



Thomas Fuchs, BSc

**Design und Entwicklung eines Smart Home Devices zur Steuerung
variabler Verbraucher zur effizienten Nutzung von erneuerbaren Energien**

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Telematik

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Eugen Brenner, Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Institut für Technische Informatik

Graz, Juli 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Der große Zuwachs erneuerbarer Energien, wie zum Beispiel der Einsatz von Photovoltaikanlagen im privaten und gewerblichen Bereich, erfordert Systeme, die eine effiziente Nutzung der produzierten Energie ermöglichen. Ein Großteil der benötigten Energie im Haushalt wird für Raumwärme und Warmwasser aufgewendet. In dieser Arbeit soll ein intelligentes Steuergerät konzipiert, realisiert und bis zur Marktreife entwickelt werden, um eine variable Warmwasseraufbereitung durchzuführen und somit dieser einer volatilen Energieproduktion anzupassen. Als Basis für die Hardware und Software dient ein Z-Wave Modul, welches als Funkschnittstelle und als Mikroprozessor eingesetzt wird. Dieses Modul wurde um eine Industrielle Schnittstelle (0-10V) zur Steuerung der einem Heizstab zugeführten Leistung erweitert und ermöglicht in weiterer Folge die Einbindung in ein Smart Home. Ein Z-Wave Controller kann Geräteparameter einstellen sowie die Warmwassertemperatur auslesen. Zusätzlich zu dem angedachten Warmwasserszenario kann das entwickelte Gerät als Standard Z-Wave Multilevel Sensor und/oder als Multilevel Switch Gerät für verschiedenste andere Smart Home Anwendungen verwendet werden.

Abstract

The growth of renewable energies and the use of more photovoltaic plants in private and commercial sectors makes electrical energy production increasingly volatile. In consequence, systems are needed that enable an efficient utilization of produced energy. A large part of the energy needed in a household is expended for room heating and hot water. In this diploma thesis a smart controlling device has been be drafted and developed to marketability, for an application tracking photovoltaic surplus power, using variable hot water generation. The soft- and hardware platform is provided using Z-Wave components. A Z-Wave module contains a microprocessor and radio interface which can be used for the envisaged smart home application. An additional industrial interface (0-10V) controls the power provided to the hot water heating element. A Z-Wave controller configures the device, sets parameters and reads back the hot water temperature from the developed device using wireless Z-Wave technology. In addition to the hot water scenario, the device can be used as a standard Z-Wave Multilevel Sensor and/or as a Multilevel Switch device for many other smart home applications.

Danksagung

Danken möchte ich meinem Kollegen Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Christian Mentin, der mich dem Thema der erneuerbaren Energie, sowie auch der Effizienzsteigerung durch intelligente Steuerungen und somit meinem Diplomarbeitsthema nähergebracht hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Ein weiterer Dank gilt auch der Firma LEVION Technologies GmbH und meinen Arbeitskollegen, insbesondere Sebastian Lassacher, BSc für die Unterstützung bei kniffligen Themen.

Danken möchte ich auch meinem ursprünglichen Betreuer Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Kreiner, sowie meinem jetzigen Betreuer Professor Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Eugen Brenner.

Meiner Frau Stefanie möchte ich dafür danken, dass sie mir in den schwierigen und anstrengenden Zeiten zur Seite stand und immer für mich da war.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern, die mir alles ermöglicht und mich immer unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	3
1.2	Ziel der Arbeit	5
2	Grundlagen	6
2.1	Erneuerbare Energien	6
2.2	Smart Meter	7
2.3	Übersicht über Kommunikationstechnologien.....	7
2.4	Z-Wave	10
2.4.1	Z-Wave Architektur	12
2.4.2	Layerübersicht	13
2.4.3	Z-Wave Device und Role Types	15
2.4.4	Associations	19
2.5	Automatentheorie	19
3	Stand der Technik	22
3.1	Smart Energy Management System	22
3.2	Variabler Energie Verbraucher (Analog-Z).....	24
3.2.1	Prinzipielle Funktionsweise	25
3.2.2	Analog-Z V1.....	26
3.2.3	Analog-Z V2.....	27
3.3	SMARTFOX	28
3.4	AC ELWA.....	29
4	Anforderungsanalyse	30
4.1	Allgemeine Anforderungen.....	30
4.2	Hardwareanforderungen	31
4.3	Softwareanforderungen	32
5	Konzept	37

5.1	Hardware	37
5.2	Z-Wave	39
5.2.1	Role und Device Type	39
5.2.2	Kommandoklassen	41
5.3	Bedienkonzept	44
5.4	Software.....	45
5.4.1	Entwicklungsumgebung.....	46
5.4.2	Endlicher Automat.....	47
5.4.3	Temperaturmessung	50
5.4.4	Regelkreis.....	56
5.4.5	Konfigurationsparameter	60
5.4.6	Sicherheit.....	66
6	Implementierung	68
6.1	Z-Wave Programmablauf.....	68
6.2	Z-Wave Main-Loop.....	69
6.3	Programmmodule	70
6.3.1	Gerätespezifische Programmlogik.....	71
6.3.2	Benutzerschnittstellen.....	74
6.3.3	Z-Wave Interface	75
6.4	Testumgebung	77
7	Ergebnisse	78
8	Schlussbemerkung und Ausblick.....	85
9	Literaturverzeichnis	87
10	Abbildungsverzeichnis	89
11	Tabellenverzeichnis	91
12	Anhang.....	92

1 Einleitung

Smart Home ist heutzutage ein sehr gebräuchlicher Begriff, der für die Vernetzung der Haustechnik eine große Rolle spielt. Hierbei werden verschiedenste Haushaltsgeräte, wie zum Beispiel die Unterhaltungselektronik oder das Heizsystem miteinander durch ein Smart Home System verknüpft. Durch diese stetige Entwicklung im Bereich der Vernetzung von Geräten steigen die Anwendungsmöglichkeiten nicht nur im Bereich der Hausautomatisierung, sondern auch im Bereich der Energieoptimierung. Dabei unterscheiden sich die Smart-Home-Systeme durch ihre Benutzerfreundlichkeit und erfordern oft viel Feingefühl und Geduld in der Konfiguration.

Durch den stetigen Zuwachs im Bereich der erneuerbaren Energie, werden Privatpersonen immer mehr auch selbst zu Prosumern¹. Daher ist es vor allem für den Endanwender extrem wichtig den täglichen Energiebedarf bestmöglich zu optimieren, um möglichst energie- und kosteneffizient zu sein. Bei Betrachtung des täglichen Energiebedarfs in einem Haushalt, kann man diesen grob in drei große Bereiche unterteilen: Raumwärme, Warmwasser und elektrische Energie. Für diese Einzelbereiche sind Systeme vorhanden. Um eine effiziente Energieausnutzung zu ermöglichen, ist jedoch eine intelligente Steuerung nötig, welche die Einzelbereiche verbindet und eine zielgerichtete Regelung übernimmt. In der Abbildung 1 ist ein Schemabild eines modernen Einfamilienhauses dargestellt, welches mit einer Photovoltaikanlage, einer elektrischen Warmwasseraufbereitung, einem Elektroauto und diversen Haushaltsgeräten ausgestattet ist.

¹ Ein Prosumer ist eine Person, die gleichzeitig Konsument und Produzent ist.

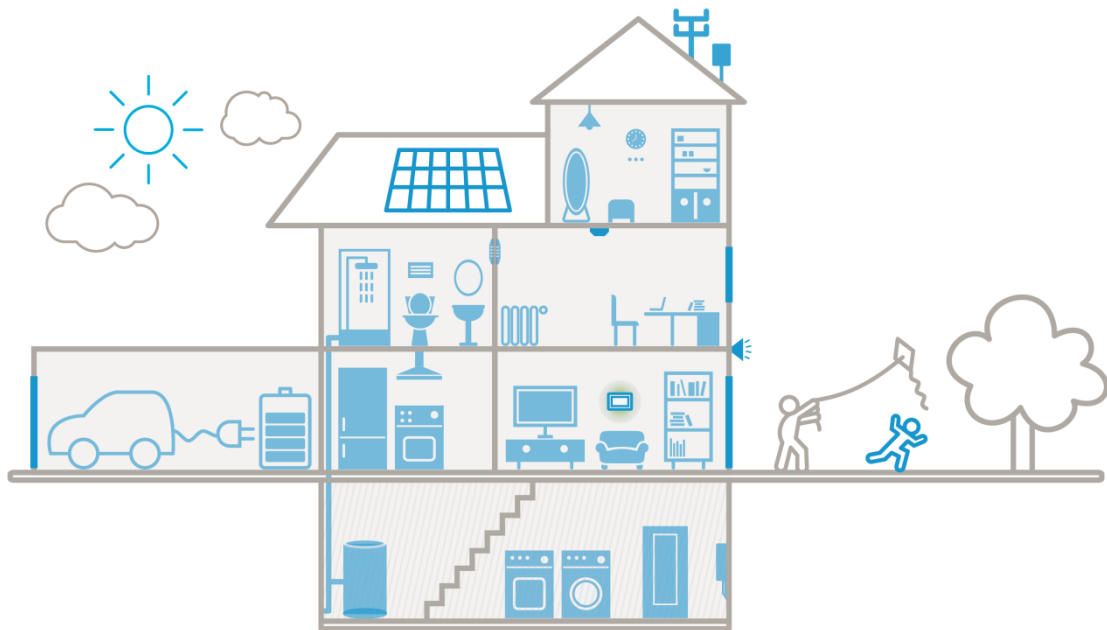


Abbildung 1: Übersicht eines Haushaltes mit einer Photovoltaikanlage und Verbrauchern, wie Elektroauto, Warmwasseraufbereitung und Haushaltsgeräten

Derzeit befindet sich der Energiesektor in einem Umbruch. Die Energiewende wird durch neue Technologien angetrieben und macht die Dekarbonisierung unseres Energiesystems möglich. Erneuerbare Energien sowie auch Energieeffizienz stellen einen großen Zukunftsmarkt dar. Die Internationale Energieagentur schätzt einen starken Zuwachs von regenerativen Quellen in den nächsten 5 Jahren auf bis zu 920 GW. Dies entspricht in etwa der Hälfte der gesamten Kapazität aus der weltweiten Energieproduktion aus Kohle mit 2000 GW. Aus der Marktstatistik des Jahres 2016 geht hervor, dass die neuen Kapazitäten zur Stromerzeugung aus fast zwei Drittel erneuerbaren Energien bestehen. Vor allem im Bereich der Photovoltaik ist ein starker Zuwachs zu erkennen. Ein wesentlicher Treiber der Energiewende ist hierbei die Elektromobilität. In Österreich ist der Verkehr der zweitgrößte Treibhausgasemittent und einer der größten Energieverbraucher. Der Energieverbrauch für die Wärmeversorgung von Gebäuden wird in der EU mit rund 40 % angegeben. In Österreich entspricht der Energieverbrauch für die Raumwärme und Warmwasser 27 %. Private Haushalte wenden in etwa die Hälfte der benötigten Energie dafür auf. Das zukünftige Energiesystem verändert die Charakteristik der gesamten Energieversorgungs-Kette und ist nicht nur ein reiner Energieträgerwechsel. Die Einbindung von Konsumenten in den Strommarkt, flexible Energieversorgung, die Digitalisierung, dezentrale Technologien, die Veränderung der Gesellschaft, durch zum Beispiel Sharing-Economy sowie die Energie- und Speichertechnologien zählen zu der

treibenden Kraft der Änderung. Intelligente Steuerungen haben den Systemwandel im Energiesystem sehr stark geprägt. [1]

Innovative Technologien können durch den gezielten Einsatz von erneuerbaren Energien zur Dekarbonisierung beitragen. Der Beitrag zu einer besseren Umwelt und zur Dekarbonisierung startet in den eigenen vier Wänden. Eine effiziente Nutzung von Energie sollte hier das Ziel in jedem Haushalt sein.

1.1 Motivation

Ein großes Thema in unserer Gesellschaft ist unsere Umwelt zu schonen und den CO₂ Ausstoß zu minimieren. Bei der Pariser Klimaschutzkonferenz (COP21) im Dezember 2015 haben sich deshalb 195 Länder auf ein weltweites Klimaschutzübereinkommen geeinigt. Dieses umfasst die Reduzierung der Erderwärmung unter 2°C zu begrenzen, die Treibhausgasemissionen um 20 % zu senken, den Anteil der erneuerbaren Energie in Europa auf 20 % anzuheben und die Energieeffizienz um 20 % zu verbessern.[2] Daraus folgt, dass die Optimierung der Energienutzung sowie Effizienzsteigerung von vorhandenen Systemen einen wesentlichen Schritt darstellt. Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt ist der Einsatz von erneuerbaren Energien, deren Ausbau im Moment durch Förderungen unterstützt wird.

Die Produktion der Energie bei erneuerbaren Energiequellen erfolgt nicht konstant, daher spielt die Optimierung des Eigenverbrauchs eine immer wesentlichere Rolle, um infolge auch wirtschaftliche Ersparnisse zu erzielen. Diese Ersparnisse gewinnen vor allem immer mehr an Bedeutung, wenn man den Strommarkt der Zukunft betrachtet, welcher sich im Umbruch befindet. Durch die Einführung der Smart Meter werden neue Tarifmodelle entstehen. Dynamische Stromtarife schaffen hier ein Regulierungswerkzeug, um über den Strompreis den Strombezug zu beeinflussen. [2][3]

Derzeit gibt es noch wenige Anbieter, die einen dynamischen Tarif erlauben. aWattar GmbH² ermöglicht zum Beispiel für Strombezieher einen stündlich ändernden Strompreis. Die Anzahl solcher Anbieter wird in Zukunft sehr wahrscheinlich steigen.

Auch durch den Zuwachs der erneuerbaren Energiequellen befindet sich die Energiebranche in einem Wandel und steht vor großen Herausforderungen. Der Bezug aus solchen Quellen fordert die Stromnetze, da die erzeugte Energie sich stetig ändert und ins

² Stromanbieter in Österreich

Netz eingespeist werden muss. Um dieses Problem zu verhindern, ist es wie schon oben erwähnt sinnvoll, die Energie gezielt einzusetzen und vor allem dann zu verbrauchen, wenn Energie verfügbar ist. So kann man in Folge Einspeisespitzen und in weiterer Folge auch Lastspitzen vermeiden. Eine Abfederung von diesen Spitzen wird ebenso durch die Möglichkeit der Zwischenspeicherung in einem elektrischen Speicher ermöglicht. [5]

In den letzten Jahrzehnten ist der Lebensstandard stetig gestiegen und so zählt zum Beispiel auch der Zugang zu Warmwasser in ausreichender Menge und zu jeder Tageszeit zur Selbstverständlichkeit. Täglich werden im Durchschnitt ca. 130 Liter Trinkwasser pro Tag und Person benötigt. Davon sind 44% warmes Wasser. Dies entspricht ca. 57 Liter pro Person täglich. [6]

Mit der folgenden Näherungslösung wird die Wärmeenergiemenge berechnet:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$$

$$1J = 1Ws = \frac{1}{3600}Wh$$

Dichte von Wasser bei 20°C

$$\rho_{Wasser,20^\circ C} = 998 \frac{kg}{m^3}$$

Spezifische Wärmekapazität von Wasser bei 20°C:

$$c_{Wasser,20^\circ C} \approx 4182 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Erwärmung von 228l Wasser (entspricht 0,228m³) um 1°C:

$$Q = 4182 \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 998 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.228m^3 \cdot 1K = 951,59KJ = 951,59KW_s = \mathbf{264Wh}$$

Erwärmung von 228l Wasser um 40°C:

$$Q = 4182 \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 998 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.228m^3 \cdot (50^\circ C - 10^\circ C) = 38.06MJ = \mathbf{10.57kWh}$$

Erwärmung von 1000l Wasser um 40°C:

$$Q = 4182 \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 998 \frac{kg}{m^3} \cdot 1m^3 \cdot (50^\circ C - 10^\circ C) = 166.95MJ = \mathbf{46.37kWh}$$

In einem vier Personen Haushalt ist somit täglich im Schnitt 10,57 kWh an Energie für die Erwärmung des Wassers um 40°C erforderlich. Daraus wird ersichtlich, dass in diesem Bereich enorm viel Energie benötigt wird und daher die Warmwasseraufbereitung ein großes Potential hat, um Energie gezielt einzusetzen.

1.2 Ziel der Arbeit

Im Zuge der Masterarbeit soll ein intelligentes Smart Home Device entwickelt werden, um die Ansteuerung von Verbrauchern stufenlos zu ermöglichen. Dadurch kann der Energieverbrauch der aktuellen Erzeugung einer erneuerbaren Quelle angepasst werden. Durch die Wahl einer geeigneten Kommunikationstechnologie soll das Steuergerät in das bestehende Energiemanagementsystem SEMS³ eingebunden werden. Die Symbiose der beiden Systeme sowie auch das Zusammenspiel mit erneuerbaren Energiequellen ermöglicht eine ökologische und auch wirtschaftliche Nutzung des Gerätes.

Die Arbeit umfasst die gesamte Produktentwicklung beginnend bei der Analyse und Planung bis hin zur Implementierung und fertigen Umsetzung. Das Produkt soll bis hin zur Marktreife entwickelt werden. Da zu Beginn des Projektes keine Hardware mit den Anforderungen für die Umsetzung der Arbeit verfügbar war, wurde im Zuge einer Projektarbeit die Hardware entwickelt. Aufbauend auf dieser Hardware wurde die Software entwickelt.

Im ersten Teil der Arbeit werden zentrale Begriffe und die verwendeten Technologien beschrieben. Der zweite Teil umfasst die Analyse der Anforderungen, um die Rahmenpunkte der Produkteigenschaften zu erhalten. Basierend darauf werden in einem Konzept die Details des zu entwickelnden Gerätes weiter ausgearbeitet und dieses umgesetzt und implementiert. Im Schlussteil wird in einer Diskussion die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf eine fortführende Weiterentwicklung gemacht.

³ Smart Energy Management System

2 Grundlagen

2.1 Erneuerbare Energien

Als erneuerbare Energien werden Energieträger bezeichnet, die sich selbst erneuern beziehungsweise nachwachsen und nicht auf endliche Ressourcen zurückgreifen und nicht zur Erschöpfung der Energiequelle beitragen. Hierzu zählen: Windenergie, Sonnenenergie, Wasserkraft, Biomasse, Gezeitenenergie und Geothermie. Die fossilen Energieträger Öl, Kohle und Gas greifen im Gegensatz zu den Erneuerbaren auf endliche Ressourcen zurück. Aus diesen Energiequellen können die unterschiedlichen Energieformen, wie Elektrizität, Wärme und Kraftstoff gewonnen werden. [7] In Österreich entspricht der Anteil der erneuerbaren Energien an der heimischen Stromerzeugung circa 70 Prozent. [8]

Bei den Energiequellen Wind und Wasser wird durch einen Generator die elektrische Energie gewonnen. Bei Windkraftanlagen wird der Generator durch die Windräder, welche durch die Windkraft in Rotation gebracht werden, gespeist. Wohingegen bei Wasserkraftanlagen die Generatoren durch Wasserräder oder Wasserturbinen angetrieben werden. Die Effizienz dieser natürlichen Energiequellen ist sehr stark von der geographischen Lage abhängig. So sollte ein Windkraftwerk in Gebieten mit möglichst viel und konstantem Wind in Betrieb genommen werden und Wasserkraftanlagen dort, wo es stetig fließendes Wasser gibt. [9][10]

Im Gegensatz zu Wasser und Windenergie wird bei der Sonnenenergie durch den photovoltaischen Effekt elektrische Energie gewonnen. Dies erfolgt durch Verwendung von Solarzellen, welche meistens aus Silizium bestehen. Durch Sonneneinstrahlung auf die Solarzelle fließt ein Gleichstrom, der durch einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt wird. [11]

Vor allem im privaten Bereich ist eine Photovoltaik Anlage sehr beliebt und gefragt. Viele Menschen wollen zur Nachhaltigkeit der Energieerzeugung beitragen, in den eigenen vier Wänden energieautonom fungieren und somit auch die Stromproduktion in die eigene Hand nehmen. Auch im gewerblichen Bereich sowie auch in der Land- und Forstwirtschaft gewinnen Photovoltaikanlagen wegen der Wirtschaftlichkeit immer mehr an Beliebtheit. [8]

Das wirtschaftliche Ziel der Prosumer ist es, durch den gezielten Einsatz der produzierten Energie aus der Photovoltaikanlage, energieautark zu werden. Die Wahl der Anlagengröße hängt hierbei von vielen Faktoren, wie zum Beispiel jährlicher Energieverbrauch, Anzahl der Personen im Haushalt, Aufstellungsort, Dachneigung sowie auch Ausrichtung der Anlage ab. Typischerweise sind Anlagen bis 7 kWp im Privatbereich relevant. Bei einer Dachneigung von 30° und Südausrichtung der Anlage kann ein PV-Ertrag von ca. 7591 kWh laut dem PV-Austria Photovoltaik-Eigenverbrauchsrechner⁴ erwartet werden. Nimmt man einen jährlichen Energieverbrauch von 6700 kWh an, könnte rein bilanziell der gesamte Energiebedarf mit der PV-Anlage abgedeckt werden. Bei Annahme aus der Berechnung im vorigen Kapitel sind für einen 4-Personenhaushalt ca. 11 kWh für die Warmwasseraufbereitung pro Tag erforderlich, dies entspricht für ein Jahr 4015 kWh. Daraus folgt, dass durch den Einsatz einer intelligenten Warmwasseraufbereitung, die sich an den Leistungsverlauf der PV-Anlage anpasst, der Eigenverbrauchsanteil wesentlich erhöht werden kann.

2.2 Smart Meter

In den letzten Jahren gewann der Begriff Smart Meter immer mehr an Bedeutung. Beim Smart Meter handelt es sich um eine intelligente digitale Messeinheit, welche den veralteten elektromechanischen Ferraris-Zähler ersetzen soll. Der flächendeckende Einsatz der Smart Meter wurde in der EU für 2020 mit 80 % in den Haushalten vorgesehen. Die Energiedaten werden in einem viertelstündlichen Intervall aufgezeichnet. Die Trendentwicklung von den bisherigen statischen Stromtarifen zu einem dynamischen Stromtarif ermöglicht somit das Verbrauchsverhalten der Kunden zu lenken. Um dynamische Tarife allerdings zu nutzen, ist ein Smart Meter zwingend erforderlich, damit das Energieversorgungsunternehmen die aufgezeichneten Energiedaten auslesen kann. [12]

2.3 Übersicht über Kommunikationstechnologien

Es gibt eine Vielzahl an Kommunikationsprotokollen, die für den Einsatz zur Hausautomatisierung eingesetzt werden. Hierbei kann zwischen kabelgebundenen und Funksystemen unterschieden werden. ZigBee, Insteon, Wavenis, Bluetooth, EnOcean und Z-Wave sind hierbei stark verbreitete Funkprotokolle. Als kabelgebundenes System wird zum Beispiel Ethernet verwendet. Jede dieser Technologie hat ihre Vor- sowie Nachteile entsprechend des Einsatzbereiches. In Abbildung 2 und Abbildung 3 ist eine

⁴ http://pvaustria.at/sonnenklar_rechner/

Gegenüberstellung der Protokolle dargestellt. Vor allem durch die Entwicklung hin zu einer immer größer werdenden Vernetzung verschiedenster Geräte im Wohnbereich, welches mit Smart Living bezeichnet wird, spielen hierbei die Funktechnologien eine Schlüsselrolle. Ausschlaggebend für den Einsatz von Funk ist ebenso die einfache Montage. Wichtige Eigenschaften der Protokolle sind die Ausfallsicherheit, die Verfügbarkeit, die Robustheit und auch die Nutzbarkeit.

	Feature	Unit	Protocols 1/2						
			ZigBee	Z-Wave	Insteon	Wavenis	Bluetooth		
Application Layer	IEEE specification	-	802.15.4	-	-	-	-	802.15.1	
	Public available specification	-	yes	-	-	-	-	yes	
	Max. Number of Nodes	-	65536	32768	65536	N/A	-	8	
	Communication modes	Unicast	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes
		Broadcast	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes
		Multicast	-	yes (APL layer) no (MAC layer)	yes	yes	yes	yes	-
	Others	-	indirect addressing	-	-	-	-	-	
	Security	AES-128	-	yes	yes	-	yes	-	-
		RSA	-	-	-	-	yes	-	-
		Others	-	key management	-	encryption (rolling codes)	-	encryption 64 - 128 bit	-
Network Layer	Hop Limit	-	30 / 10 / 5 mesh / tree / source routing	4	4	N/A	1 (low energy) not defined otherwise		
Link Layer	MAC mechanism	TDMA	-	yes	-	yes	yes	yes	
		CSMA/CD	-	-	-	-	-	-	
		CSMA/CA	-	yes	yes	-	yes	yes	
	Message size	byte	127	64	14 - 28	N/A	8 - 358		
	Reliability	CRC	bit	16	8	8	-	16	
Acknowledge Messages		-	yes	yes	-	per frame per window	yes		
Physical Layer	Frequency band	MHz	868 / 915 / 2400	868 / 908 / 2400	904	433 / 868 / 915	2400		
	Range (typically)	m	10 - 100 (75)	30 (inside), 100 (outside)	45 (outside)	200 (inside) 1000 (outside)	10		
	Bit rate	kb/s	20 / 40 / 250	9.6 / 40 / 200	38.4	4.8 / 19.2 / 100	720 - 1000		
	Modulation	-	BPSK / BPST / O-QPSK	BFSK	FSK	GFSK	GFSK		
	No Gateway needed for Internet Connection	-	-	-	-	-	-		
	Implementation size	ROM	kB	45-128	32-64	0.25-7	48	40-100	
RAM		kB	2.7-12	2-16	0.25	0.4	2.5-30		

Abbildung 2: Übersicht verschiedener Protokolle - Teil 1 [13]

	Feature	Unit	Protocols 2/2					
			WiFi	6lowpan	UWB	Homeplug AV	Ethernet	
Application Layer	IEEE specification	-	802.11a/b/g	802.15.4	802.15.3a	1901	802.3	
	Public available specification	-	yes	yes	yes	yes	yes	
	Max. Number of Nodes	-	50	65536	8	64	65536	
	Communication modes	Unicast	-	yes	yes	yes	yes	yes
		Broadcast	-	yes	yes	yes	yes	yes
		Multicast	-	yes	yes	-	yes	yes
	Others	-	IPv6 anycast	IPv6 anycast	-	-	IPv6 anycast	
	Security	AES-128	-	yes	yes	yes	yes	yes
		RSA	-	yes	yes	-	-	yes
Others		-	WEP, WPA	-	-	-	-	
Network Layer	Hop Limit	-	255	255	N/A	-	255	
Link Layer	MAC mechanism	TDMA	-	-	yes	-	planned	N/A
		CSMA/CD	-	-	-	-	-	yes
		CSMA/CA	-	yes	yes	yes	yes	-
	Reliability	Message size	byte	N/A	127	N/A	1518	1500
		CRC	bit	32	16	32	24	32
Acknowledge Messages	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes	
Physical Layer	Frequency band	MHz	2400 / 5000	868 / 915 / 2400	3100 - 10600	1.8 - 30	-	
	Range (typically)	m	100	10 - 100	10	300	185 - 10000	
	Bit rate	kb/s	11000 - 54000	20 / 40 / 250	100000 - 114000	14 - 200000	10000 -	
	Modulation	-	BPSK, QPSK, QOFDM, CCK, M-QAM	BPSK / BPST / O-QPSK	BPSK, QPSK	QFDM, QAM, QPSK, BPSK	-	
	No Gateway needed for Internet Connection	-	yes	yes	-	-	yes	
	Implementation size	ROM	kB	N/A	24	N/A	N/A	N/A
RAM		kB	N/A	3.6	N/A	N/A	N/A	

Abbildung 3: Übersicht verschiedener Protokolle - Teil 2 [13]

Für die Ausfallsicherheit spielt die Modulation der drahtlosen Funkprotokolle sowie auch das Frequenzband eine wesentliche Rolle. Kommunikationsstandards, die auf den 2,4 GHz Frequenzbereich arbeiten, sind durch den weitverbreiteten Einsatz in fast jedem Haushalt und vielen Geräten, wie zum Beispiel Smartphone und Tablet, Interferenzen ausgesetzt [13]. Bei Z-Wave wurde deshalb der 400er Chip entwickelt, welcher zwischen drei lizenzierten Frequenzbändern wechseln kann und durch Ermittlung der am besten geeigneten Bandbreite für das Senden von Nachrichten, eine Optimierung in der Datenübertragung ermöglicht [14]. Auch Bluetooth und UWB besitzen einen Frequenzsprung Mechanismus, um Kollisionen am Kanal zu vermeiden. ZigBee und WiFi können hingegen eine dynamische Frequenzwahl verwenden [13].

