatz umgeschaltet. Ist der aktive Batteriesatz voll aufgeladen und der andere Batteriesatz auch, werden die Sollwerte auf Minimum eingestellt. Das bedeutet der Sollwert für die Lagerraumtemperatur liegt bei 18 °C und der Sollwert für die relative Luftfeuchtigkeit im Lagerraum liegt bei 50 %.

Der Grund für die Umschaltung, der Sollwerte von Minimum auf Maximum und umgekehrt, ist die verfügbare gespeicherte Energie der Batterien und die verfügbare Solarenergie effizient mit dem Verbrauch der Klimageräte abzustimmen. Um vorhandene Solarenergie durch voll aufgeladene Batterien nicht ungenutzt zu lassen, wechseln die Klimageräte bei maximalem Ladezustand der Batterien auf einen höheren Verbrauch. Sind die Batterien nicht voll aufgeladen, sollen die Klimageräte nur so wenig Energie wie möglich verbrauchen, um die Einhaltung der Bereiche der Parameter zu garantieren.

### **3.3. Modell**

Die Veränderungen der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Kaffeekühlhaus in Abhängigkeit verschiedener Parameter sollen analysiert und verschiedene Algorithmen sollen unter gleichen Bedingungen verglichen werden. Dazu wurde ein Modell mit den thermodynamischen Bilanzgleichungen der Enthalpie, der Masse der trockenen Luft und des Dampfs erstellt. Zusätzlich ist im Modell eine Bilanzgleichung des Ladezustands der Batterien enthalten. Dafür werden die thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten, sowie Python als Programmiersprache verwendet.

Die Simulation ist nicht genau, sondern stellt die ungefähren Veränderungen der Enthalpie, der Massen und der Ladezustände der Batterien dar. Der Anspruch ist die grundsätzlichen dynamischen Zusammenhänge zu beschreiben. Für die Parametrierung ist das Modell zu ungenau, aber es kann gezeigt werden, wie sie prinzipiell durchzuführen ist. In der Simulation des Modells werden in jeder Schleifeniteration die Parameter neu berechnet. Die verwendeten Gleichungen werden im Folgenden präsentiert. In Abbildung 33 sind die Bilanzgrößen des Modells dargestellt.

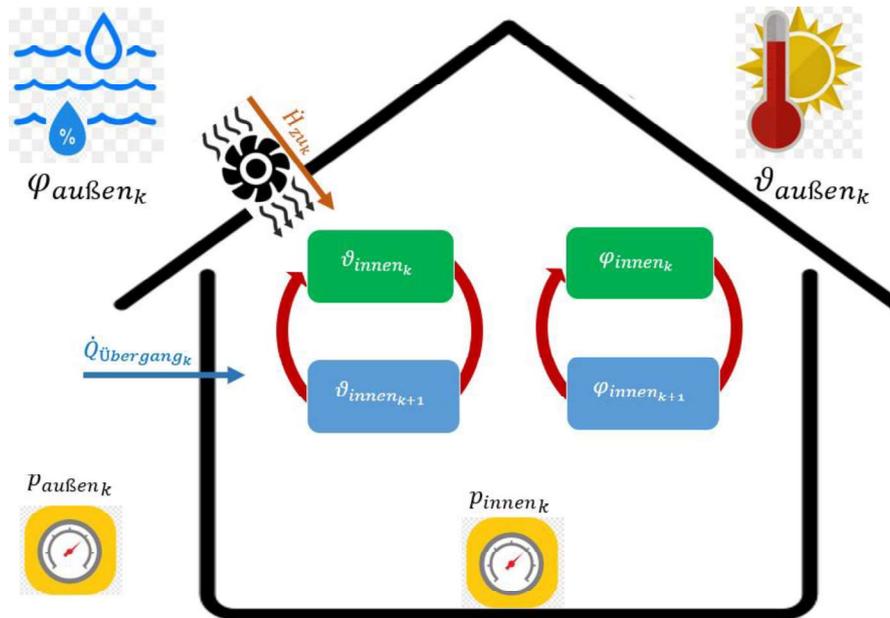


Abbildung 33: Skizze Modell (Eigene Zeichnung)

Aus Kombination von (1), (2) und (3) ist die Enthalpie im Kaffeekühlhaus von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig. Durch Außeneinflüsse, wie z.B. starke Temperaturunterschiede zur Umgebung, kann sich innerhalb eines Zeitschritts  $\Delta t$  die ursprüngliche Enthalpie  $H_{\text{innen}_k}$  zu einer geänderten Enthalpie  $H_{\text{innen}_{k+1}}$  verändern. Die abgelaufene Zeit  $t$  ist das Produkt der Anzahl der Zeitschritte  $k$  und der Länge eines Zeitschritts  $\Delta t$ .

$$t = k \cdot \Delta t \quad (19)$$

Die Enthalpieänderungen sind: der Enthalpieübergang  $\dot{H}_{\text{Übergang}_k}$  über die Außenwände, die zugeführte Enthalpie  $\dot{H}_{zu_k}$  durch den Zuluflüfter, die Enthalpieänderung durch das Klimasplitgerät  $\dot{H}_{K_k}$  und die Entfeuchterenthalpieänderung  $\dot{H}_{E_k}$ .

$$H_{\text{innen}_{k+1}} = H_{\text{innen}_k} + \dot{H}_{\text{Übergang}_k} \cdot \Delta t + \dot{H}_{zu_k} \cdot \Delta t + \dot{H}_{K_k} \cdot \Delta t + \dot{H}_{E_k} \cdot \Delta t \quad (20)$$

Zusätzlich zur Enthalpiebilanz in (20) müssen noch die Massenbilanzen der trockenen Luft im Lagerraum  $m_{L,\text{innen}_k}$  und des Dampfes im Lagerraum  $m_{D,\text{innen}_k}$  betrachtet werden. Sie bestehen aus den Massenänderungen:  $\dot{m}_{L,zu_k}$  bzw.  $\dot{m}_{D,zu_k}$  durch den Lüfter,  $\dot{m}_{L,K_k}$  und  $\dot{m}_{D,K_k}$  durch das KSG und  $\dot{m}_{L,E_k}$  und  $\dot{m}_{D,E_k}$  durch den Entfeuchter. So ergeben sich pro Zeitschritt die Massenänderungen  $m_{L,\text{innen}_{k+1}}$  und  $m_{D,\text{innen}_{k+1}}$ .

$$m_{L,\text{innen}_{k+1}} = m_{L,\text{innen}_k} + \dot{m}_{L,zu_k} \cdot \Delta t + \dot{m}_{L,K_k} \cdot \Delta t + \dot{m}_{L,E_k} \cdot \Delta t \quad (21)$$

$$m_{D,innen_{k+1}} = m_{D,innen_k} + \dot{m}_{D,zu_k} \cdot \Delta t + \dot{m}_{D,K_k} \cdot \Delta t + \dot{m}_{D,E_k} \cdot \Delta t \quad (22)$$

Der Lüfter bewirkt eine Enthalpieänderung  $\dot{H}_{zu_k}$ , abhängig von der spezifischen Enthalpie der zugeführten Luft  $h_{zu_k}$  und dem Massenstrom, der von außen zugeführten feuchten Luft  $\dot{m}_{f,zu_k}$ . Dieser ist abhängig von der Leistung des Lüfters, welche im Modell als Konstante angenommen wird, wenn der Lüfter aktiv ist.

$$\dot{H}_{zu_k} = h_{zu_k} \cdot \dot{m}_{f,zu_k} \quad (23)$$

Die feuchte Luft besteht aus der trockenen Luft  $\dot{m}_{L,zu_k}$  und dem Dampf  $\dot{m}_{D,zu_k}$ .

$$\dot{m}_{f,zu_k} = \dot{m}_{L,zu_k} + \dot{m}_{D,zu_k} \quad (24)$$

Um die spezifische Enthalpie der Außenluft zu bestimmen, kann (1) angewendet werden und es ergibt sich:

$$h_{zu_k} = c_{p,L} \cdot \vartheta_{au\beta en_k} + x_{zu_k} \cdot (c_{p,D} \cdot \vartheta_{au\beta en_k} + r_0) \quad (25)$$

Die Größen  $c_{p,L}$ ,  $c_{p,D}$  und  $r_0$  sind, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, Naturkonstanten.  $\vartheta_{au\beta en_k}$  ist eine der zentralen Größen des Modells. Im Verlauf eines Jahres und eines Tages verändert sich die Außentemperatur, auf die kein Einfluss genommen werden kann. Die letzte Größe aus (25), die Wasserbeladung der Umgebung  $x_{zu_k}$ , kann nach (3) berechnet werden.

$$x_{zu_k} = 0,622 \frac{\varphi_{au\beta en_k} \cdot p_{s,au\beta en_k}}{p_{au\beta en_k} - \varphi_{au\beta en_k} \cdot p_{s,au\beta en_k}} \quad (26)$$

Im Modell ist die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung  $\varphi_{au\beta en_k}$  wie  $\vartheta_{au\beta en_k}$  veränderlich. Zur Vereinfachung wird der Druck der Umgebung  $p_{au\beta en_k}$  mit 1 bar als konstant betrachtet. Der Sättigungsdruck der Umgebung  $p_{s,au\beta en_k}$  kann mit (4) berechnet werden. Mit den Umgebungsgrößen ergibt sich:

$$p_{s,au\beta en_k} = 6,112 \text{ hPa} \cdot e^{\frac{m \cdot \vartheta_{au\beta en_k}}{T_n + \vartheta_{au\beta en_k}}} \quad (27)$$

Die Größen  $m$  und  $T_n$  sind, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, konstant.  $\vartheta_{au\beta en_k}$  ist die Außentemperatur in °C. Für (21) und (22) müssen noch die Größen  $\dot{m}_{D,zu_k}$  und  $\dot{m}_{L,zu_k}$  mit Hilfe von (24) und (2) berechnet werden.

$$\dot{m}_{L,zu_k} = \frac{\dot{m}_{f,zu_k}}{1 + x_{zu_k}} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{D,zu_k} = \dot{m}_{f,zu_k} - \dot{m}_{L,zu_k} \quad (29)$$

Nach  $\dot{H}_{zu_k}$  folgen nun die Betrachtungen zu  $\dot{H}_{\text{Übergang}_k}$ . Da kein Massenstrom durch die Wand möglich ist, kann festgelegt werden, dass der Enthalpiestrom mit Hilfe des Wärmestroms  $\dot{Q}_{\text{Übergang}_k}$  berechnet werden kann. Dieser Wärmestrom lässt sich nach (5) bestimmen und es ergibt sich (30).

$$\dot{Q}_{\text{Übergang}_k} = (\vartheta_{\text{außen}_k} - \vartheta_{\text{innen}_k}) \cdot \beta \quad (30)$$

$$\beta = k_A \cdot A_A + k_D \cdot A_D + k_T \cdot A_T \quad (31)$$

$$k_A = \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\frac{\lambda_{PB}}{s_{PB}}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{XPS}}{s_{XPS}}} + \frac{1}{\alpha_a} \right)^{-1} = 0,23 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (32)$$

$$k_T = 1,5 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (33)$$

$$k_D = 0,58 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (34)$$

Die Wärmeübergangskonstanten haben vier Erscheinungsformen: die der Wand  $k_A$ , die des Dachs  $k_D$ , die der Tür  $k_T$  und die des Bodens  $k_B$ . Letztere wurde zur Vereinfachung vernachlässigt. Die Wärmeübergangseigenschaften hängen von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , sowie der Stoffdicke  $s$  ab. Der konvektive Wärmetransport an der Innenwand  $\alpha_i$  bzw. der Außenwand  $\alpha_a$  wurden von efa mit  $8,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  bzw.  $23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  bestimmt. Die Fläche der Wand  $A_A$ , der Tür  $A_T$  und des Dachs  $A_D$  betragen jeweils  $52,5 m^2$ ,  $4,4 m^2$  und  $30,3 m^2$ . Die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton  $\lambda_{PB}$  und extrudiertem Polystyrol  $\lambda_{XPS}$  betragen  $0,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  und  $0,04 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . Die Dicke der beiden Stoffe  $s_{PB}$  und  $s_{XPS}$  betragen 75 mm und 150 mm.

Ein weiterer Teil der Gleichung (20) ist der Initialwert der Enthalpie im Lagerraum  $H_{\text{innen}_k}$ . Analog zu (23) bis (29) gilt:

$$H_{\text{innen}_k} = h_{\text{innen}_k} \cdot (m_{L,\text{innen}_k} + m_{D,\text{innen}_k}) \quad (35)$$

$$h_{innen_k} = c_{p,L} \cdot \vartheta_{innen_k} + x_{innen_k} \cdot (c_{p,D} \cdot \vartheta_{innen_k} + r_0) \quad (36)$$

$$x_{innen_k} = \frac{m_{D,innen_k}}{m_{L,innen_k}} \quad (37)$$

$$x_{innen_k} = 0,622 \frac{\varphi_{innen_k} \cdot p_{s,innen_k}}{p_{innen_k} - \varphi_{innen_k} \cdot p_{s,innen_k}} \quad (38)$$

$$p_{s,innen_k} = 6,112 \text{ hPa} \cdot e^{\frac{m \cdot \vartheta_{innen_k}}{T_n + \vartheta_{innen_k}}} \quad (39)$$

$$m_{f,innen_k} = m_{D,innen_k} + m_{L,innen_k} \quad (40)$$

Zur Bestimmung der Masse der feuchten Luft  $m_{f,innen_k}$  ist das Volumen der feuchten Luft  $V_{f,innen_k}$  im Lagerraum gegeben mit  $80,017 \text{ m}^3$ . Um das Volumen in eine Masse umzurechnen, muss die Dichte der feuchten Luft im Lagerraum  $\rho_{f,innen_k}$  berechnet werden.

$$\rho_{f,innen_k} = \frac{p_{innen_k} \cdot (1 + x_{innen_k})}{R_L \cdot \vartheta_{innen_k} \left(1 + \frac{R_D}{R_L} \cdot x_{innen_k}\right)} \quad (41)$$

Der Druck im Lagerraum wird als Konstante  $p_{innen_k}$  betrachtet, mit einem Wert von 1 bar. Die spezifische Gaskonstante der Luft  $R_L$  beträgt  $0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  und die spezifische Gaskonstante des Dampfs  $R_D$  beträgt  $0,461 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ . Die Wasserbeladung im Lagerraum  $x_{innen_k}$  kann mit (38) berechnet werden.

Jede Schleifeniteration der Simulation startet mit einer initialen Innentemperatur  $\vartheta_{innen_k}$  und initialen relativen Innenluftfeuchtigkeit  $\varphi_{innen_k}$ . Durch Anwendung der Berechnungen eines Iterationsschritts ergibt sich eine geänderte Innentemperatur  $\vartheta_{innen_{k+1}}$  und eine geänderte relative Innenluftfeuchtigkeit  $\varphi_{innen_{k+1}}$ . Am Ende eines Simulationsschritts wird  $\vartheta_{innen_k}$  zu  $\vartheta_{innen_{k+1}}$  und  $\varphi_{innen_k}$  zu  $\varphi_{innen_{k+1}}$ . Im ersten Iterationsschritt können die initialen Werte frei festgelegt werden. Danach errechnet das Modell mit Hilfe folgende Formel immer neue Werte für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit.

$$\vartheta_{innen_{k+1}} = \frac{h_{innen_{k+1}} - x_{innen_{k+1}} \cdot r_0}{c_{p,L} + x_{innen_{k+1}} \cdot c_{p,D}} \quad (42)$$

$$x_{innen_{k+1}} = \frac{m_{D,innen_{k+1}}}{m_{L,innen_{k+1}}} \quad (43)$$

$$h_{innen_{k+1}} = \frac{H_{innen_{k+1}}}{(m_{L,innen_{k+1}} + m_{D,innen_{k+1}})} \quad (44)$$

$$\varphi_{innen_{k+1}} = \frac{p \cdot p_{s,innen_{k+1}} + x_{innen_{k+1}}}{p_{s,innen_{k+1}} \cdot (0,622 + x_{innen_{k+1}})} \quad (45)$$

$$p_{s,innen_{k+1}} = 6,112 \text{ hPa} \cdot e^{\frac{m \cdot \vartheta_{innen_{k+1}}}{T_n + \vartheta_{innen_{k+1}}}} \quad (46)$$

Um die Werte für (21) und (22) zu bestimmen, gelten folgende Zusammenhänge:

$$m_{f,innen_k} = \rho_{f,innen_k} \cdot V_{f,innen_k} \quad (47)$$

$$m_{L,innen_k} = \frac{m_{f,innen_k}}{1 + x_{innen_k}} \quad (48)$$

$$m_{D,innen_k} = m_{f,innen_k} - m_{L,innen_k} \quad (49)$$

Es folgt die Beschreibung des Enthalpiestroms des KSGs  $\dot{H}_{K_k}$ . Hier gilt ähnlich wie bei  $\dot{H}_{\text{Übergang}_k}$ , dass der Enthalpiestrom als Wärmestrom  $\dot{Q}_{K_k}$  betrachtet werden kann. Nach Tabelle 4 ist die Kühlleistung des KSGs von der Innen- und Außentemperatur abhängig.

$$\dot{H}_{K_k} = \dot{Q}_{K_k} = f(\vartheta_{innen_k}, \vartheta_{außen_k}) \quad (50)$$

Tabelle 4: Kühlleistung KSG in Abhängigkeit von Außentemperatur und Innentemperatur [44]

$\vartheta_{innen_k} \backslash \vartheta_{außen_k}$	18°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	32°C
20°C	3180W	3550W	3670W	3910W	4030W	4270W	4510W
25°C	3030W	3370W	3490W	3720W	3830W	4060W	4290W
30°C	2860W	3190W	3300W	3520W	3630W	3840W	4060W
35°C	2690W	2990W	3090W	3300W	3400W	3600W	3810W
40°C	2270W	2530W	2620W	2790W	2870W	3050W	3220W
43°C	2090W	2330W	2410W	2570W	2650W	2810W	2980W

Um  $\dot{Q}_{K_k}$  genau zu bestimmen, werden die Werte aus Tabelle 4 als Grundlage für eine Interpolation mit Python benutzt.

Nun ist es notwendig die Massenänderung des Dampfs des Entfeuchters  $\dot{m}_{L,E_k}$  zu bestimmen. Der Enthalpiestrom und die Massenänderung der trockenen Luft des Entfeuchters werden zur

Vereinfachung vernachlässigt. In Abbildung 34 ist die Abhängigkeit des Volumenstroms, der vom Entfeuchter hervorgerufen wird, von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit als Kennlinienfeld dargestellt. In Tabelle 5 ist das Kennlinienfeld tabellarisch dargestellt. Nun kann wie beim KSG eine Interpolation durchgeführt werden. Die Umrechnung von Volumen- zu Massenstrom erfolgt über die Dichte von Wasser  $\rho_{D_k}$ .

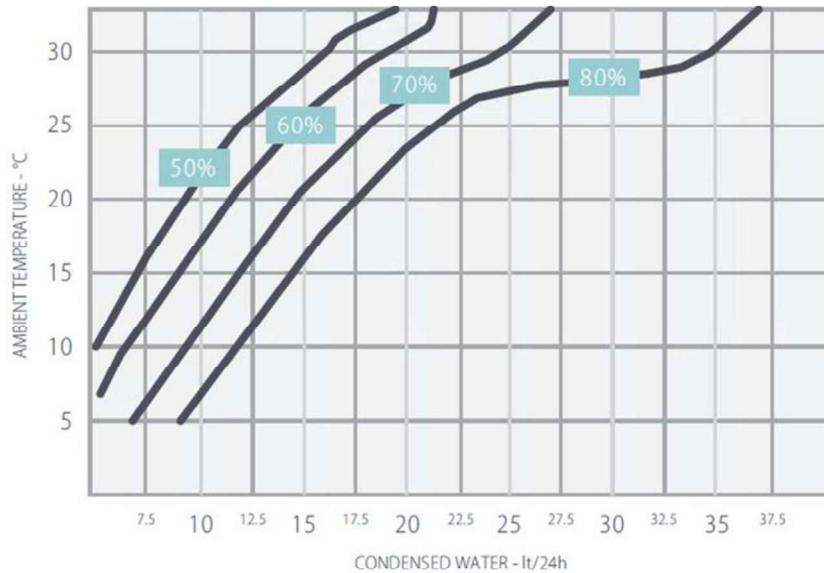


Abbildung 34: Kennlinienfeld Entfeuchter [45]

Tabelle 5: Kennlinienfeld Entfeuchter [45]

<b>T\F</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>
<b>30</b>	16,20	18,9	24,6	34
<b>25</b>	12,4	14,7	18	21,25
<b>20</b>	9,375	11,4	14,2	17,5
<b>15</b>	7,25	8,85	11,9	14,4
<b>10</b>	5,25	6,45	9,4	11,8

$$\dot{m}_{D,E_k} = \frac{\dot{V}(\vartheta_{innen_k}, \varphi_{innen_k})}{\rho_{D_k}} \quad (51)$$

Die Dichte von Wasser ist abhängig von der Temperatur, wobei die genauen Zahlenwerte aus Tabelle 6 abgelesen werden können. Für das Modell werden die dazwischenliegenden Werte mit Hilfe von Python interpoliert.

Tabelle 6: Dichte von Wasser [46]

Temperatur	Dichte	Temperatur	Dichte	Temperatur	Dichte
-10	0,99815	7	0,99993	70	0,97781
-5	0,99930	8	0,99988	80	0,97781
0	0,99987	9	0,99981	90	0,96534
1	0,99993	10	0,99973	100	0,95838
2	0,99997	20	0,99823	150	0,9173
3	0,99999	30	0,99567	200	0,8690
4	1,00000	40	0,99224	250	0,794
5	0,99999	50	0,98807	300	0,710
6	0,99997	60	0,98824	350	0,574

Es war gefordert  $\dot{H}_{zu_k}$  zu vernachlässigen, um das Modell zu vereinfachen. Somit war keine Betrachtung der Vorgänge im Technikraum möglich, da diese von  $\dot{H}_{zu_k}$  abhängig sind. Die Zusammenhänge des XWTs und damit die Veränderung der  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum werden aus Vereinfachungsgründen nicht betrachtet.

Neben der Thermodynamik der Klimatisierung muss noch das Energiesystem betrachtet werden. Wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, kann Solarenergie mit Hilfe von PV-Modulen in elektrische Energie umgewandelt werden. Die so gewonnene Energie wird im Modell mit  $E_{z_k}$  bezeichnet. Die Klimatisierungsgeräte benötigen je Iterationsschritt eine elektrische Energiemenge  $E_{v_k}$ . Die überschüssige elektrische Energie kann zur Ladung der Batterien genutzt werden. Der Ladezustand der Batterien, auf Englisch state of charge, am Anfang eines Simulationsschritts  $SOC_k$  kann zu Beginn der Simulation einmal festgelegt werden. Nach dem ersten und jedem weiteren Simulationsschritt wird der resultierende Ladezustand  $SOC_{k+1}$ , welcher den nächsten Startwert des Ladezustands  $SOC_k$  darstellt, berechnet. Analog zu (20) gilt:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{E_{v_k} \cdot \Delta t}{MaxLadung_{Batterien}} + \frac{E_{z_k} \cdot \Delta t}{MaxLadung_{Batterien}} \quad (52)$$

$MaxLadung_{Batterien}$  beschreibt die maximale Energie, die ein Batteriesatz speichern kann. Für die Berechnungen wurde die  $MaxLadung_{Batterien}$  mit Hilfe von (53) bestimmt.

$$MaxLadung_{Batterien} = 120 \text{ Ah} \cdot 48 \text{ V} = 5.760 \text{ Wh} \quad (53)$$

Der Energiebedarf der Verbraucher verändert sich, je nachdem ob das KSG, der Entfeuchter und später auch der XWT und die Lüfter aktiv sind. Der Wert  $E_{v_k}$  ergibt sich aus der Summe der elektrischen Leistung der momentan aktiven Verbraucher. In Tabelle 7 sind die elektrischen Leistungen der Klimageräte dargestellt.

Tabelle 7: Elektrische Leistung der Verbraucher (Eigene Tabelle)

Verbraucher	Elektrische Leistung P/kW
Lüfter	0,02
Entfeuchter	0,77
KSG	0,97
XWT	0,092

Im Modell wird vernachlässigt, dass die Klimageräte im Störfall oder beim Anlaufen eine höhere elektrische Leistung aufnehmen. Auch die Abhängigkeit der Kühlleistung und des Volumenstroms des Entfeuchters von der Zeit wird außer Acht gelassen. Es wird stattdessen immer mit der Nennleistung gearbeitet. Für die generierte elektrische Energie der Photovoltaikmodule  $E_{z_k}$  gilt folgender Zusammenhang:

$$E_{z_k} = S_k \cdot n \cdot A_{pV} \cdot \eta \quad (54)$$

Für die Sonneneinstrahlung  $S_k$  stehen historische Daten zu Verfügung, die für das Modell verwendet werden können. Dafür muss ein Startzeitpunkt und ein Zeitunterschied zwischen Messzeitpunkten festgelegt werden. Die Anzahl der Module  $n$  beträgt in Köthen 18. Ein Modul hat eine Fläche  $A_{pV}$  von  $1,6 \text{ m}^2$  und einen Wirkungsgrad  $\eta$  in Höhe von 0,16.

Zusammenfassend kann mit Hilfe des Modells der zeitliche Verlauf der Lagerraumtemperatur, der relativen Lagerraumluftfeuchtigkeit und des Ladezustands der Batterien aufgenommen werden. Dabei werden die in diesem Kapitel beschriebenen Gleichungen verwendet, um die Zusammenhänge der Raumluftechnik und der Energietechnik zu betrachten.

### 3.4. Algorithmen

In Abbildung 31 und Abbildung 32 wurden die originalen Programmablaufpläne für die Klimatisierung bzw. für das Energiesystem vorgestellt. Nach deren gründlicher Analyse wurden Schwachpunkte im Ablauf identifiziert. In diesem Kapitel werden Verbesserungsmöglichkeiten der originalen Programmierung beschrieben. Danach werden drei neue Algorithmen präsentiert. Alle Algorithmen haben das Ziel die Parameter für die Kaffeebohnenlagerung einzuhalten und die Batterien nicht unter 50 % zu entladen. Die Gründe dafür wurden in Kapitel 2.1 und 2.3.2 beschrieben.

#### 3.4.1. Verbessertes Schwellwertalgorithmus

Im originalen Schwellwertalgorithmus wurde in einem Programmdurchlauf nur eine Möglichkeit zur Verbesserung des Raumklimas betrachtet. Ist schon die erste Abzweigung wahr, dann werden die weiteren Fälle nicht betrachtet. Es kann aber der Fall eintreten, dass gleichzeitig die Temperaturen im Technikraum und im Lagerraum, sowie die relative Luftfeuchtigkeit und die  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum zu hoch sind, bzw. das drei oder zwei Parameter nicht in Ordnung sind. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Logiktable in Tabelle 8 aufgestellt, um die korrekte Ansteuerung der Klimageräte in Abhängigkeit der Sollwerte für die Lagerraumtemperatur  $W\_T, Lr$ , die Technikraumtemperatur  $W\_T, Tr$  und die Lagerraumfeuchtigkeit  $W\_F, Lr$  vorzunehmen. In der Logiktable gilt der Zusammenhang 1-eingeschaltet und 0-ausgeschaltet.

Es werden die Eigenschaften  $\vartheta_{au\beta en_k}$ ,  $\varphi_{au\beta en_k}$ ,  $\vartheta_{innen_k}$ ,  $\varphi_{innen_k}$  und  $\vartheta_{innen_{Technik}}$  betrachtet, um eine Entscheidung für das KSG, den Entfeuchter und die Lüfter Zulufter und Ablüfter zutreffen. Ist der Parameter größer als der Sollwert, wird eine 1 eingetragen, sonst wird eine 0 eingetragen. Die Entscheidung für den XWT bezieht sich nur auf die  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum. Ist sie zu hoch, muss der XWT eingeschaltet werden. Der erste Punkt „Außenklima entspricht Sollwerten“ hat keinen Effekt, da es sein kann, dass die Lüfter eingeschaltet werden, obwohl das Raumklima den Sollwerten entspricht. Das würde nur die Batterien unnötig belasten, was dem Ziel widerspricht eine hohe Lebensdauer der Batterien zu erreichen. Es wäre möglich die Außenluft bei adäquaten Bedingungen durch die Lüfter als Kühlung und Entfeuchtung zu benutzen, aber das KSG und der Entfeuchter sind dafür besser geeignet.

Wie in der Abbildung 3 zu sehen, kann der Abluftlüfter zur Kühlung des Technikraums benutzt werden. Es wurde entschieden, dass zum Druckausgleich im Lagerraum der Zuluftlüfter aktiv sein muss, wenn der Abluftlüfter aktiv ist. Ist die Temperatur im Technikraum zu hoch, muss

zusätzlich zur Lüftung das KSG aktiviert werden, um eine ausreichende Kühlung des Technikraums zu garantieren. Für den Entfeuchter gilt der gleiche Zusammenhang wie beim XWT, ist die relative Luftfeuchtigkeit im Lagerraum zu hoch, wird der Entfeuchter eingeschaltet.

Tabelle 8: Logiktablelle (Eigene Tabelle)

$\vartheta_{au\beta en_k}$	$\varphi_{au\beta en_k}$	$\vartheta_{innen_k}$	$\varphi_{innen_k}$	$\vartheta_{innen_{Technik}}$	KSG	Entfeuchter	Zuluft-lüfter	Abluft-lüfter
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	1	1
0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	0	1	1
0	0	1	1	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	0	1	1
1	1	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

Die Vereinfachung der Logiktablelle ergibt folgende Gleichungen für die Ansteuerung der Klimageräte:

$$KSG = (\vartheta_{innen_k} > W_{T,Lr}) \text{ oder } (\vartheta_{innen_{Technik}} > W_{T,Tr}) \quad (55)$$

$$\text{Entfeuchter} = \varphi_{\text{innen}_k} > W\_F, Lr \quad (56)$$

$$\text{Ablüfter} = \text{Zulüfter} = \vartheta_{\text{innen}_{\text{Technik}}} > W\_T, Tr \quad (57)$$

Im originalen Schwellwertalgorithmus existiert für das Minimum und das Maximum nur ein Grenzwert für die Ansteuerung der Klimageräte. Befindet sich der Istwert unter diesem Wert, werden die Klimageräte ausgeschaltet. Andererseits werden die Klimageräte, wenn der Istwert über oder gleich den Grenzwert ist, eingeschaltet. Dies ist nicht zielführend, da daraus ein ständiges ein- und ausschalten der Klimageräte resultiert. Dabei wird mehr Energie verbraucht als bei längeren Ein- und Ausphasen. Ein weiteres Problem ist, dass der Grenzwert zum ein- und ausschalten längere Zeit bestehen bleibt.

Jedoch stellt das Prinzip des Zweipunktreglers mit Hysterese aus Abbildung 15 und Abbildung 16 eine bessere Alternative dar. Die verwendeten Werte für die Schaltabstände sind in Tabelle 9 verzeichnet. Demnach wird ein Verhalten wie in Abbildung 16 erreicht. Das bedeutet, die Klimageräte behalten ihren Stand bei, bis der Grenzwert zum aus- oder einschalten erreicht wird. Für Minimum und Maximum unterscheiden sich diese Grenzwerte. So kann ein effizienterer Energieverbrauch erreicht werden, da beim Einschalten die meiste Energie verbraucht wird und mit der Hysterese weniger Schaltspiele durchgeführt werden.

Tabelle 9: Obere und untere Grenzwerte (Eigene Tabelle)

Geräte	Min		Max	
	Aus	Ein	Aus	Ein
Temperatur im Lagerraum	18	18,5	19	19,5
Temperatur im Technikraum	-	-	24	24,5
Feuchtigkeit	50	55,5	60	65,5

Es ergibt sich ein verbesserter Schwellwertalgorithmus mit einem neuen Programmablaufplan für die Klimatisierung, der in Abbildung 35 dargestellt ist. Für das Energiesystem bleibt der Programmablaufplan des originalen Algorithmus für den verbesserten Schwellwertalgorithmus bestehen. Zuerst wurde eine neue Verzweigung mit der Bezeichnung „Fehlerfall“ im Programmablaufplan hinzugefügt. Diese ist wahr, wenn der Laderegler ausgefallen ist oder der Batteriestrang 1 stark entladen ist. Dann müssen Wechselrichter, XWT, KSG, Entfeuchter und die Lüfter abgeschaltet werden. Dieser Punkt war im Originalprogramm enthalten, aber nicht

im Originalprogrammablaufplan. Zusätzlich wird nur ein Wechsel des Zustands der Klimageräte vom Programm ausgegeben. In den Kapiteln 3.4 und 3.5 wird beschrieben ob der Algorithmus umgesetzt werden konnte und wie stark die Verbesserung zum originalen Schwellwertalgorithmus ausfällt.