Fast alle der aufgelisteten Protokolle, bis auf Insteon, bestätigen den Empfang einer Nachricht durch eine Empfangsbestätigung. Die Integritätsüberprüfung der Nachrichten

mittels eines CRC Mechanismus wird von allen, bis auf Wavenis, verwendet. Auch die Übermittlung von verschlüsselten Nachrichten spielt eine indirekte Rolle für die Ausfallsicherheit. Alle Protokolle haben einen Verschlüsselungsmechanismus implementiert, die meisten AES⁵-128. [13]

Durch eine Gemeinschaft von Herstellern und Dienstleistern wird die Verfügbarkeit und Ausbreitung eines Standards unterstützt. Bereits vor einigen Jahren hatte Z-Wave, Wavenis und Insteon eine größere Gemeinschaft als ZigBee oder andere Standards wie zum Beispiel 802.15.4 [14]. Heutzutage zählt Z-Wave zu den Marktführern im Bereich der Hausautomatisierung [15]. Bei Z-Wave handelt es sich um einen sich stetig erweiternden Funkstandard, der von vielen Herstellern eingesetzt wird. Die Eigenschaften Robustheit, Verlässlichkeit und Interoperabilität zwischen den Geräten sowie auch die Abwärtskompatibilität zeichnen Z-Wave aus. Im Vergleich zu Z-Wave, gibt es bei ZigBee viele unterschiedliche Anwenderspezifikationen, wodurch Geräte verschiedener Hersteller untereinander nicht kommunizieren können und dadurch die Interoperabilität nicht unbedingt gewährleistet ist. Um die Interoperabilität zwischen Geräten innerhalb eines Funkprotokolls zu gewährleisten, ist eine Standardisierung bis in dem höheren Software-Layer erforderlich. Ist dies nicht der Fall, entstehen viele proprietäre Lösungen, wodurch Geräte mit demselben Funkprotokoll untereinander nicht immer kompatibel sind.

Die Funkreichweite von Z-Wave befindet sich im Vergleich zu den anderen Standards auch im Bereich, der für die Hausautomatisierungsaufgabe des zu entwickelnden Smart Home Devices erforderlich ist.

2.4 Z-Wave

In diesem Abschnitt wird genauer auf Z-Wave eingegangen, da dieser Funkstandard für die Kommunikation mit dem Energiemanagementsystem verwendet wird. Die Firma Zen-Sys, die von zwei dänischen Ingenieuren gegründet wurde, entwickelte Z-Wave in den 90er Jahren. Es handelt sich um ein drahtloses Protokoll, welches eine zuverlässige Übertragung von kleinen Nachrichten von einer Steuereinheit zu einem oder mehreren Knoten im Z-Wave-Netzwerk ermöglicht. Am Anfang war Z-Wave ein proprietäres System. Die Ausbreitung der Technologie führte zur Gründung der Z-Wave Alliance im Jahr 2005. Diese setzt sich für Interoperabilität der Z-Wave Geräte ein, welche durch

⁵ Advanced Encryption Standard

Zertifizierung der Geräte gewährleistet wird. Zu einem öffentlichen Standard wurde Z-Wave im Jahr 2012. Hierbei wurde die Funkschicht durch die internationale Telekommunikationsunion ITU-T als Standard G.9959 verabschiedet. [16]

Für die Funkkommunikation nutzt Z-Wave lizenzfreie regulierte Frequenzbereiche und stellt somit eine faire Nutzung der Frequenzbereiche sicher. Hierzu wird das lizenzfreie SRD⁶ 860 MHz Frequenzband verwendet. Dieses Band unterteilt sich in mehrere Subbänder mit unterschiedlichen Parametern für die Nutzung, wie in der Tabelle 1 aufgelistet wird. [16]

Tabelle 1: Frequenznutzungsparameter für das 860 MHz Band

Subband (MHz)	Nutzung	max. ERP ⁷	Tastgrad, zeitliche Nutzung
865,0-868,0	allgemein	25 mW	<1%
868,0-868,6	allgemein	25 mW	<1%
868,7-869,2	allgemein	25 mW	<0,1%

Eine Regulierung der Sendeleistung und der Sendezeit stellt hier die faire Nutzung des Bandes sicher, wodurch Dauersender ausgeschlossen werden. Diese Regulierung wird vom Staat vorgenommen und besitzt unterschiedliche Vorschriften für die Funkfrequenzen in den jeweiligen Ländern. In der Tabelle 2 werden beispielhaft die Funkfrequenzen für Z-Wave genannt. [17]

Tabelle 2: Z-Wave Frequenzbereiche verschiedener Länder

	Europa	Russische Föderation	Indien
Frequenz in MHz	868,42	869	868,2

Interferenzen mit dem überfüllten 2,4 GHz Band, das von WLAN, Bluetooth und anderen benutzt wird, werden dadurch vermieden.

Alle Z-Wave Geräte müssen eine Zertifizierung durchlaufen, um die Interoperabilität zu gewährleisten. Hierbei werden gewisse Grundfunktionalitäten vorausgesetzt, die jedes neu zu entwickelnde Gerät erfüllen muss. [16]

⁶ Short Range Devices

⁷ Effective Radiated Power (effektive Strahlungsleistung)

In den folgenden Unterkapiteln wird näher auf den Aufbau der Z-Wave Architektur eingegangen.

2.4.1 Z-Wave Architektur

Der Z-Wave-Stack ist in einer Layer-Architektur organisiert, die sich aus fünf Schichten zusammensetzt, wie in der Abbildung 4 dargestellt ist. Die Schichten sind folgende: physikalische Schicht (PHY⁸), Medienzugriffsschicht (MAC⁹), Transportschicht¹⁰, Routing-schicht¹¹ und Anwendungsschicht¹². Wie zuvor erwähnt sind die unteren Schichten MAC und PHY durch die ITU-T G.9959 standardisiert. Die oberen Schichten werden durch die Z-Wave Alliance standardisiert. [16]

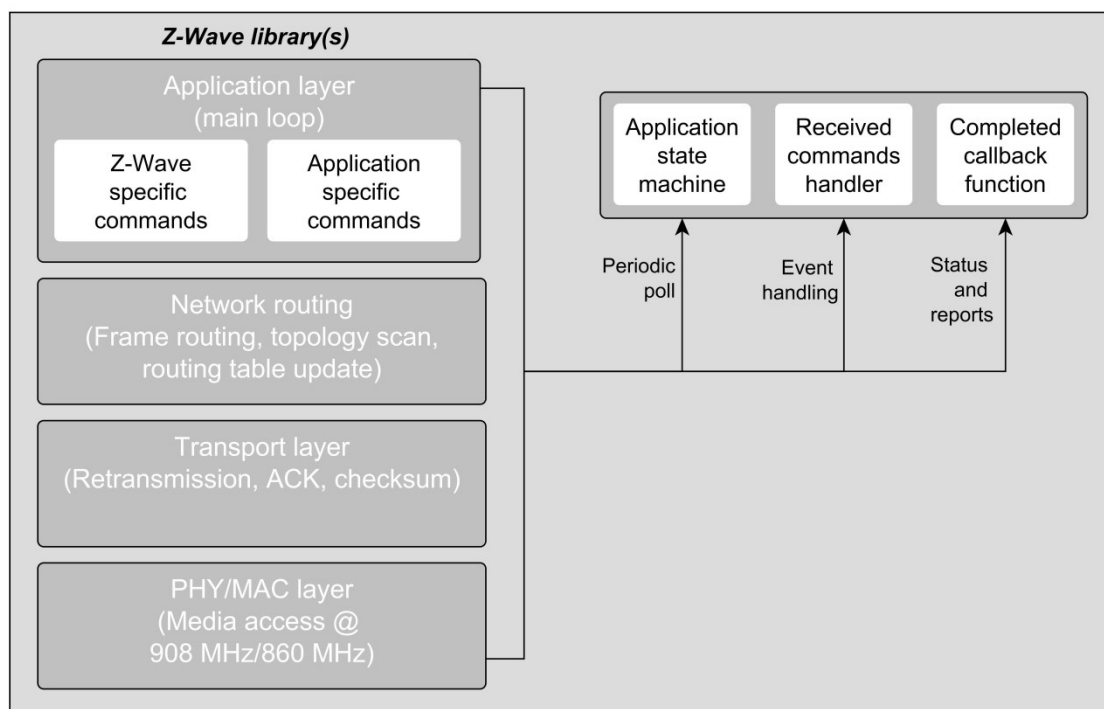


Abbildung 4: Z-Wave Layer Architektur

⁸ Physical Access Layer

⁹ Media Access Layer

¹⁰ Transport Layer

¹¹ Routing Layer

¹² Application Layer

Um die Interoperabilität im Z-Wave Ökosystem zu gewährleisten ist ein Zertifizierungsprogramm vorhanden. Hierbei werden die Funktionen des Gerätes überprüft, ob diese konform zu den Vorgaben der Z-Wave Spezifikation sind. Dabei handelt es sich um eine Konstellation aus mehreren Einzelspezifikationen. In der Abbildung 5 werden die Spezifikationsbereiche von Z-Wave aufgezeigt. Es werden hierbei unter anderem der Ablauf des Netzwerkmanagements, Transport und Anwendungszwecke, sowie auch die physische Ebene spezifiziert. Ein Teil der Z-Wave Spezifikation wurde Ende 2016 veröffentlicht. Dies umfasst die Kommandoklassen, Rollen- und Gerätetypen-Spezifikationen. Um die gesamte Spezifikation zu erhalten ist eine Mitgliedschaft zur Z-Wave Alliance erforderlich. [16]

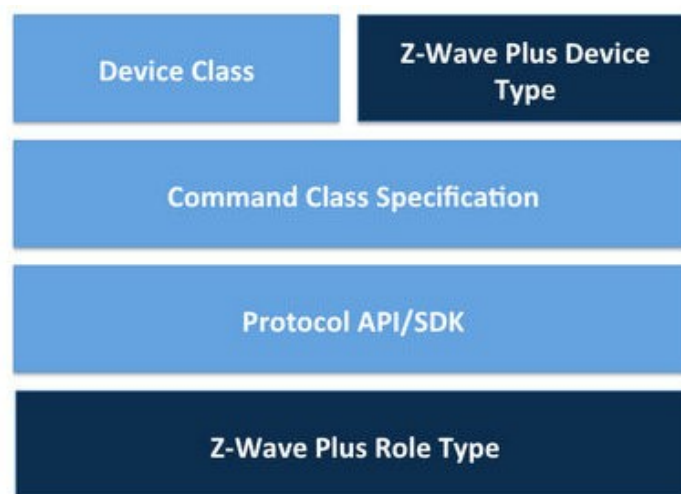


Abbildung 5: Z-Wave Spezifikation [18]

2.4.2 Layerübersicht

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die Softwareschichten des Z-Wave Protokollstacks eingegangen.

Physical und Media Access Layer

Die physikalische Funkschicht verwendet Frequency Shift Keying (FSK), um die Bytes vom Sender zum Empfänger zu transportieren. Zwischen den Geräten wird die zu verwendende Datenrate 9.6 kB/s, 40 kB/s oder 100 kB/s ausgehandelt und automatisch optimiert. Die Codierung unterscheidet sich in den Datenraten. Die Manchester-Codierung wird für 9,6 kB/s und die NRZ-Codierung für 40 kB/s und 100 kB/s verwendet. Mess- und Zählerdaten sowie Firmware-Updates erfordern einen höheren Datendurchsatz, welcher durch die höheren Datenraten ermöglicht wird. Der PHY-Rahmen wird in der

Abbildung 6 zeigt. Dieser Rahmen besteht aus einer 10-Byte-Präambel, die für die Synchronisation notwendig ist, 1 Startbyte und 1 Endbyte für den Frame. Der MAC-Layer sorgt für den Austausch von Datenpaketen zwischen Sender und Empfänger. Um gleichzeitige Datenübertragung und Kollisionen der Datenpakete zu vermeiden, wird die Carrier Sense und Multiple Access (CSMA) mit Collision Avoidance (CA) Methode verwendet. Die Nachrichtengröße ist auf 64 Bytes begrenzt. Die minimale Größe beträgt 13 Byte. Der ganze Z-Wave-Frame besitzt eine minimale Größe von 25 Bytes und eine maximale Größe von 76 Bytes. Zur Identifikation, welche Knoten die Nachricht erhalten soll, wird eine *HomeID* und eine *NodeID* vergeben. Die *HomeID* ist die globale Identifikation des Knotens und hat eine Größe von 4 Byte und dient zur Unterscheidung von unterschiedlichen Z-Wave Netzwerken. Nur Knoten mit der gleichen *HomeID* können miteinander kommunizieren. Die *NodeID* hat eine Größe von 1 Byte und ist eine individuelle, eindeutige Adresse des Knotens. Diese wird benötigt um Knoten innerhalb eines Netzwerkes zu adressieren. [16][19]

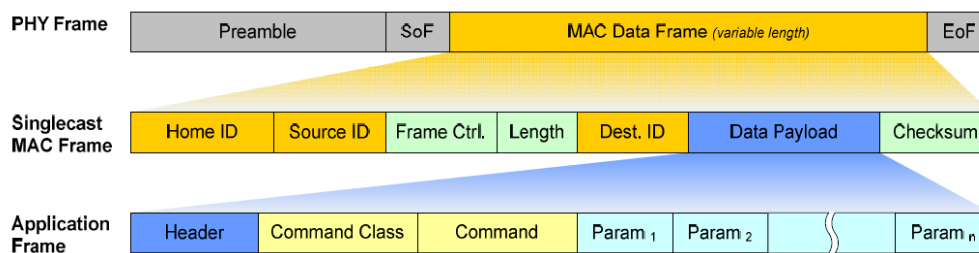


Abbildung 6: Z-Wave Protokollaufbau [19]

Transport und Routing Layer

Die Transportschicht ist für die Kommunikation zwischen den Knoten verantwortlich. Um die Zustellung zu überprüfen wird eine Zwei-Wege Kommunikation genutzt. Der Empfängerknoten übermittelt eine Empfangsbestätigung (ACK¹³). Bei Verlust der Bestätigung wird innerhalb eines definierten Zeitintervalls das Paket erneut übertragen. Für die korrekte Übertragung des MAC-Frames wird eine 8-Bit-Prüfsumme verwendet. Am Empfänger werden nur Pakete mit korrekter Prüfsumme und richtiger *HomeID* übernommen. Für eine höhere Integrität der übertragenen Payload kann eine zusätzliche CRC-16 Bit Prüfsumme, die als optionale Kommandoklasse hinzugefügt werden kann, sorgen. [16][20]

¹³ Acknowledge

Die Routing-Schicht erweitert die Funkreichweite, baut ein Mesh-Netz auf und ermöglicht bis zu 4 Hops. Als Routing-Strategie wird Source-Routing verwendet, hierbei generieren die Knoten eigenständig die komplette Route bis zum Zielknoten. Nur Geräte mit der gesamten Topologie des Netzwerks können Ad-hoc-Nachrichten an beliebige Ziele senden. Die primären Controller (siehe Abschnitt 2.4.3) haben die Routing Informationen und sind verantwortlich für die optimale Route und die Verwaltung der Routingtabelle.[16][20]

Application Layer

In der Applikationsschicht wird definiert und spezifiziert warum und welche Daten zwischen Knoten ausgetauscht werden. Um die Geräte zu vereinheitlichen und diese einfacher zu kategorisieren, werden diese zu einem bestimmten Role Type und einem Device Type zugeordnet. Diese beschreiben das grundlegende Verhaltens- und Kommunikationsmuster. [16] In der folgenden Abbildung 7 ist die Vorgehensweise bei der Auswahl für die Gerätespezifikation dargestellt.

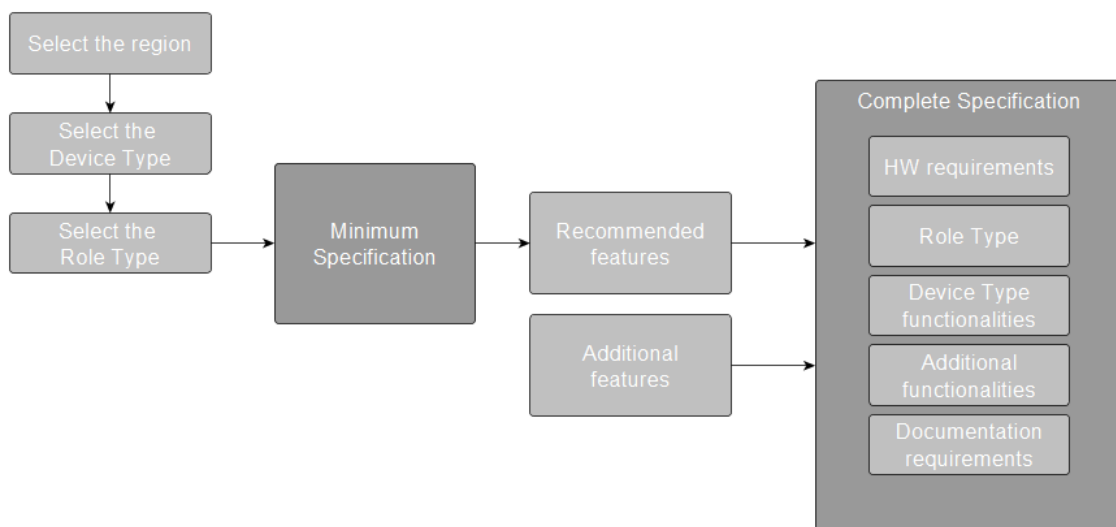


Abbildung 7: Z-Wave Plus Übersicht der Spezifikation

2.4.3 Z-Wave Device und Role Types

Eine Zuordnung zum Device und Role Type wird durch die Generic und Specific Device Classes erleichtert. In der Tabelle 3 ist eine Auflistung der Device Types und Role Types und deren Beziehung zu den Generic und Specific Device Classes ersichtlich.

Tabelle 3: Device Types mit der Beziehung zu den Generic und Specific Device Classes

Generic Device Class	Specific Device Class	Device Type	Role Type
Notification	Notification Sensor	Sensor – Notification	RPC ¹⁴ , RSS ¹⁵ , AOS ¹⁶ , LSS ¹⁷
Binary Switch	Binary Power Switch	On/Off Power Switch	AOS
	Power Strip Switch	Power Strip	AOS
	Siren	Siren	AOS, LSS
	Valve	Valve – Open/close	AOS, LSS
	Irrigation Control	Irrigation Control	AOS
Display	Simple Display	Display – Simple	AOS, LSS
Entry Control	Secure Keypad Door Lock	Door Lock - Keypad	AOS, LSS
	Secure Door	Motorized barrier – GDO	AOS, LSS
	Secure Gate	Motorized barrier – Gate	AOS, LSS
	Secure Barrier Add-on	Motorized barrier – Add-on	AOS, LSS
	Secure Barrier Open only	Motorized barrier – Open only	AOS, LSS
	Secure Barrier Close only	Motorized barrier – Open only	AOS, LSS
Meter	Simple Meter	Sub Energy Meter	AOS
	Simple Whole Home Meter	Whole Home Meter - Simple	AOS, LSS, RSS
Multilevel Sensor	Routing Multilevel Sensor	Sensor - Multilevel	RPC, RSS, AOS, LSS
Multilevel Switch	Multilevel Power Switch	Light Dimmer Switch	AOS
	Motor Control A	Window Covering - No Position/Endpoint	AOS, LSS
	Motor Control B	Window Covering - End Point Aware	AOS, LSS

¹⁴ Reporting Portable Controller¹⁵ Reporting Sleeping Slave¹⁶ Always On Slave¹⁷ Listening Sleeping Slave

- **Device Type**

Grundsätzlich kann jedes Gerät im Haushalt mit Z-Wave erweitert werden. Der Device Type gibt hierbei eine grobe Zuordnung des Gerätes zu einem bestimmten Gerätetyp an, um den Installationsprozess zu vereinfachen und die Interoperabilität zu verstärken. Dies kann zum Beispiel ein Aktuator, Sensor, Sirene oder ein Messgerät sein. [16]

- **Role Type**

Der Role Type spezifiziert wie das Gerät im Netzwerk reagieren muss. Jedes Gerät wird entweder gesteuert, übermittelt Daten oder steuert sich selbst. Hierbei wird grundsätzlich zwischen Controller und Slaves unterschieden. Der Hauptunterschied zwischen diesen ist, dass die Controller die Möglichkeit haben ein Z-Wave Netzwerk zu erstellen und zu verwalten und die Slaves prinzipiell nur auf Anfragen anderer Knoten antworten. Des Weiteren unterscheiden sich die Role Types aufgrund der Stromversorgung des Gerätes. Wenn es sich um ein netzbetriebenes Gerät handelt, ist das Gerät jederzeit für den Empfang oder das Senden von Nachrichten aktiv, sodass dieses als Repeater für Nachrichten im Netzwerk fungieren kann und somit die Funkreichweite auf bis zu vier Hops vergrößert. Batteriebetriebene Geräte hingegen werden in einen Schlafmodus versetzt. Hierbei wird bei den Slaves auch noch unterschieden, ob diese in definierten Zeitintervallen aufwachen oder diese sich in einem Lauschmodus befinden, um die Energie der Batterie zu schonen und somit die Lebensdauer zu verlängern. In der Abbildung 8 sind die Role Types mit den Eigenschaften aufgelistet. Die Controller unterteilen sich weiter in Central Static, Sub Static, Portable und Reporting Portable Controller. Die Static Controller werden am Stromnetz direkt angeschlossen, wohingegen die portablen Controller durch Batterien gespeist werden und dadurch ortsunabhängig innerhalb der Funkabdeckung verwendet werden können. Der Sub Static Controller eignet sich nicht als primäre Controller, sondern für Anwendungen die eine Teilmenge des Z-Wave Netzwerkes verwalten. Der primäre Controller verwaltet das gesamte Netzwerk von Geräten, welches das hinzufügen und entfernen der Z-Wave Geräte betrifft. Ein primärer Controller kann ebenso ein SIS¹⁸ sein, wodurch andere Controller im Netzwerk Geräte einbinden oder entfernen können. [16][21]

¹⁸ Static Update Controller ID Server

Role Type	Abbreviation	Repeater	Power source	Can be SIS	Network setup	Setup lifeline	Report through lifeline	Direct control-able	Heart beat comms.	Push button WakeUp
Central Static Controller	CSC	✓	Mains	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Sub Static Controller	SSC	✓	Mains	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Portable Controller	PC	✗	Battery	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Reporting Portable Controller	RPC	✗	Battery	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓
Portable Slave	PS	✗	Battery	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Always On Slave	AOS	✓	Mains	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Listening Sleeping Slave	LSS	✗	Battery	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Reporting Sleeping Slave	RSS	✗	Battery	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓
Network Aware Slave	NAS	✓	Mains	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗

Abbildung 8: Übersicht der Role Types [21]

- **Node Information Frame (NIF)**

Der NIF ist eine allgemeine Information des Funktionsumfangs vom Z-Wave Gerät. Es ist eine Funknachricht, welche die Device Type Zugehörigkeit sowie die unterstützten Kommandoklassen beinhaltet und die Visitenkarte des Gerätes darstellt. Der NIF wird zu Beginn der Inklusion als Bestätigung ausgesendet. Dadurch erhält der Controller des Netzwerkes die Informationen welche Funktionen das Gerät unterstützt. Weiters wird der NIF ebenso als Bestätigung beim Exkludieren genutzt. [16]

- **Kommandoklassen**

Die von Geräte miteinander ausgetauschten Nachrichten werden als Befehle bezeichnet. Es gibt drei grundlegende Arten von Kommandos: Set, Get und Report. Verschiedene Geräte reagieren auf die grundlegenden Kommandos auf unterschiedliche Weise. Aus diesem Grund werden Kommandos in sogenannte Kommandoklassen eingeteilt. Diese Klassen beschreiben die spezifische Funktion eines Befehlssatzes des Gerätes und die dieser Funktion zugeordneten Kommandos. Die Kommandoklassen werden in drei Gruppen aufgeteilt: obligatorische, empfohlene und optionale. Die obligatorischen Kommandoklassen sind verpflichtend umzusetzen. Diese sind erforderlich, um die

Interoperabilität der Geräte zu gewährleisten. Die empfohlenen Kommandoklassen erweitern die Kompatibilität zwischen den Geräten. Die optionalen Kommandoklassen sind für die spezifische Gerätefunktionalität zuständig. [16]

- **Inclusion/Exclusion**

Um Geräte zu einem Z-Wave Netzwerk hinzuzufügen, muss der Z-Wave Controller in einen Learnmode bzw. Inclusion-Mode sowie auch das Z-Wave Slave Gerät in einen Inclusion Mode versetzt werden. Durch das Inkludieren eines Gerätes wird beim Controller die Z-Wave Node Liste um das Gerät erweitert und eine *NodeID* und *HomeID* dem Slave Device übermittelt. [16]

2.4.4 Associations

Um Z-Wave Geräte untereinander zu verbinden, sodass diese bei bestimmten Ereignissen automatisch Aktionen ausführen, dienen die Associations zwischen den Geräten. Diese definieren in einem Z-Wave Netzwerk eine Sensor-Aktor-Beziehung. Die Struktur der Beziehung ist durch eine Wenn-Dann-Beziehung beschrieben. Hierzu besitzen die Geräte sogenannte Association Groups, mit welchen die Beziehung definiert wird. Bei Auftreten des Ereignisses wird hierzu der Report oder Set-Befehl an die in der Gruppe befindlichen Geräte ausgeschickt. [16]

2.5 Automatentheorie

Zur Vereinfachung des Programmablaufes der Software ist die Modellierung von abstrakten Konzepten sehr nützlich. Hierbei stellt das Teilgebiet der theoretischen Informatik, die Automatentheorie, welche sich mit der systematischen Erfassung verschiedener Verarbeitungstechniken mithilfe abstrakter Automatenkonzepte beschäftigt, ein sehr nützliches Werkzeug dar. Unter einem Automaten wird ein Modell einer Maschine beziehungsweise Rechner für die Informationsverarbeitung verstanden. [22]

Eines dieser nützlichen Modelle stellt der endliche Automat, die FSM¹⁹ dar. Bei diesem handelt es sich um eine zustandsbasierte Maschine, die eine endliche Menge von inneren Zuständen besitzen kann. Die FSM kann für verschiedene Arten der Software und Hardware verwendet werden. So kann diese zum Beispiel zur Modellierung von digitalen Schaltwerken wie auch zum Erzeugen von regulären Sprachen zur Verifizierung von

¹⁹ Finite State Machine

Systemen in der Software, wie Kommunikationsprotokolle oder ähnlichem mit endlicher Anzahl an Zuständen, verwendet werden. [23][24]

Ein einfaches Beispiel eines endlichen Automaten ist zur Veranschaulichung in der Abbildung 9 dargestellt. In diesem Modell handelt es sich um einen Lichtschalter der die Zustände „ein“ oder „aus“ einnehmen kann. Der Zustandsübergang kann durch Betätigung des Schalters hervorgerufen werden. Die Kantenbeschriftung b steht für diese Aktion.

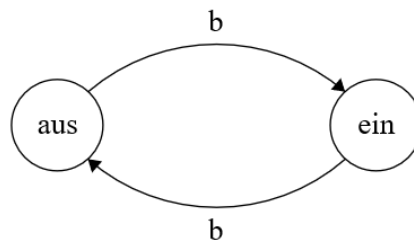


Abbildung 9: Endlicher Automat eines einfachen Lichtschalters

Ein endlicher Automat um Geräte via Z-Wave miteinander zu koppeln würde zum Beispiel wie in der Abbildung 10 dargestellt ist aussehen. Dafür sind die Zustände „Init“, „Idle“, „LearnMode“ und „Reset“ erforderlich. Zum Signalisieren der Kopplungsbereitschaft des Gerätes dient zum Beispiel ein Button, der den Zustandsübergang, um Geräte einzubinden oder zu entfernen, startet.

Im „Init“-Zustand startet das Gerät und initialisiert alle Parameter und wechselt daraufhin in den „Idle“-Zustand. Im „Idle“-Zustand wird auf eine Zustandsüberführung gewartet. Durch den Buttondruck wechselt der Zustand auf „LearnMode“ oder „Reset“, dies hängt von der Dauer wie lange der Button gedrückt wird ab. Im „LearnMode“ wird, je nachdem ob sich das Gerät in einem Z-Wave Netzwerk befindet oder nicht, der Inklusions- oder Exklusionsmodus gestartet. Nach erfolgreichem hinzufügen oder entfernen wechselt das Gerät wieder zurück in den „Idle“-Zustand. Bei diesem Zustand handelt es sich um einen akzeptierten Endzustand. Dieser akzeptierte Endzustand wird mit einem Doppelkreis dargestellt.

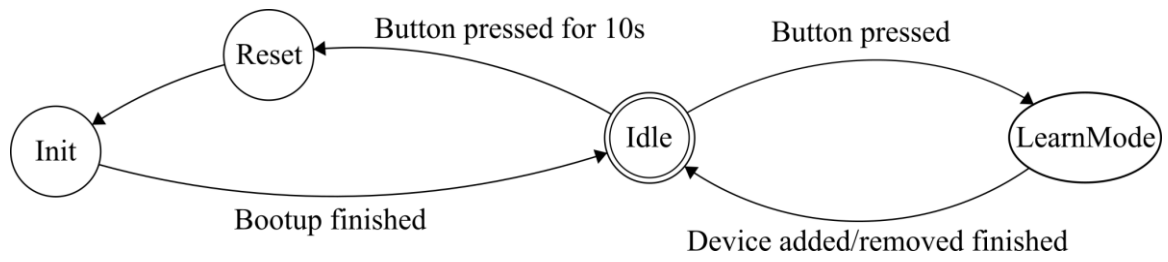


Abbildung 10: Endlicher Automat für Z-Wave Gerätekopplung

3 Stand der Technik

3.1 Smart Energy Management System

Beim Smart Energy Management System, kurz SEMS, handelt es sich um ein intelligentes Energiemanagementsystem der Firma LEVION Technologies GmbH, das zur Optimierung des Eigenverbrauchs im Eigenheim eingesetzt wird. Als zentrale Steuereinheit dient der SEM²⁰, dieser verbindet verschiedenste Aktuatoren und Sensoren über eine Z-Wave- oder LAN/WLAN-Verbindung. Durch die Verwendung von Funktechnologien wird der Installationsaufwand so gering als möglich gehalten [25] und eine Direktverkabelung mit der Zentrale vermieden. Die unterschiedlichen Anwendungsgebiete die SEMS miteinander verbindet sind in der Abbildung 11 dargestellt.