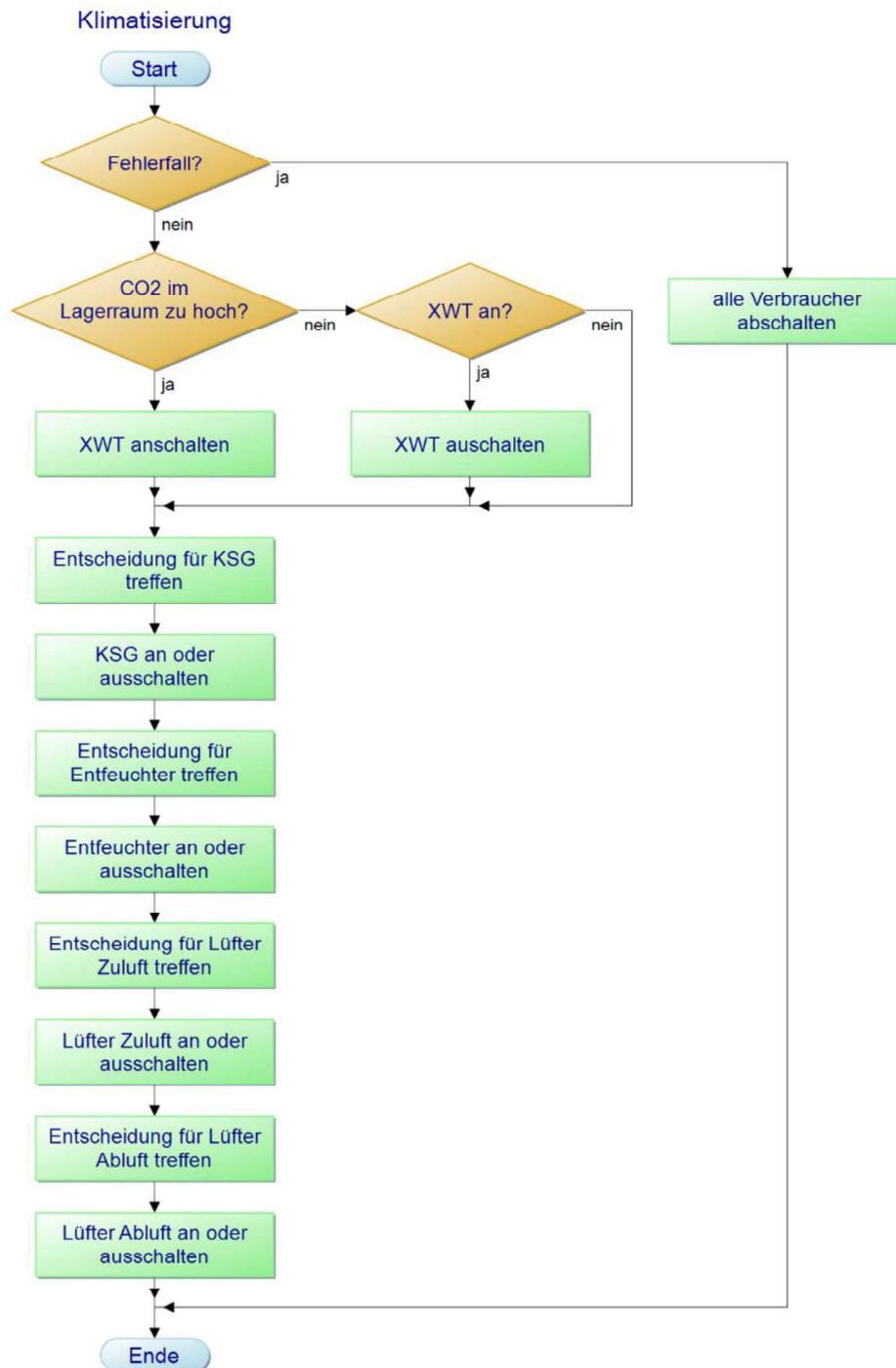


Abbildung 35: Verbesserter Schwellwertalgorithmus

### 3.4.2. Sonneneinstrahlungsalgorithmus

Hier beginnt die Neuentwicklung eines Steueralgorithmus für die Klimatisierung eines energieautarken Kühlhauses. Bisher wurde auf die Probleme des Ausgangszustands hingewiesen und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. In den Kapiteln 3.4.3, 3.4.4 und 3.4.5 werden nun Vorschläge für neue Steueralgorithmen gemacht. Dabei bleibt die Grundstruktur des Originalalgorithmus bestehen, aber es werden neue Ideen angebracht. Ob diese Neuentwicklungen zu Verbesserungen führen, wird im Weiteren diskutiert. Am Ende wird ein Vorschlag für einen finalen Algorithmus gemacht.

Der erste Vorschlag ist ein Sonneneinstrahlungsalgorithmus. Das bedeutet, zusätzlich zum aktuellen Ladezustand könnte auch die Intensität der Sonneneinstrahlung bei der Festlegung der Klimatisierungssollwerte miteinbezogen werden. Dafür muss betrachtet werden, ob genug Sonneneinstrahlung zur Verfügung steht. Dies ist der Fall, wenn die Energieerzeugung  $E_z$  den Energieverbrauch  $E_v$  übersteigt, wobei die Batterien geladen werden und die Verbraucher aktiv sind. Nun wäre es möglich die Sollwerte der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf Minimum zu setzen, um eine stärkere Kühlung und Entfeuchtung zu bewirken. Daraus folgt eine effizientere Solarenergienutzung. Steht nicht genug Sonneneinstrahlung zur Verfügung, werden die Sollwerte der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf Maximum gesetzt, um die Batterien wenig zu belasten.

Bei der Umschaltung von Maximum auf Minimum erhöht sich der Energieverbrauch. Das kann bedeuten, dass für kurze Zeit nicht mehr genug Sonneneinstrahlung zur Verfügung steht und direkt wieder auf Maximum umgeschaltet werden muss, was sich immer wiederholt. Die Lösung für dieses Problem ist die Einführung eines Puffers  $P$  bei der Umschaltung. Dieser bezieht sich auf die Steigung des Ladezustands der Batterien nach einem Zeitabschnitt. Ist diese Steigung größer als die Veränderung des Energieverbrauchs beim Umschalten, ist der Puffer vorhanden.

Es wird ein Programm implementiert, bei dem diese Idee umgesetzt wird. Der verbesserte Schwellwertalgorithmus wird dafür beim Batteriemangement, wie in Abbildung 37 zu sehen, verändert. Abbildung 36 und Abbildung 38 unterscheiden sich nur im Programmablaufplan zur besseren Übersicht vom verbesserten Schwellwertalgorithmus, aber die Programmierung ist gleichgeblieben. Die Betrachtung des Ladezustands für den Puffer kann wegen fehlerhafter Messung zu Problemen führen. Deshalb müssen noch weitere Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein, um ein korrektes Umschalten der Sollwerte von Maximum auf Minimum zu garantieren. Erstens muss der Ladestrom des Ladereglers größer als null sein. Zweitens muss die berechnete

erzeugte elektrische Energie, die durch den Messwert des ADLSR Sensors, die Sonneneinstrahlung berechnet wurde, größer als die Summe der verbrauchten Energie der aktiven Verbraucher sein. Drittens muss der Batterieladezustand größer als 65 % sein, um die Batterien vor Tiefenentladung zu schützen. In Abbildung 36 sind zwei zusätzliche Möglichkeiten für die Abschaltung des Wechselrichters und der Verbraucher dargestellt. Einerseits, falls die Tür des Lagerraums nach draußen mehr als 60 Sekunden offenbleibt, andererseits, wenn beide Batteriesätze stark entladen sind. Die Klimatisierung wird genau gleich wie im verbesserten Schwellwertalgorithmus gesteuert.

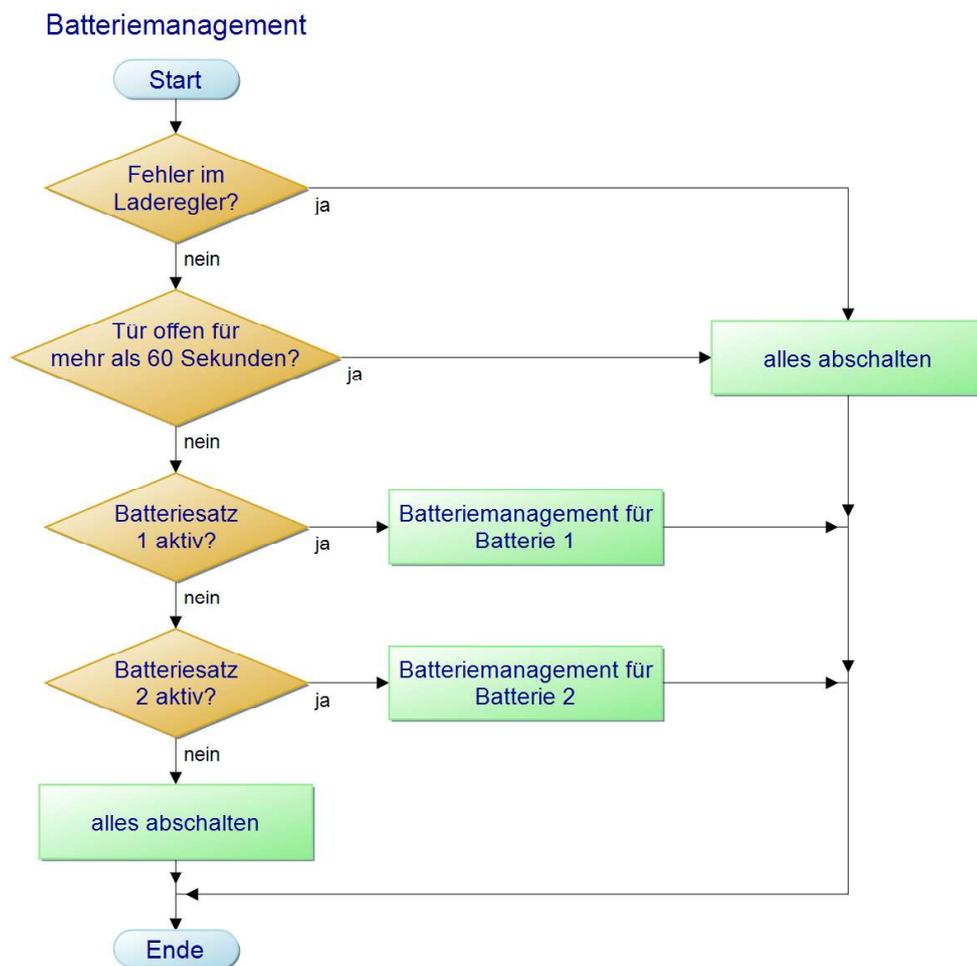


Abbildung 36: Batteriemanagement allgemein Sonneneinstrahlungsalgorithmus

### Batteriemangement für Batterie 1

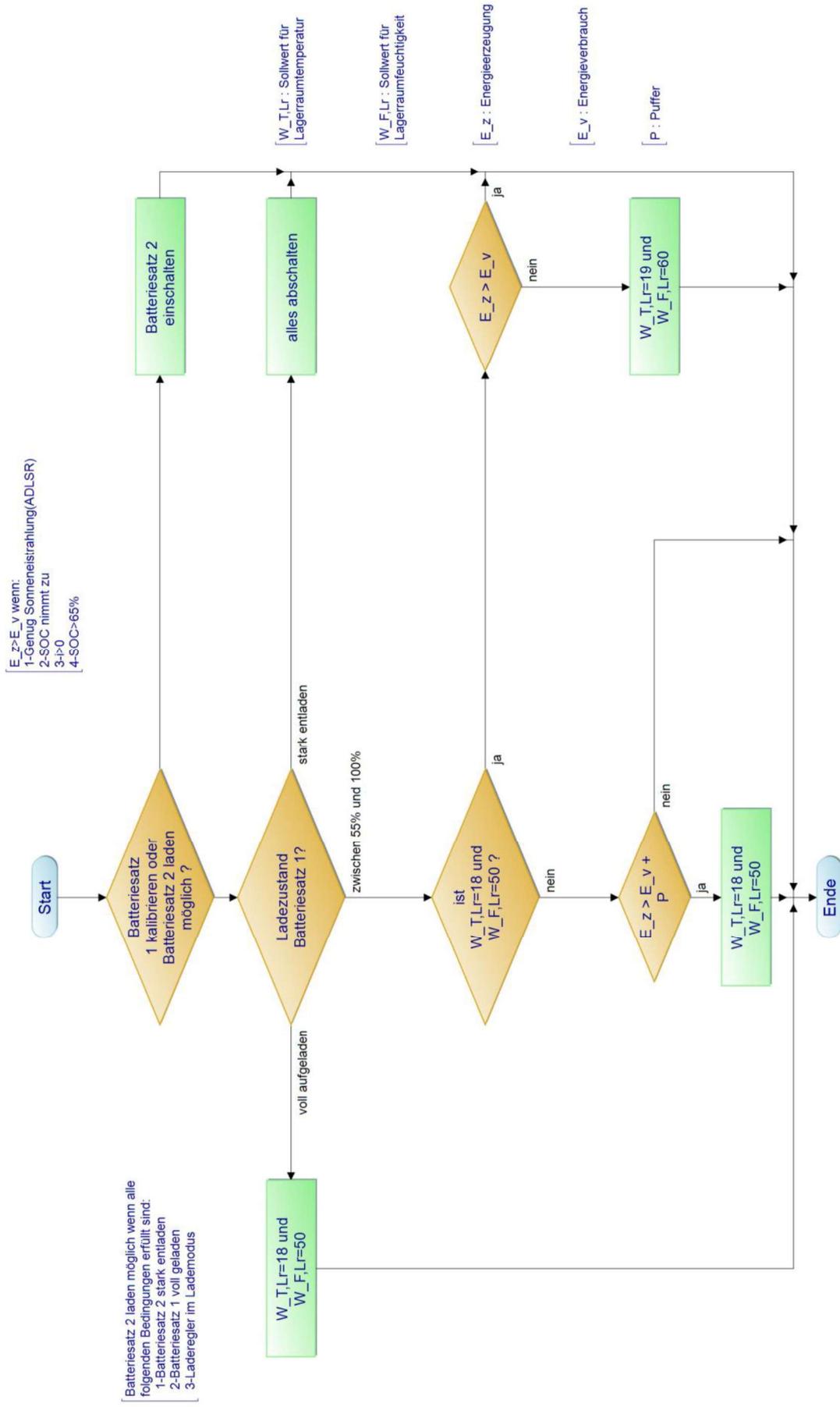


Abbildung 37: Batteriemangement Batteriesatz I für den Sonneneinstrahlungsalgorithmus

### Batteriemanagement für Batterie 2

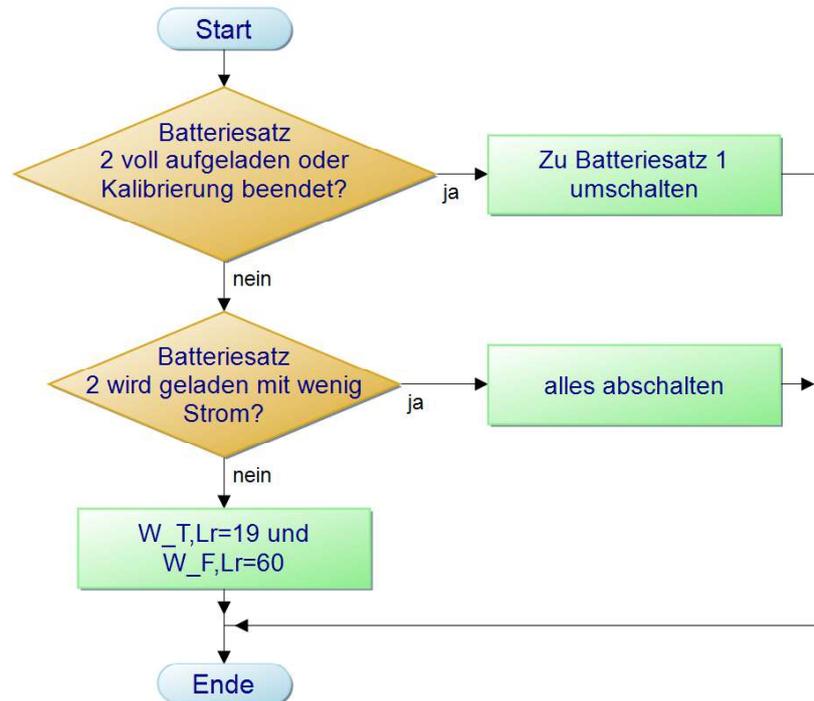


Abbildung 38: Batteriemangement Batteriesatz2 für den Sonneneinstrahlungsalgorithmus

#### 3.4.3. Regleralgorithmus

Bis hier hin wurde eine Ansteuerung der Geräte direkt über Schwellwerte als Zweipunktregler programmiert. Jedoch ist aus der Regelungstechnik der PID-Regler als Werkzeug zum Erreichen eines Sollwertes bekannt. Dieses Werkzeug könnte auch im Projekt SilaaCooling Anwendung finden.

Die Sollwerte für einen Regelkreis wären hier die Lagerraumtemperatur und die Lagerraumfeuchtigkeit. Es bieten sich 19 °C und 60 % in der Mitte der geforderten Bereiche als Sollwerte an. Folglich müssen zwei Regler verwendet werden: ein Temperaturregler, der das KSG anspricht und ein Feuchtigkeitsregler, der den Entfeuchter steuert. Es wurde geprüft ob direkt auf die Drehzahl oder die Leistung der Geräte zugegriffen werden kann. Dies war nicht möglich, deshalb wurde das an- und ausschalten der Geräte über Pulsweitenmodulation (PWM) als Ausweichvariante gewählt. Es ergeben sich die Regelkreise in der Abbildung 39, wobei die dargestellten PID-Regler in den Regelkreisen unterschiedliche Reglerparameter aufweisen.

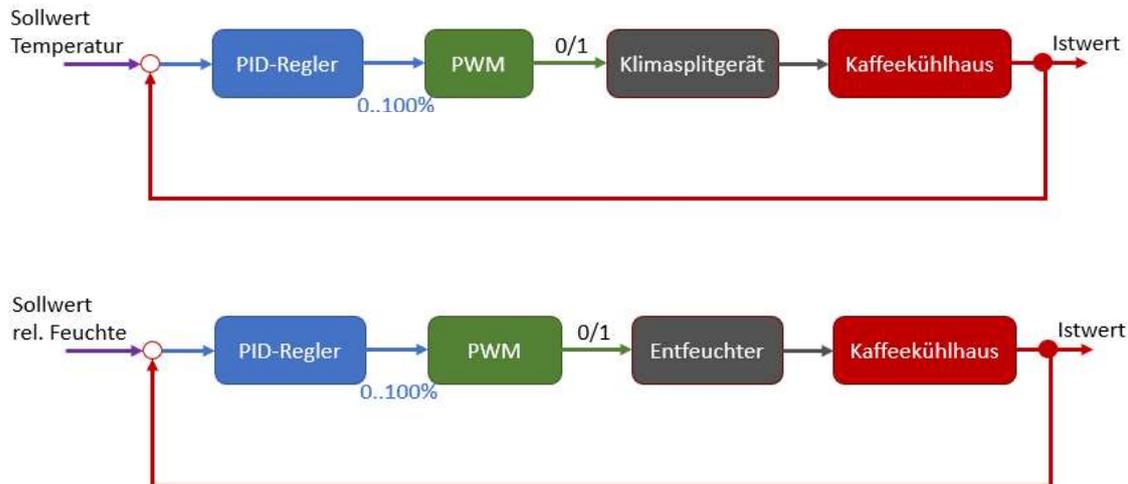


Abbildung 39: Temperaturregelkreis und Feuchtigkeitsregelkreis (Eigene Zeichnung)

Bei PWM wechselt ein Signal, mit einer konstanten Frequenz, von 0 auf 1. Die charakteristischen Werte sind Tastgrad  $G$ , Periodendauer  $T_p$  und die Impulsdauer  $t_i$ . Die Periodendauer ist für ein PWM-Signal konstant. Über die Impulsdauer einer Periode lässt sich der Tastgrad bestimmen über: [47]

$$G = \frac{t_i}{T_p} \quad (59)$$

Ein PID-Regler kann durch Veränderung des Tastgrads das Verhalten der Klimageräte beeinflussen.

Der Vorteil des Regleralgorithmus ist, dass der zeitliche Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit bei der Ansteuerung der Klimageräte betrachtet wird. Dadurch werden die Kühlung und Entfeuchtung direkt gestartet und es muss kein Grenzwert überschritten werden. Das resultiert in eine Energieeinsparung. Es wurden keine Regler für die  $CO_2$ -Konzentration im Lagerraum und die Technikraumtemperatur benutzt, weil das dazugehörige XWT bzw. die Lüfter einen niedrigen Energieverbrauch haben und die Grenzwerte nur selten verletzt werden.

Für den Regleralgorithmus bleibt der vorherige allgemeine Programmablauf bestehen. Es werden Änderungen im Batteriemangement und in der Klimatisierung vorgenommen. Beim Batteriemangement, wie in Abbildung 40 und Abbildung 41 zu sehen, gibt es nun keine Sollwertveränderungen mehr, da der Sollwert in der Mitte der Bereiche ausreichen sollte.

### Batteriemanagement für Batterie 1

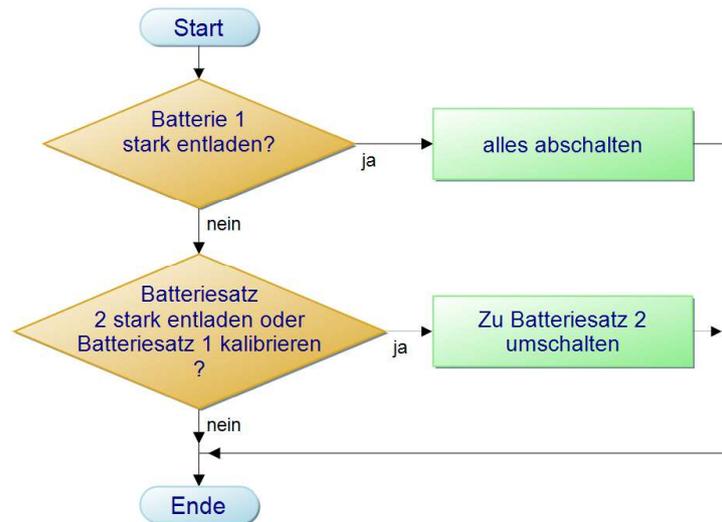


Abbildung 40: Batteriemangement für Batterie1 für den Regleralgorithmus

### Batteriemanagement für Batterie 2

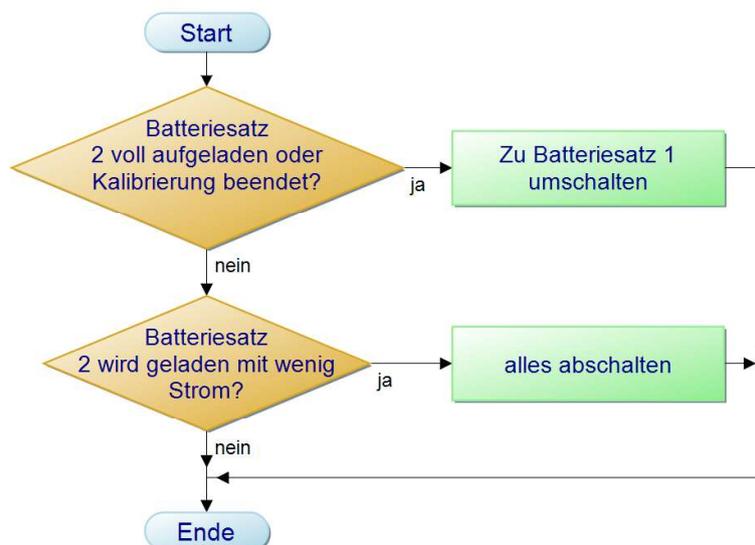


Abbildung 41: Batteriemangement für Batterie2 für den Regleralgorithmus

Im Programmablauf für die Klimageräte wurde, wie in Abbildung 42 zu sehen, das Prinzip des PID-Reglers mit PWM hinzugefügt.

Wie in Kapitel 2.6 beschrieben kann ein PID-Regler über die Parameter  $K_P$ ,  $K_I$  und  $K_D$  definiert werden. Es stellt sich noch die Frage, ob nicht ein P-Regler oder PI-Regler bzw. PD-Regler ausreicht. Als Temperatur- und Feuchtigkeitsregler empfiehlt sich ein PI-Regler, da dessen Dynamik ausreicht und eine bleibende Regelabweichung vermieden wird, somit ist kein PID-Regler nötig [48]. Der P-Regler weist das Problem der bleibenden Regelabweichung auf. Was bedeuten würde, dass beim ausgeregelten Zustand die Zielgröße nicht den Sollwert erreicht hat

[49]. Als Temperaturregler empfiehlt sich ein PI-Regler, da dessen Dynamik ausreicht und eine bleibende Regelabweichung vermieden wird [48].

Das heißt es müssen die Parameter  $K_P$  und  $K_I$  für die Temperaturregelung und die Feuchtigkeitsregelung bestimmt werden. Hier ergab sich im Laufe der Arbeit ein großes Problem, da für die Reglerparameterbestimmung Sprungantworten aufgenommen werden mussten. Die Messdaten waren aber verrauscht, womit die Zielgrößen überhaupt nicht erreicht werden konnten. Auch nach mehrmaligem Aufnehmen der Kennlinien war deren Verlauf nie nachvollziehbar. Die Messgrößen schwankten teilweise über das Rauschen hinaus oder blieben für eine längere Zeit gleich, obwohl die Zielgröße noch nicht erreicht war. Deshalb wurde die Reglerparameterbestimmung mit Schätzwerten durchgeführt. In Thailand müssen dann nochmals Sprungantworten aufgenommen werden, um die Regler zu parametrieren.

Die Reglerverstärkung des Temperaturreglers  $K_{PT}$  kann über das Verhältnis von Regelabweichung und Kühlleistung des KSGs geschätzt werden. Bei 10 K Regelabweichung soll das KSG 100 % Kühlleistung abgeben. Jeweils bei kleineren Unterschieden eine kleinere Kühlleistung, bei 5 K 50 % und bei 1 K 10 % usw..  $K_{PT}$  beträgt somit  $\frac{10\%}{1\text{ K}}$ .

Die Nachstellzeit  $T_{NT}$  für das KSG mit einer Regelabweichung von 10 K beträgt laut Model 4080 Sekunden. Das bedeutet, wenn das KSG ständig an ist, benötigt es 4080 Sekunden um den Lagerraum von 28 °C auf 18 °C abzukühlen. Mit (15) beträgt  $K_{IT}$  rund  $0,000025 \frac{1}{\text{K}\cdot\text{s}}$ . Analog zum Temperaturregler wird beim Feuchtigkeitsregler für die Reglerverstärkung des Feuchtigkeitsreglers  $K_{PF}$  die Entfeuchtungsleistung des Entfeuchters mit der Regelabweichung ins Verhältnis gesetzt. Bei 10 % Regelabweichung soll der Entfeuchter 100 % Entfeuchtungsleistung abgeben.  $K_{PF}$  beträgt somit  $\frac{10\%}{1\%}$ . Die Nachstellzeit  $T_{NF}$  für den Entfeuchter für eine Regelabweichung von 10% beträgt laut Modell 7020 Sekunden. Wenn der Entfeuchter ständig arbeitet, dauert es 7020 Sekunden um die Feuchtigkeit von 60 % auf 50 % zu verringern.  $K_{IF}$  beträgt somit  $0.0014 \frac{1}{\text{s}}$ .

Für die Programmierung der PWM-Funktion wurde  $T_p$  auf 100 Sekunden festgelegt. Ein Durchlauf des Programms dauert 10 Sekunden. Das PWM-Signal kann dann Werte von 0 bis 100 % in 10 % Schritten annehmen. Berechnet der PI-Regler einen Wert zwischen vollen Zehnerwerten wird auf den unteren Zehnerwert gerundet.

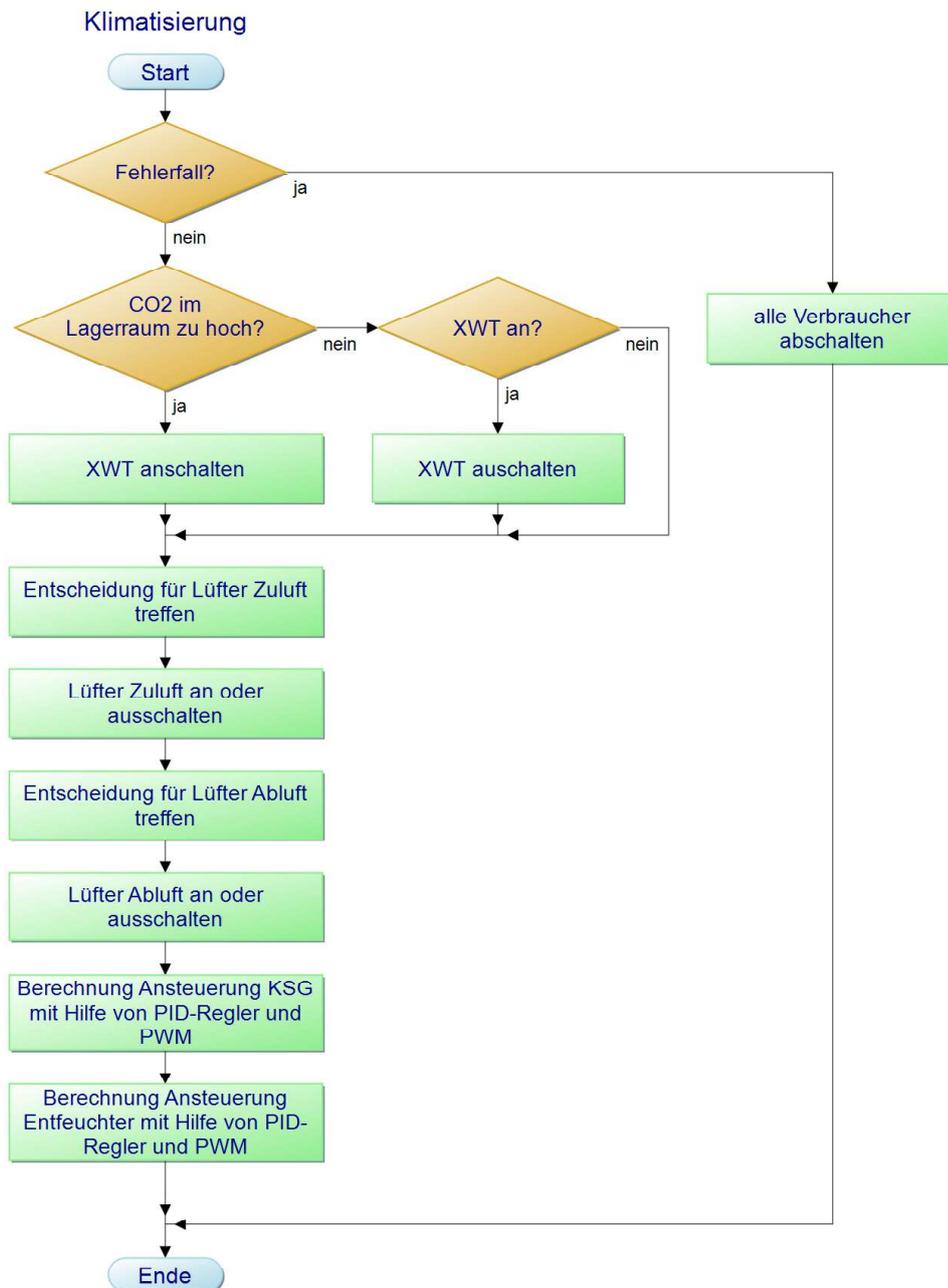


Abbildung 42: Klimatisierung für den Regleralgorithmus

Im Regleralgorithmus entfallen die Betrachtungen zur Hysterese, da die Ein- und Ausschaltpunkte vom zeitlichen Verlauf der Regelgrößen abhängen.

#### 3.4.4. Kombination aus Sonneneinstrahlungsalgorithmus und Regleralgorithmus

Eine Weiterentwicklung des Regleralgorithmus stellt dessen Kombination mit dem Sonneneinstrahlungsalgorithmus dar. Ein Teil der beiden Algorithmen ist für einen bestimmten Teil des Sollwertbereichs geeignet. Das Grundprinzip des Kombinationsalgorithmus geht vom Sonneneinstrahlungsalgorithmus aus. Bei genügend Sonneneinstrahlung, den vier Bedingungen des Sonneneinstrahlungsalgorithmus, erhöht sich der Energieverbrauch. In den

Sollwertbereichen von Maximum und Minimum wird von Reglern die Ansteuerung der Klimageräte übernommen. Befindet sich der Istwert über bzw. unter dem geforderten Bereich, wird das Klimagerät aktiv bzw. inaktiv ohne den Regler zu beachten.