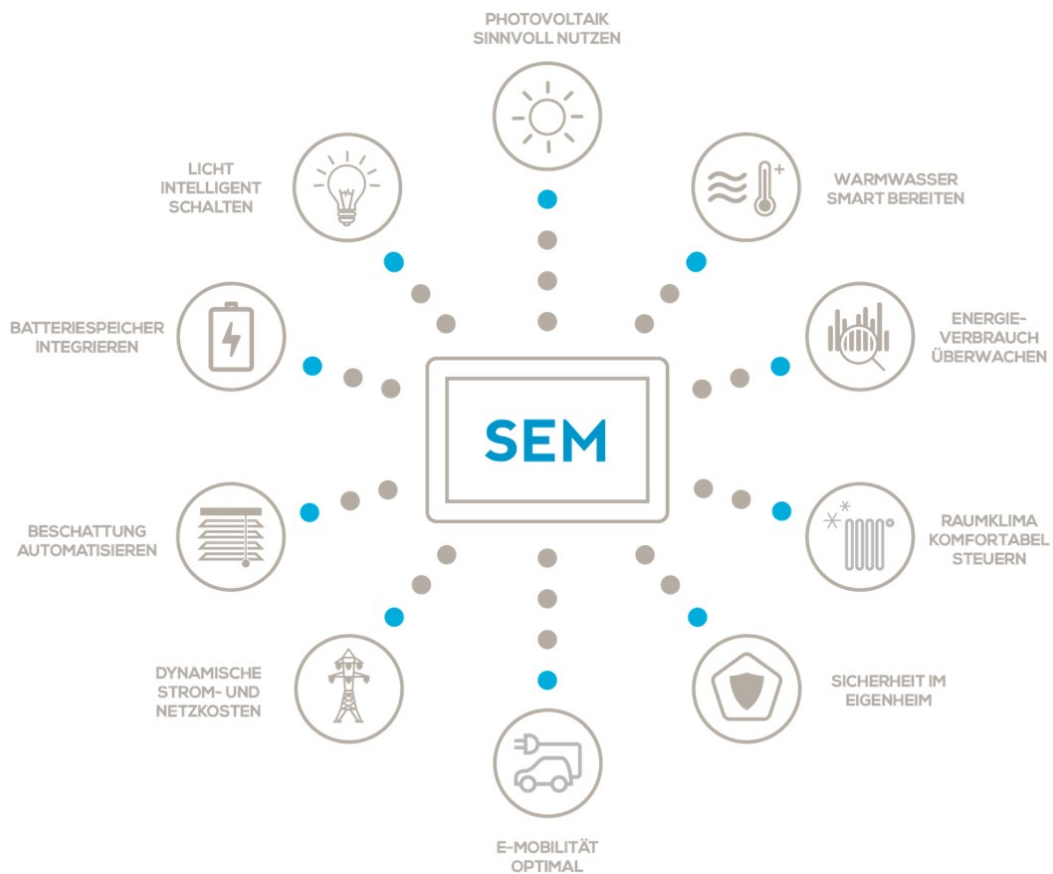


Abbildung 11: Anwendungsgebiete von SEMS

²⁰ Smart Energy Manager

Durch die Vernetzung der Verbraucher wird eine bessere Übersicht über die Momentansituation des Energiehaushalts geschaffen und dies ermöglicht die Verbraucher sinnvoll und energieoptimiert anzusteuern. Je mehr Geräte hierzu eingebunden werden, desto besser ist die Energieoptimierung des Eigenheims. Eines dieser Teilgebiete ist hierbei die Warmwasseraufbereitung, auf welchem in dieser Arbeit der Hauptfokus liegt. Das zu entwickelnde Gerät soll hierzu als intelligentes Steuergerät zwischen dem SEM und einem elektrischen Hezelement zur Warmwasseraufbereitung dienen, wie in Abbildung 12 ersichtlich ist. Hierzu wird an der Netzzuleitung beziehungsweise Hauptleitung des Hauses, direkt nach dem Zählpunkt, die Leistung mit einem Leistungsmessgerät gemessen. Dieses liefert hierbei die Messdaten der gemessenen Einzelphasen an den SEM und dieser berechnet die Gesamtleistung. Anhand dieser Leistung wird ersichtlich in welcher Energiesituation sich das Gebäude befindet. Wird eine negative Leistung gemessen, so wird in das Leitungsnetz des Energieversorgers Energie eingespeist. Bei positiver Leistung wird Energie aus dem Netz bezogen. SEMS steuert die vernetzten Verbraucher, sodass die Netzleitung am Zählpunkt gegen Null geht, um den Eigenverbrauch zu optimieren. Dies bedeutet bei Einspeisung in das Netz werden die Verbraucher zugeschaltet. Durch einen variabel ansteuerbaren Verbraucher kann der Eigenverbrauch optimiert und so in weiterer Folge erhöht werden.

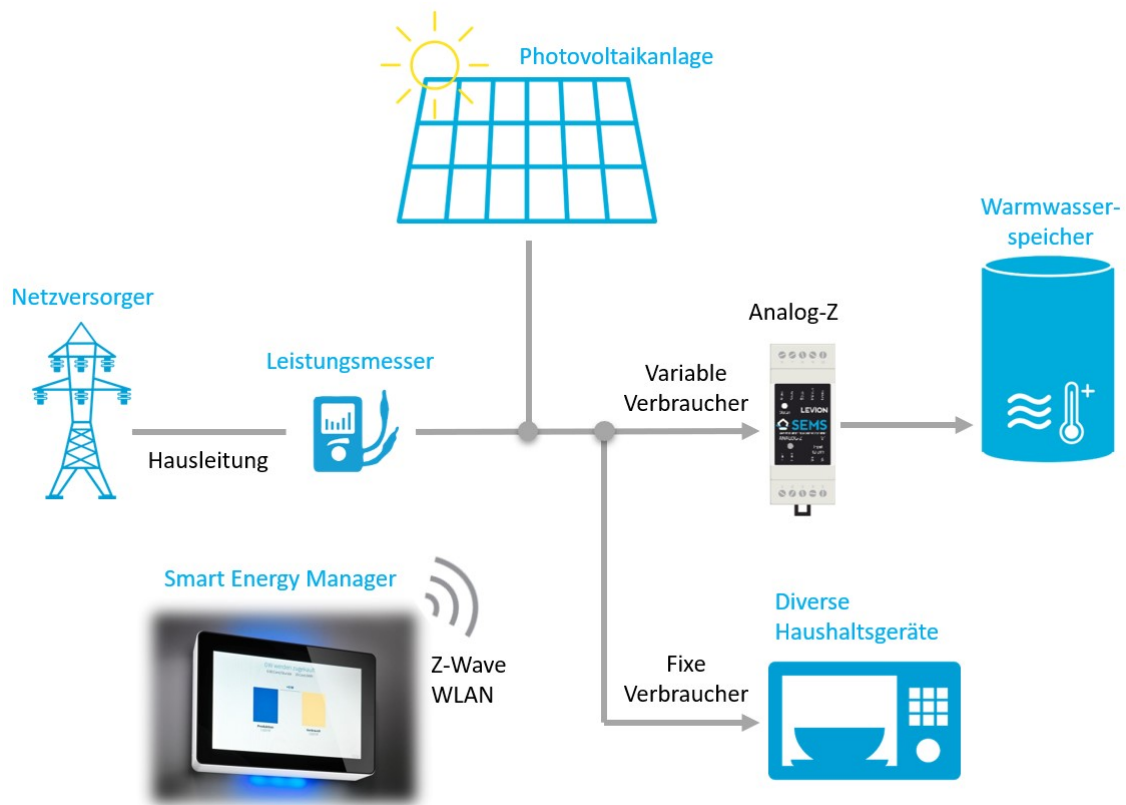


Abbildung 12: Gesamtsystem für die Warmwasseraufbereitung

Beim Einbinden von Geräten in SEMS werden diese in Verhaltensgruppen eingeteilt, welche einem vordefinierten Regelwerk folgen. Die Komplexität des Energiemanagementsystems wird dadurch für die Bedienung durch den Benutzer stark vereinfacht. Die Einstellungen sind für den Benutzer auf die wesentlichen minimiert. Eine dieser Einstellungen ist das Prioritätenmanagement, durch welchen die Verbraucher im Haus automatisch anhand der Energiesituation des Gebäudes angesteuert werden.

3.2 Variabler Energie Verbraucher (Analog-Z)

Der Analog-Z ist ein Regler, der zur Warmwasseraufbereitung eingesetzt wird. Durch Integration des Analog-Z in SEMS wird die Warmwasseraufbereitung in die Eigenverbrauchsoptimierung mit eingebunden. Durch die Funkschnittstelle kann der Analog-Z ohne Stemmarbeiten oder großen Verkabelungsaufwand in Bestandsanlagen nachgerüstet werden.

Der Analog-Z ist in den Versionen V1 und V2 vorhanden. Diese unterscheiden sich in dem Hardwareaufbau, sowie auch in der Softwarearchitektur und waren die Vorentwicklungen des in dieser Arbeit entwickelnden Gerätes, dem Analog-Z V3.

3.2.1 Prinzipielle Funktionsweise

Der Analog-Z ist ein Regler mit Smart-Home Funktionalität. Anhand einer Temperatur-Hysterese kann das Warmwasser in einem Temperaturbereich gehalten werden. Durch Einbindung in SEMS wird der Regler durch das Energiemanagementsystem übersteuert. Dadurch kann Überschussenergie, welche durch einen Produzenten, wie eine Photovoltaik-Anlage erzeugt wird, zur Warmwasseraufbereitung verwendet werden. Somit kann diese „günstige“ Überschussenergie im Eigenheim selbst verbraucht werden.

Zur Realisierung der intelligenten Warmwasseraufbereitung sind mehrere Komponenten, wie in Abbildung 12 dargestellt ist, erforderlich. Der analoge Ausgang des Analog-Z dient zur variablen Ansteuerung des Thyristors, welcher die Leistung am Heizelement einstellt. Durch eine Temperaturmessung ist dieser im voll automatischen Betrieb einsetzbar. In der Abbildung 13 ist ein schematischer Temperaturverlauf eines Warmwasserspeichers dargestellt.

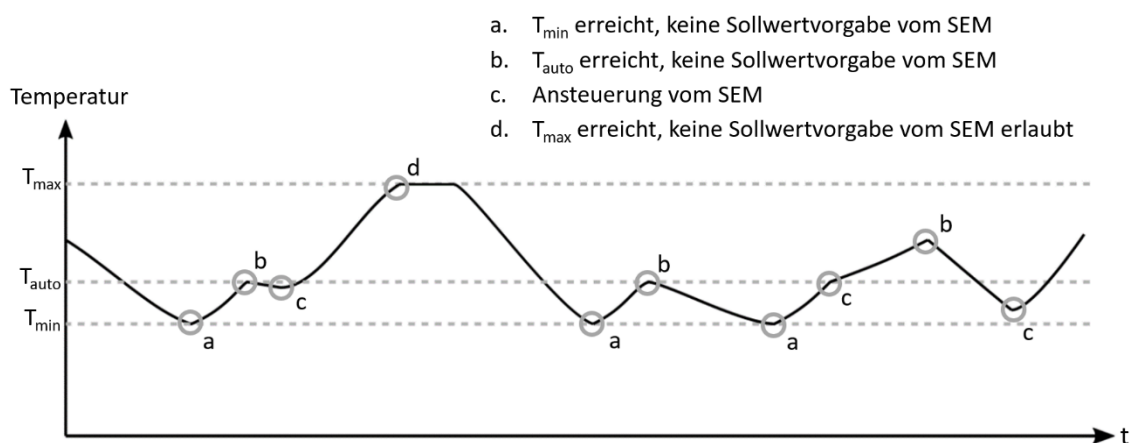


Abbildung 13: Schematischer Temperaturverlauf im Warmwasserspeicher

In den folgenden Punkten werden die grundlegenden Merkmale des Reglers genauer erklärt:

- Befindet sich die Wassertemperatur im Bereich der Solltemperatur, also zwischen der Minimaltemperatur T_{min} und Maximaltemperatur T_{max} , kann ein übergeordnetes System, wie der SEM, die Ansteuerung des Analog-Z übernehmen und so das Warmwasser mit einer variablen Leistung regeln. Diese Eigenschaft ist in der Abbildung 13 mit den Symbolen b und c dargestellt.
- Fällt die Wassertemperatur unter T_{min} , wird durch die Temperaturhysterese des Analog-Z das Warmwasser mit der maximalen Leistung bis zur Temperaturgrenze T_{auto} , die für den Zukauf von Energie aus dem Netz steht, aufgeheizt. Hierbei spielt es keine Rolle ob eine Ansteuerung vom übergeordneten System besteht. Dies ist in der Abbildung 13 mit dem Symbol a dargestellt.
- Durch T_{max} wird ein Überhitzen des Warmwassers vermieden. Diese Obergrenze dient nicht nur als Schutz vor Überhitzung sondern auch als Kalkschutzgrenze. Wird die Temperaturgrenze T_{max} erreicht, so wird die Temperatur auf dieser Grenze gehalten. Bei Überschreitung schaltet der Analog-Z den Ausgang ab und bei Unterschreitung der Grenze, wenn eine Vorgabe vorhanden ist, wieder ein. Somit wird eine Übersteuerung durch das Fremdsystem vom Analog-Z ignoriert, wie in der Abbildung 13 mit dem Symbol d dargestellt wird.

3.2.2 Analog-Z V1

Der Analog-Z V1 diente als Prototyp, um die variable Warmwasseraufbereitung in Kombination mit dem SEM im ersten Feldeinsatz zu testen. Dieser wurde mit einem PIC Mikroprozessor und einem Z-Wave Modul ausgestattet. In Abbildung 14 ist das Hardwarekonzept des Analog-Z V1 ersichtlich. In diesem sind die wesentlichen Hardwareelemente und die verwendeten Hardwareschnittstellen dargestellt.

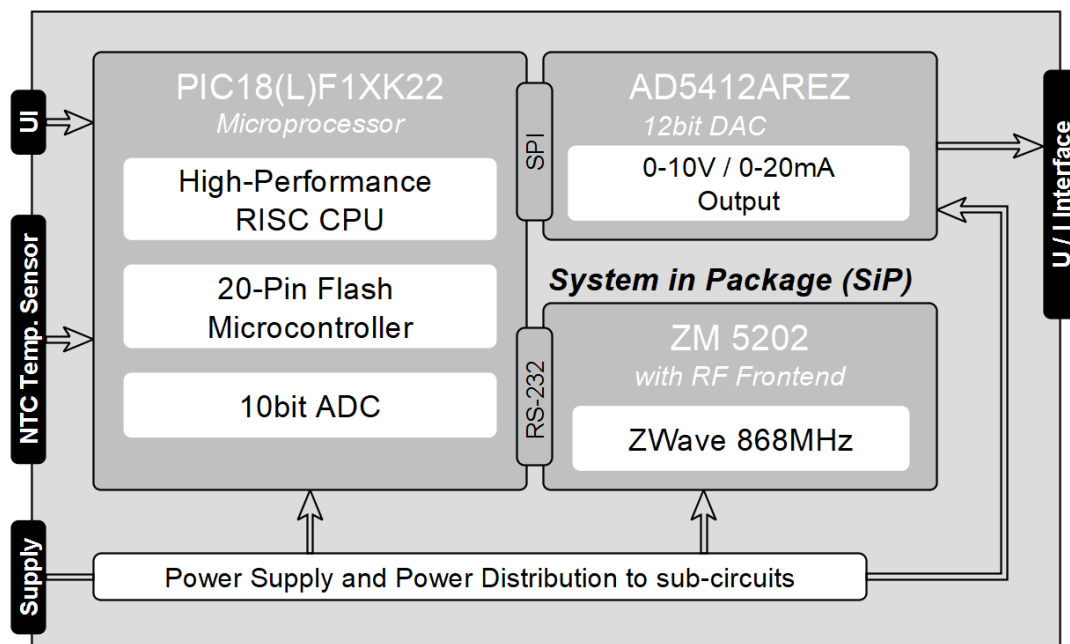


Abbildung 14: Hardwarekonzept Analog-Z V1

Der Mikroprozessor beinhaltet die Programm-/Regler-Logik. Das Z-Wave Kommunikationsmodul ZM 5202, mit welchem die Kommunikation zum SEM besteht, ist über die RS232-Schnittstelle in den Mikroprozessor eingebunden und fungiert als Gateway in das Z-Wave Netzwerk. Weiters ist ein Analogeingang zur Temperaturmessung sowie ein Analogausgang durch einen Digital-Analog-Converter, der als Ansteuerung für die Warmwasseraufbereitung verwendet wird, vorhanden. Das Softwarekonzept wird entscheidend durch das Hardwarekonzept beeinflusst. Hier wurde bei der ersten Version auf einen Zwei-Chip-Lösungsansatz gesetzt, welche aus dem Mikroprozessor PIC und dem Z-Wave-Modul, welches ebenso eine MCU beinhaltet, besteht. Der Mikroprozessor ist für den Programmablauf und die Logik zuständig. Das Z-Wave Modul ist in diesem Fall das Gateway zum Z-Wave Funknetz und wird mittels einer seriellen API in den PIC Mikroprozessor eingebunden. [26]

Bei der nachfolgenden Version V2 hat sich das Konzept soweit verändert, dass der Zwei-Chip-Lösungsansatz durch eine Ein-Chip-Lösung ersetzt wurde.

3.2.3 Analog-Z V2

Beim Analog-Z V2 wird das Z-Wave Modul als MCU für die den gesamten Programmablauf verwendet. Hierbei wird ein benutzerdefiniertes Firmware-Image für das Modul

entwickelt. Dadurch wird der PIC-Mikroprozessor nicht mehr benötigt, wodurch Bauteilkosten gespart werden. In der Abbildung 15 ist hierzu das Hardwarekonzept für die Version V2 dargestellt. Hierbei gibt es einen zusätzlichen Flash-Speicher, der hardwareseitig ein Over-the-Air Update ermöglicht. [26]

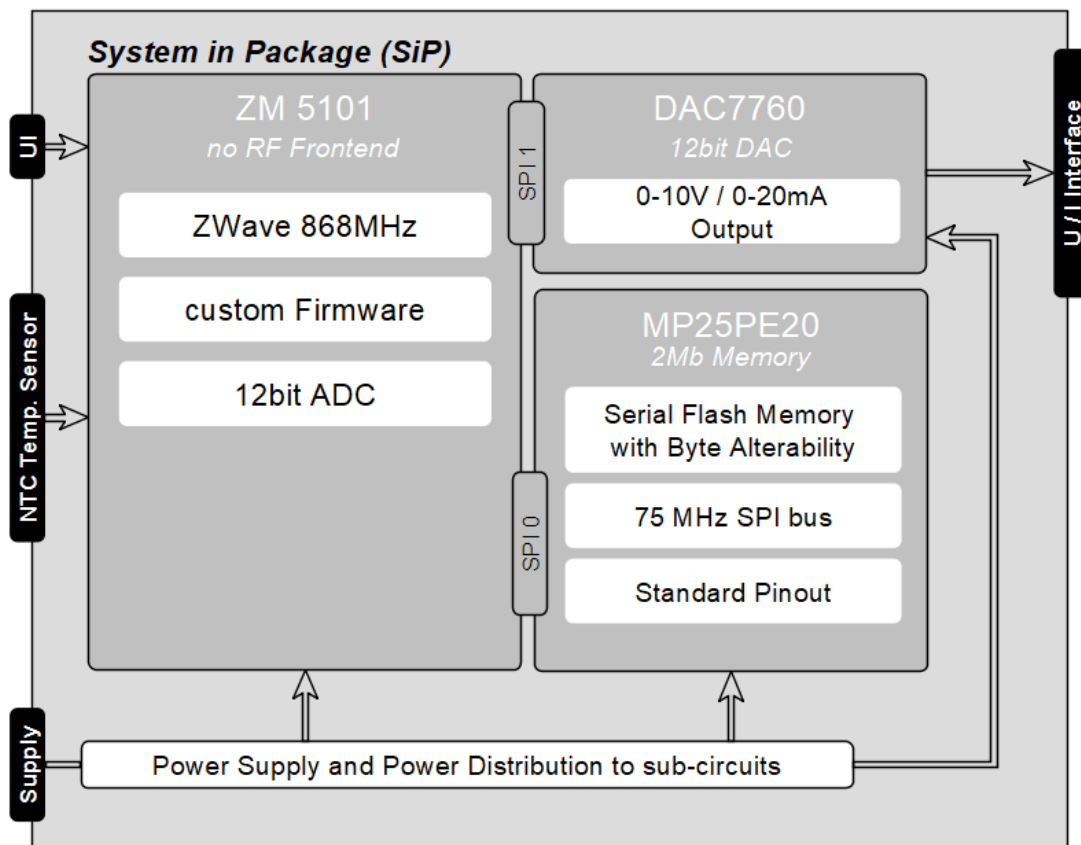


Abbildung 15: Hardwarekonzept Analog-Z V2

3.3 SMARTFOX

Bei SMARTFOX handelt es sich um ein Energiemanagementsystem, welches von der Firma DAfi GmbH vertrieben wird. Bei diesem System wird ähnlich wie beim SEMS die überschüssige Energie der Photovoltaikanlage an Verbraucher im Haus verteilt, dies führt zu einer besseren Eigenverbrauchsquote. Bei diesem System wird auf andere Technologien wie bei SEMS gesetzt. Die Einbindung von Verbrauchern erfolgt teils über eine Direkt-Verkabelung mit der Zentrale oder über Ethernet. Es stehen hierzu potentialfreie Relais-Kontakte und analoge Ausgänge zur Ansteuerung zur Verfügung. Als Zentrale gibt es verschiedene Produkte zur Auswahl, welche sich in den Schnittstellen unterscheiden.

Bei allen wird der Leistungsmesser direkt mitverbaut. Der Einsatzort der Zentrale ist daher in der Nähe des Energiezählers, welcher sich meist im Schaltschrank des Hauses befindet. Durch die Direkteinbindung mancher Verbraucher ist eine Verkabelung von diesen zur Zentrale erforderlich. Im Gegensatz dazu wird die Elektroladestation für Fahrzeuge über das LAN-Netzwerk eingebunden. [27]

Bei der Produktvariante SMARTFOX Light handelt es sich um die light Version des Reglers, der nur die Leistungsmessung und die variable Ansteuerung des Warmwasserspeichers mit einem analogen Ausgang ermöglicht. Der SMARTFOX REG extended besitzt im Vergleich dazu noch zusätzliche Schnittstellen. Diese wären ein LAN-Anschluss zur Einbindung ins Hausnetzwerk und potentialfreie Kontakte zur Ansteuerung weiterer Verbraucher. Anhand eines zweizeiligen Displays können die aktuellen Werte ausgelesen werden. Mittels eines Leistungsmessers werden die Leistungswerte gemessen und mit dem Regler der Überschuss ermittelt. In weiterer Folge wird der analoge Ausgang anhand des Überschusses variabel angesteuert. Der Analogausgang kann hier einen Leistungssteller mittels einer Phasenanschnittsteuerung ansteuern um die Warmwasseraufbereitung durchzuführen. Die Einbindung des Verbrauchers erfolgt über eine Zweidraht-Leitung mit dem Regler. Bei diesen beiden Reglern gibt es keine Temperaturmessung, wodurch die Ansteuerung des Warmwasserspeichers ohne eine Rückführgröße erfolgt. Um eine Überhitzung zu vermeiden, ist eine Temperatursicherung am Heizstab erforderlich. Um den Komfort des Warmwassers sicherzustellen, kann eine tägliche Zwangsfreigabe des Analogausganges eingestellt werden. Dadurch wird unabhängig vom Photovoltaik Überschuss das Wasser erhitzt. [27]

3.4 AC ELWA

Bei der AC ELWA handelt es sich um einen variabel ansteuerbaren Heizstab der Firma myPV GmbH. Die Heizstäbe besitzen eine Leistungselektronik, mit der zwischen 0 bis 3 kW geregelt werden kann. Durch die Leistungselektronik wird die Amplitudenhöhe des Stroms geregelt. Hierbei gibt es verschiedene Produktvarianten, welche für die variable Warmwasseraufbereitung eingesetzt werden können. Diese unterscheiden sich anhand der Schnittstelle, welche für die Regelung herangezogen wird. Die AC ELWA wird durch einen 0 bis 10 V Eingang und die AC ELWA-E per LAN über das Modbus TCP Protokoll angesteuert. [28] Die AC ELWA mit dem 0 bis 10 V Eingang kann zum Beispiel über einen Analog-Z zur variablen Warmwasseraufbereitung verwendet und somit ins Smart Home eingebunden werden.

4 Anforderungsanalyse

In diesem Kapitel werden die Anforderungen des zu entwickelnden Gerätes ausgearbeitet. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung des Analog-Z V2. Durch iterative Prozesse wurden die Anforderungen bei jeder Version erweitert. Es handelt sich um ein Produkt, das von der Prototypenphase bis hin zur marktreifen Version entwickelt werden soll. Durch Evaluierung der im Vorfeld entwickelten Versionen und installierten Geräte im Feldeinsatz, wurden neue Anforderungen ersichtlich, die in diese Weiterentwicklung miteinfließen und in dieser Anforderungsanalyse mitberücksichtigt werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Anforderungen für die Hardwareentwicklung und die Softwareentwicklung aufgelistet. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei in der Softwareentwicklung. Die Hardware wurde in einer Projektarbeit [26] bereits ausführlich behandelt.

4.1 Allgemeine Anforderungen

In den Grundlagen wurde das Gesamtsystem von SEMS sowie auch die prinzipielle Funktionsweise des Analog-Z bereits betrachtet, woraus sich ein Großteil der Anforderungen ableiten lässt. Die Hauptanwendung des Analog-Z wird primär die variable Ansteuerung zur Aufbereitung von Warmwasser sein. Weiters soll dieser auch als universelles Steuergerät für andere Anwendungen verwendet werden können. Ein Analogausgang soll hierbei als industrielle Strom- und Spannungsschnittstelle zur Verfügung stehen, um einen elektrischen Großverbraucher mittels einer Leistungselektronik oder einer Phasenanschnittsteuerung quasi stufenlos variabel anzusteuern.

Um den Analog-Z in vielen Bereichen einzusetzen, soll dieser zusätzlich zu den erforderlichen Schnittstellen der Hauptanwendung, welche ein Temperatureingang und ein Analogausgang sind, einen zweiten Temperatureingang und zwei Digitalausgänge besitzen. Durch die Möglichkeit der zweiten Temperaturmessung ergeben sich viele zusätzliche Steuerungsmöglichkeiten. Die beiden Temperaturmessungen können somit separat zur Steuerung von zwei getrennten Regelkreisen oder in Kombination für einen Regelkreis, durch zum Beispiel Bildung des Mittelwertes, verwendet werden. Die zwei Digitalausgänge sollen die Einbindung von fixen Verbrauchern ermöglichen, welche durch die Temperaturmessung oder anhand des Analogausganges steuerbar sind.

4.2 Hardwareanforderungen

Die Anforderungen, die an die Hardware gestellt werden, können in drei Anforderungsgruppen unterteilt werden: nichtfunktionale, funktionale und normative Anforderungen. Einige dieser Anforderungen kommen aus den Vorgängerversionen des Analog-Z, andere sind hingegen durch den Feldeinsatz hinzugekommen.

Nichtfunktionale Anforderungen

Die nichtfunktionalen Anforderungen stellen ein paar Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Hardware. Der Betrieb des Analog-Z soll durch ein extern zugekauftes Netzteil mit 12-24 V erfolgen. Die Elektronik soll aufgrund des Einsatzzweckes und der kostengünstigen Fertigung in einem Standard Hutschienengehäuse Platz finden. Bei der BauteilAuswahl soll auf kostengünstige Elektronikkomponenten geachtet werden, um eine günstige Serienfertigung zu ermöglichen. [26]

Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen betreffen den Analog-Z in dessen Bedienung sowie die Auslegung seiner Schnittstellen und zusätzlichen Anforderungen für den Betrieb. [26]

▪ **Mensch-Maschine Schnittstelle (Bedienung)**

Als Userinterface soll eine mehrfarbige LED dienen, um den Betriebszustand des Analog-Z V3 zu visualisieren. Zwei zusätzliche mehrfarbige LEDs sollen optional für eine spätere Weiterentwicklung zur Verfügung stehen, um zusätzliche Betriebszustände sowie auch den Energiezustand des Gebäudes visuell durch ein Ampelsystem darzustellen. Als Interaktion mit dem Gerät soll ein Button zum Einbinden des Analog-Z in das Z-Wave Netzwerk zur Verfügung stehen. Ein optionaler zweiter Button soll wiederum für eine Weiterentwicklung des Analog-Z V3 dienen. [26]

▪ **Schnittstellen**

Der Analog-Z soll folgende Schnittstellen besitzen [26]:

- Zwei analoge Eingänge zur Temperaturmessung mittels eines 10k NTC Zwei-Draht Temperaturfühlers
- Einen konfigurierbaren Analogausgang für Strom oder Spannung, um einen Verbraucher variabel anzusteuern
- Zwei Digitalausgänge um zwei zusätzliche Verbraucher anzusteuern
- Ein Z-Wave Modul als Kommunikationsschnittstelle zu Z-Wave Geräten

- Eine RS232 Schnittstelle zum initialen Flashen der Software und Testen der Hardwarekomponenten
- Eine optionale microUSB Schnittstelle zur Konfiguration des Analog-Z ohne Z-Wave Einbindung

Normative Anforderungen

Die normativen Anforderungen sind laut der Norm EN60730-1:2011 einzuhalten. Hierbei muss der Analog-Z die EMV Prüfungen bestehen. Diese bestehen aus Störaussendungs- und Störfestigkeitsprüfungen. Bei der Störaussendung wird überprüft ob das Gerät empfindliche elektronische Geräte im laufenden Betrieb stört beziehungsweise beeinflusst. Diese Störaussendung kann zum einen eine Funkstörabstrahlung des Gerätes oder zum anderen eine leitungsgeführte Störung sein. Bei Störfestigkeitsprüfungen wird überprüft ob das Gerät zum Beispiel bei einer elektrostatischen Entladung beschädigt beziehungsweise beeinträchtigt wird. [26]

4.3 Softwareanforderungen

Die Anforderungen, die an die Software gestellt werden, können in zwei Anforderungsgruppen unterteilt werden: nichtfunktionale und funktionale.

Funktionale Anforderungen

▪ Einbindung in Smart Home/Energiemanagement-Systeme

Um den Analog-Z in ein übergeordnetes System einzubinden, ist eine Kommunikationstechnologie zu wählen. Um den Analog-Z universell und einfach einzusetzen, ist die Verwendung einer kabellosen Technologie einer kabelgebundenen vorzuziehen. Über Funk sollen die Ausgänge steuerbar und die Eingänge auslesbar sein. Der Funkstandard soll robust, zuverlässig, sicher und interoperabel sein. Die Wahl des Funkstandards fällt auf Z-Wave aus zwei wesentlichen Gründen. Zum einen garantiert Z-Wave durch die Standardisierung eine Kompatibilität zwischen den zertifizierten Geräten von 100 % [16] und zum anderen wurde der Funkstandard durch die Einbindung in SEMS festgelegt. Eine Einbindung in SEMS über LAN oder WLAN wäre auch möglich, wurde aber ausgeschlossen aufgrund des Einsatzbereiches, der Interoperabilität und der Bauteilkosten.

- **Automatischer Reglerbetrieb**

Ein Zweipunkt-Regler soll einen automatischen Betrieb des Analog-Z V3 gewährleisten. Hierbei dient eine gemessene Temperatur als Regelgröße für die Hysterese Regelung. Anhand dieser soll der analoge Ausgang entweder auf 0 % oder 100 % gesteuert werden. Im Falle einer Warmwasseraufbereitung soll hiermit ein Komfortverlust vermieden werden, da bei Temperaturabfall des Warmwassers der Regler des Analog-Z einspringt und das Wasser erhitzt. Der automatische Betrieb soll ebenso deaktivierbar sein, um einen rein manuellen Betrieb durch das übergeordnete System zu ermöglichen. Die Führungsgröße des analogen Ausgangs soll aus den möglichen Kombinationen der beiden Temperatureingänge frei konfigurierbar sein. Auch für die Digitalausgänge soll ein Zweipunkt-Regler für den automatischen Betrieb zum Einsatz kommen. Die Führungsgröße soll hier ebenso frei konfigurierbar sein. Jedoch kann hier die Führungsgröße entweder ein Temperaturwert oder ein Analogwert sein.

- **Funktionale Sicherheit**

Um die funktionale Sicherheit des Analog-Z im Falle der Warmwasseraufbereitung sicherzustellen, wird ein Safe State für den analogen Ausgang definiert. Bei der Warmwasseraufbereitung wäre dieser eine Ansteuerung des analogen Ausgangs mit 0 %. Hierdurch soll sowohl beim Fehlverhalten des Gerätes, wie zum Beispiel bei einem Ausfall der Temperaturmessung, als auch beim Erreichen der Maximaltemperatur sichergestellt werden, dass das Wasser nicht weitererhitzt wird und somit das Heizsystem in einen kritischen Zustand geführt wird. Eine Ansteuerung über das übergeordnete System ist in diesem Fall für den Ausgang nicht möglich. Weiters soll jeweils ein Safe State für die digitalen Ausgänge definiert werden, um auch diese bei Fehlverhalten in einen gewünschten Zustand zu führen.

- **Stufenlose Ansteuerung**

Der Analogausgang stellt die Schnittstelle zur stufenlosen Ansteuerung durch ein externes System, wie zum Beispiel dem SEM, dar. Dadurch ist für ein Energiemanagementsystem ein Potential zur Energieoptimierung, um zum Beispiel Überschussenergien gezielt zur Warmwasseraufbereitung zu nutzen, vorhanden.

- **Konfiguration der digitalen und analogen Ein- und Ausgänge**

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einsatz des Analog-Z zur Warmwasseraufbereitung. Um jedoch das entwickelte Gerät für weitere Anwendungen einsetzen zu können, ist es notwendig, dass die digitalen und analogen Ein- und Ausgänge frei konfigurierbar sind. Darunter versteht man das Einstellen von Parametern für den analogen Eingang

zur Temperaturmessung, das Einstellen von Temperaturgrenzen sowie das Auswählen der Führungsgröße für den Regler.

Ein Beispiel für einen weiteren Anwendungsfall ist die Ansteuerung eines Durchlauferhitzers mit einer zusätzlichen Pumpe. Hierbei wird der Heizstab des Durchlauferhitzers durch den analogen Ausgang variabel angesteuert und ein Digitalausgang zur Steuerung der Pumpe verwendet. Der Digitalausgang wird in diesem Fall so konfiguriert, dass dieser bei aktiver Heizung einschaltet und in weiterer Folge die Pumpe aktiviert.

Folgende Konfigurationen sind für einen universellen Betrieb erforderlich:

- Für den Analogausgang:
 - Automatischer Reglerbetrieb ein/ausschaltbar
 - Temperaturgrenzen der Hysterese konfigurierbar
 - Führungsgröße beziehungsweise Temperaturquelle für den Regler konfigurierbar
- Für die Digitalausgänge:
 - Automatischer Reglerbetrieb ein/ausschaltbar
 - Grenzen der Hysterese konfigurierbar
 - Führungsgröße für den Regler konfigurierbar
- Für die Temperatureingänge:
 - Temperaturkoeffizienten für die Temperaturberechnung konfigurierbar

▪ **Schnittstelle zur Provisionierung des Analog-Z**

Der Analog-Z soll eine Schnittstelle zur Provisionierung des Gerätes besitzen. Bei der Provisionierung sollen dem Gerät die Hardware- und Softwareversion sowie die Seriennummer eingespielt werden. Die Seriennummer dient zur Rückverfolgbarkeit sowie auch für Gewährleistungsansprüche von Geräten am Markt. Als Schnittstelle soll hier die RS232-Schnittstelle oder die USB-Schnittstelle des Z-Wave Moduls dienen. Diese soll ebenso zur Konfiguration des Analog-Z verwendbar sein.

▪ **Bedienkonzept**

Für eine userfreundliche Bedienung und Konfiguration des Gerätes soll der Analog-Z per Z-Wave Funk zu einem Z-Wave Controller hinzugefügt werden. In der Abbildung 16 ist der Analog-Z V3 mit Gehäuse und Produkt-Label sowie auch die Elektronik dargestellt.



Abbildung 16: Analog-Z V3

Das Einbinden des Gerätes muss laut Z-Wave Spezifikation aktiv eingeleitet werden. Dies soll hier mit einem Button durchgeführt und der aktuelle Betriebszustand mit einer zweifarbigen LED dargestellt werden. Das Verbinden zu einem Z-Wave Netzwerk und auch das Entfernen aus dem Netzwerk sowie das Zurücksetzen auf die Werkseinstellungen soll mithilfe des Buttons eingeleitet werden. Die zweifarbige LED soll den Betriebszustand beziehungsweise den Status des Analog-Z darstellen.

Nichtfunktionale Anforderungen

- **Software Versionierung**

Eine Versionierung der Software soll einen Überblick über die Weiterentwicklungen und Fehlerbehebungen schaffen. Somit wird bei im Einsatz befindlichen Systemen eine rasche Fehlerzuordnung ermöglicht. Die aufgetretenen Fehler können in weiterer Folge durch ein Software-Update behoben werden.

- **Wiederverwendbarkeit**

Die Software soll in Module unterteilt werden um einzelne Programmabschnitte für eine Weiterentwicklung oder Neuentwicklung verwenden zu können.

- **Robustheit**

Bei unerwarteten Ereignissen, wie zum Beispiel einer ESD²¹-Entladung auf die Schraubklemme, darf der Analog-Z nicht unsicher oder dauerhaft beeinflusst werden. Bei Fehleingaben von Parametern, die sich außerhalb der Spezifikation befinden, soll das Gerät robust sein und in den Safe State wechseln.

²¹ Electrostatic discharge

- **Korrektheit**

Bei Fehlmessungen, wie zum Beispiel bei der Messung eines Temperatursprunges, der ein unnatürliches Verhalten aufweist, soll sich das Gerät korrekt verhalten und gegeben falls in den Safe-State wechseln.

- **Zuverlässigkeit**

Die Software soll bei nicht plausiblen Werten oder unter Dauerbelastung durch ständige Funk-Kommunikation fehlerfrei und zuverlässig funktionieren.

- **Wartbarkeit**

Der Analog-Z soll zu einem Produkt für die Serienanfertigung entwickelt werden und in größeren Stückzahlen am Markt vorhanden sein. Deshalb ist die Wartbarkeit eine sehr wichtige Anforderung, welche mit einem Over-the-Air Update gelöst werden soll.

5 Konzept

In den folgenden Unterkapiteln wird das Konzept zur Entwicklung des Analog-Z erarbeitet. Hierzu soll das zu entwickelnde Gerät, der Analog-Z V3, alle oben angeführten Anforderungen für die Hardware und Software erfüllen. Da sich im Umsetzungszeitraum bereits die Anforderungen an das Gerät stetig erweitert haben, wurde für die Konzeptentwicklung auf eine einfach erweiterbare Plattform geachtet, welche eine Weiterentwicklung des Gerätes erleichtert.

5.1 Hardware

Wie bereits erwähnt wurde, ist im Rahmen einer Projektarbeit die Entwicklung der Hardwarevarianten des Analog-Z durchgeführt worden. Der Analog-Z durchlief iterative Entwicklungsprozesse aus welchen ersichtlich wurde, dass zusätzliche Ausgänge und Eingänge erforderlich sind, um weitere Verbraucher in Kombination zum analogen Ausgang anzusteuern sowie eine weitere Temperatur zu messen. In Abbildung 17 ist das Hardwarekonzept des Analog-Z V3 mit den Ausgängen, Eingängen und Schnittstellen dargestellt. [26]

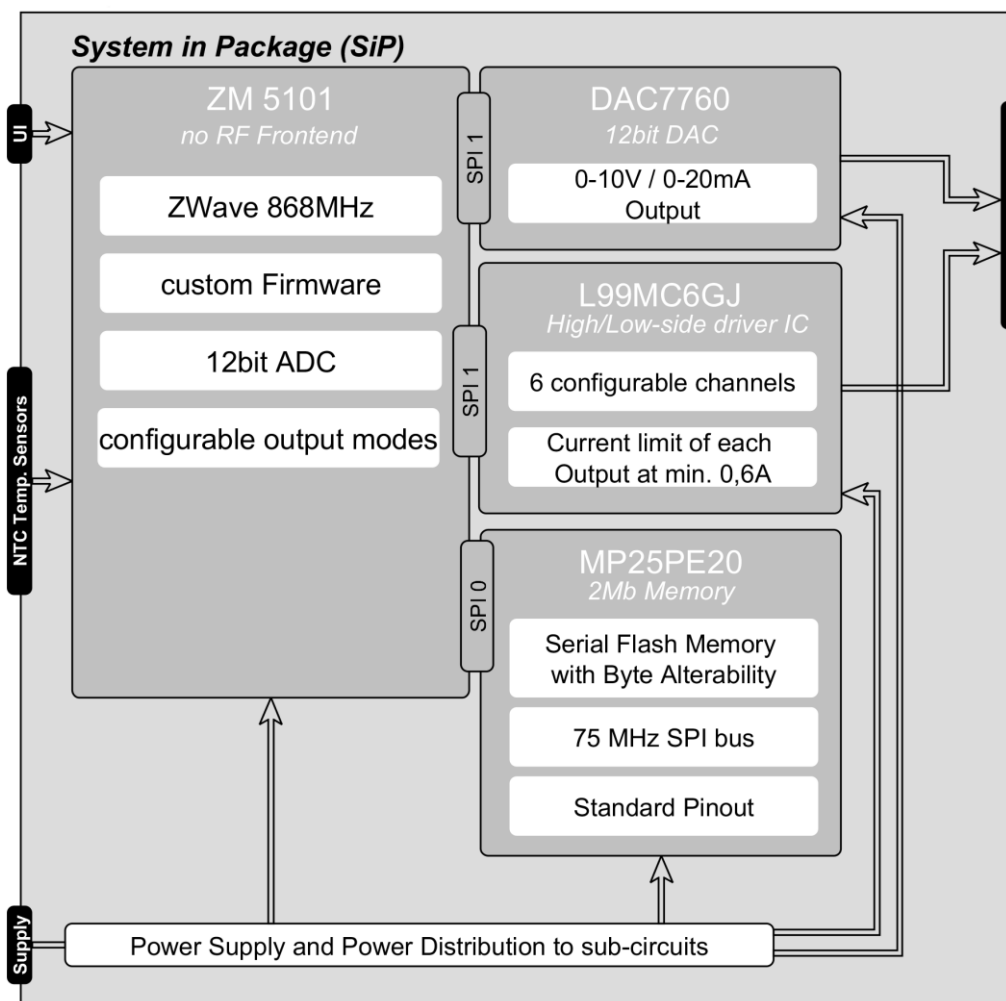


Abbildung 17: Hardwarekonzept Analog-Z V3

Auf dem Z-Wave Modul wird eine benutzerdefinierte Firmware mit der gesamten Programmlogik und dem Kommunikationshandling implementiert. Durch den Flash-Speicher ist das Z-Wave Modul hardwareseitig updatefähig und kann über den Z-Wave Funk Over-the-Air upgedated werden. Der High/Low side IC stellt die Digitalausgänge und der DAC den analogen Ausgang zur Verfügung. Auf dem Z-Wave Modul werden zwei GPIO's²² als analoge Eingänge für die Temperaturmessung herangezogen sowie zwei weitere für die Button's. Für die beiden zweifarbig Status-LEDs sind vier Ausgänge erforderlich sowie drei Ausgänge für die dreifarbig LED, welche für die Darstellung des Energieverbrauchs eingeplant ist. Im Anhang wurde der Schaltplan des Analog-Z V3 hinzugefügt. Dieser besteht aus zwei Teilen: der Basisplatine und der Erweiterungsplatine.

²² General Purpose Input Output

Eine RS232- und eine microUSB Schnittstelle sind zur Programmierung und Konfiguration des Analog-Z vorhanden. Für die Provisionierung, dem Testen der Hardware sowie zum Debuggen des Gerätes wird hierzu die RS232 Schnittstelle verwendet. Die optional bestückte microUSB Schnittstelle soll als Kundenschnittstelle zur Konfiguration des Analog-Z dienen.

Die zusätzliche zweite Status-LED, dreifarbig LED, der zusätzlichen Button und die microUSB Schnittstelle ermöglicht die Produktweiterentwicklung. Durch diese Hardware Erweiterung werden die Voraussetzungen für die Zertifizierung als Z-Wave Gerät geschaffen um andere Geräte, wie zum Beispiel den Leistungsmesser ohne einen zusätzlichen Controller, wie zum Beispiel dem SEM, direkt beim Analog-Z einzubinden. Die aktuellen Haus-Leistungsdaten können somit dem Analog-Z zugesendet werden. Die Auswertung der zur Verfügung stehenden Leistung und des Energiezustandes des Gebäudes am Analog-Z ermöglicht die variable Ansteuerung des Heizstabes ohne den SEM. Für diesen Use-Case muss der Analog-Z laut Z-Wave Spezifikation zu einem Controller weiterentwickelt werden.

5.2 Z-Wave

Z-Wave spielt als Kommunikationstechnologie eine integrale Rolle für die Konzeptentwicklung. Um auf Basis dieser Technologie zu entwickeln, besteht zum einen die Möglichkeit die frei verwendbare Bibliothek von OpenZWave²³ zu verwenden und zum anderen Mitglied der Z-Wave Alliance zu werden. Durch die Mitgliedschaft besteht die Möglichkeit mit dem offiziellen Z-Wave Stack zu arbeiten und diesen für das eigene Produkt zu erweitern. Um ein Gerät als Z-Wave-fähig zu vermarkten, ist eine Zertifizierung durch die Z-Wave Alliance erforderlich. Ein zertifiziertes Gerät muss eine gewisse Basisfunktionalität unterstützen. Diese minimalen Anforderungen werden durch Wahl des Device Types und Role Types definiert.

5.2.1 Role und Device Type

Um den Role und Device Type des Analog-Z zu definieren, ist eine Betrachtung der prinzipiellen Funktionsweise und der vorhandenen Schnittstellen erforderlich. Die primäre Aufgabe, die stufenlose Ansteuerung mittels eines Analogausganges, wurde in der Anforderungsanalyse bereits erarbeitet. Die Schnittstellen, die über Z-Wave angesprochen

²³ <http://www.openzwave.com/>

werden können, sind in der Abbildung 18 dargestellt. Daraus folgt, dass ein Adressierungsschema erforderlich ist, um jeden Knotenpunkt anzusprechen. In Z-Wave werden diese mit Endpunkte bezeichnet und werden durch eine eindeutig vergebene ID angesprochen. Es handelt sich in Z-Wave um ein Multi Channel Device, also ein Mehrkanal-Gerät. Hierdurch wird für jeden Endpunkt ein eigener Device Type vergeben.

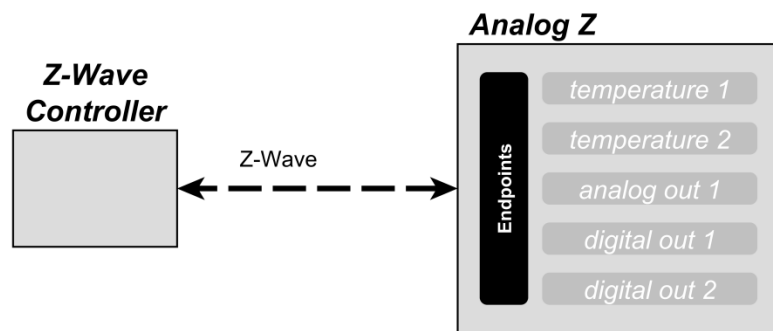


Abbildung 18: Analog-Z Endpunkte

Die primäre Aufgabe des Analog-Z definiert den primären Z-Wave Device Type. Als Hilfestellung dient die Tabelle 3, welche im Grundlagen Kapitel 2.4.1 die Beziehungen der verschiedenen Device Types, Role Types, Generic- und Specific Device Classes beinhaltet.

Nachfolgend sind die für die Endpunkte erforderlichen Zuordnungen aufgelistet:

- **Analoger Ausgang**

Für die primäre Aufgabe des Analog-Z ist der analoge Ausgang erforderlich. Die prozentuale Ansteuerung fällt bei der Generic Device Class in die Gruppe „*Multilevel Switch*“. Hierbei handelt es sich um einen variablen Schalter. Die Specific Device Class ist in diesem Fall „*Multilevel Power Switch*“. Daraus folgt der Device Type „*Light Dimmer Switch*“. Die Bezeichnung des Device Type Namens ist unter Umständen irreführend, jedoch erfüllt dieser den Zweck des Ausganges mit der Ansteuerung von 0-100 %.

- Generic Device Class: Multilevel Switch
- Specific Device Class: Multilevel Power Switch
- Multi Channel Device Type: Light Dimmer Switch

▪ Temperatur Eingänge

Bei den Temperatureingängen wird die Wassertemperatur ermittelt. Bei diesen handelt es sich um einen Sensor, der in folgende Device Classes und folgenden Device Type zugeordnet wird:

- Generic Device Class: Multilevel Sensor
- Specific Device Class: Routing Multilevel Sensor
- Multi Channel Device Type: Sensor – Multilevel

▪ Digitalausgänge

Bei den Digitalausgängen handelt es sich um einfache Ein/Aus – Schalter. Diese werden in die folgenden Gruppen eingeteilt:

- Generic Device Class: Binary Switch
- Specific Device Class: Binary Power Switch
- Multi Channel Device Type: Multi Channel Device Type On/Off Power Switch

Role Type

Durch den primären Device Type „*Light Dimmer Switch*“ wird auch der Role Type für den Analog-Z vorgegeben. Dieser ist der Role Type „*AOS*“²⁴. Dies bedeutet, dass dieser eine permanente Stromversorgung besitzen muss, welche für die Regelung der Warmwasseraufbereitung auch ohne diese Z-Wave Bedingung erforderlich ist. Durch diesen Role Type wird der Analog-Z ebenso zu einem Routing Slave und somit zu einem Z-Wave Repeater im Z-Wave Netzwerk.

5.2.2 Kommandoklassen

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben sind einige Kommandoklassen zwingend erforderlich, um die Interoperabilität der Z-Wave Geräte zu gewährleisten und den Anforderungen des Funkstandards zu entsprechen. In der Abbildung 19 sind die Kommandoklassen der drei Rubriken ersichtlich.

²⁴ Always On Slave

Pflicht Basiskommandoklassen	Pflicht Kommandoklassen durch Gerätetypen	Empfohlene & Optionale Kommandoklassen
<ul style="list-style-type: none"> • Association V2 • Association Group Information V1 • Basic V1 • Manufacturer Specific V2 • Device Reset Locally V1 • Version V2 • Z-Wave Plus V2 • Power Level V1 • No Operation 	<ul style="list-style-type: none"> • Binary Switch V1 • Multi Channel V4 • Multi Channel Association V2 • Multilevel Sensor V5 • Multilevel Switch V1 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuration V1 • CRC-16 Encapsulation V1 • Firmware Update Meta Data V2 • Node Naming and Location V1

Abbildung 19: Kommandoklassen des Analog-Z

Die sogenannten Basiskommandoklassen sind für alle neu zu entwickelnden Geräte erforderlich. Durch die Auswahl des Role und des Device Types des Gerätes sind zusätzliche Kommandoklassen erforderlich. Beim Analog-Z müssen hierbei für jeden Multi Channel Device Type die verpflichtenden Kommandoklassen umgesetzt werden.

Nachfolgend werden die Kommandoklassen kurz beschrieben:

Basic

Diese Kommandoklasse ist zwingend erforderlich und ermöglicht die Steuerung der primären Funktionen des Gerätes über einen SET und GET Befehl. Diese Kommandoklasse soll die Basisfunktion des Gerätes dem Controller zur Verfügung stellen. Dadurch können Controller, welche nicht alle unterstützten Kommandoklassen implementiert haben, einen eingeschränkten Funktionssatz des Gerätes unterstützen. [29]

Manufacturer Specific

Diese Kommandoklasse wird verwendet, um herstellerebene Gerätedaten, wie Manufacturer ID, Product Type ID und Product ID anzuzeigen. Anhand dieser IDs wird das Gerät eindeutig einem Hersteller zugewiesen. [30]

Version

Diese Kommandoklasse gibt allgemeine Infos zum Gerät aus. Hierzu zählen die Z-Wave Library Type, die Z-Wave Protokollversion, die herstellerebene Application Version und die Versionen der verwendeten Kommandoklassen. [30]

Association

Mit dieser Kommandoklasse kann sich ein Z-Wave Gerät in die Association Group hinzufügen und entfernen und erhält so Änderungen laut der Beschreibung der Association Group. [30]

Multi Channel

Um mehrere Endknoten über Z-Wave anzusprechen, ist die *Multi Channel* Kommandoklasse erforderlich. Hierzu wird eine Nummer dem Endpunkt zugewiesen, damit dieser direkt ansprechbar ist. [31]

Multi Channel Association

Durch die *Multi Channel Association* Kommandoklasse kann sich ein Z-Wave Gerät in die Gruppe eines speziellen Endpunktes legen und erhält von diesem zum Beispiel die Änderungen als Report zugeschickt. [30]

Association Group Information

Mit dieser Kommandoklasse können die Geräte, die sich in einer Association Group befinden, ausgelesen werden. [30]

Multilevel Switch

Durch diese Kommandoklasse wird die prozentuale Steuerung des analogen Ausgangs ermöglicht. [29]

Multilevel Sensor

Alle Sensoren werden über diese Kommandoklasse abgefragt. In diesem Fall wird über diese Kommandoklasse ein Wassertempersensordatensensor abgefragt. [29]

Binary Switch

Einfache Ein/Aus Schalter, wie die Digitalausgänge, werden mit dieser Kommandoklasse realisiert. [29]

Configuration

Über diese Befehlsklasse können die Parameter des Analog-Z über Z-Wave konfiguriert werden. [29]

Power Level

Diese Kommandoklasse ermöglicht das Einstellen und Testen des HF-Sendeleistungspegel in einem Netzwerk sowie auch zwischen Knoten. [32]

Firmware Update Meta Data

Um das Firmware Image über Z-Wave upzudaten, wird diese Kommandoklasse implementiert. Dies trägt zur Wartbarkeit der Software bei. [30]

CRC-16 Encapsulation Befehlsklasse

Die *CRC-16 Encapsulation* Kommandoklasse wird als Integritätscheck beim Austausch von Daten über Z-Wave verwendet. [31]

Node Naming and Location

Diese Kommandoklasse wird genutzt, um dem Analog-Z einen Standardnamen und -ort zu vergeben, der von anderen Z-Wave Geräten abgefragt werden kann. [30]

Device Reset Locally

Durch diese Kommandoklasse wird ein Report ausgeschickt und somit der Controller informiert, dass der Analog-Z auf Werkseinstellungen zurückgesetzt wurde und sich nicht mehr im Z-Wave Netzwerk befindet. [30]

5.3 Bedienkonzept

Das User-Interface des Analog-Z V3 besteht aus einem Button und einer zweifarbigen LED. Der Button ist für das Hinzufügen zu einem Z-Wave Netzwerk sowie auch zum Entfernen aus diesem und zum Zurücksetzen auf Werkseinstellungen zuständig. In der Tabelle 4 werden die möglichen Zustandsänderungen des Analog-Z's aufgelistet. Im nachfolgenden Kapitel 5.4.2 werden die Zustände, in welchen sich der Analog-Z befinden kann, detailliert beschrieben.

Tabelle 4: Bedienkonzept Button

Button	Beschreibung
1sec drücken	Inklusion/Exklusion vom Analog-Z V3 zu Z-Wave Netzwerk
> 10sec drücken	Zurücksetzen auf Werkseinstellungen

Die zweifarbige LED stellt den Betriebszustand beziehungsweise den Status des Analog-Z dar. Durch eine durchgehend leuchtende LED wird angezeigt, dass sich dieser in einem Z-Wave Netzwerk befindet. Im blinkenden Zustand ist dieser nicht eingebunden. Somit ist auch für Menschen mit einer Farb-Sehschwäche der Betriebszustand leicht erkennbar.

Durch langsames Blinken (1x/sec) wird die Bereitschaft zum Inkludieren angezeigt. Sobald die LED schnell blinkt (2x/sec) befindet sich der Analog-Z im Inklusions-/Exklusionsmodus und kann zu einem Z-Wave Netzwerk hinzugefügt oder davon entfernt werden. Bei durchgehend leuchtender LED befindet sich der Analog-Z in einem Z-Wave Netzwerk. Die Farbe zeigt an in welchem Modus sich der Analog-Z befindet. Leuchtet die LED durchgehend Rot, so ist dieser im manuellen Modus und der Automatische Heizmodus ist deaktiviert. Der Analogausgang ist hierbei separat und unabhängig von der Temperaturmessung ansteuerbar. Wird der Automatische Heizmodus aktiviert, leuchtet die LED entweder Grün oder Orange. Gibt es vom Z-Wave Controller, wie zum Beispiel vom SEM, keinen Vorgabewert für eine konfigurierte Zeitspanne, wird dies mit einer Orange leuchtenden LED visualisiert. Sobald ein Vorgabewert durch ein übergeordnetes System vorliegt, leuchtet die LED Grün. In der Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die möglichen Betriebszustände und Modi des Analog-Z aufgelistet.