Für die Implementierung des Kombinationsalgorithmus wird keine Hysterese verwendet. Der Programmablaufplan der Klimatisierung aus dem vorherigen Kapitel kann mit neuen Grenzwerten für die KSG- bzw. Entfeuchterausschaltung und -einschaltung  $W_{T,low}$  und  $W_{T,high}$  bzw.  $W_{F,low}$  und  $W_{F,high}$  verwendet werden. Je nachdem ob die Sollwerte auf Maximum oder Minimum stehen, wechseln die Grenzwerte. Die Reglersollwerte der zwei Regler befinden sich in der Mitte des Grenzwertbereichs.

Der neue Programmablaufplan für das Batteriemangement der Batterie 1 kann aus in Abbildung 43 abgelesen werden. Somit können die Vorteile der beiden vorherigen Algorithmen verbunden werden, um noch energieeffizienter das Kaffeekühlhaus zu klimatisieren.

### 3.5. Tests

Es wurden vier Programme entwickelt: der verbesserte Schwellwertalgorithmus, der Sonneneinstrahlungsalgorithmus, der Regleralgorithmus und der Kombinationsalgorithmus. Die Programmierung wurde aufbauend auf dem originalen Schwellwertalgorithmus durchgeführt. Bevor die verschiedenen Programme verglichen werden, soll erst deren allgemeine Funktion einzeln getestet werden. Dafür wird überprüft, ob bei allen möglichen Szenarien der Sensorwerte die für den bestimmten Fall vorgesehenen Klimageräte aktiviert werden.

Hierfür wurde von der axxeo GmbH ein Testprogramm, dessen Oberfläche in Abbildung 44 dargestellt ist, zur Verfügung gestellt, das die verschiedenen Sensorwerte simulieren kann. Mit diesem Programm können die Parameter Außenluftfeuchtigkeit, Außentemperatur, Lagerraumtemperatur, Lagerraumluftfeuchtigkeit, Technikraumtemperatur und  $CO_2$ -Konzentration eingestellt werden. Die Parameter werden entweder jede Minute aktualisiert oder beim Tastendruck auf „Apply manually“.

Jeder Algorithmus hat verschiedene Grenzwerte, bei denen die unterschiedlichen Klimageräte aktiv werden sollen. Beim verbesserten Schwellwertalgorithmus wurden die Formeln (55), (56) und (57), sowie der Unterschied von Maximum und Minimum aus Tabelle 9, getestet. Für ein Testszenario wird zusätzlich zu den veränderbaren Parametern der Ladezustand der Batterien und der Zustand der Klimageräte betrachtet. Ein verkürztes Beispielszenario, bei dem nur  $\vartheta_{innen_k}$ ,  $\vartheta_{innen_{Technik}}$ , das KSG und die Lüfter betrachtet werden, hat folgende Möglichkeiten:

- Aktive Batterie: Batteriestrang 1
- Batterieladezustand = 74% → Sollwerte auf Maximum
- $W\_T, Lr = [19\text{ °C}; 19,5\text{ °C}]$ ,  $W\_T, Tr = [24\text{ °C}; 24,5\text{ °C}]$ 
  - a)  $\vartheta_{innen_k} = 23\text{ °C}$  → KSG an
  - b)  $\vartheta_{innen_k} = 18,9\text{ °C}$  → KSG aus
  - c)  $\vartheta_{innen_k} = 19,2\text{ °C}$  → KSG behält seinen Zustand
  - d)  $\vartheta_{innen_{Technik}} = 25,3\text{ °C}$  → KSG an und Lüfter an
  - e)  $\vartheta_{innen_{Technik}} = 23\text{ °C}$  → KSG aus und Lüfter aus
  - f)  $\vartheta_{innen_{Technik}} = 24,3\text{ °C}$  → KSG und Lüfter behalten ihren Zustand

Das KSG wird angeschaltet, wenn  $\vartheta_{innen_k}$  oder  $\vartheta_{innen_{Technik}}$  oder beide größer als der Sollwert sind. Analog zur Temperatur wurde mit der Lagerraumfeuchtigkeit verfahren. Außerdem sollte bei der Betrachtung der  $CO_2$ -Konzentration bei 2000 ppm der XWT aktiv sein und bei 700 ppm abschalten. Der verbesserter Schwellwertalgorithmus hat alle Tests fehlerfrei bestanden.

### Batteriemangement für Batterie 1

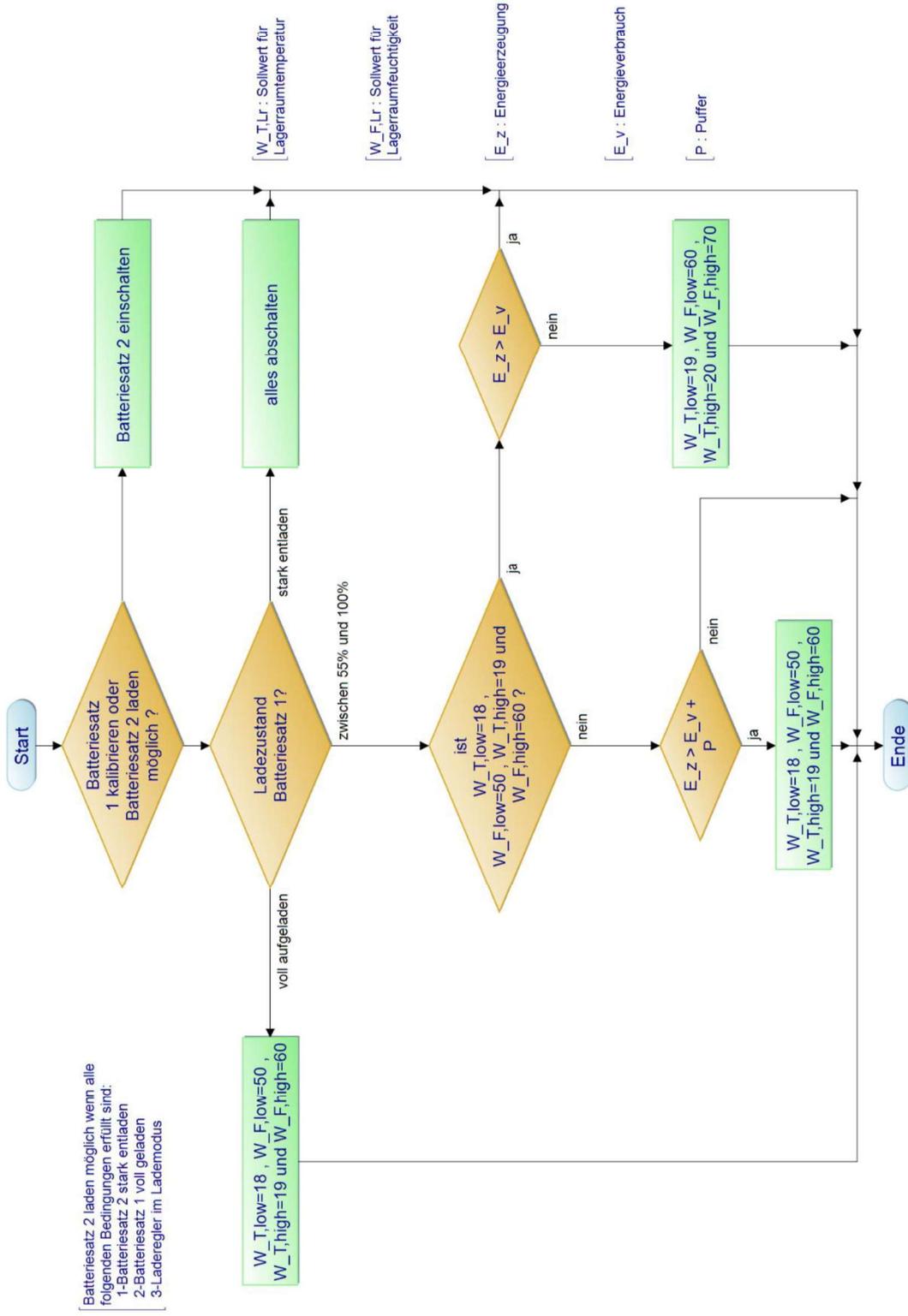


Abbildung 43: Batteriemangement für Batterie 1 für den Kombinationsalgorithmus

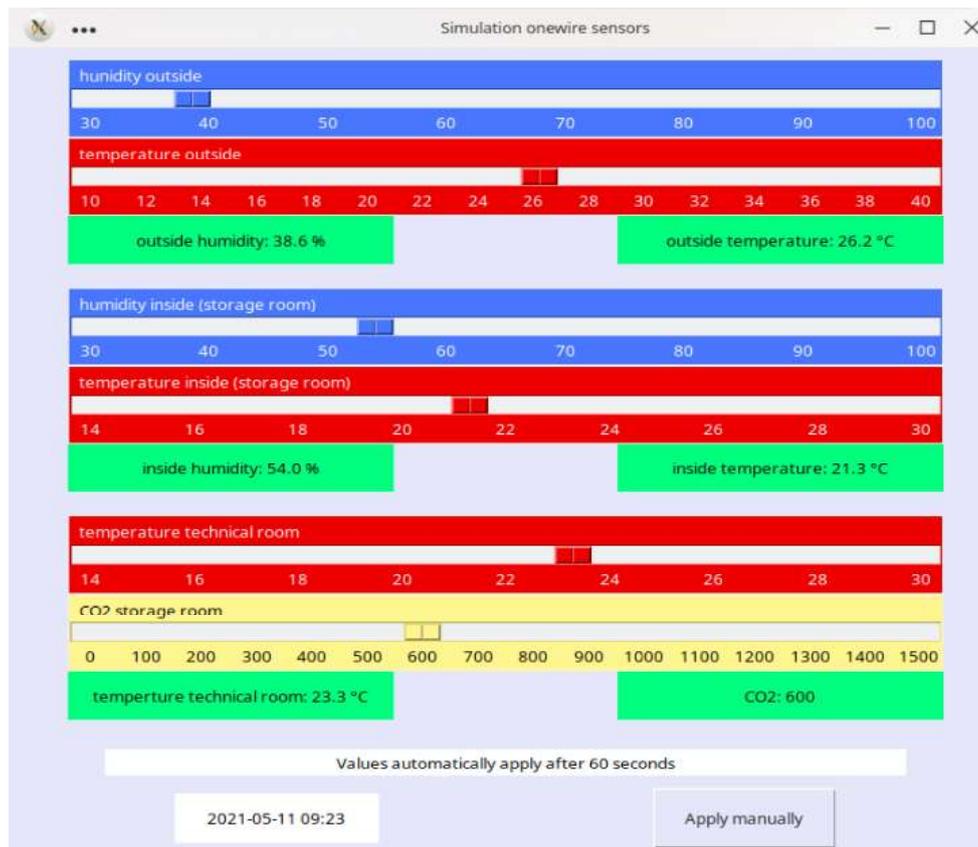


Abbildung 44: Testoberfläche (Screenshot axexo GmbH)

Für den Sonneneinstrahlungsalgorithmus gelten die gleichen Grenzwerte bei der Aktivierung der Klimageräte, wie beim verbesserten Schwellwertalgorithmus. Zusätzlich sind die Umschaltunkte von Minimum auf Maximum und umgekehrt zu testen, wie sie in Abbildung 37 dargestellt sind. Dazu wurde die Testoberfläche aus Abbildung 44 von der axexo GmbH erweitert. Damit konnte der ADLSR Sensor, der Ladezustand der Batterie 1 und der Ladestrom des Ladereglers simuliert werden. Ein Beispielszenario für die relative Luftfeuchtigkeit und die  $CO_2$ -Konzentration hat folgende Eigenschaften, mit dem maximal möglichen Gesamtverbrauch  $E_{\nu_{Gesamt}} = 1852 \text{ W}$ :

- Aktive Batterie: Batteriestrang 1
- Ladezustand der Batterie 1 = 74%
- Vorheriger Ladezustand der Batterie 1 = 73%
- ADLSR Sensor =  $800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \rightarrow E_{\nu_z} = 3.686,4 \text{ W} > E_{\nu_{Gesamt}}$
- Ladestrom = 3 mA
- Alle Bedingungen sind erfüllt  $\rightarrow$  Sollwerte auf Minimum:  $W_{F, Lr} = [50 \%; 55,5 \%]$
- $CO_2$ -Konzentration = 1800 ppm
- Relative Luftfeuchtigkeit im Lagerraum:  $\varphi_{innen_k} = 59 \%$
- Aktive Verbraucher: XWT und Entfeuchter

Wie im Beispielszenario zu sehen, wurde das Batteriemangement in Verbindung mit der Klimatisierung getestet. Der Sonneneinstrahlungsalgorithmus hat alle Tests fehlerfrei bestanden.

Die Tests für den Regleralgorithmus konnten nicht komplett durchgeführt werden, da die Testoberfläche nicht kompatibel mit der Funktionsweise des Reglers war. Normalerweise hat eine Änderung der Stellgröße einen direkten Einfluss auf die Regelgröße. Aber durch die Verwendung der Testoberfläche ändert sich die Regelgröße nicht automatisch in Abhängigkeit der Stellgröße, weil die Regelgröße per Hand eingestellt wird. Das bedeutet, die Zielgrößen werden nicht erreicht und es kann nicht getestet werden, ob die Regler die Zielgrößen in einer annehmbaren Zeit erreichen. Es konnte nur getestet werden, dass bei Überschreiten der Sollwerte die Klimageräte aktiv werden.

Diese Funktion konnte für den Temperaturregler und den Feuchtigkeitsregler erfolgreich getestet werden. Auch die Grenzwerte für die Temperatur im Technikraum und die  $CO_2$ -Konzentration hatten den korrekten Einfluss auf das KSG und das XWT, wie im Programmablaufplan beschrieben. Somit hat auch der Regleralgorithmus alle durchführbaren Tests bestanden.

Schließlich wurden Tests für die Kontrolle der Funktion des Kombinationsalgorithmus durchgeführt. Wie bei den vorherigen Tests wurden dafür verschiedene Szenarien aufgestellt. Aufbauend auf den Programmablaufplan aus Abbildung 43 folgt ein Beispielszenario für die Temperatur und das KSG, mit dem Verbrauch des KSG  $E_{\nu_{KSG}} = 970 \text{ W}$ :

- Aktive Batterie: Batteriestrang 1
- Ladezustand der Batterie 1 = 80%
- Vorheriger Ladezustand der Batterie 1 = 82%
- ADLSR Sensor =  $50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \rightarrow E_{\nu_Z} = 230,4 \text{ W} < E_{\nu_{KSG}}$
- Ladestrom = 1,8 mA
- Bedingungen sind nicht erfüllt: nicht genug Sonneneinstrahlung und Ladezustand der Batterie nimmt ab  $\rightarrow$  Sollwerte auf Maximum:  $W_{T, low} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W_{T, high} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 
  - a)  $\vartheta_{innen_k} = 22 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$  KSG an
  - b)  $\vartheta_{innen_k} = 18,7 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$  KSG aus
  - c)  $\vartheta_{innen_k} = 19,7 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$  Temperaturregler aktiv mit Führungsgröße =  $19,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Für die restlichen Parameter und Klimageräte werden analog Testszenarien beschrieben und getestet. Die Tests des Reglers waren wie beim Regleralgorithmus nicht vollständig möglich.

Auch der Kombinationsalgorithmus hat alle durchführbaren Tests bestanden. Mithilfe der Tests konnte ermittelt werden, dass alle Algorithmen nach dem geplanten Prinzip in der Praxis funktionieren.

### 3.6. Vergleich

Die Algorithmen sollen anhand verschiedener Kriterien mit Hilfe eines Modells verglichen werden, um festzustellen welcher Algorithmus am besten für die Klimatisierung des Kaffeekülhauses geeignet ist. Die gewählten Kriterien sind: Genauigkeit, Geschwindigkeit und Energieverbrauch, da so die geforderten Eigenschaften der Algorithmen nachgewiesen werden können. Erstens: die Genauigkeit bedeutet, ob ein Algorithmus das Ziel erreicht, die Lagerraumtemperatur zwischen 18 °C und 20 °C sowie die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 50 % und 70 % zu halten. Sollte ein Algorithmus die Genauigkeit nicht einhalten, ist er nicht für die Klimatisierung des Kaffeekülhauses geeignet. Zweitens: die Geschwindigkeit bedeutet, wie schnell ein Algorithmus den Zielbereich erreicht. Dies kann nur geprüft werden, wenn die Startparameter außerhalb des Zielbereichs liegen. Drittens: der Energieverbrauch ist die Summe aus der verbrauchten elektrischen Energie des Entfeuchters und des KSGs. Ziel ist es diesen Energieverbrauch zu minimieren, um die Batterien nicht zu stark zu belasten.