Tabelle 5: Betriebszustand Analog-Z

LED Zustand	Betriebszustand
LED leuchtet durchgehend	Gerät ist in einem Z-Wave Netzwerk inkludiert
LED blinkt 1x/sec	Gerät ist nicht inkludiert und bereit für die Inklusion
LED blinkt 2x/sec	Gerät befindet sich im Inklusion/Exklusionsmodus für Z-Wave

Tabelle 6: Betriebsmodus des Analog-Z

LED Farbe	Betriebsmodus
Rote LED	Manueller Modus, der Analogausgang wird nicht automatisch angesteuert
Grüne LED	Automatischer Modus des Analogausgangs, Vorgabewert vorhanden
Orange LED	Automatischer Modus des Analogausgangs, kein Vorgabewert vorhanden

5.4 Software

Durch die Mitgliedschaft zur Z-Wave-Alliance ist eine Entwicklung eines benutzerdefinierten Firmware Images direkt auf dem Z-Wave Modul möglich. Die Z-Wave Module

basieren auf der 8051-Prozessorarchitektur. Die Programmierung des Embedded Systems erfolgt mit der Programmiersprache C.

5.4.1 Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung wurde die Keil μ Vision IDE²⁵ herangezogen. Der Keil-Compiler C51 ist die Industrie-Tool-Chain für 8051 kompatible Geräte und wurde daher für das Kompilieren der Software herangezogen. In der Lite/Evaluation-Version des Keil-Compilers wird der Objektcode mit einer Größe von 2 Kbytes limitiert. Da die Objektcode Limitierung für die Entwicklung der Firmware weit überschritten wird, musste auf die kostenpflichtige Compiler Lizenz für das Professional Developer's Kit gewechselt werden.

Prozessorarchitektur ZM5101

Das Z-Wave SiP²⁶ Modul ZM5101 basiert auf einem 8051er-Mikrokontroller und kombiniert, wie in der Abbildung 20 dargestellt, ein Z-Wave SD3502 SoC²⁷, Crystal und passive RF²⁸ Komponenten miteinander. Die Prozessorarchitektur des ZM5101 besitzt einen 8-Bit Prozessorkern, welcher auf die Speicher- und Linkverwaltung für die Z-Wave Anforderungen optimiert wurde. Dieser besitzt folgende Kenndaten [33]:

- Optimized 8051 CPU Core
- 128kB Flash
- 16kB SRAM
- Two UARTs with speed up to 230.4kbps
- Two SPIs with speed up to 8MHz
- USB 2.0 full speed
- 4-channel 12/8-bit rail-to-rail ADC with VDD/internal/external voltage reference
- 4-channel 16-bit LED PWM
- 30 GPIOs
- Hardware AES-128 security engine

²⁵ <http://www.keil.com>

²⁶ System-in-Package

²⁷ System-on-a-Chip

²⁸ Radio Frequency

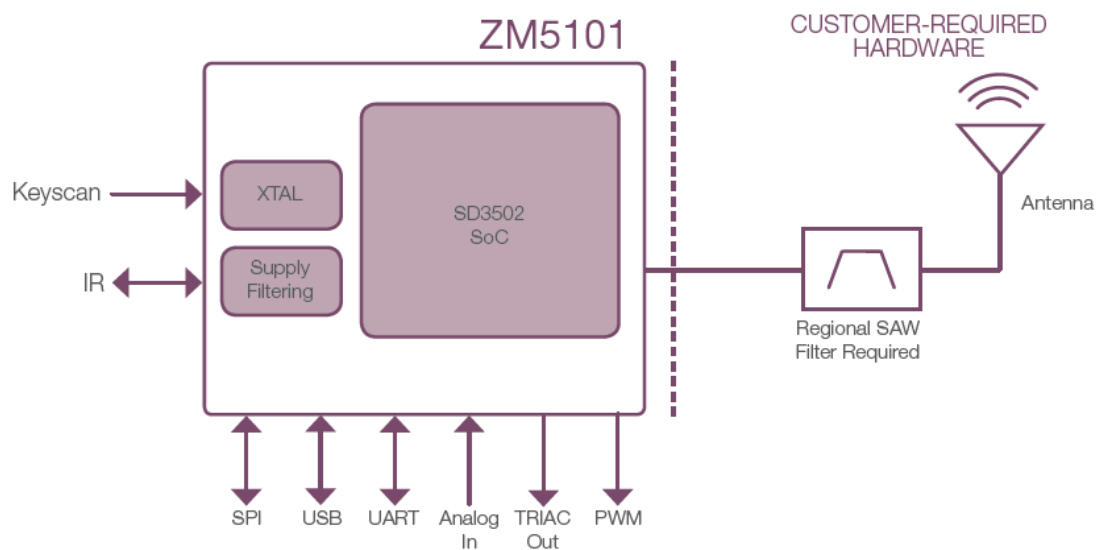


Abbildung 20: Blockschaltbild ZM5101 [33]

Code Banking

Wird der Programmcode zu groß und die Standardgröße von 64 Kbytes überschritten, ermöglicht das Code Banking eine Codegröße von bis zu 2 Mbytes. Das Programm wird also in mehrere Code Banks aufgeteilt. Hierbei gibt es einen gemeinsamen und einen eigenen Speicherbereich der Code Banks.

Z-Wave Software-Development-Kit (SDK)

Sigma Designs stellt ein SDK für die Programmierung zur Verfügung. In diesem sind Werkzeuge und Libraries, welche mehrfach durch Sigma Designs getestet wurden, enthalten. Dies ist bei der Entwicklung sehr hilfreich, um Teilstücke aus getestetem Code wiederzuverwenden.

5.4.2 Endlicher Automat

Um den Programmablauf zu modularisieren und verständlicher zu gestalten, wird ein endlicher Automat verwendet. Durch dieses Verhaltensmodell werden die Zustände, in denen sich das Gerät befinden kann, sowie auch die Zustandsübergänge und Aktionen beschrieben. Für die Zustände des Analog-Z spielt unter anderem auch Z-Wave eine entscheidende Rolle.

Es werden folgende Zustände definiert:

Init

In diesem Zustand wird der Analog-Z initialisiert und die Konfigurationsparameter ausgewertet. Nach der Auswertung wechselt der Analog-Z in den nächsten Zustand, welcher von der Konfiguration abhängig ist.

Idle

Befindet sich der Analog-Z in keinem Z-Wave Netzwerk, ist der Analog-Z im „Idle“ Zustand und bereit zur Einbindung in ein Z-Wave Netzwerk.

Inclusion/Exclusion

Durch Drücken des Buttons erfolgt eine Zustandsänderung in den Zustand „Inclusion/Exclusion“, hierbei befindet sich der Analog-Z im Inklusions-/Exklusionsmodus und kann in ein Z-Wave Netzwerk eingebunden oder von einem bestehendem Z-Wave Netzwerk entfernt werden.

Controlled

Im Zustand „Controlled“ befindet sich der Analog-Z wenn der automatische Heizmodus aktiviert ist, dieser sich in einem Z-Wave Netzwerk befindet und solange Vorgabewerte für die Ansteuerung vom SEM oder einem anderen externen System an den Analog-Z geschickt werden.

Lazy

Durch Deaktivierung des automatischen Heizmodus wechselt der Analog-Z von den Zuständen „Controlled“ oder „Fallback“ in den Zustand „Lazy“. Alle Ein- und Ausgänge sind hier unabhängig voneinander und werden nur noch vom SEM oder einem externen System gesteuert. Der Analog-Z befindet sich in diesem Zustand in einem Z-Wave Netzwerk.

Fallback

Ist der automatische Heizmodus aktiviert und es erfolgt in einem konfigurierten Zeitintervall keine Vorgabe vom SEM zur Ansteuerung des analogen Ausganges, so wechselt der Analog-Z in den Zustand „Fallback“. In diesem Zustand ist der Analog-Z ein Regler ohne externe Steuerung. Sobald ein Vorgabewert wieder vorliegt, wechselt der Analog-Z wieder in den Zustand „Controlled“.

Reset

Durch Zurückstellen auf die Werkseinstellungen, wird auf den Zustand „Reset“ gewechselt. Sobald alle Daten und Einstellungen gelöscht wurden, startet die Applikation neu im Zustand „Init“ und wechselt nach der Initialisierung in den Zustand „Idle“.

In der Abbildung 21 ist der endliche Automat des Analog-Z dargestellt. Im Initialen Zustand wird das System im Zustand „Init“ gestartet. Nach dem Bootvorgang werden die Konfigurationen und Systemparameter ausgelesen. Anhand dieser wird entschieden in welchem Zustand sich der Analog-Z befindet. Zuerst wird überprüft ob das Gerät bereits in einem Z-Wave Netzwerk eingebunden ist und eine Geräteidentifikationsnummer, eine *NodeID* besitzt. Ist keine *NodeID* vorhanden befindet sich der Analog-Z im Zustand „Idle“ und wartet bis eine Zustandsüberführung durch Knopfdruck hervorgerufen wird. Bei vorliegender *NodeID* wird weiter überprüft ob der „Automatische Heizmodus“ aktiviert ist. Wenn dieser nicht aktiviert ist, befindet sich der Analog-Z im manuellen Modus und wechselt in den Zustand „Lazy“. Ansonsten wird weiter überprüft ob ein Vorgabewert eines externen Systems vorhanden ist und der Analog-Z wechselt hier entweder in den Zustand „Controlled“ oder „Fallback“. Bei einer Konfigurationsänderung wird neu ermittelt in welchen Zustand der Analog-Z übergeführt wird. Durch drücken des Buttons für länger als eine Sekunde wechselt der Analog-Z in den „Inclusion/Exclusion“ Zustand und kann von einem Netzwerk entfernt werden. Die akzeptierten Endzustände der FSM sind „Idle“, „Controlled“, „Fallback“ und „Lazy“. In diesen Zuständen befindet sich der Analog-Z im Reglerbetrieb.

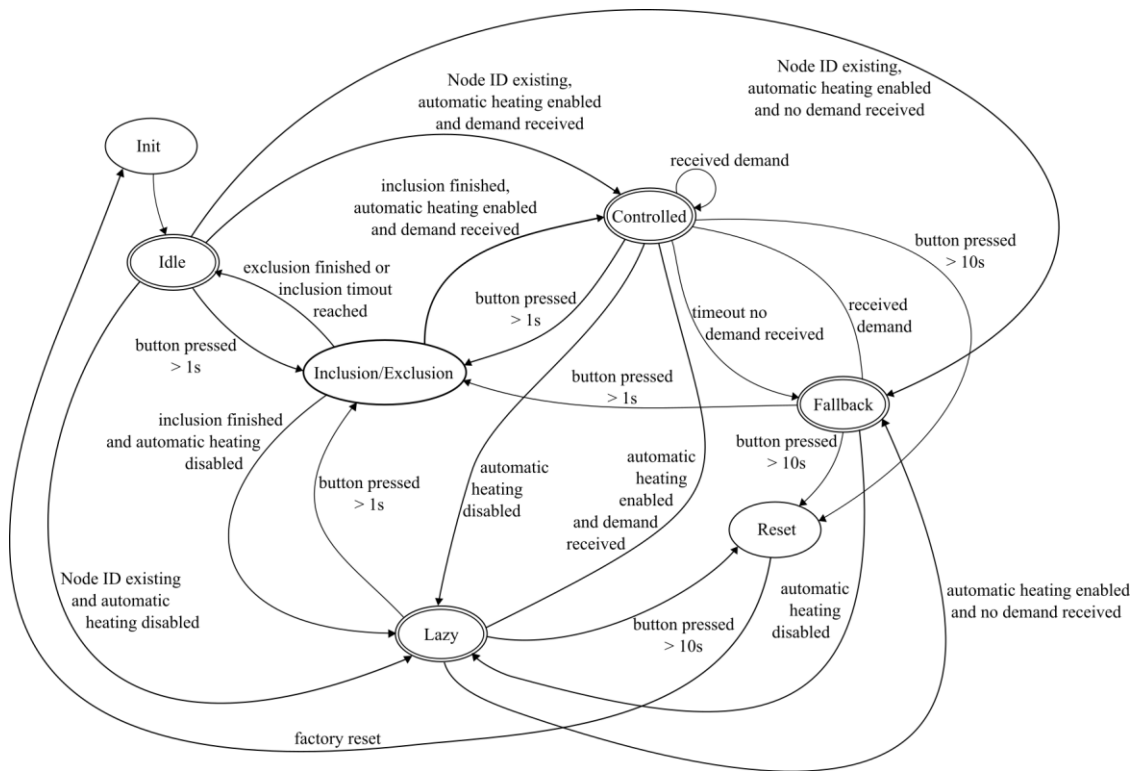


Abbildung 21: Endlicher Automat des Analog-Z V3

5.4.3 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung muss an den analogen Eingängen eine Temperatursonde angeschlossen werden. Hierzu wird ein Heißleiter (NTC²⁹ Widerstand) ausgewählt. Hierbei handelt es sich um einen temperaturabhängigen Widerstand, der einen negativen Temperaturkoeffizienten besitzt. Die verwendete Temperatursonde besitzt einen Temperaturkoeffizienten B von 3950 K. Der Widerstandswert bei einer bestimmten Temperatur wird durch eine Exponentialfunktion berechnet. Diese Formel lautet:

$$R_T = R_N \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)}$$

In der Abbildung 22 ist der Widerstandsverlauf des Heißleiters in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Bei der Kennlinie R_{NTC} werden die nominalen Werte herangezogen und bei den weiteren Kennlinien werden die Toleranzen des Vorwiderstandes und des Temperaturkoeffizienten mit $\pm 1\%$ mitberücksichtigt. Aus der Kennlinie erkennt man,

²⁹ Negative Temperature Coefficient

dass die Toleranzen im Temperaturbereich unter 0°C einen größeren Einfluss haben, wohingegen im relevanten Bereich von 0°C bis 100°C der Widerstandswert nur kleine Abweichungen besitzt.

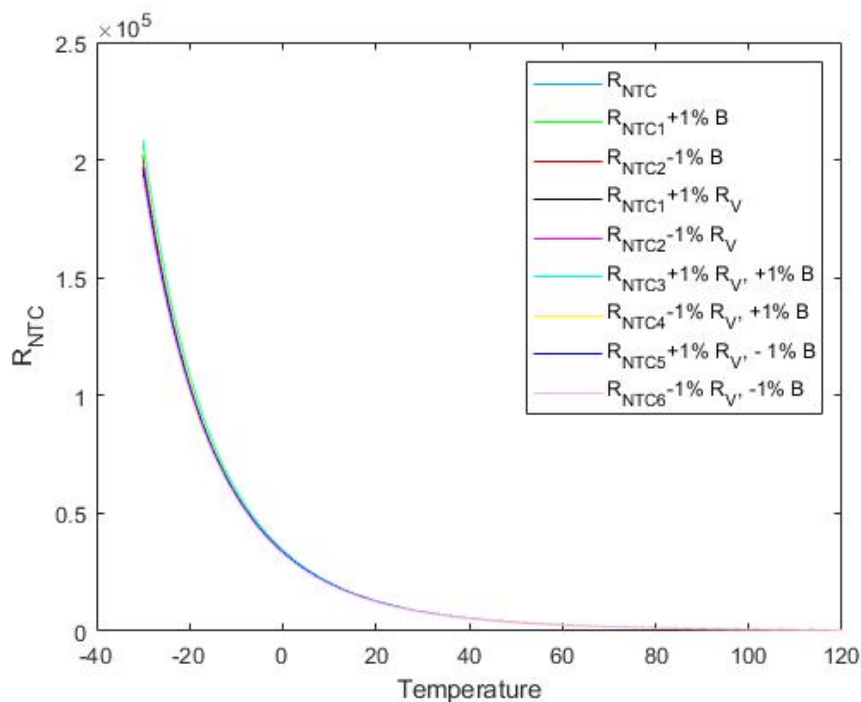


Abbildung 22: NTC Widerstandskennlinie mit Berücksichtigung von Toleranzen des Beta Temperaturkoeffizienten (B) und Vorwiderstandes (R_V)

Der NTC-Widerstand wird an den Schraubklemmen, die zum analogen Eingang des Z-Wave Moduls führen, angeschlossen. Der gemessene ADC³⁰-Wert ist hierbei proportional zur Temperatur. Zur Auswertung des Messwertes und Berechnung der Temperatur ist hierbei die Betrachtung des internen Schaltaufbaus erforderlich. In der Abbildung 23 ist der interne Schaltaufbau ersichtlich. Die Widerstände R_3 und R_6 sind hierbei die Vorwiderstände der Temperatureingänge. R_{12} und C_6 , sowie R_2 und C_8 bilden hier einen Tiefpassfilter 1. Ordnung um hochfrequente Störungen am analogen Eingang der MCU auszufiltern. Auf der Leitung mit der Beschriftung TEMP1 und TEMP2 werden die NTC Temperaturfühler angeschlossen.

³⁰ Analog-Digital-Converter

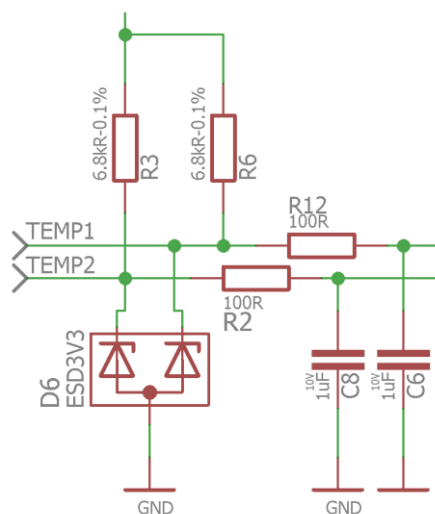


Abbildung 23: Schematischer Aufbau des Temperatureingangs

Der Widerstand R_{NTC} berechnet sich über den Spannungsteiler wie folgt:

$$R_{NTC} = \frac{V_{NTC} \cdot R_V}{V_{Ref} - V_{NTC}} = \frac{V_{NTC} \cdot 6800k\Omega}{3,3V - V_{NTC}}$$

Die Spannung V_{NTC} wird mit dem ADC-Wandler des Z-Wave Moduls auf 12bit digitalisiert. Diese Spannung ist proportional zum gemessenen Analogwert ADC .

$$V_{NTC} \propto ADC$$

Aus den 12bit folgt eine maximale Größe des ADC-Wertes von 4095. Dieser Wert ist proportional zum maximalen Spannungswert am NTC-Fühler von 3,3 V. Daraus ergibt sich eine Genauigkeit der Schrittweite durch Division der Referenzspannung von 3,3 V mit 4095.

$$\frac{V_{Ref}}{2^{12} - 1} = \frac{3,3V}{4095} = 0,00080586V = 8,0586 \cdot 10^{-4}V$$

Die Widerstandsberechnung des NTC-Fühlers erfolgt folgendermaßen:

$$R_{NTC} = \frac{ADC \cdot 6800k\Omega}{4095 - ADC}$$

Durch umformen der Exponentialfunktion erhält man folgende Formel zur Berechnung der Temperatur:

$$T = \frac{T_N}{1 + \frac{T_N}{B} \cdot \ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_N}\right)}$$

Die Nominalwerte des 10k-NTC Temperatursensors sind bei einer Temperatur von 25°C 10kΩ. In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die berechneten Werte für die Temperaturen und deren dazugehörigen Werte aufgelistet.

Tabelle 7: Zusammenhang der Temperatur-, Widerstands-, Spannungs- und Digitalwerte eines 10k-NTC Temperatursensors

Temperatur in °C	R _{NTC} in Ω	U _{NTC}	ADC
-30	200204	3,19	3960
-20	105385	3,10	3847
-10	58246	2,96	3667
0	33621	2,74	3406
10	20175	2,47	3063
20	12535	2,14	2655
30	8037	1,79	2218
40	5301	1,45	1794
50	3588	1,14	1414
60	2486	0,88	1096
70	1760	0,68	842
80	1270	0,52	645
90	934	0,40	494
100	698	0,31	381

Der Temperaturverlauf am NTC-Fühler wird in Abbildung 24 dargestellt. Der Verlauf ist für die Spannung und dem ADC-Wert durch die Proportionalität gleich. Die linke y-Achse stellt hierbei den ADC-Wert und die rechte y-Achse den Spannungswert am NTC-Fühler dar. Daraus lässt sich die digitale Repräsentation der Temperatur sowie auch der Spannungswert des NTC-Fühlers ablesen.

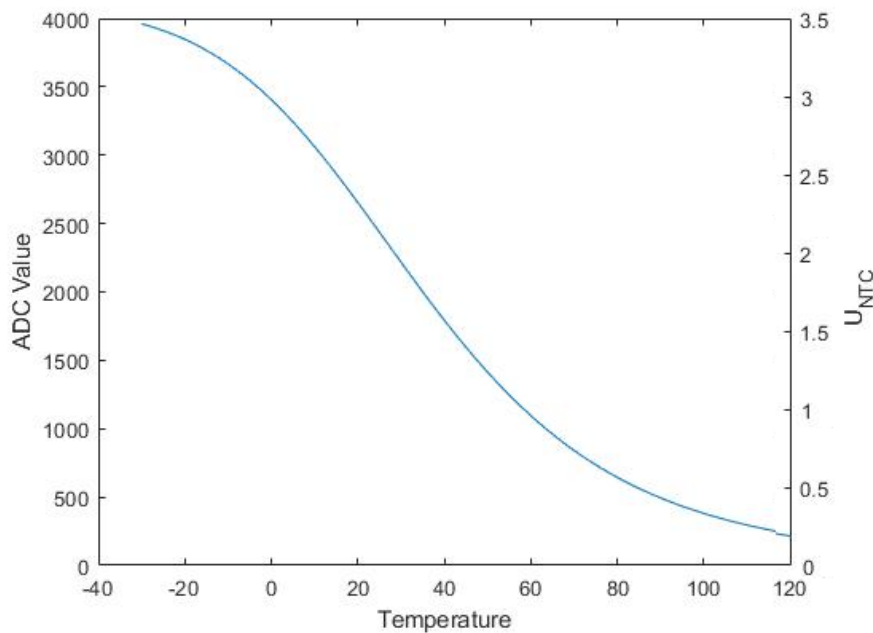


Abbildung 24: ADC-Wert und Spannung in Abhängigkeit der Temperatur

Abbildung 25 stellt die Differenzspannungen der berechneten Punkte in Abhängigkeit der Temperatur dar. In dieser Abbildung wird mit $0,1^{\circ}\text{C}$ Schritten die Differenzspannung ermittelt. Die rote Linie zeigt die bit-Genauigkeitsgrenze des 12bit ADC-Wandlers an. Die Grenze der bit-Genauigkeit liegt bei $0,80586\text{e-}4\text{ V}$, wie zuvor berechnet wurde. Hier lassen sich die Schnittpunkte der Kennlinie und der bit-Genauigkeitsgrenze ablesen und es lässt sich der Bereich von ca. -23°C bis 98°C ablesen, in welchem die $0,1^{\circ}\text{C}$ Genauigkeit noch besteht. Dies bedeutet Temperaturen außerhalb dieses Bereiches können nicht mit einer $0,1^{\circ}\text{C}$ Genauigkeit gemessen werden. Weiters ist aus der Kurve ersichtlich je weiter der größte Abstand zur Nominaltemperatur von 25°C ist, desto geringer ist die Differenzspannung und somit auch die Genauigkeit der Messung.

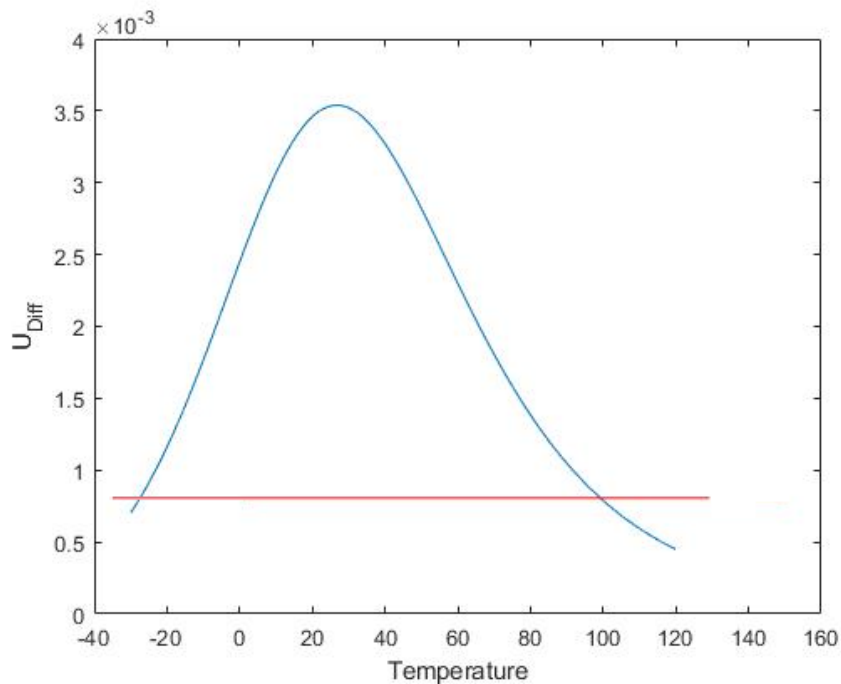


Abbildung 25: Differenzspannungsverlauf $U_{\text{NTC}(i)} - U_{\text{NTC}(i+1)}$

Messintervall der Temperatur

Um bei der Berechnung der Temperatur die Abweichungen der Messwerte vom wahren Wert zu reduzieren, wird das arithmetische Mittel aus mehreren Messpunkten gebildet. Hierbei werden die gemessenen ADC-Werte, die proportional zur Spannung sind, herangezogen.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Um einen guten Durchschnittswert aus den gemessenen Messwerten zu erzielen, soll aus 50 Messpunkten das arithmetische Mittel berechnet werden.

Hierbei wird das Messintervall mit 10ms gewählt, daraus ergibt sich, dass jede halbe Sekunde ein neuer Temperaturwert zur Verfügung steht. Das Z-Wave Modul besitzt nur einen ADC Wandler, welcher über einen Multiplexer an den Eingang durchgeschaltet wird. Da der Analog-Z V3 zwei Temperatureingänge besitzt, muss nach der Messung einer Temperatur der Multiplexer auf den anderen Temperatureingang umschalten. Für die Messung einer Temperatur werden 0,5s benötigt. Daraus ergibt sich ein Ausgabeintervall von 1s für die Temperaturen, da nur eine Messung aktiv sein kann. Dieses

Messintervall ist für die Berechnung einer Wassertemperatur völlig ausreichend, da Temperaturänderungen im Warmwasserspeicher sehr langsam stattfinden.

Beim arithmetischen Mittelwert handelt es sich um einen ungewichteten Mittelwert, bei welchen jeder Messpunkt dieselbe Gewichtung besitzt. Deshalb beeinflussen große Ausreißer oder asymmetrische Verschiebungen das arithmetische Mittel sehr stark und führen so zu Aussagen, die nicht repräsentativ sind. Deshalb müssen diese Ausreißer ausgefiltert werden.

Fehlerkorrekturmaßnahmen

Ausreißer oder Abweichungen vom wahren Wert verursachen einen Messfehler, welche durch eine einfache Maßnahme ausgefiltert werden können. Ein unnatürlicher Sprung in der Messung wird mit einer Änderung des ADC-Wertes von ± 20 ADC Samples definiert. Die Änderung der Temperatur für den ADC-Wert variiert sehr stark und ist um den Nennpunkt von 25°C bei $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ Abweichung und bei 90°C bis zu $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$ Abweichung. Diese Abweichung ist absolut zwischen den Messpunkten betrachtet. Durch das arithmetische Mittel werden Messfehler und Messrauschen ausgefiltert. Eine absolute Genauigkeit von $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ist beim Warmwasserspeicher zulässig. Das Erreichen dieser Genauigkeit wurde in Tests verifiziert.

5.4.4 Regelkreis

Zur Steuerung des Ausganges ist ein Regelkreis erforderlich. Dieser besteht, wie in Abbildung 26 dargestellt, grundsätzlich aus einem Regler, einer Regelstrecke und einer Verzweigungs- beziehungsweise Summationsstelle.

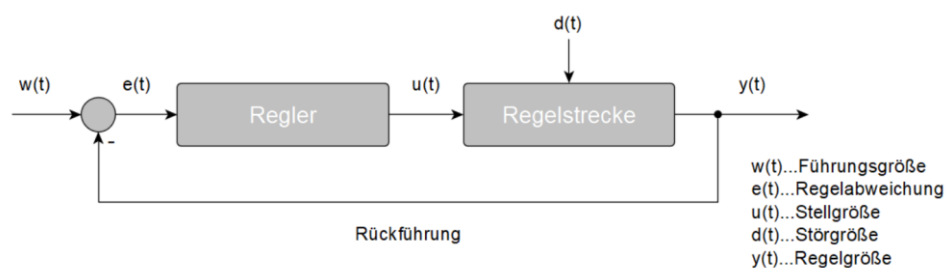


Abbildung 26: Grundstruktur eines Regelkreises

Mit der Stell- und Störgröße, welche nicht beeinflussbar ist, besitzt die Regelgröße zwei Eingänge. Das Regelziel ist es die Regelgröße der Führungsgröße nachzuführen, sodass die Führungsgröße $w(t)$ gleich der Regelgröße $y(t)$ wird und die Regeldifferenz gegen 0 geht.

$$e(t) = w(t) - y(t)$$

Für die Warmwasseraufbereitung wird ein Zweipunktregler eingesetzt. In der Abbildung 27 ist der Regelkreis für diesen Einsatzzweck dargestellt.