Es wird der Verlauf der Lagerraumtemperatur, der Lagerraumluftfeuchtigkeit und des Ladezustands innerhalb von 24 Stunden verglichen. Dafür wird die Sonneneinstrahlung, die Anfangstemperatur und die Anfangsluftfeuchtigkeit im Lagerraum vorgegeben. Es war gefordert beim Vergleich nicht auf die Lüfter und den XWT einzugehen, deshalb ist  $\dot{H}_{zu_k}$  im Modell gleich 0 und die Außenluftfeuchtigkeit hat keinen Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit im Lagerraum. Ohne Lüfter kann auch kein Einfluss auf die Temperatur im Technikraum genommen werden. Um den Vergleich zu vereinfachen wird nur eine Situation und der Verlauf der Größen analysiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass der typische Verlauf der Sonneneinstrahlung und des Temperaturverlaufs an einem Tag als Beispiel für andere Tage herangezogen werden kann.

Für die Kennlinien in Abbildung 47 bis Abbildung 52 wurden die folgenden Werte festgelegt: die Anfangstemperatur im Lagerraum beträgt 17 °C, die Anfangsluftfeuchtigkeit im Lagerraum beträgt 58 %, der Anfangsladezustand der Batterien beträgt 100 %. Diese Werte wurden so gewählt, um den Endwert an einem Tag ungefähr dem Anfangswert zu entsprechen. Die aus der Realität bekannten Sollwerte wurden für die Vereinfachungen im Modell angepasst, da die verwendeten Außentemperaturverläufe eine sehr starke Einwirkung auf die Lagerraumluftfeuchtigkeit hatten. Eine Zunahme der Temperatur hat eine Verringerung der

Luftfeuchtigkeit bewirkt. Diese Abhängigkeit hat ihren Ursprung in dem Zusammenhang von Enthalpie, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Für den Verlauf der Außentemperatur und der Sonneneinstrahlung wurden die Daten von Thailand am 03.09.2019, gemessen von einem Pyranometer, verwendet. Diese Verläufe sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 zu sehen.

Ein Sachverhalt der bisher nicht betrachtet wurde ist, dass das KSG eine bestimmte Anlaufzeit benötigt, die im Modell auf 5 Minuten festgelegt wurde. Ein Abschalten des KSGs beinhaltet immer auch eine Totzeit, die maximal 5 Minuten beträgt. Zusätzlich wurde der maximale Ladezustand der Batterien mit 120 Ah und 48 V, das bedeutet 5,76 kWh, festgelegt.

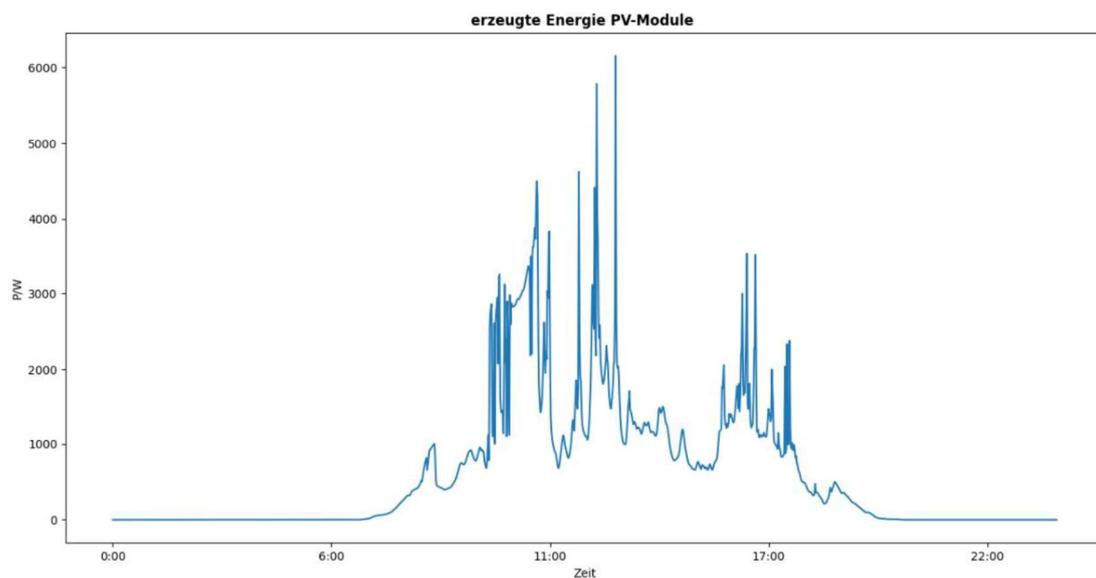


Abbildung 45: erzeugte Energie PV-Module

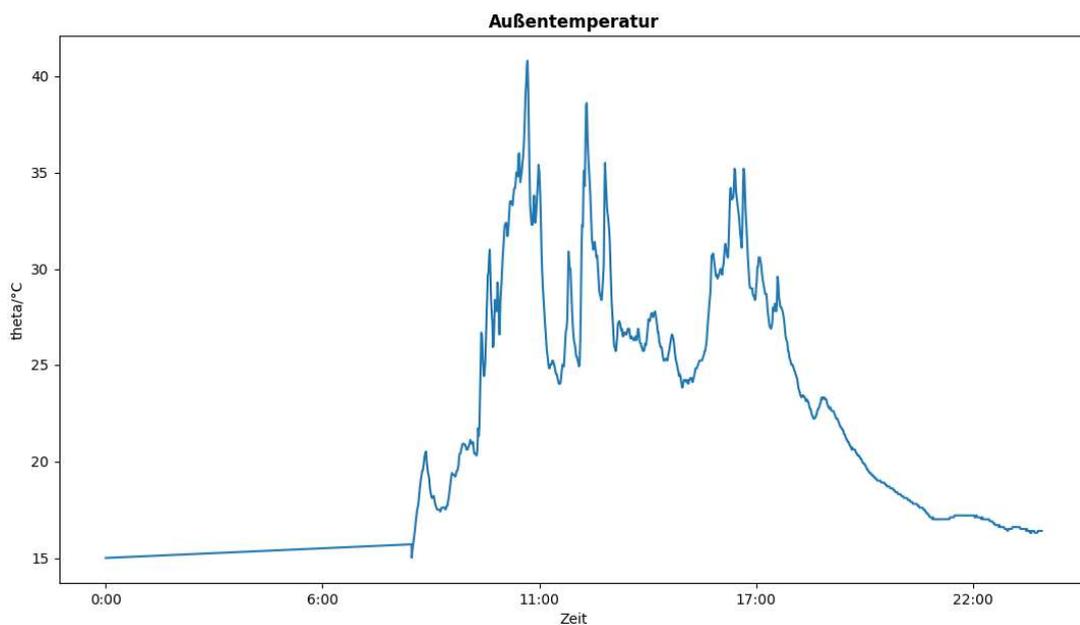


Abbildung 46: Außentemperatur

## Vergleich Algorithmen Lagerraumtemperatur

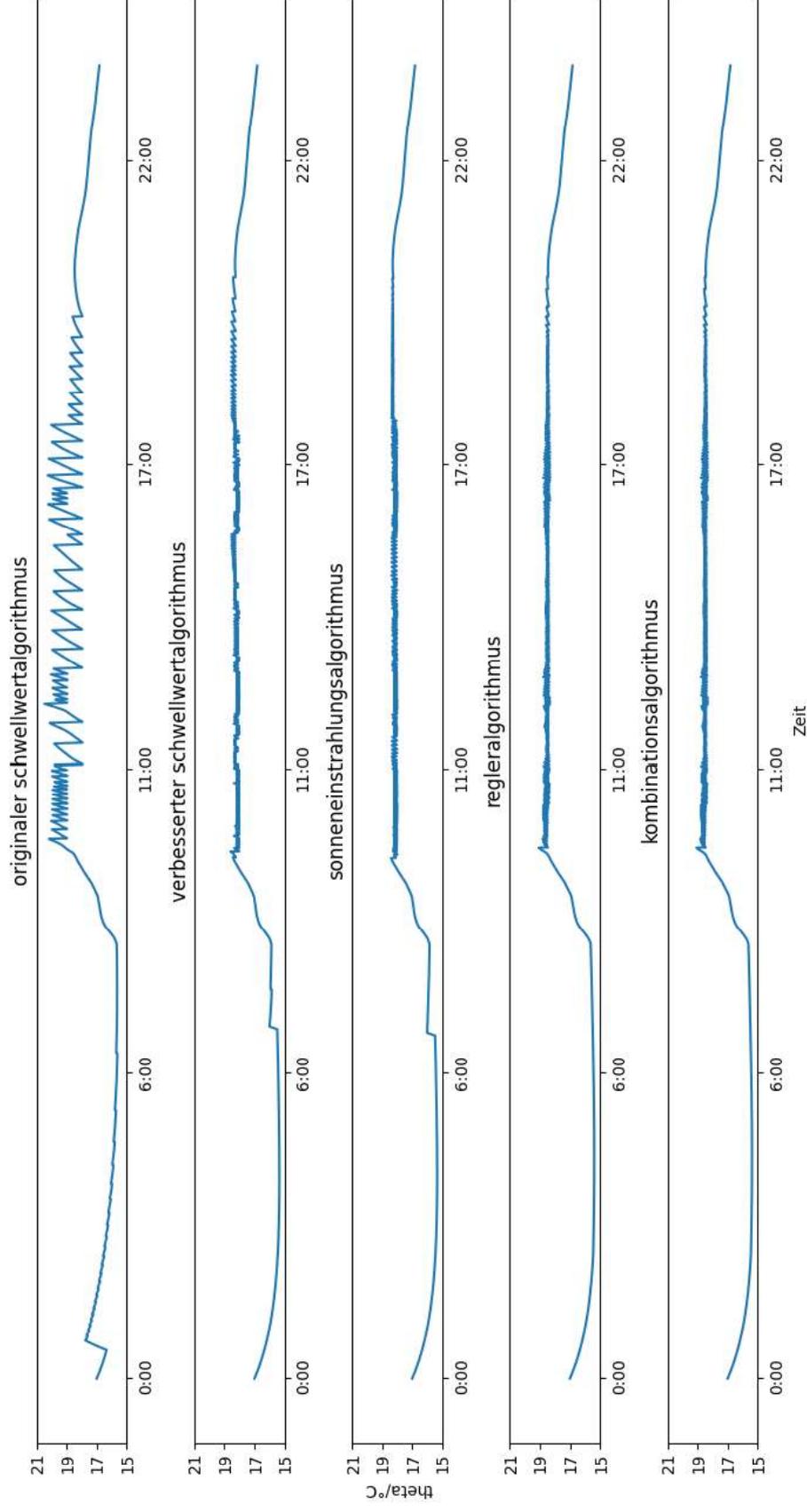


Abbildung 47: Vergleich Algorithmen Lagerraumtemperatur einzeln

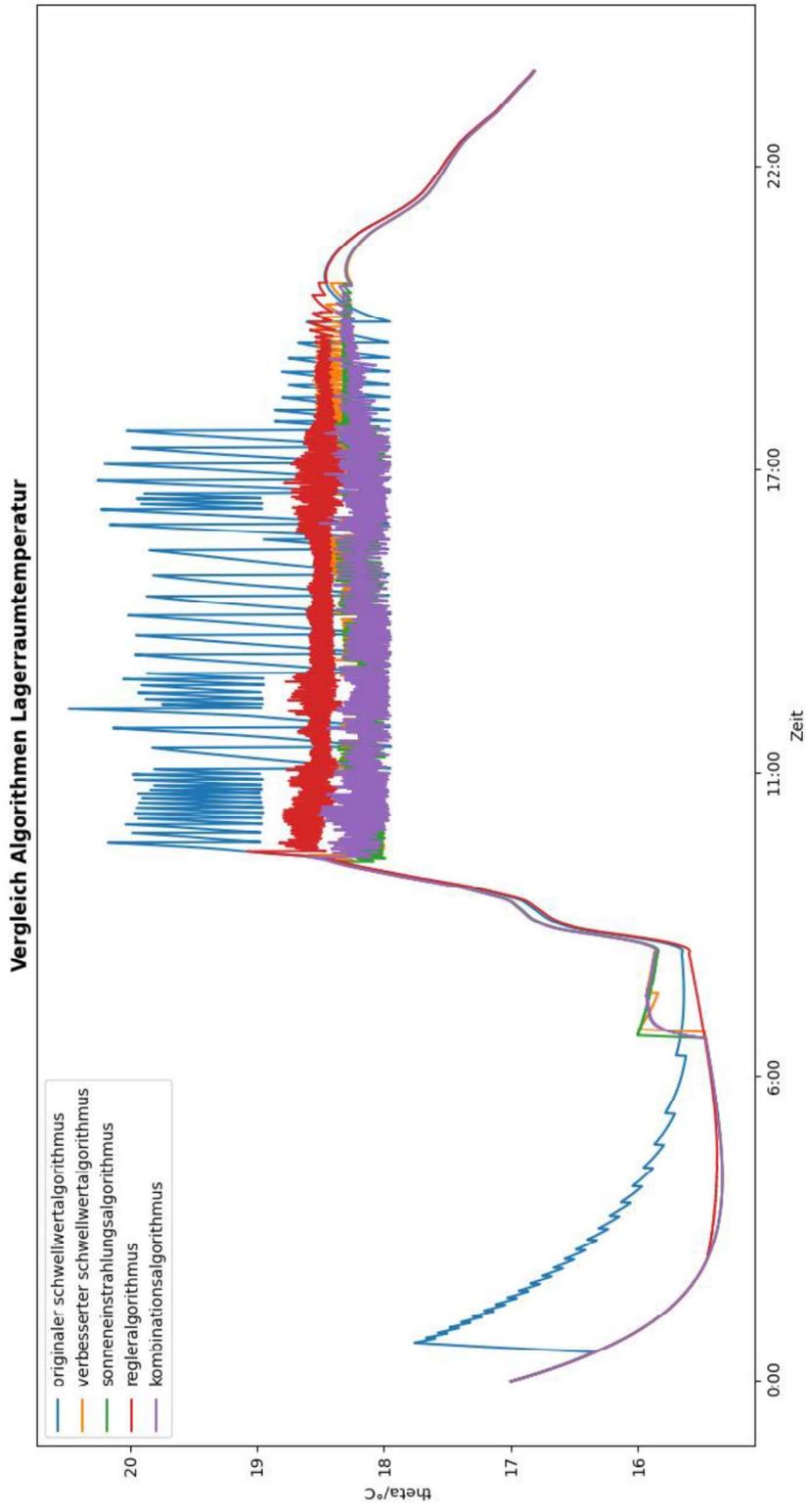


Abbildung 48: Vergleich Algorithmen Lagerraumtemperatur zusammen

## Vergleich Algorithmen relative Feuchtigkeit

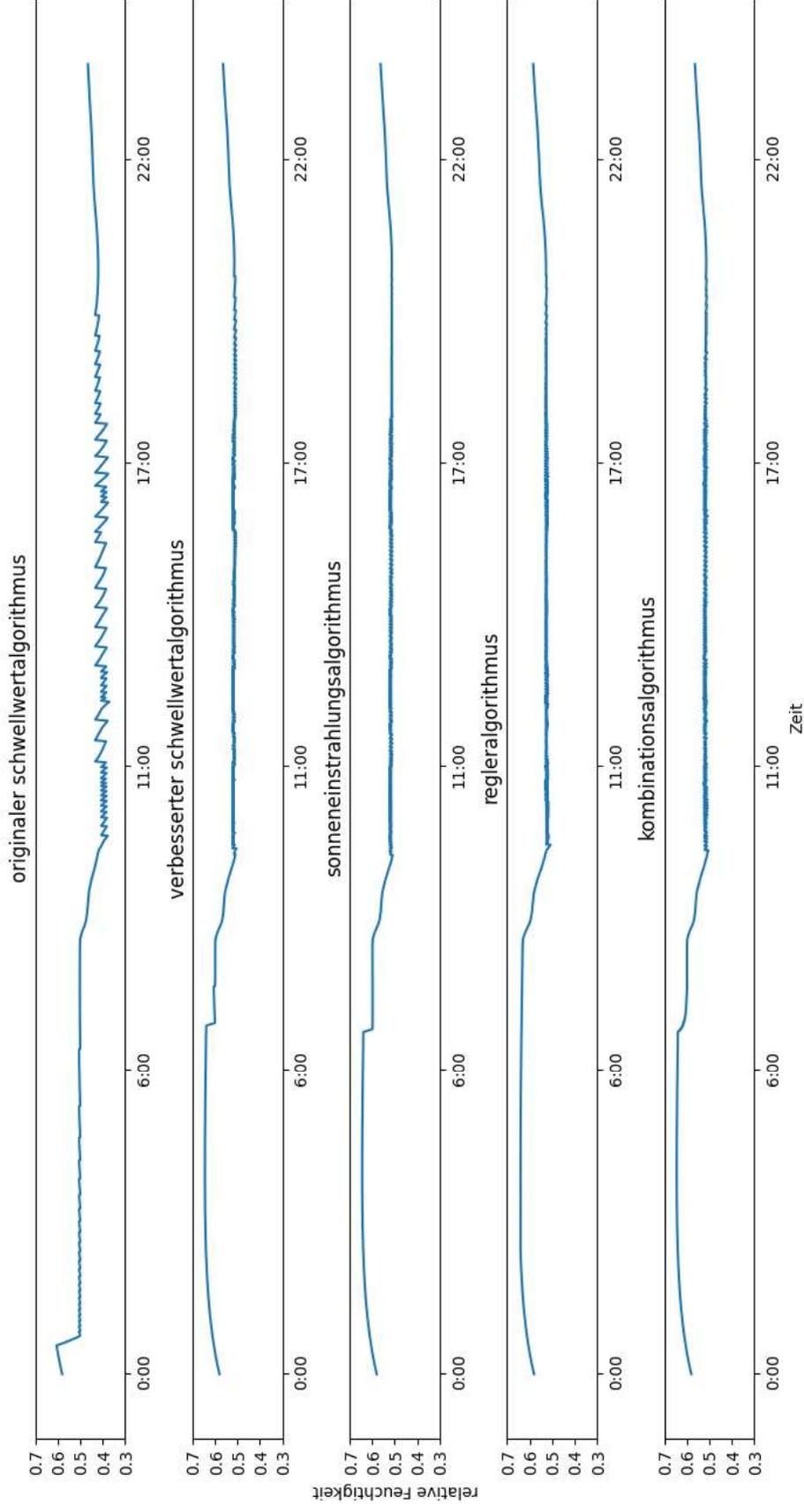


Abbildung 49: Vergleich Algorithmen relative Feuchtigkeit einzeln

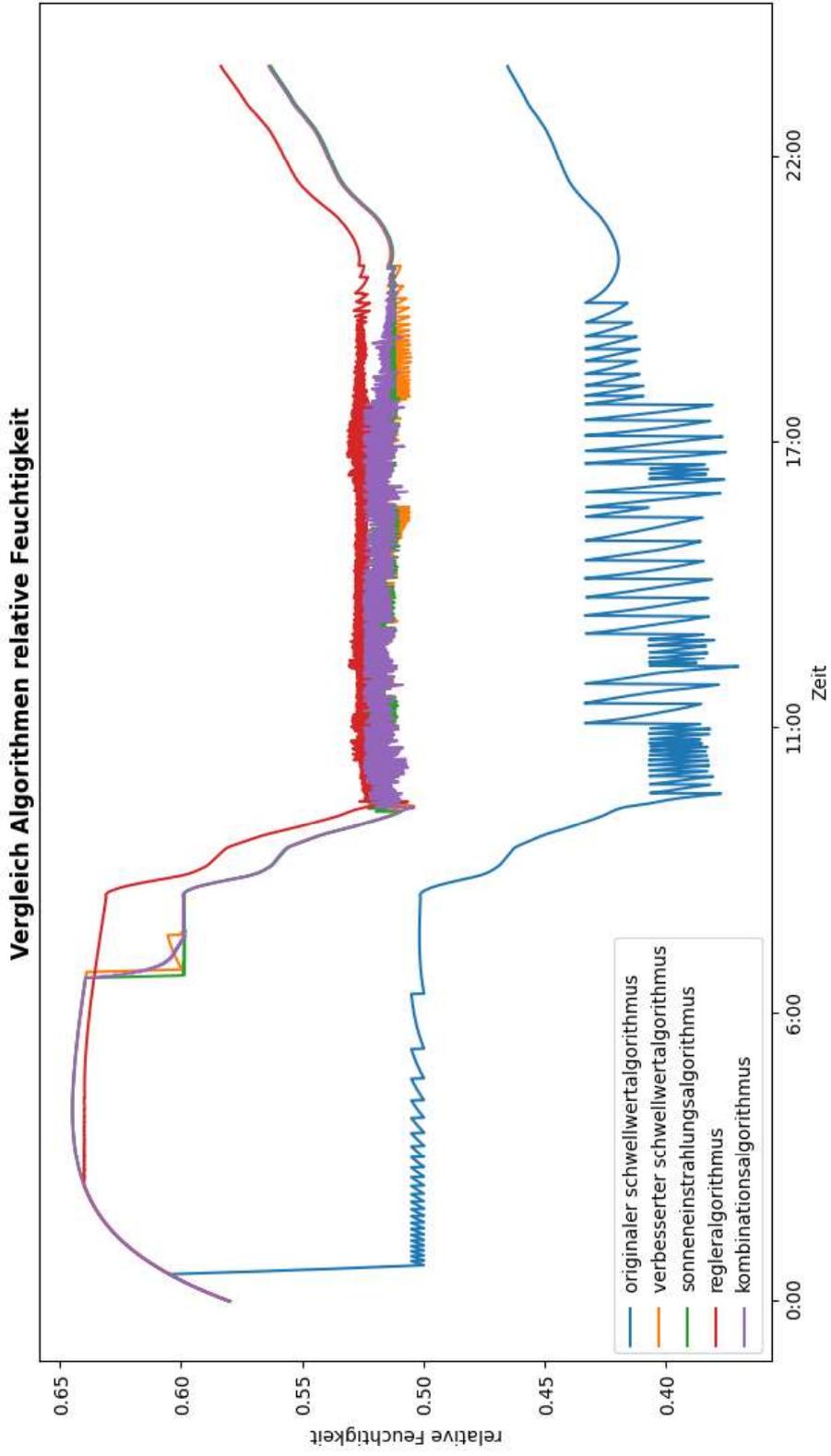


Abbildung 50: Vergleich Algorithmen relative Feuchtigkeit zusammen

## Vergleich Algorithmen SOC

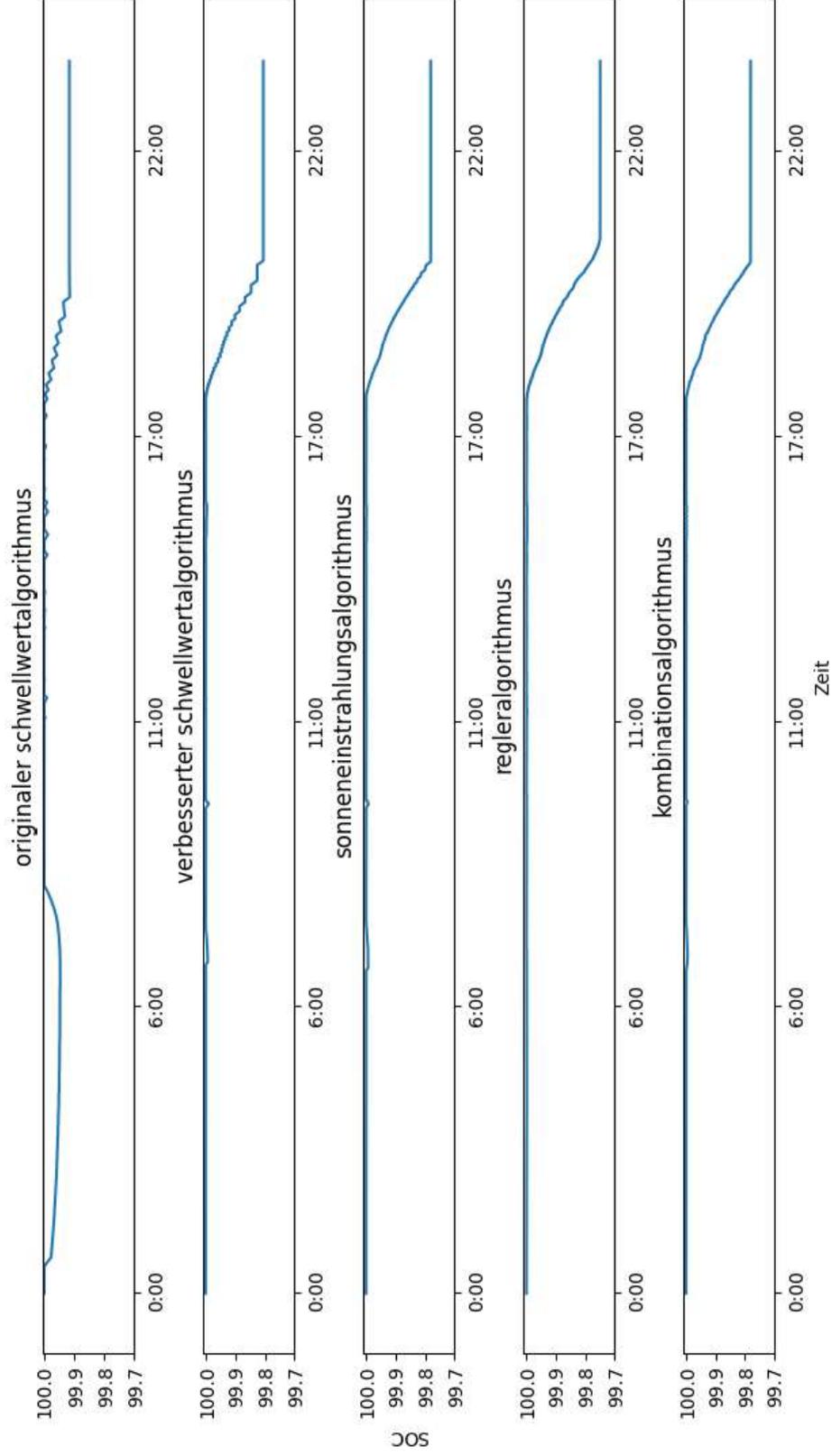


Abbildung 51: Vergleich Algorithmen SOC einzeln

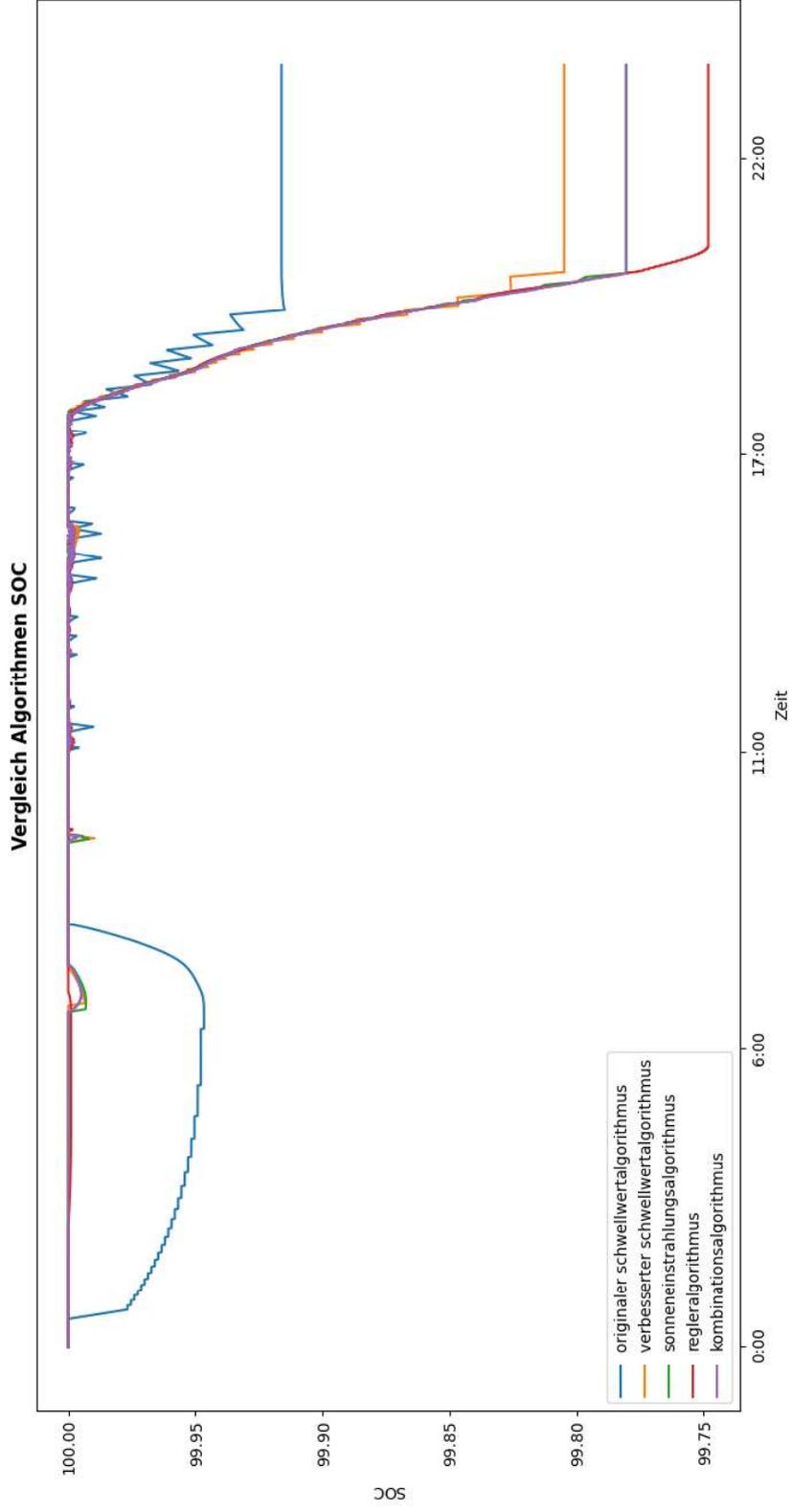


Abbildung 52: Vergleich Algorithmen SOC zusammen

Aus den vorherigen Verläufen können die Informationen für Genauigkeit, Geschwindigkeit und Energieverbrauch abgelesen werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Vergleich (Eigene Tabelle)

Algorithmus	Genauigkeit	Geschwindigkeit	Energieverbrauch
<b>Originaler Schwellwertalgorithmus</b>	Nicht erfüllt	Keine Aussage möglich	5,45 kWh
<b>Verbesserter Schwellwertalgorithmus</b>	erfüllt	Keine Aussage möglich	7,63 kWh
<b>Sonneneinstrahlungsalgorithmus</b>	erfüllt	Keine Aussage möglich	7,62 kWh
<b>Regleralgorithmus</b>	erfüllt	Keine Aussage möglich	7,57 kWh
<b>Kombinationsalgorithmus</b>	erfüllt	Keine Aussage möglich	7,58 kWh

Aus dem Vergleich geht hervor, dass alle Algorithmen außer dem originalen Schwellwertalgorithmus die Vorgaben für die Genauigkeit erfüllen. Demnach wird er in den folgenden Betrachtungen ignoriert. Der Algorithmus mit dem geringsten Energieverbrauch ist der Regleralgorithmus.

Die Geschwindigkeit kann nicht betrachtet werden, weil sich die Parameter des Kühlhauses durch die Ansteuerung der Algorithmen immer im Zielbereich von 50 % bis 70 % relativer Luftfeuchtigkeit und 14 °C bis 20 °C Lagerraumtemperatur bewegen. Zusätzlich sind die Anfangswerte schon innerhalb des Zielbereichs.

Des Weiteren können die Algorithmen auch anhand des Lagerraumtemperaturverlaufs verglichen werden. Der Sonneneinstrahlungsalgorithmus und der Kombinationsalgorithmus haben fast den gleichen Verlauf der Lagerraumtemperatur in der Mitte des erwünschten Bereichs. Deshalb würden sich die beiden Algorithmen am besten für die Einhaltung der Grenzwerte der Lagerraumtemperatur empfehlen. Neben den Temperaturverläufen können die Algorithmen anhand der Luftfeuchtigkeitsverläufe bewertet werden. Die Verläufe ähneln sich stark, aber der Regleralgorithmus bewirkt den größten Abstand der Luftfeuchtigkeit von der Grenze von 50 %. Schließlich kann der Verlauf des Ladezustands bei der Anwendung der verschiedenen Algorithmen unterschieden werden. Der Regleralgorithmus entlädt die Batterien am stärksten und der verbesserte Schwellwertalgorithmus am wenigsten.