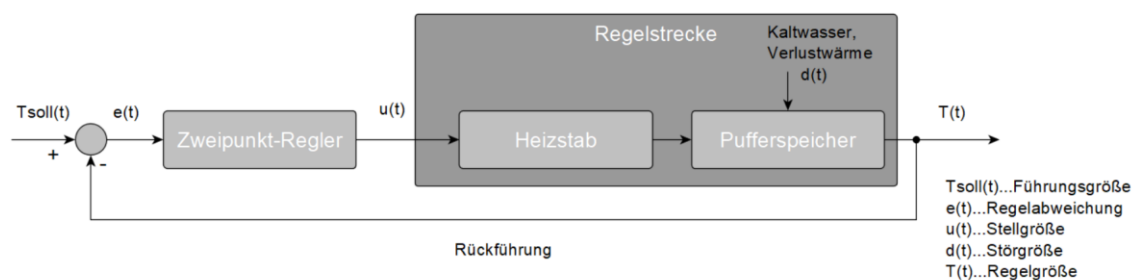


Abbildung 27: Strukturbild der Temperaturregelung für die Warmwasseraufbereitung

Die Regelstrecke besteht in diesem Fall aus einem elektrischen Heizstab und einem Warmwasserboiler beziehungsweise Pufferspeicher. Der Zweipunkt-Regler zählt zu den unstetigen Reglern und wechselt zwischen zwei Ausgangszuständen „Ein“ und „Aus“. Unterschreitet der Istwert den Sollwert, nimmt der Regler den Ausgangszustand „Ein“ an, bei Überschreitung den Zustand „Aus“.

Die Abbildung 28 zeigt hierzu die Kennlinie eines Zweipunktreglers mit und ohne Hysterese. Beim Zweipunktregler ohne Hysterese wird der Zustandswechsel von y_2 auf y_1 anhand der Führungsgröße w durchgeführt. Die Hysterese oder Schalthysterese/-differenz x_{sd} bezeichnet die Differenz zwischen Einschaltpunkt x_1 und Ausschaltpunkt x_2 . Somit wird der Regler gegenüber Änderungen toleranter.

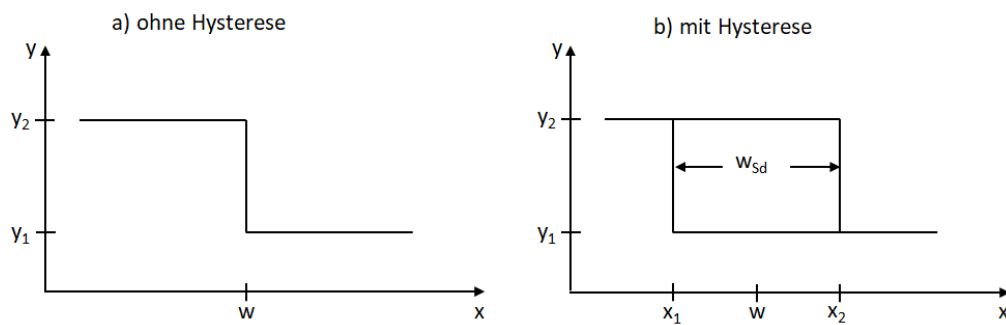


Abbildung 28: Kennlinie eines Zweipunktreglers ohne (a) und mit (b) Hysterese

Der Unterschied zwischen einem Zweipunktregler mit und ohne Hysterese ist, dass der Regler ohne Hysterese exakt beim vorgegebenen Sollwert w schaltet. Der eingeschwungene Zustand wird zwar erreicht, jedoch kommt es nie zu einem Ruhezustand und die Stellgröße pendelt. Der Regler wird somit bei kleinen Abweichungen dauernd zwischen den Zuständen wechseln. Durch Einbau einer Hysterese wird das Schwingverhalten um den Sollwert vermieden.

In der Abbildung 29 wird der zeitliche Verlauf eines Reglers mit Hysterese dargestellt.

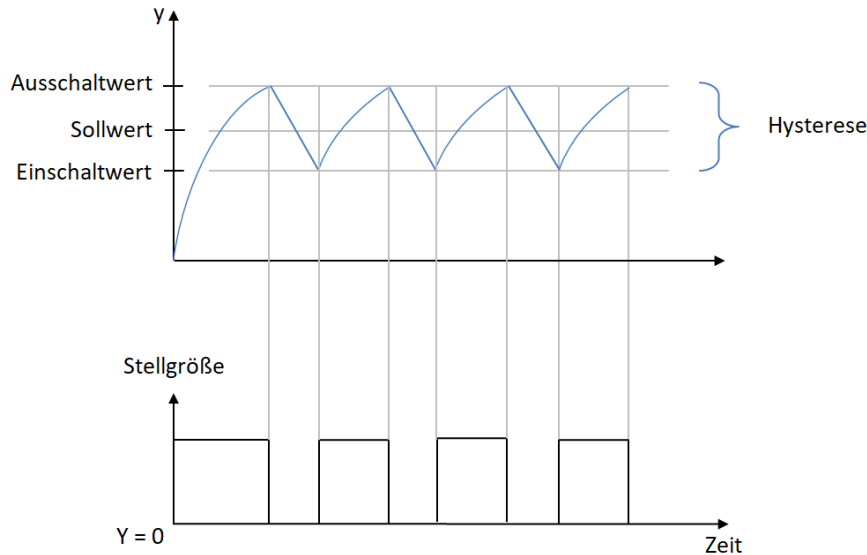


Abbildung 29: Zweipunktregler mit Hysterese

Im Fall des Analog-Z werden mehrere Regelkreise eingebaut, die unabhängig voneinander arbeiten. Dies betrifft den analogen und die digitalen Ausgänge des Analog-Z. Beim analogen Ausgang werden zwei Regler mit Hysterese eingebaut, die

unabhängig voneinander arbeiten. Als Regelgröße wird die Wassertemperatur herangezogen. In Abbildung 30 ist ein schematischer Verlauf mit dem Reglerverhalten für den analogen Ausgang dargestellt. Einer der Regler wird zum Halten einer Minimaltemperatur eingebaut. Der zweite Regler wird für die Maximaltemperatur eingebaut. Ohne die zweite Hysterese wird der Schaltzustand, bei Übersteuerung durch den SEM, ständig um die Maximaltemperatur pendeln. Durch die zweite Hysterese wird der ständige Schaltzustandswechsel vermieden.

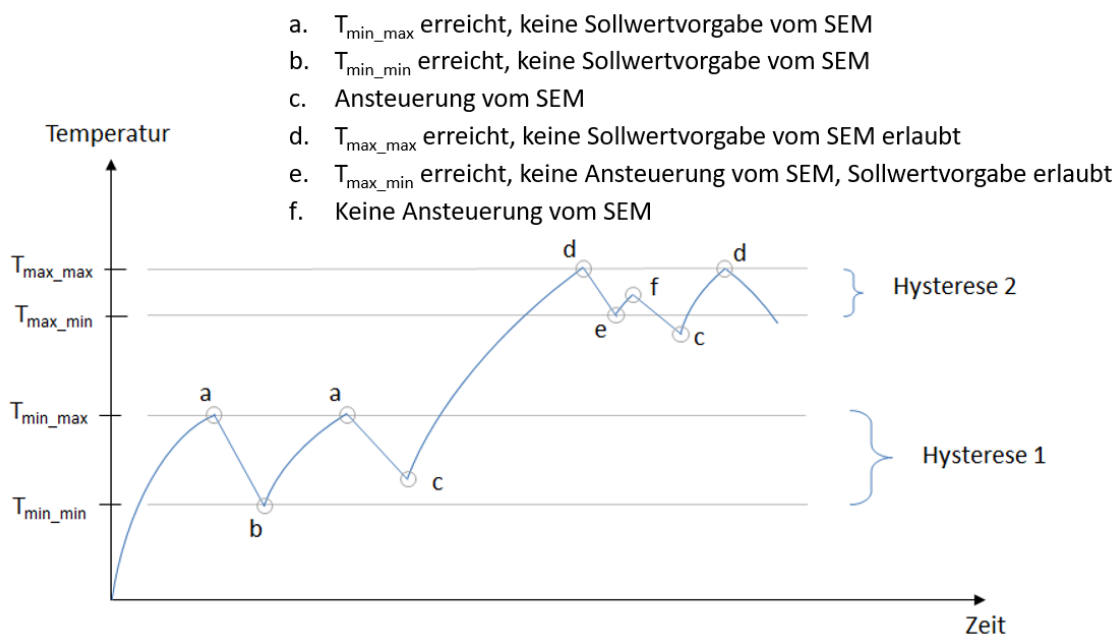


Abbildung 30: Schematischer Temperaturverlauf des Reglers für den analogen Ausgang

Die grundlegenden Merkmale des Reglers sind in der Abbildung 30 mit den Punkten a bis f vermerkt. Im Kapitel 3.2.1 wurden die grundlegenden Eigenschaften des Reglers bereits erklärt. Für die Umsetzung des Analog-Z V3 kommt hier die zweite Hysterese für die Maximaltemperatur hinzu.

Hysterese 1

Die Grenzen für die Hysterese 1 sind T_{\min_min} und T_{\min_max} . Mit dieser Hysterese wird eine Minimaltemperatur im Warmwasserspeicher gehalten.

Hysterese 2

Die Grenzen für die Hysterese 2 sind T_{max_min} und T_{max_max} . Mit dieser Hysterese wird eine Maximaltemperatur im Warmwasserspeicher nicht überschritten und ein ständiges Ein- und Ausschalten des analogen Ausgangs vermieden.

Für jeden Digitalausgang wird ebenso ein Zweipunkt-Regler mit Hysterese implementiert. Hierbei kann die Führungsgröße, wie auch beim analogen Ausgang frei konfiguriert werden. Zusätzlich kann der Digitalausgang als Führungsgröße den analogen Ausgangswert besitzen. Im nächsten Kapitel werden die Konfigurationsparameter der Regler genauer betrachtet.

5.4.5 Konfigurationsparameter

Da der Einsatzbereich des Analog-Z neben der Warmwasseraufbereitung auch für andere Bereiche zur Verfügung stehen soll, ist die Konfigurationsmöglichkeit sehr umfassend. Aus der Anforderungsanalyse ergibt sich ein Großteil der Konfigurationsparameter. In der Tabelle 8 sind alle Parameter mit Beschreibung aufgelistet.

Für die Vorgängerversionen V1 und V2 sind die Konfigurationsparameter bis zur Nummer 0x09 ident. Alle weiteren Parameter sind erst ab der Version V3 hinzugekommen.

Tabelle 8: Parameterliste für Analog-Z V3

Parameter- nummer (Hex/Dezimal)	Name	Beschreibung	Default Wert (Dezimal)	Bereich (Dezimal)
0x01 / 1	T_{min_min}	Unteres Temperaturlimit der Hysterese 1 um eine Minimaltemperatur im Warmwasserspeicher zu halten. Wird diese Grenze unterschritten, so wird der analoge Ausgang auf das Maximum des automatischen Heizwertes (Parameter 0x03) gesetzt. Dieser Parameter ist nur aktiv, wenn das automatische Heizen (Parameter 0x07) aktiviert ist.	40°C	-30°C...120°C
0x02 / 2	T_{min_max}	Obere Temperaturgrenze der Hysterese 1 zur Sicherstellung einer Minimaltemperatur im Warmwasserspeicher.	45°C	-30°C...120°C
0x03 / 3	Automatic heating value	Dieser Wert gibt an mit wie viel Prozent der analoge Ausgang im automatischen Heizbetrieb für die Hysterese 1 angesteuert wird.	0%	0% - 99%

0x04 / 4	Output mode	Der analoge Ausgang kann auf die folgenden Strom- beziehungsweise Spannungsausgangszustände gesetzt werden: 0. 0-10V 1. 0-5V 2. 0-20mA 3. 4-20mA	0	0-3
0x05 / 5	NTC Beta Koeffizient Sensor 1	Beta Temperaturkoeffizient für den NTC Temperaturfühler 1.	3950	0-65535
0x06 / 6	T _{max_max}	Obere Temperaturgrenze der Hysterese 2 für den analogen Ausgang. Bei Überschreitung dieses Limits wird der Ausgang auf 0% herabgesetzt.	55°C	-30°C...120°C
0x07 / 7	Automatic Heating	Ein und Aus-Schalten des automatischen Heizbetriebes für den analogen Ausgang: 0. Aus 1. Ein	0	0-1
0x08 / 8	Timeout Fallback	Ist kein Vorgabewert des externen Systems für das Timeout Zeitintervall vorhanden, wechselt der Analog-Z den Zustand in den Fallbackmodus.	3min	1min... 255min
0x09 / 9	Minimales Reportingintervall	Mit diesem Zeitintervall kann das Intervall eingestellt werden in der unaufgefordert die Unsolicited Notifications geschickt werden. Diese betreffen die Änderungen der Ausgänge und Temperaturen.	30s	30s...255s
0x0A / 10	T _{max_min}	Unteres Limit der Hysterese 2.	53°C	-30°C...120°C
0x0B / 11	Temperaturquelle	Temperaturquelle zur Steuerung des analogen Ausgangs: 0. Temperatur 1 1. Temperatur 2 2. Maximum aus beiden Temperaturen	0	0-2
0x0C / 12	NTC Beta Koeffizient Sensor 2	Beta Temperaturkoeffizient für den NTC Temperaturfühler 2.	3950	0-65535
0x20 / 32 (DO³¹₁)	Controlling Source	Der automatische Digitalausgang kann Ein und ausgeschaltet werden: 0. Aus...Vorgabe durch externes System 1. Ein...geregelt durch Hysterese	0	0-1
0x30 / 48 (DO₂)				
0x21 / 33 (DO₁)	Source	Quelle für die Hystereseregulierung des Digitalausganges: 0. Analogwert 1. Temperatur 1 2. Temperatur 2 3. Minimum aus beiden Temperaturen	0	0-5
0x31 / 49 (DO₂)				

³¹ Digital Output...digitaler Ausgang

		4. Maximum aus beiden Temperaturen		
		5. Minimum aus beiden Temperaturen für untere Temperaturgrenze und Maximum aus beiden Temperaturen für obere Temperaturgrenze		
0x22 / 34 (DO1)	Output mode on logic high	Physikalische Zustand bei logisch High:	2	0-2
0x32 / 50 (DO2)		0. pull down (GND)		
		1. pull up (VDC)		
		2. high impedant		
0x23 / 35 (DO1)	Output mode on logic low	Physikalische Zustand bei logisch Low:	0	0-2
0x33 / 51 (DO2)		0. pull down (GND)		
		1. pull up (VDC)		
		2. high impedant		
0x24 / 36 (DO1)	Upper Limit	Oberes Limit der Hysterese für den Digitalausgang	1	0...100% oder -30°C...120°C
0x34 / 52 (DO2)				
0x25 / 37 (DO1)	Lower limit	Unteres Limit der Hysterese für den Digitalausgang	0	0...100% oder -30°C...120°C
0x35 / 53 (DO2)				

Der Analogausgang der Version V3 kann frei konfiguriert werden. Einerseits kann dieser anhand eines externen Steuerbefehls über Z-Wave direkt betrieben werden und andererseits über den Automatikbetrieb des Analog-Z. Im automatischen Modus wird zusätzlich eine Ansteuerung eines externen Systems, wie zum Beispiel dem Z-Wave Controller SEM, erlaubt. Da dem Analog-Z V3 zwei Temperatureingänge zur Verfügung stehen, kann die Quelle, also die Führungsgröße für den Regler, anhand welcher der Analogausgang betrieben wird, ausgewählt werden. Die zweite Hysterese im Automatikbetrieb soll in Kombination mit dem Energiemanagement das ständige Ein/Ausschalten an der maximalen Temperaturgrenze verhindern, wie zuvor beschrieben. Das Blockdiagramm in Abbildung 31 veranschaulicht die Einstellungsmöglichkeiten für den Analogausgang.

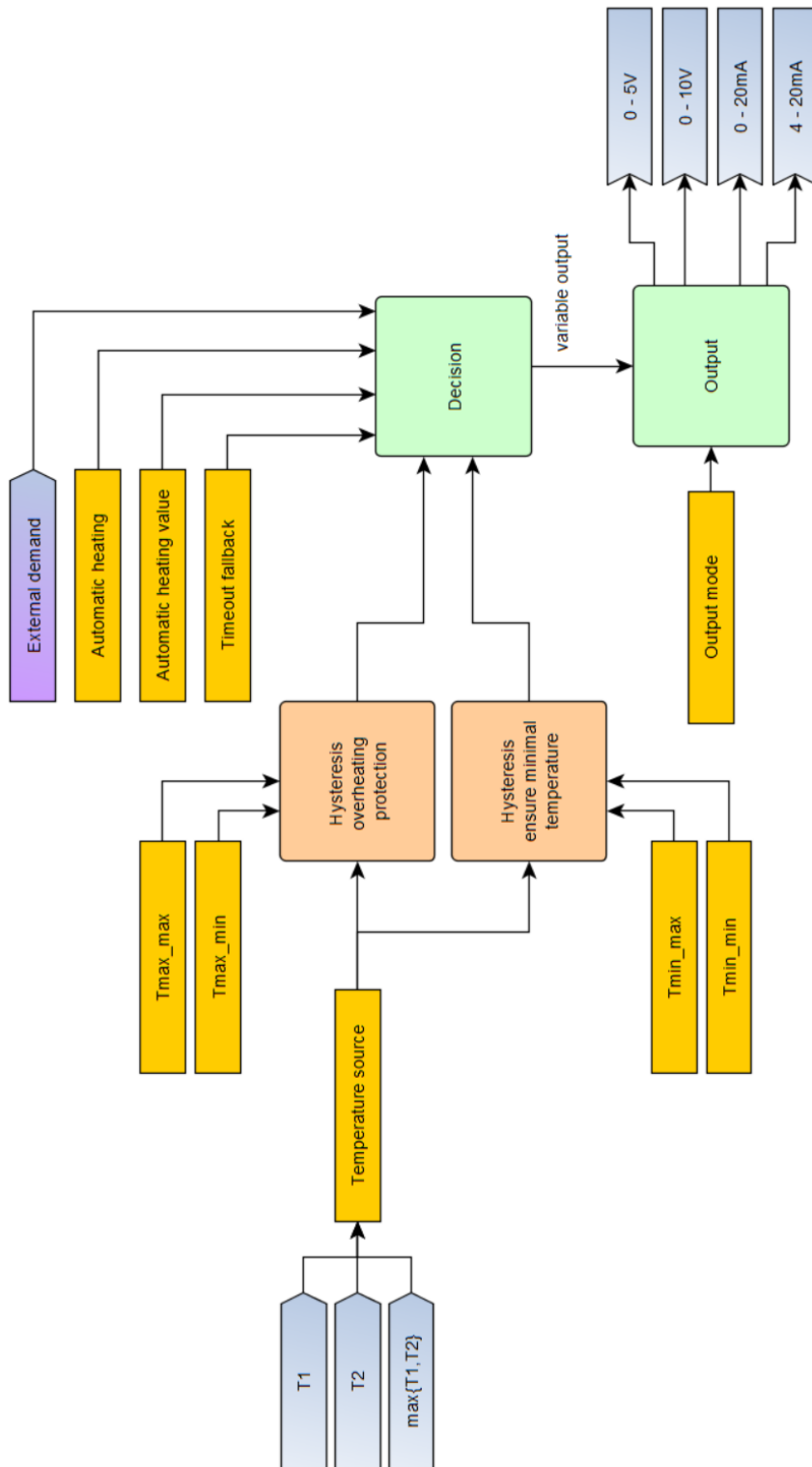


Abbildung 31: Blockdiagramm Konfiguration Analogausgang

Auch die Digitalausgänge sollen frei konfigurierbar sein und einen Automatikbetrieb ermöglichen. Wird der Automatikbetrieb aktiviert, steht für jeden Digitalausgang eine Hysterese mit frei einstellbaren Grenzen zur Verfügung. Durch einen Parameter wird die Führungsgröße der Hysterese konfiguriert, sodass der Digitalausgang zum Beispiel anhand einer gemessenen Temperatur oder anhand des Analogausganges gesteuert werden kann, wodurch sich ein breiter Einsatzbereich ergibt. In Abbildung 32 ist ein Blockdiagramm, welche Parameter für die Konfiguration der Digitalausgänge zur Verfügung stehen, dargestellt.

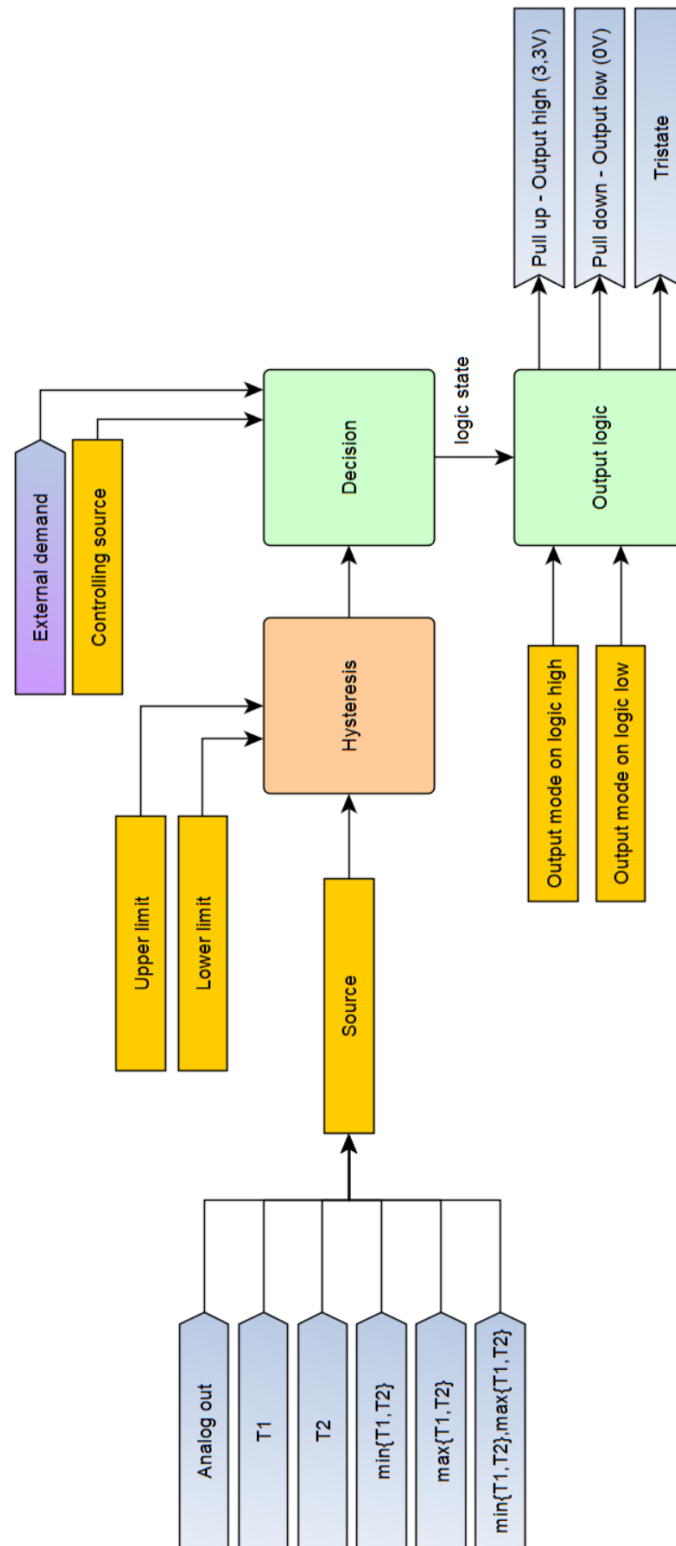


Abbildung 32: Blockdiagramm Konfiguration Digitalausgang

5.4.6 Sicherheit

Sicherheit spielt im Smart Home Bereich eine wesentliche Rolle. Hierbei wird zwischen zwei Bereichen unterschieden, der funktionalen und der IT-Sicherheit. Die IT-Sicherheit behandelt die Daten- und Informationssicherheit. Der zuverlässige und sichere Ablauf wird der funktionalen Sicherheit zugeordnet. Wird aufgrund von falsch übertragenen Daten, durch zum Beispiel einen Kabelbruch oder einer dauerhaft gestörten Z-Wave Kommunikation, das System in einen kritischen oder gefährlichen Zustand geführt, zählt dies zum Beispiel ebenso zur funktionalen Sicherheit. Dahingegen würde ein Hackerangriff zur IT-Sicherheit zählen. Jedoch wenn das System dadurch in einen kritischen Zustand geführt wird, würde dies wieder die funktionale Sicherheit betreffen. In der IT-Sicherheit möchte man grundsätzlich vermeiden, dass ein unbefugter Dritter Zugriff auf vertrauliche Daten erhält. Weiters soll dieser auch keine unerwünschten Aktionen als Man-in-the-Middle im Namen des Angegriffenen durchführen, wie zum Beispiel Manipulation der Daten, sowie auch das Netz nicht vorsätzlich durch eine Denial-of-Service Attacke stören. Um diese Angriffe zu vermeiden, werden typischerweise die Sicherheitsverfahren der Datenverschlüsselung und der Authentifizierung angewendet. Nur durch Verschlüsselung der Daten ist das Smart Home noch nicht sicher, da Reply-Attacken verwendet werden können. Die abgefangene Nachricht muss hier nur ein weiteres Mal vom Angreifer ausgesendet werden, um dieselbe Wirkung zu erzielen. Hierzu hilft das Konzept von Einmalpasswörtern. Hierbei wird durch *Nounce's*³² die versendete Nachricht verschlüsselt. Beim Online-Banking wird dasselbe Verfahren verwendet, hier entspricht der TAN³³ dem einmaligen Passwort. [16]

Das Sicherheitskonzept von Z-Wave setzt auf mehreren Ebenen an. Grundsätzlich sind alle übertragenen Daten verschlüsselt, jedoch durch den offengelegten Standard bekannt und daher sehr einfach zu entschlüsseln. Weiters können nur Geräte die sich im selben Z-Wave Netzwerk befinden miteinander kommunizieren. Mit einer eigenen *Security* Kommandoklasse wird von Z-Wave ein sicheres Übertragungsverfahren, welches auf dem Konzept von *Nounce's* basiert, unterstützt. Durch den kryptografischen Verschlüsselungsalgorithmus AES³⁴ wird ein sicherer Kommunikationskanal aufgebaut. Die *Nounce's* werden bei jeder Kommunikation neu erzeugt und besitzen eine begrenzte Gültigkeitsdauer. Die gewollte Beschränkung der Funkreichweite, indem nur wenige

³² Einmalpasswort

³³ Transaktionsnummer

³⁴ Advanced Encryption Standard

Milliwatt von den 25mW maximaler Sendeleistung des 868 MHz Bandes ausgenutzt werden, unterstützt hier ebenso die Sicherheit durch örtliche Einschränkung. [16]

Im Fall des Analog-Z ist die funktionale Sicherheit von wesentlicher Bedeutung. Um den Analog-Z funktional sicher zu betreiben wurden Safe-States eingeführt, um Fehlverhalten zu vermeiden. Hierbei wird bei der Warmwasseraufbereitung das Überschreiten der Maximaltemperatur beziehungsweise beim Erreichen einer kritischen Temperatur durch den Safe State die Ansteuerung auf 0 % herabgesetzt und somit die funktionale Sicherheit gewährleistet. Der Safe State tritt ein sobald keine Temperatur oder eine Temperatur außerhalb der Messrange gemessen wird. Auch für die Digitalausgänge wird im Fall des Automatikbetriebes bei vorliegendem Fehler in den Safe State gewechselt. Dieser ist hier der logische Zustand *Low*. Für die logischen Zustände der Digitalausgänge können die drei physikalischen Safe State Zustände *VDC*, *GND* und *hochimpedant* konfiguriert werden.

Beim Analog-Z sind zusätzliche Sicherheitsmechanismen, wie die verschlüsselte Kommunikation durch *Nounce's* von Z-Wave vernachlässigbar, da die *HomeID* und *NodeID* bereits eine ausreichende Hürde für einen Angriff darstellt. Durch die Eigensicherung des Analog-Z kann kein kritischer Schaden am Gesamtsystem angerichtet werden. Der einzige mögliche Schaden ist ein wirtschaftlicher Schaden. Im Worst-Case wird durch Manipulation der Datenkommunikation, der Analog-Z in der Nacht durch manipulierte Sollwertvorgaben voll angesteuert, wodurch Strom zugekauft wird, um das Warmwasser bis zur maximalen Temperatur aufzuheizen und somit der PV-Überschuss tagsüber nicht für die Warmwasseraufbereitung verwendet wird. Hierzu muss der Angriff im Umfeld der Empfangsreichweite des Analog-Z stattfinden. Bei anderen Z-Wave Geräten wie Türschlösser spielt eine verschlüsselte Kommunikation und eine erhöhte IT-Security eine bedeutendere Rolle.