Der Vergleich anhand verschiedener Kriterien hat nicht zu einem einzelnen Algorithmus geführt, der alle Vorteile vereint. Jedoch muss sich für Thailand auf ein Programm festgelegt werden. Folglich ist es notwendig, die verschiedenen Kriterien zu priorisieren. Das höchste Gut ist die Kaffeebohnen vor dem Verderben zu schützen und das Aroma zu konservieren. Deshalb ist das wichtigste Kriterium für die Algorithmen die Einhaltung des Bereichs der relativen Feuchtigkeit. Somit wird der Regleralgorithmus als finaler Algorithmus vorgeschlagen.

## 4. Auswertung

Ausgehend von der originalen Struktur des Kaffeekühlhausprototyps in Köthen wurde die Ausgangssituation analysiert und verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten zum originalen Schwellwertalgorithmus erstellt. Zusätzlich wurden drei Steueralgorithmen zur Klimatisierung eines energieautarken Kühlhauses entwickelt. Dabei wurde beachtet, dass die Batterien bei unsachgemäßer Benutzung an Lebensdauer verlieren. Dieser Prozess war kompliziert, da die Architektur aus sehr vielen Teilen besteht und die aufgenommenen Kennlinien nicht nachvollziehbar waren. Dadurch war es nicht möglich die Bilanzierung in ein Modell zu überführen, das die genauen Vorgänge im Kaffeekühlhausprototyp bzw. im geplanten Kaffeekühlhaus in Thailand widerspiegelt. Nichtsdestotrotz konnte mit einem vereinfachten Modell gezeigt werden, dass die Algorithmen unterschiedlich arbeiten und verschiedene Stärken und Schwächen aufweisen.

Es war gefordert Wettervorhersagen bzw. Wetterdaten in die Algorithmen miteinzubeziehen. Diese Forderung konnte nicht erfüllt werden, da es bei den Berechnungen zu Ungenauigkeiten gekommen ist. Diese hätten in der Realität zu Problemen führen können, weil das System des Kaffeekühlhauses sensibel auf Veränderung reagiert. Deshalb sind weder Wetterdaten noch Wettervorhersagen in die Betrachtungen eingeflossen. Es wurde nur die Information der aktuellen Sonneneinstrahlung verwendet, um eine Entscheidung für die Veränderung der Sollwerte für die Lagerraumtemperatur und die Lagerraumluftfeuchtigkeit zu treffen.

Schließlich wird eine Empfehlung für den Regleralgorithmus ausgesprochen, da mit diesem sicher alle geforderten Bedingungen eingehalten werden können. Zusätzlich wurde ein Problem bei allen Algorithmen erkannt, wenn für längere Zeit keine Sonne scheint und somit die Batterien nicht geladen werden können. Dafür wird als Lösungsmöglichkeit die Verwendung eines Benzinaggregats oder einer Brennstoffzelle vorgeschlagen, damit die Lagerbedingungen der Kaffeebohnen eingehalten werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurde der Aufbau der Klimatisierung eines energieautarken Kaffeekühlhauses, bestehend aus Photovoltaik-Modulen, Laderegler, Wechselrichter, Batterien, KSG, Entfeuchter, Lüfter, XWT, Sensoren, Steuergeräten, Raspberry Pi und Kommunikationsmodulen, dargestellt. Es wurden die im Kaffeekühlhaus auftretenden thermodynamischen Vorgänge erläutert und die dazugehörigen Bilanzgleichungen aufgestellt. Mögliche regelungstechnische Herangehensweisen wurden beschrieben und in Form von Algorithmen angewendet.

Der Projektstand von SilaaCooling zu Beginn der Arbeit wurde dokumentiert und der vorhandene Algorithmus wurde analysiert und optimiert. Zusätzlich zur Verbesserung wurden neue Algorithmen entwickelt. Diese konnten nicht in Thailand getestet werden, weil dort das Kaffeekühlhaus noch nicht fertiggestellt ist. Außerdem bilden die Geräte im Kaffeekühlhausprototyp in Köthen nicht die vollständige Arbeitsweise im Kaffeekühlhaus ab. Als Alternative zum Vergleichen der Algorithmen in Thailand wurde ein Modell mit Hilfe der Bilanzierungsgleichungen entworfen. Die Algorithmen konnten jedoch positiv am Kaffeekühlhausprototyp getestet werden. Ein Vergleich der Algorithmen wurde durchgeführt und der Regleralgorithmus mit PI-Reglern für die Temperaturregelung und die Feuchtigkeitsregelung wurde vorgeschlagen.

Nach Fertigstellung des Kaffeekühlhauses in Thailand sollten Temperatur und Feuchtigkeitskennlinien für das KSG und den Entfeuchter aufgenommen werden. Dann können die Werte für  $K_{PT}$ ,  $K_{PF}$ ,  $K_{IT}$  und  $K_{IF}$  aus dem Regleralgorithmus bestimmt werden. Eine mögliche Kennlinie ist in Abbildung 53 dargestellt.

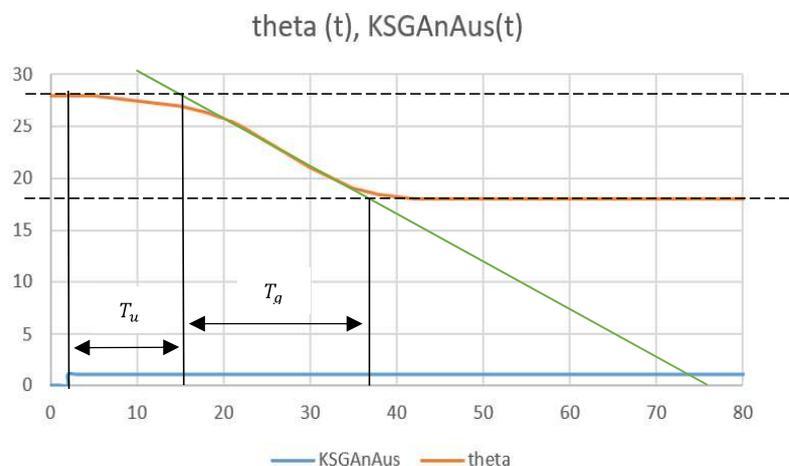


Abbildung 53: Beispielhafte Kennlinie (Eigene Zeichnung)

Daraus können dann  $T_u$ ,  $T_g$  und  $K_{P_S}$  bestimmt werden:  $T_u$  beträgt 14 s,  $T_g$  beträgt 32 s und  $K_{P_S}$  kann analog zu (11) bestimmt werden mit  $\frac{18^\circ\text{C}-28^\circ\text{C}}{1-0} = -10^\circ\text{C}$ . Danach können für den Temperaturregler, mit Hilfe der Tabelle 3, die Parameter  $K_P$  und  $K_I$  bestimmt werden. Für den Feuchtigkeitsregler kann analog vorgegangen werden.

Als Ausblick wurden verschiedene Themengebiete entdeckt, die nach dieser Masterarbeit weiterverfolgt werden sollten. Einerseits, sollte die Abhängigkeit von Temperatur, Feuchtigkeit und Enthalpie aus dem  $h,x$ -Diagramm in Bezug auf das Kaffeekühlhaus in Zukunft betrachtet und in die Algorithmen eingebaut werden. Andererseits, sollte betrachtet werden wie mit zusätzlichen Störgrößen verfahren wird. Diese sind:

- der Wärmeübergang des Bodens in das Kaffeekühlhaus
- die eingetragene Temperatur und Luftfeuchtigkeit:
  - der Kaffeebohnen
  - der Luft bei geöffneter Tür
  - der Lüfter
  - des XWTs.

Es wurde ein Problem identifiziert, dass auch der beste Algorithmus des Kaffeekühlhauses nicht vor fehlender Energie bei sonnenarmen Phasen schützen kann. Dies sollte auch weiter betrachtet werden.

Insgesamt bietet SilaaCooling den Kaffeebohnenanbauern in Thailand die Möglichkeit in gebirgigem Gebiet mit Hilfe von erneuerbaren Energien Kaffeebohnen unter Einhaltung der korrekten Bedingungen zu lagern. Die Algorithmen dieser Masterarbeit können dabei helfen.

## VI. Literaturverzeichnis

- [1] Hochschule Anhalt, „SilaaCooling, Energieautarke klimatisierte Lebensmittellager für offgrid Gebiete,“ [Online]. Available: <https://www.silaacooling.de/wp/>. [Zugriff am 07.07.2021].
- [2] Embedded-Systems Lab, „SilaaCooling: Entwicklung energieautarker Kühllager für off-grid Gebiete der ASEAN Region,“ [Online]. Available: <https://es-lab.de/wp/studentische-arbeiten-und-projekte/projekte/silaacooling-entwicklung-energieautarker-kuehllager-fuer-off-grid-gebiete-der-asean-region/>. [Zugriff am 01.06.2021].
- [3] M. Haile und W. H. Kang, The Harvest and Post-Harvest Management Practices' Impact on Coffee Quality, Chuncheon: IntechOpen, 2019.
- [4] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. , „Kaffee, Rohkaffee,“ [Online]. Available: <https://www.tis-gdv.de/tis/ware/genuss/kaffee/kaffee.htm/>. [Zugriff am 04.06.2021].
- [5] H.-D. Tscheuschner, Grundzüge der Lebensmitteltechnik, B. Behr's Verlag GmbH & Co. KG, 2004.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), „Storage of Coffee,“ Rom.
- [7] T. Luckos, „Bestimmung der Gehalte an Ochratoxin A in Kaffee,“ Wien, 2017.
- [8] H. K. Iben und J. Schmidt, Starthilfe Thermodynamik, Magdeburg: B.G. Teubner Stuttgart Leipzig, 1999.
- [9] L. Keller, Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen, München: Oldenbourg Industrieverlag , 2009.
- [10] B. Hörschemeyer, Modellierung der Verdunstung urbaner Vegetation, Münster: Springer Spektrum, 2019.
- [11] P. v. Böckh und T. Wetzels, Wärmeübertragung, Karlsruhe: Springer Vieweg, 2017.
- [12] F. Stange, „Klimatisierungsschema,“ [Online]. Available: <https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/SilaaCooling/Blockschaltbild/Programmablaufplan&openfile=7042932>. [Zugriff am 09.08.2021].

- [13] J. Dohmann, Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen, Heidelberg: Springer-Verlag, 2016.
- [14] P. Kunz, Wärmepumpen und Kältetechnik II, Dietlikon: Kunz-Beratungen, 2007.
- [15] A. Heindl, „Praxisbuch Horden- und Flächentrocknung,“ Springer-Verlag GmbH Deutschland, Deining, 2020.
- [16] K. Schild und W. M. Willems, Wärmeschutz Grundlagen - Berechnung - Bewertung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [17] K.-H. Grote, B. Bender und D. Göhlich, Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [18] V. Wesselak und S. Voswinkel, Photovoltaik Wie Sonne zu Strom wird, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [19] H.-G. Wagemann und H. Eschrich, Photovoltaik, Berlin: B.G.Teubner Verlag, 2007.
- [20] M. Collares-Pereira und A. Rabl, „The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values,“ *Solar Energy*, pp. 155-164, 1979.
- [21] A. Bikbulatov, „Analysis of the Valve Regulated Lead-Acid (VRLA-GEL) batteries behavior and development of State of Charge determination device and algorithm for real-time applications,“ Köthen, 2017.
- [22] T. Riegler, Solarstrom effizient nutzen, Baden-Baden: Verlag für Technik und Handwerk, 2011.
- [23] Accusysteme Transwatt GmbH, „Batterie-Ladung: längere Lebensdauer mit adaptiver 4-Stufen-Ladung,“ [Online]. Available: <https://www.transwatt.de/mehr-lebensdauer-mit-4-stufiger-batterieladung>. [Zugriff am 14.06.2021].
- [24] S. Bortignon, „Wie funktioniert ein Wechselrichter,“ [Online]. Available: <https://www.mpptsolar.com/de/wechselrichter-funktionsweise.html>. [Zugriff am 09.08.2021].
- [25] J. Lunze, Regelungstechnik 1, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [26] G. Strohrmann, Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse, München: Oldenbourg-Industrieverlag, 2002.
- [27] ProSign GmbH, „P-Glied,“ [Online]. Available: [https://micon-l.de/FB\\_DE\\_P-Glied.html](https://micon-l.de/FB_DE_P-Glied.html). [Zugriff am 15.06.2021].

- [28] Prosign GmbH, „I-Glied,“ [Online]. Available: [https://micon-l.de/FB\\_DE\\_I-Glied.html](https://micon-l.de/FB_DE_I-Glied.html). [Zugriff am 15.06.2021].
- [29] P.F.Orlowski, Praktische Regeltechnik, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- [30] T. Bindel und D. Hofmann, Projektierung von Automatisierungsanlagen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [31] V. Plenck, Grundlagen der Automatisierungstechnik kompakt, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [32] SAMSON AG , „Technische Information Regler und Regelstrecken,“ Frankfurt am Main, 2012.
- [33] Hochschule Anhalt, „Programm „KMU innovativ – Energieeffizienz / Klimaschutz“ Zwischenbericht 2020,“ Köthen, 2020.
- [34] axxeo GmbH, „Forschung und Entwicklung,“ [Online]. Available: <https://www.axxeo.de/ueber-uns/forschung/>. [Zugriff am 19.06.2021].
- [35] Hochschule Anhalt, „Bericht des Präsidiums zur Erfüllung der Zielvereinbarungen 2018,“ Köthen, 2018.
- [36] A. Weiß, „Fotos TZK,“ [Online]. Available: [https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/Masterarbeit\\_fhassa/Fotos%20TZK&fileid=23336746](https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/Masterarbeit_fhassa/Fotos%20TZK&fileid=23336746). [Zugriff am 17.07.2021].
- [37] Gold Coast Car Electrics & Mechanical, „Dual battery systems – the basics you need to know,“ [Online]. Available: <https://gccem.com.au/dual-battery-systems-the-basics-you-need-to-know/>. [Zugriff am 17.07.2021].
- [38] Helios Ventilatoren AG, „AV 100,“ [Online]. Available: <https://www.helios.ch/de/detail?id=4245>. [Zugriff am 09.08.2021].
- [39] Koralewski Industrieelektronik oHG, „Steuergerät/Übersicht,“ Hambühren, 2019.
- [40] Koralewski Industrieelektronik oHG, „Batteriemanagement/ Übersicht,“ Hambühren, 2019.
- [41] S. Eduard, „Programm „KMU innovativ – Energieeffizienz /Klimaschutz“ Zwischenbericht 2019,“ Köthen, 2019.
- [42] F. Stange, „PAP Klimatisierung,“ [Online]. Available: [https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/SilaaCooling/Teilprojekt\\_Anlagensteuerung/Programmierung%20Raspi&openfile=21750746](https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/SilaaCooling/Teilprojekt_Anlagensteuerung/Programmierung%20Raspi&openfile=21750746). [Zugriff am 17.07.2021].

- [43] F. Stange, „PAP Energiesystem,“ [Online]. Available: [https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/SilaaCooling/Teilprojekt\\_Anlagensteuerung/Programmierung%20Raspi&openfile=21750745](https://fb-emw.de/index.php/apps/files/?dir=/SilaaCooling/Teilprojekt_Anlagensteuerung/Programmierung%20Raspi&openfile=21750745). [Zugriff am 17.07.2021].
- [44] Swegon Germany GmbH, „Montage- und Betriebsanleitung,“ Garching-Hochbrück, 2021.
- [45] Trotec GmbH, „Kennlinien DH25S,“ Heinsberg, 2021.
- [46] N. I. Koschkin und M. G. Schirkjewitsch, Elementarphysik griffbereit. Definitionen, Gesetze, Tabellen, Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1975.
- [47] H. Bernstein, Analoge, digitale und Messtechnik, München: Oldenbourg Verlag München, 2013.
- [48] N. Held, Zylinderdruckbasierte Regelkonzepte für Sonderbrennverfahren bei PKW-Dieselmotoren, Stuttgart: Springer Vieweg, 2016.
- [49] J. Unger, Einführung in die Regelungstechnik, Stuttgart: B. G. Teubner Stuttgart, 1992.