6 Implementierung

Für die Firmware Entwicklung wird wie im Konzept erwähnt die Programmiersprache C eingesetzt. Als Programmierstil wird die prozedurale und ereignisorientierte Programmierung zur Steuerung des Programmflusses verwendet. Durch diesen nicht-deterministischen Ansatz kommt es im Programm zu keiner aktiven Wartezeit (busy waiting) auf bestimmte Ereignisse. Sobald ein Ereignis wie zum Beispiel eine Temperaturänderung auftritt, wird dies an die entsprechende Ereignisbehandlungsroutine, den „*Event Handler*“, übergeben und von diesem abgearbeitet. Eine periodische Applikationsfunktion des Z-Wave Stacks dient als Einsprungspunkt für die Benutzerinteraktion. Somit können Änderungen der Ein/Ausgangszustände sowie Button Events erkannt werden. Der periodische Aufruf der Poll-Funktion zum Überwachen des Buttons erfolgt alle 10ms. Das bedeutet, dass ein Buttondruck in jedem Fall erkannt wird sofern dieser also mindestens länger als 10ms gedrückt wird.

6.1 Z-Wave Programmablauf

Die Z-Wave Software beruht auf mehreren Konzepten, wie zum Beispiel dem Polling oder Callback Konzept. Die Software unterteilt sich grundsätzlich in zwei Programmmodule. Diese wären eine Z-Wave Basissoftware und eine Applikationssoftware. Im Basisteil sind allgemeine Programmteile enthalten, wie zum Beispiel der Systemstart, die Main Loop und der Z-Wave Protokoll-Stack. Der Applikationsteil umfasst die Initialisierung der Software und Hardware, die Application State Machine (welche durch die Main Poll-Funktion aufgerufen wird), completed callback-Funktionen und das Handling von empfangenen Z-Wave Nachrichten. In der folgenden Abbildung 33 wird dies in einem Schema-Bild dargestellt.

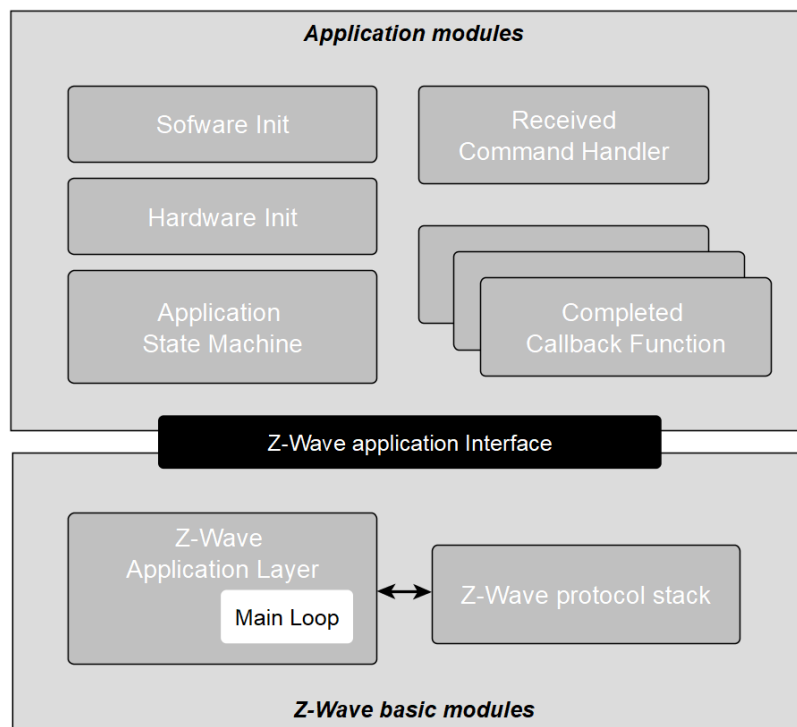


Abbildung 33: Z-Wave Softwarearchitektur

6.2 Z-Wave Main-Loop

Die Z-Wave Main-Loop des Mikrocontrollers ruft in einer Round Robin Reihenfolge die Z-Wave Applikationsfunktionen auf. Hierzu zählen die *ApplicationPoll*-Funktion und der *ApplicationCommandHandler*, die vom Z-Wave Stack aufgerufen werden. Änderungen der Hardwareschnittstellen können hierbei in der Poll-Funktion abgefragt und weiterverarbeitet werden. Eingehende Kommandos werden über den Z-Wave Command Handler an einen eigenen Handler weitergereicht und dort verarbeitet. Busy wait Routinen müssen im Programm vermieden werden. Andernfalls kann es zu Blockaden im Programm kommen und der Mikrocontroller versäumt wichtige Datenpakete, die über Funk übermittelt werden. Die Rechenzeit darf deshalb in der Poll-Funktion maximal 2ms und im Handling von Kommandos maximal 5ms betragen, um die Funkkommunikation nicht zu stören beziehungsweise zu unterbrechen.

Der Einsprungspunkt von der Basissoftware in die Applikationsmodule ist die *ApplicationPoll* Funktion. Diese wird von der *MainLoop* aufgerufen, wenn keine zeitkritischen low-level Aktionen aktiv sind.

6.3 Programmmodule

Zur Vereinfachung der Programmkomplexität und um eine skalierbare Firmware für eine erleichterte Weiterentwicklung und Wartung zu realisieren, werden die unterschiedlichen Programmteile in Module aufgeteilt. Funktionszeiger dienen hierbei als Rücksprungradresse für die jeweiligen Event-Handler, um bei eintretenden Ereignissen der Untermodule zu reagieren. In der Abbildung 34 sind die Module und deren Abhängigkeiten dargestellt.

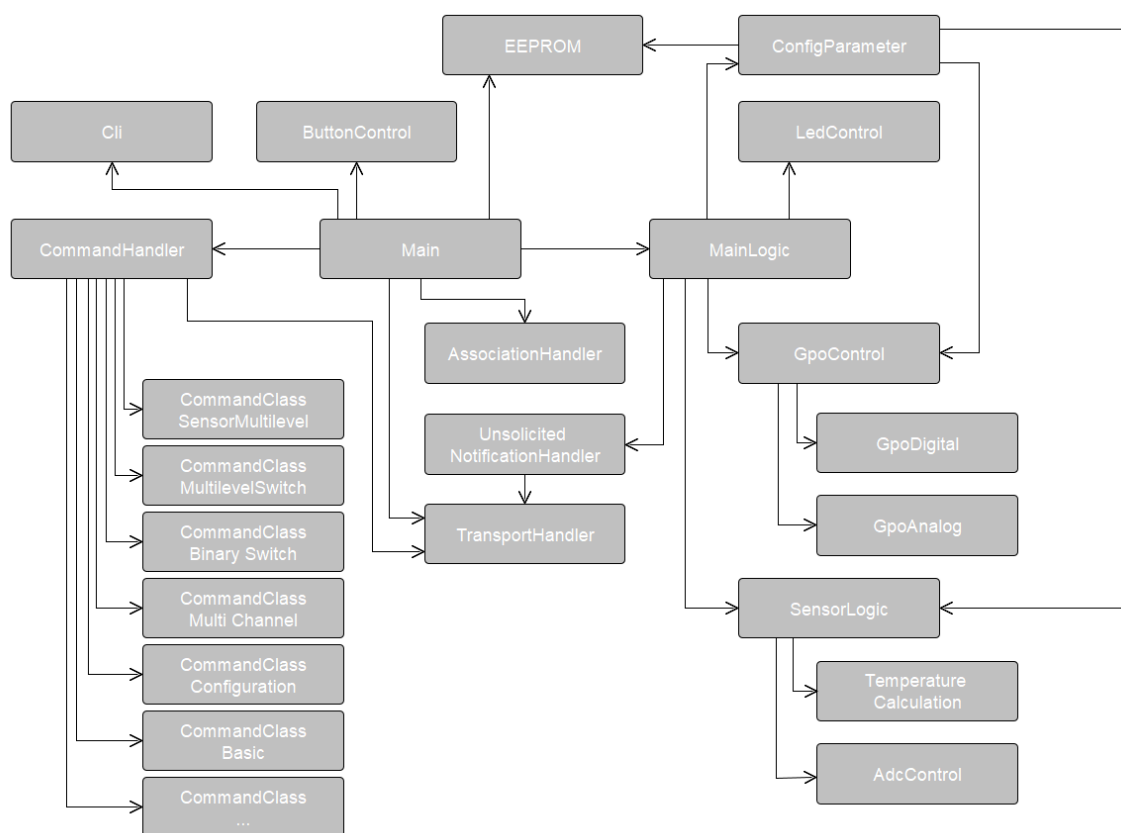


Abbildung 34: Programmmodule und deren Abhängigkeiten zueinander

Im Hauptprogramm der Applikation, der Main, befinden sich die Applikationsfunktionen, die von der Z-Wave Main Loop aufgerufen werden. Empfangene Nachrichten oder Befehle werden hier abgearbeitet und an die entsprechenden Untermodule weitergeleitet.

In den folgenden Kapiteln wird auf die Hauptfunktionalitäten der Module eingegangen. Diese gliedern sich in die Gerätespezifische Programmlogik, die Benutzerschnittstellen und das Z-Wave Interface.

6.3.1 Gerätespezifische Programmlogik

Die gerätespezifische Programmlogik wird in der *MainLogic* umgesetzt. Hierbei werden die physikalischen Ein- und Ausgänge eingebunden sowie auch die Konfigurationsoptionen der Parameter. Die *MainLogic* initialisiert und verwaltet hierbei die Untermodule *LedControl*, *GpoControl*, *SensorLogic* sowie auch das Modul *ConfigParameter*.

Im Kapitel 5.4.5 befinden sich die Blockdiagramme der Ausgänge, welche für die Ansteuerung von Verbrauchern genutzt werden. Der Analogausgang wird in der Abbildung 31 und die Digitalausgänge in der Abbildung 32 dargestellt. Wie in diesen Abbildungen ersichtlich ist, werden unterschiedliche Quellen für die Entscheidung des Ausgangsverhaltens herangezogen. Die Entscheidung welcher Zustand am Ausgang herrscht wird in der *MainLogic* anhand der Regler Konfiguration und anhand der vorliegenden Führungsgröße entschieden.

Der Event-Handler der *MainLogic* bekommt jede Änderung der Ausgänge und Eingänge durch ein Event der Untermodule mit. Events der Ein- beziehungsweise Ausgänge können das Ausgangsverhalten des Analogausganges oder der Digitalausgänge beeinflussen. Dies hängt jeweils von der Konfiguration des physikalischen Ausganges ab. So haben bei entsprechender Konfiguration die Events des Untermoduls *SensorLogic* einen Einfluss auf die Ausgänge.

Ein weiteres Modul ist für das automatische Ausschicken von Änderungen der Endpunkte an die Geräte in der Association Group verantwortlich. Durch die Events der Untermodule sind die Änderungen von Temperaturen und Änderungen des Ausgangsverhaltens in der *MainLogic* bekannt und werden als „*Unsolicited Notification*“ an die Geräte in der Association Group ausgeschickt. Andere Z-Wave Geräte im selben Z-Wave Netzwerk können sich in die Association Group vom Analog-Z subscriben, um diese zu erhalten.

Ausgänge – GpoControl Modul

Die Ausgänge werden im Modul *GpoControl* gesteuert und verwaltet. Es werden für jeden Ausgang die aktuellen Werte und Einstellungen im EEPROM gespeichert. Bei Neustart des Systems werden diese aus dem Speicher wieder geladen und auf den zuletzt vorliegende Ausgangswert gesetzt. Die Bausteine der Ausgänge werden über das SPI³⁵-Interface mit einer Taktrate von 1MHz eingebunden. Nachfolgend werden die Untermodule für den Analogausgang und die Digitalausgänge aufgelistet:

- **Analogausgang – GpoAnalog Modul**

Der Analogausgang wird über das Modul *GpoAnalog* gesteuert sowie auch ausgelesen. Die Kommunikation wird über SPI0 mit dem Digital-Analog-Converter DAC7760 von Texas Instruments umgesetzt. Der SPI-Kommunikationsframe wird mit einem Adress-Byte und einem 2 Byte-Datenwort zusammengebaut. Über die Register wird der DAC konfiguriert welches Ausgangsverhalten (0-5V, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA) dieser hat sowie auch der Ausgangswert gesteuert und ausgelesen. Weiters werden über das Status-Register Alarmzustände des DAC ausgelesen und an den Event-Handler des *GpoControl*-Moduls weitergeleitet.

- **Digitalausgänge – GpoDigital Modul**

Die beiden Digitalausgänge werden im Modul *GpoDigital* gesteuert. Die Kommunikation mit dem digitalen Treiberbaustein erfolgt ebenso über SPI mit einem Command-Byte und einem Daten-Byte. Vom Digitaltreiber werden zwei Ausgänge für die low-side und zwei Ausgänge für die high-side Konfiguration verwendet. Jeweils ein low-side und ein high-side Ausgang des Digitaltreibers sind zu einem Digitalausgang zusammengeführt. Der physikalische Zustand am Digitalausgang des Analog-Z erfolgt durch Setzen des entsprechenden Registers des Treiberbausteins.

Sensoren – SensorLogic Modul

In der *SensorLogic* werden die Sensordaten ausgewertet und die Temperatur berechnet. In der Abbildung 35 ist das Flussdiagramm zur Berechnung des arithmetischen Mittelwerts des gemessenen ADC-Wertes durch das *AdcControl*-Modul dargestellt. Jeder ADC-Wert wird auf Plausibilität überprüft. Dies umfasst den Check, ob ein unnatürlicher Sprung im Vergleich mit vorhergehenden Werten vorherrscht oder die Ober-/Untergrenze des ADC-Wertebereichs erreicht wurde. Bei vorliegender Änderung zum zuvor berechneten Wert, wird ein Event an das übergeordnete Modul, der *SensorLogic*

³⁵ Serial-Peripheral-Interface

übermittelt. Das Z-Wave Modul besitzt mehrere ADC-Eingänge, jedoch nur einen ADC-Umsetzer. Dieser ADC-Umsetzer ist über einen Multiplexer mit den ADC-Eingängen verbunden. Um beide Temperaturen zu messen, wird nach erfolgter Messung eines Temperatureingangs der Multiplexer umgeschaltet und die Berechnung für den anderen Eingang gestartet.

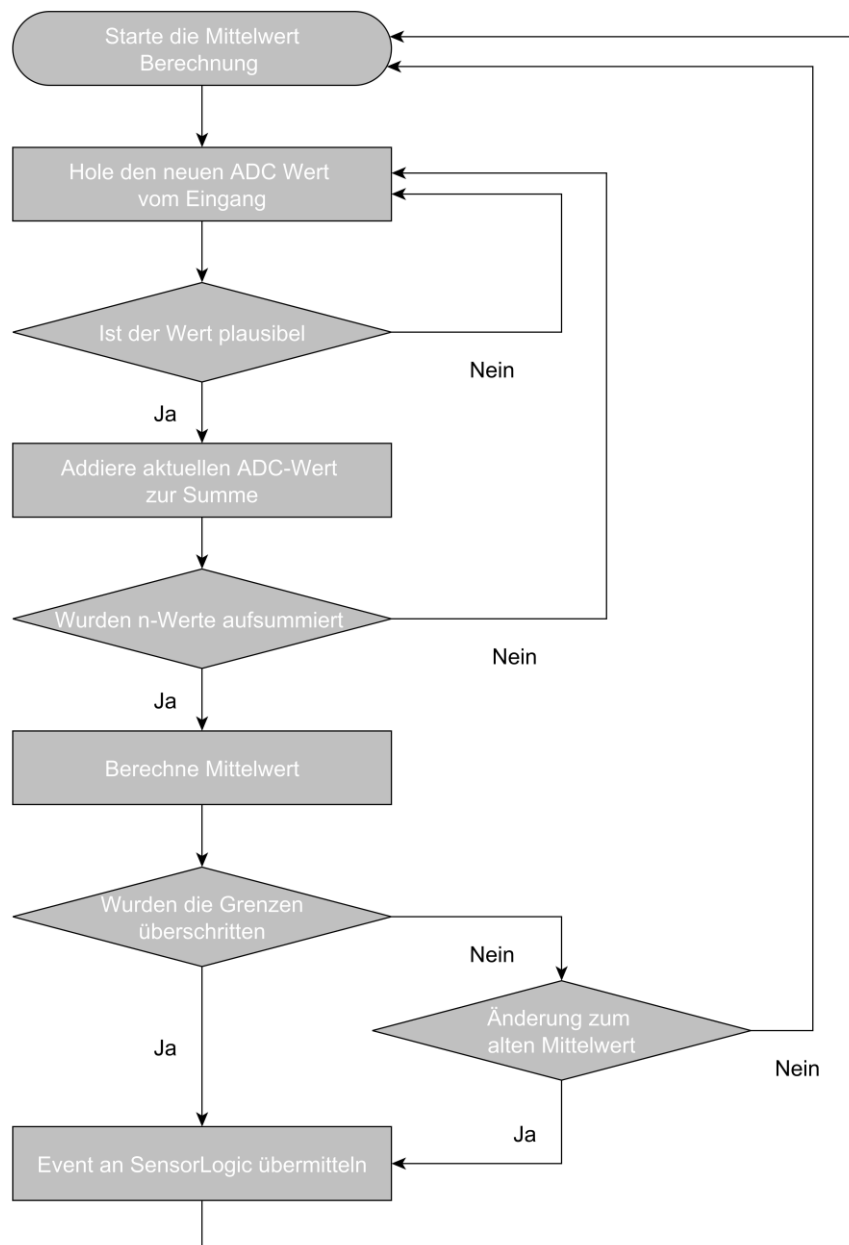


Abbildung 35: Flussdiagramm zur Berechnung des arithmetischen Mittelwertes

6.3.2 Benutzerschnittstellen

Benutzereingaben – KeyManager Modul

Im Modul *KeyManager* werden die Buttoneingänge überprüft und verwaltet. Im Untermodul *ButtonControl* wird der Buttonstatus ermittelt. Beim verwendeten Button handelt es sich um einen mechanischen Taster. Dieser verursacht beim Betätigen, durch mechanische Vibrationen des Schaltkontaktes, sogenanntes Prellen. Durch Verwendung einer Entprellfunktion mithilfe einer Timerfunktion werden diese vermieden. Der Buttonstatus wird in *ButtonControl* gespeichert. Der *KeyManager* überprüft den Buttonstatus periodisch und löst bei Änderung ein Event aus, welches durch die *Application State Machine* der *Main* abgearbeitet wird.

Betriebszustände – LedControl Modul

Die Visualisierung des Betriebszustandes wird mittels einer zweifarbigen LED realisiert. Im Modul *LedControl* werden die Digitalausgänge der LED angesteuert. Bei Änderung des Betriebszustandes des Analog-Z werden die Ausgänge für die LED-Farben angesteuert und die LED-Farbe ändert sich auf die Farbe wie in der Tabelle 4 und Tabelle 5 im Konzept im Kapitel 5.3 festgelegt wurde.

Kommunikationsschnittstellen – Cli Modul

Das *ClI*³⁶-Modul ist die Kommunikationsschnittstelle des Analog-Z, mit welchem per Konsole oder Terminal im Textmodus über die physischen Schnittstellen RS232 oder microUSB kommuniziert werden kann. In diesem Modul befindet sich der Befehlssatz für die Steuerung und Konfiguration des Analog-Z.

Speicher

Ein externer 2MB Flash Speicher steht zusätzlich zu den 128kByte integrierten Speicher des Moduls zur Verfügung. Der Speicher ist ein nichtflüchtiger Speicher und ermöglicht aufgrund seiner Größe ein Firmware-Update über das Z-Wave Protokoll. Um externe Abhängigkeiten zu berücksichtigen, wird die Compiler Anweisung „*#pragma ORDER*“ verwendet, sodass die Anordnung der Variablen im Code und im Speicher in der gleichen Reihenfolge beibehalten werden. Dies betrifft die Weiterentwicklungen der Firmware, da auf die Reihenfolge geachtet werden muss, um die Funktionalität bei Firmware-Updates von bestehenden Systemen zu gewährleisten.

³⁶ Command line interface

6.3.3 Z-Wave Interface

Im Hauptprogramm der Main wird die Hardware und Software initialisiert. Dies umfasst die Einstellungen der Ausgänge der MCU. Ein weiterer wichtiger Bestandteil, um die Fähigkeiten des Gerätes mitzuteilen, ist der *NIF*. Der *NIF* ist ein statisches Struct, welches die implementierten Kommandoklassen beinhaltet und bei der Inklusion und Exklusion des Gerätes benötigt wird. Im Folgenden werden die einzelnen Programmbausteine kurz erklärt.

Association Handler

Die Verwaltung der Associations zwischen den Geräten erfolgt im *AssociationHandler*. Da es sich beim Analog-Z um ein *MultiChannelEndpoint*-Gerät handelt, wird zwischen den normalen Associations und den MultiChannel Associations unterschieden. Bei den normalen Associations wird nur die *NodeID* benötigt. Wohingegen bei den MultiChannel Associations der Endpunkt dazukommt. Eine geordnete Liste der Associations wird im nichtflüchtigen Speicher abgelegt. Jede Association besitzt die Attribute *NodeID*, *EndPoint* und *MultiChannelAssociation*.

Command Handler

Der *CommandHandler* ist für die gesamte Verwaltung der Kommandoklassen zuständig. Es werden die Nachrichten zusammengebaut und durch die entsprechenden Frames, wie zum Beispiel dem CRC-Frame, erweitert. In Abbildung 6 des Kapitels 2.4 ist der Protokollaufbau dargestellt.

Kommandoklassen

Alle Kommandoklassen wurden, wie bereits im Konzept im Kapitel 5.2.2 erklärt, entsprechend der Z-Wave Spezifikation implementiert.

Transport Handler

Im *TransportHandler* werden die Nachrichten an die unteren Z-Wave Schichten und an die Transport-API des Frameworks übergeben. Das Versenden von Nachrichten benötigt einen gewissen Zeitabstand, da ansonsten manche Nachrichten verworfen werden. Deshalb wird für auszusendende Nachrichten ein Ringspeicher verwendet, wie in Abbildung 36 dargestellt wird. Erst nach erfolgreicher Versendung wird die nächste Nachricht im Ringspeicher versendet. Für den Ringspeicher wird ein Größenfaktor von 2^n gewählt, dadurch können Bitmasken für eine einfache Maskierung verwendet werden. Bei Erreichen der Obergrenze des Ringspeichers springt der Index zurück an den Anfang. Dies wird durch Maskieren des Index-Wertes erreicht.

Für den Analog-Z wurde eine Ringspeichergröße von 2^5 gewählt. Dies entspricht einer Anzahl von 32 Elementen. Diese Größe ist bei maximaler Auslastung von auszuschiekenden Nachrichten ausreichend. Es gibt fünf Endpunkte und es können fünf Associations zum Gerät hergestellt werden. Ändern sich alle Endpunkte gleichzeitig und sind die maximal möglichen Associations mit dem Gerät vorhanden, werden 25 Nachrichten in den Ringspeicher gelegt.

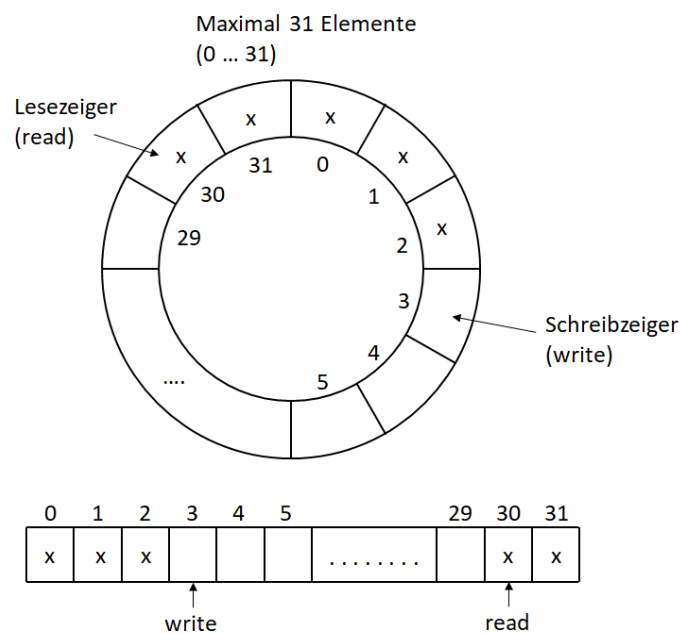


Abbildung 36: Ringpuffer

UnsolicitedNotification Handler

Der *UnsolicitedNotification* Handler übermittelt unaufgefordert Änderungen der Temperatur des analogen und digitalen Ausgangs an die Association Group und somit an die darin adressierten Z-Wave Geräte. Um das Z-Wave-Netzwerk zu entlasten und bei ständiger Änderung der Werte nicht jedes Mal eine Notification auszuschieken, wird ein Wartealgorithmus eingebaut. Es wird bei auftretender Änderung 2 Sekunden auf Folgeänderungen gewartet. Die danach noch vorhandenen Notfications werden in einem Burst ausgeschickt. Unsolicited Notifications werden frühestens alle 30 Sekunden ausgeschickt.

6.4 Testumgebung

Zur Überprüfung der Software-Anforderungen wurden unterschiedliche Tests vorgenommen. Ein Test betrifft die Z-Wave relevanten Softwareteile. Um alle Anforderungen für die Zertifizierung zu erfüllen, sind die erforderlichen und optional gewählten Kommandoklassen vollständig, laut der Z-Wave Spezifikation, zu implementieren. Zur Überprüfung stellt Z-Wave ein Compliance Test Tool zur Verfügung. Durch dieses Testtool können die einzelnen Kommandoklassen auf deren richtige Umsetzung überprüft werden. Ein weiterer Test ist der funktionale Test, welcher per Hand durchgeführt wurde. Dies umfasste die Überprüfung der gesamten FSM sowie die korrekte Hysteresenregelung für alle möglichen Kombinationen und Konfigurationen. Weiters musste ein Test über das Gesamtsystem, welches den Analog-Z und den SEM umfasst, durchgeführt werden. Dabei wurde bei Testanlagen ein Analog-Z V3 eingebaut zur Überprüfung des Langzeiteinsatzes. Im folgenden Kapitel werden Ergebnisse von Testanlagen diskutiert.

7 Ergebnisse

Der Analog-Z V3 wurde im Laufe der Diplomarbeit bis zur Marktreife fertig entwickelt und befindet sich bereits im Dauereinsatz bei Kunden der Firma LEVION. Die variable Ansteuerung des Heizstabes ermöglicht die Optimierung des Eigenverbrauchs dahingehend, dass sich die Verbrauchskurve des Hauses an die Produktionskurve anpasst. Bei Betrachtung der aufgezeichneten Daten³⁷ von mehreren Systemen, die sich im Einsatz befinden, wird ersichtlich, dass das Warmwasser anhand der Produktion der Photovoltaikanlage aufbereitet wird.

Ein weiterer Einsatz bei einer Anlage ist, dass der Analog-Z einen Durchlauferhitzer mit separater Umwälzpumpe ansteuert. Hierbei wurde der Analog-Z so konfiguriert, dass bei Ansteuerung des Analogausgangs ein Digitalausgang mit angesteuert wird und über einen Schütz die Pumpe einschaltet. Dabei ist das Ziel, das Warmwasser durch den Durchlauferhitzer in den Puffer zu laden.

Von einem System wurden verschiedene Tage herausgenommen zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Tageswerte. Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine Kundenanlage mit einer Photovoltaikanlage mit ca. 3kWp und einer Warmwasseraufbereitung mit einem 3kW Heizstab und einem 450l Boiler. Der Analog-Z wurde mit einer Maximaltemperatur von 59°C, einer Minimaltemperatur von 35°C und einer 40°C Zukauf-Grenze konfiguriert. Die Hysterese um die Maximaltemperatur ist mit 1°C Breite konfiguriert. Im Winter wird die elektrische Warmwasseraufbereitung als Zusatz zum Heizsystem und im Sommer primär verwendet.

In den folgenden Abbildungen werden die Tagesverläufe der PV- und Hausleistung farblich dargestellt. Der rote Bereich kennzeichnet den Zukauf von Energie, der blaue den Verbrauch von erzeugter Energie und der grüne Bereich die Energie, die ins Netz eingespeist wird. Abbildung 37 und Abbildung 39 stellen einen Tages-Leistungsverlauf mit optimaler Eigenverbrauchsausnutzung dar. Die Verbrauchskurve passt sich der Produktionskurve sehr genau an. Abbildung 38 und Abbildung 40 zeigen die zugehörigen Temperaturverläufe zu den Leistungsverläufen. Grundsätzlich kann zu den beiden Tagen gesagt werden, dass die Primärheizung das Warmwasser um ca. 4:30 Uhr auf 50°C aufheizt. Eine Verschiebung des Aufheizzeitpunktes der Primärheizung auf den Abend, kann zur

³⁷ Alle verwendeten Daten für die Darstellung der Ergebnisse wurden anonymisiert ausgewertet und besitzen keine personenbezogenen Informationen.

Eigenverbrauchsoptimierung beitragen, da die tagsüber verfügbare Überschussleistung zum Erwärmen des Warmwassers herangezogen werden kann. Im Worst-Case wird die Temperatur im Laufe des Tages nicht erreicht und so muss abends mit Zukaufenergie das Warmwasser mit der Primärheizung aufbereitet werden. Die beiden Tage unterscheiden sich dahingegen, dass an einem Tag kaum Sonne schien und demzufolge wenig Überschussleistung zur Verfügung stand. Durch die vorhandene Sonneneinstrahlung am anderen Tag konnte eine optimale Eigenenergieproduktion erreicht werden. Am Temperaturverlauf in der Abbildung 38 nimmt die Temperatur des Warmwassers sukzessive ab. Bei Unterschreiten der eingestellten Minimaltemperatur von 35°C hätte die automatische Warmwasseraufbereitung das Wasser bis zu 40°C aufgeheizt.

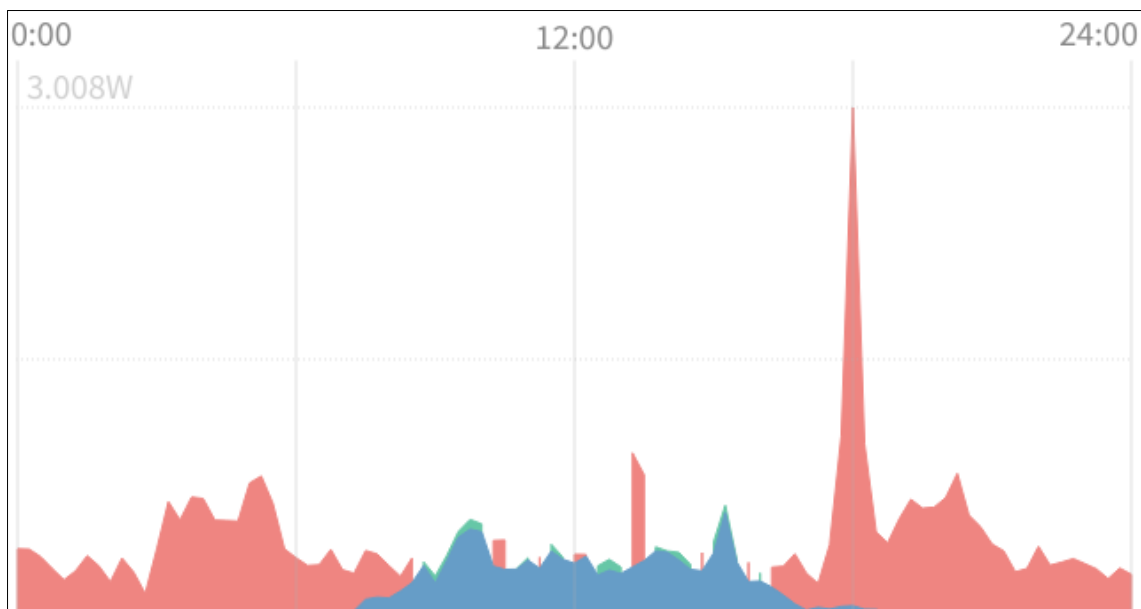


Abbildung 37: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 1

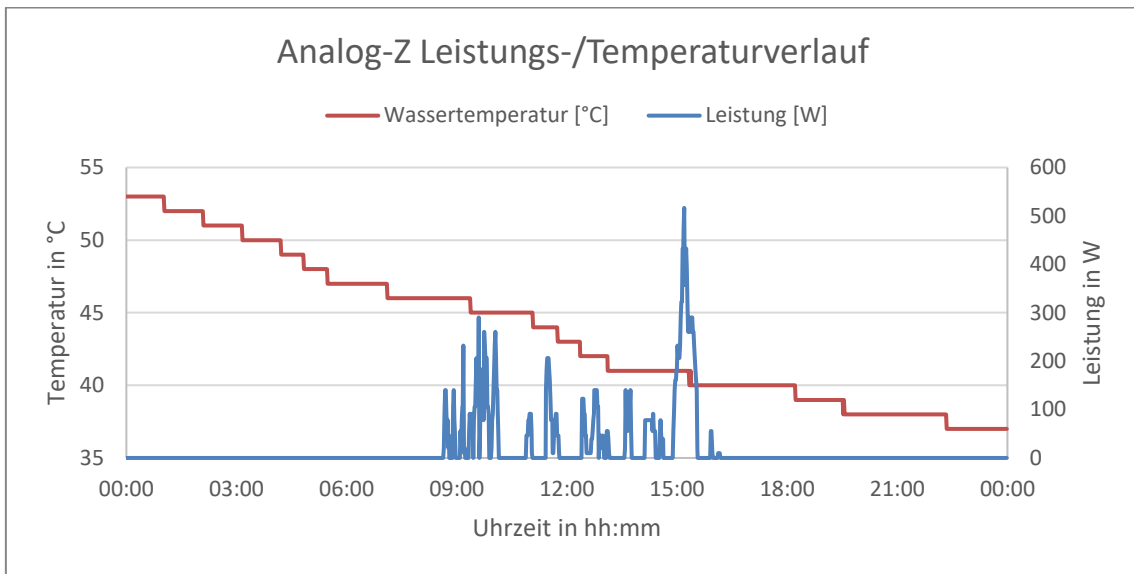


Abbildung 38: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 1

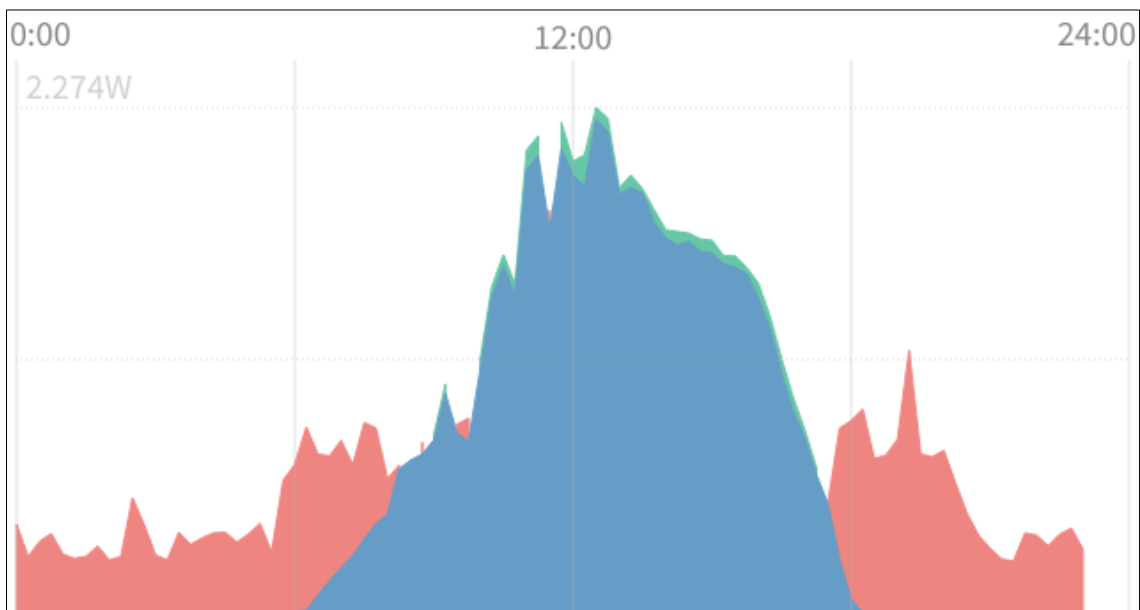


Abbildung 39: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 2

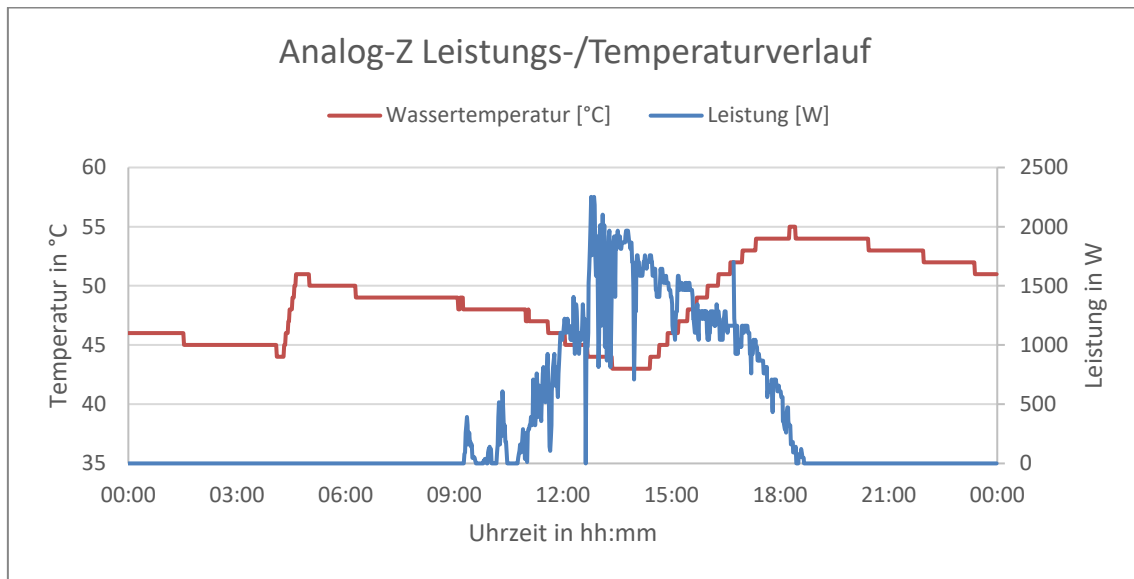


Abbildung 40: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 2

Im Tagesverlauf der Abbildung 41 wird die Überschussenergie nicht ausgenutzt und die meiste Energie ins Netz eingespeist. Bei Betrachtung des Temperaturverlaufs in der Abbildung 42 wird ersichtlich, dass unnötigerweise das Warmwasser in der Nacht auf 69°C aufgeheizt wurde und durch die maximale Temperaturgrenze von 59°C die elektrische Warmwasseraufbereitung deaktiviert bleibt und keine Ansteuerung erfolgt. Am frühen Nachmittag fällt die Temperatur unter 58°C und die Ansteuerung des Analogausgangs des Analog-Z durch den SEM ist wieder erlaubt. Die Temperatur wird aufgrund ausreichender Überschussleistung tagsüber zwischen 58°C und 59°C gehalten.

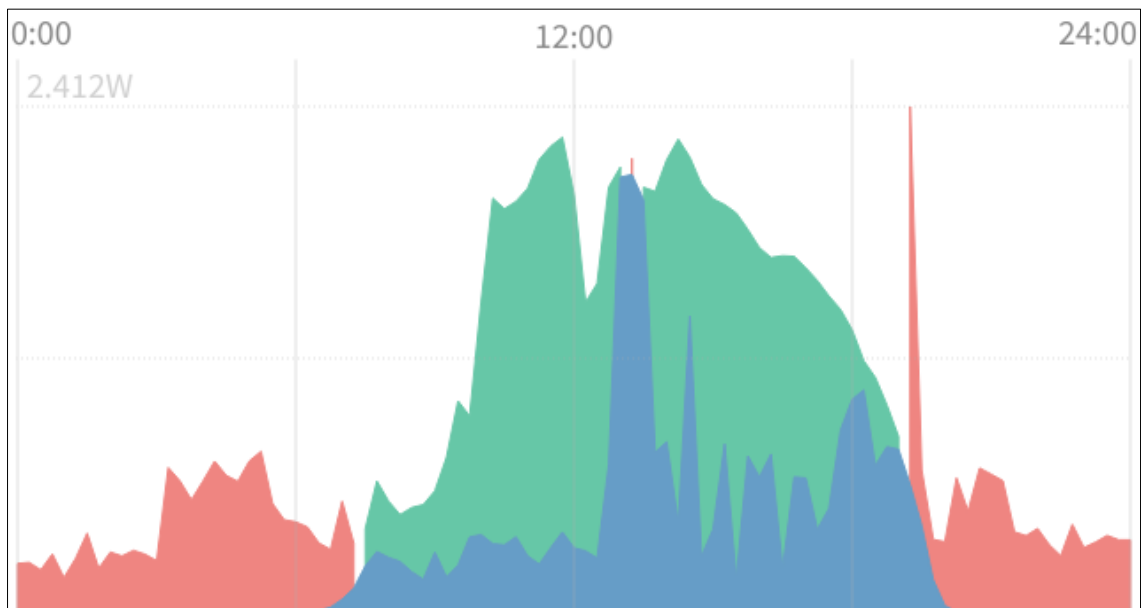


Abbildung 41: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 3

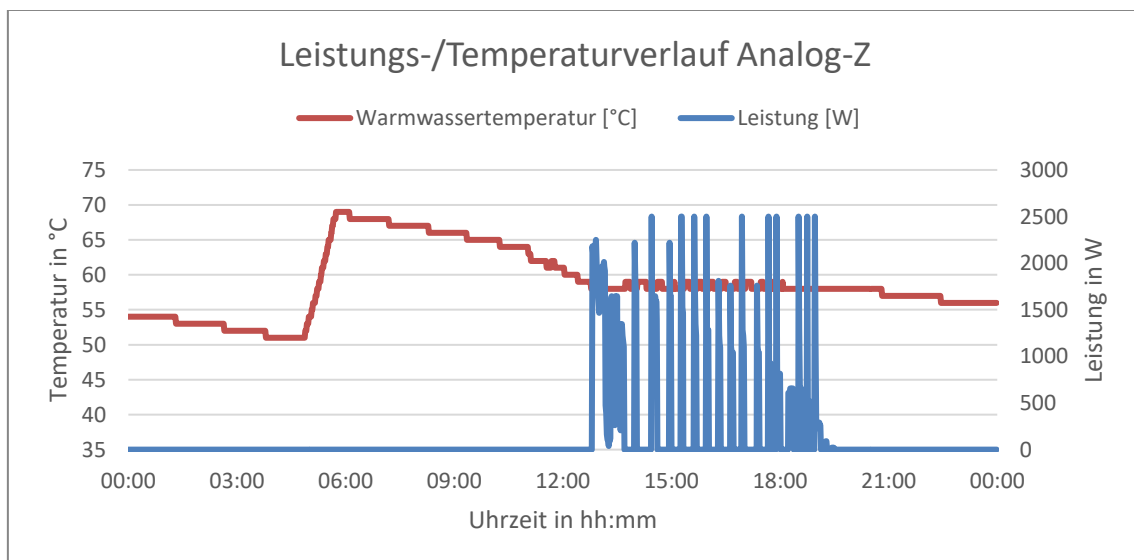


Abbildung 42: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 3

In der Abbildung 43 und Abbildung 44 wurde das Warmwasser im Gegensatz zum vorigen Beispieltag nicht auf 69°C in der Nacht erhitzt. Am Vormittag wird die Ansteuerung noch erlaubt und nachmittags ist die maximale Temperatur erreicht und diese wird ebenso zwischen 58°C und 59°C gehalten.

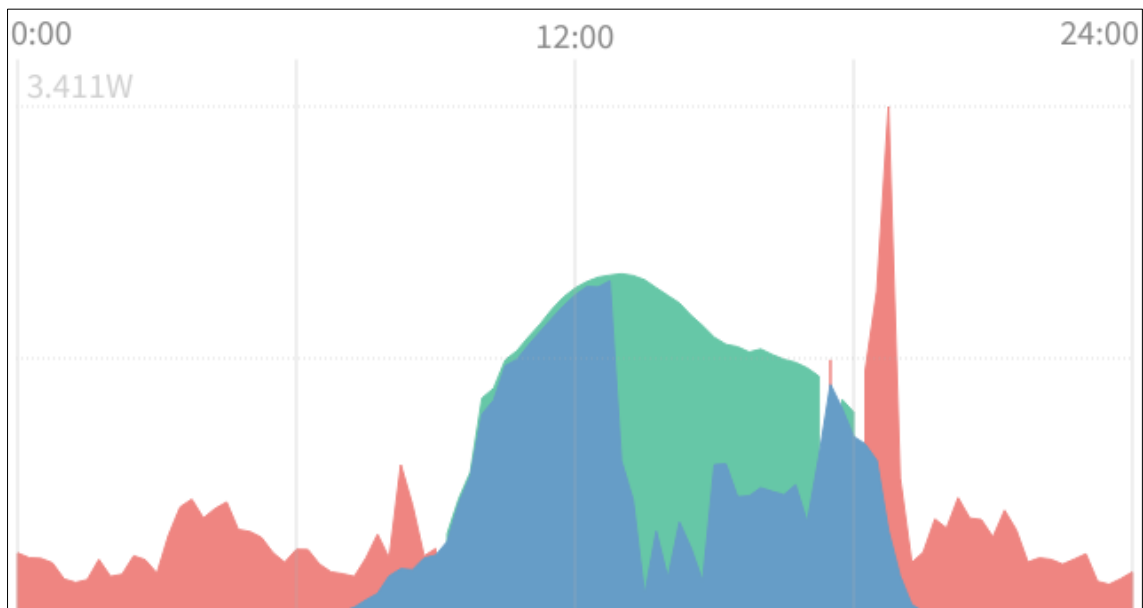


Abbildung 43: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 4

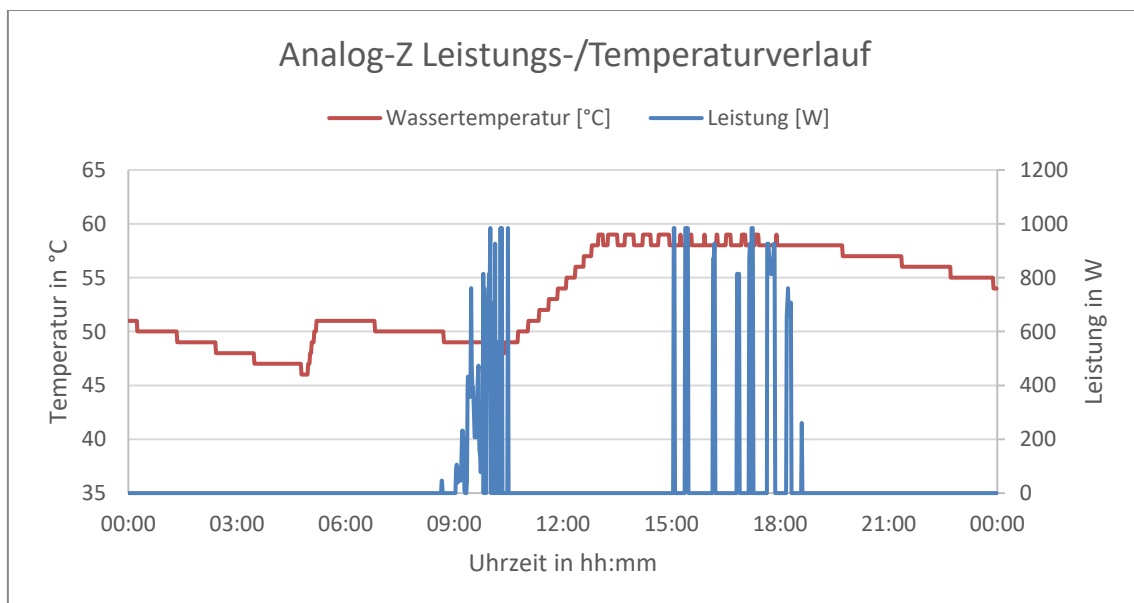


Abbildung 44: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 4

In der Tabelle 9 wird der berechnete Energieverbrauch und die daraus erzeugte Warmwassererhitzung für den 450l Boiler für die dargestellten Tage aufgelistet. Der analoge Ausgang des Analog-Z steuert in diesem Fall einen Thyristorsteller. Dieser besitzt einen nichtlinearen Leistungsverlauf in Bezug zur Ansteuerung, welcher herausgerechnet

wurde. Bei den berechneten Werten handelt es sich daher um eine Annäherung an den tatsächlichen Verbrauch. Bei Betrachtung der berechneten Werte wird ersichtlich, dass eine beträchtliche Menge an elektrischer Energie für das Warmwasser benötigt wird. Bei der Tagesübersicht 2 wird somit ersichtlich, dass 8,79kWh von den 14,44kWh erzeugter elektrischer Energie zum Aufheizen von 450l Wasser um 16,85°C benötigt worden sind.

Tabelle 9: Berechneter Energieverbrauch zur Warmwassererzeugung und die daraus erfolgende Erwärmung des Wassers durch den Analog-Z

Daten aus Tagesübersicht-Leistungsverlauf	Produktion in kWh	Berechneter Verbrauch des Analog-Z in kWh	Aufheizung des Wassers ohne Entnahme in °C
1	2,80	0,43	0,83
2	14,44	8,79	16,85
3	18,42	2,92	5,59
4	17,27	1,02	1,96

Durch den Einsatz des Analog-Z in Kombination mit dem SEM wird ein mögliches Optimum der Verbrauchsoptimierung erzielt. Bei einem Haus mit PV-Anlage ohne Eigenverbrauchsoptimierung wird der Eigenverbrauch nicht optimal ausgenutzt. Wie im vorigen Beispiel gezeigt wurde, wird das Warmwasser durch die Primärheizung in der Nacht aufbereitet. Ohne die variable Ansteuerung würde somit vermutlich wenig Überschussenergie für das Warmwasser verwendet werden.

Am Beispiel konnte man sehr gut die funktionale Sicherheit des Analog-Z erkennen. Bei Erreichen der Maximaltemperatur wird die Ansteuerung unterbunden. Die Warmwassersicherstellung konnte in den Abbildungen nicht dargestellt werden, da in diesem Fall an den gewählten Tagen keine Unterschreitung der Minimaltemperatur erreicht wurde. Diese Unterschreitung wird auch selten vorkommen, da im Winter das Warmwasser in den Morgenstunden auf 50°C durch die Primärheizung aufgeheizt wird. Im Sommer wird die minimale Temperaturgrenze vermutlich auch selten unterschritten, da die Sonne eine stärkere Einstrahlung besitzt und mehr Sonnenstunden vorhanden sind und daher bei weitem mehr Überschussleistung für die Aufbereitung zur Verfügung steht. Die Warmwassersicherstellung soll auch nur im äußersten Notfall anspringen und dient größtenteils dem Komfortfaktor.

8 Schlussbemerkung und Ausblick

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde ein marktreifes Z-Wave Smart Home Gerät konzipiert und entwickelt, die es Anwendern ermöglicht, die Warmwasseraufbereitung intelligent durchzuführen. Der Analog-Z besitzt mehrere Schnittstellen mit denen verschiedene Anwendungsszenarien abgebildet werden können. Durch die hohe Konfigurationsmöglichkeit kann der automatische Reglerbetrieb für die Ausgänge, sowohl für die digitalen und als auch für die analogen, eingestellt werden, sodass die Ansteuerung eines Verbrauchers oder mehrerer Verbraucher in einem Gerät vereint ist. Der Analog-Z ist aus Z-Wave Sicht ein Slave-Gerät welches über einen Z-Wave Controller, wie zum Beispiel dem SEM, eingebunden werden kann. Die Anpassung der Verbrauchsleistung an die momentane Ertragsleistung einer Photovoltaik-Anlage wird durch den Einsatz des Analog-Z's, der variabel bedient werden kann, sehr stark vereinfacht.

Bei der Konzeptentwicklung des Analog-Z wurde bereits mitüberlegt in welche Richtung die Weiterentwicklung des Gerätes sinnvoll und möglich wäre. Hierzu wurden mehrere Schnittstellen in der Hardwareentwicklung zusätzlich miteingeplant, um den Analog-Z zu einem eigenstehenden Z-Wave Controller weiterzuentwickeln. In diesem Fall würde der Analog-Z für die Verwaltung des Z-Wave Netzwerkes zuständig sein und andere Z-Wave Geräte in sein eigenes Z-Wave Netzwerk einbinden. Dadurch würde der Leistungsmesser direkt beim Analog-Z eingebunden werden. Der Analog-Z übernimmt die Berechnungen der Überschuss- sowie Zukaufs-Leistung und kann somit die Warmwasseraufbereitung ohne der SEM Steuerzentrale variabel durchführen. Eine dreifarbige LED soll hierbei wie die SEM Steuerzentrale, den Energiezustand des Gebäudes darstellen.

Eine weitere zukünftige Verbesserungsmöglichkeit wäre zum Beispiel den Analog-Z noch kundenfreundlicher und einfacher zum Einbinden in ein Z-Wave Netzwerk zu gestalten. Dies könnte durch Einbau eines NFC-Chips erfolgen oder durch Z-Wave Smart Start, wodurch eine Vorkonfiguration ermöglicht wird. Bei der NFC-Variante müsste hierzu am Analog-Z ein NFC-Tag eingebaut werden, sowie ein NFC-Reader am Z-Wave Controller. Die Z-Wave Smart Start Variante ist hierbei eine Lösung, die für die zukünftigen Z-Wave Geräte interessant wird. Hierbei wird der Z-Wave Stack durch zusätzliche Protokolle und Softwareschichten erweitert. Dafür sind Maßnahmen nicht nur in der Software nötig, sondern dies ist auch eine logistische Herausforderung, denn durch Smart Start wird eine ID als QR-Code am Gerät, der Verpackung und digital auslesbar gefordert.

Zusammenfassend kann hier festgehalten werden, dass das entwickelte Z-Wave Device, der Analog-Z, es dem Benutzer ermöglicht nicht auf den Komfort von immer bereitgestelltem Warmwasser zu verzichten und gleichzeitig auch eine Schnittstelle zur Verfügung stellt, um den Energieverbrauch zu optimieren und an die aktuell produzierte Energie, wie zum Beispiel der Photovoltaikleistung, anzupassen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] "Faktencheck Energiewende." [Online]. Available: <https://faktencheck-energiewende.at/faktencheck/energiewende-2017-2018/>. [Accessed: 08-Jun-2018].
- [2] "Klimapolitik." [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/clima/>. [Accessed: 24-Feb-2018].
- [3] "Netzentgeltstruktur 2.0 - Modernisierung des Netzentgeltsystems," no. April, 2017, pp. 1–5.
- [4] "Netzentgeltstruktur 2.0." [Online]. Available: <https://www.e-control.at/netzentgeltestruktur-2.0>. [Accessed: 24-Feb-2018].
- [5] A. Einfalt, A. Schuster, C. Leitinger, D. Tiefgraber, M. Litzlbauer, and S. Ghaemi, "Energie der Zukunft," p. 148, 2012.
- [6] "Holding Graz - Wasserwirtschaft." [Online]. Available: <https://www.holding-graz.at/graz-wasserwirtschaft/wissenswertes/wasserverbrauch.html>. [Accessed: 07-Mar-2018].
- [7] "Erneuerbare Energie." [Online]. Available: <http://www.erneuerbare-energie.at/energie1/>. [Accessed: 06-Mar-2018].
- [8] M. Teoh and V. Liebl, "Leitfaden Zu Pv-Eigen- Verbrauchsmodellen," no. 2, pp. 1–52, 2016.
- [9] "Austrian Wind Energy Association." [Online]. Available: [https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1049](https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1049). [Accessed: 03-Feb-2018].
- [10] "E-Control - Wasserkraft." [Online]. Available: <https://www.e-control.at/konsumenten/oeko-energie/basiswissen/oekostrom-arten/wasserkraft>. [Accessed: 03-Feb-2018].
- [11] "Solarenergie." [Online]. Available: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/solarenergie/>. [Accessed: 20-Mar-2018].
- [12] "Smart Metering." [Online]. Available: <https://www.e-control.at/konsumenten/energie-sparen/smart-metering>. [Accessed: 21-Mar-2018].
- [13] F. Hofer, "Home Automation Communication Standards Comparison," no. April, p. 88, 2014.
- [14] C. Gomez and J. Paradells, "Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 6, pp. 92–101, 2010.
- [15] "Z-Wave Market Leader." [Online]. Available: https://www.cepro.com/article/why_z-wave_is_the_home_automation_market_leader_for_now. [Accessed: 10-May-2018].
- [16] D. C. Pätz, *Z-Wave*. 2014.

- [17] "Bundesnetzagentur - Allgemeinzuteilungen." [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/allgemeinzuteilungen-node.html. [Accessed: 20-May-2018].
- [18] "Z-Wave Public Specification." [Online]. Available: <http://zwavepublic.com/specifications>. [Accessed: 04-Apr-2018].
- [19] B. Fouladi and S. Ghanoun, "Security Evaluation of the Z-Wave Wireless Protocol," *Black hat*, p. 6, 2013.
- [20] C. Reinisch, W. Kastner, G. Neugschwandtner, and W. Granzer, "Wireless technologies in home and building automation," *IEEE Int. Conf. Ind. Informatics*, vol. 1, pp. 93–98, 2007.
- [21] "Software Design Specification Z-Wave Plus Role Type Specification," *Sigma Designs*, 2017.
- [22] U. Hedtstück, *Einführung in die Theoretische Informatik: Formale Sprachen und Automatentheorie: Formale Sprachen und Automatentheorie*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012.
- [23] H. Herold, B. Lurz, J. Wohlrab, and M. Hopf, *Grundlagen der Informatik*. Pearson Deutschland GmbH, 2017.
- [24] J. E. Hopcroft, R. Motwani, and J. D. Ullmann, *Einführung in Automatentheorie, Formale Sprachen und Berechenbarkeit*. Person Studium, 2011.
- [25] C. Mentin, "Entwurf , Aufbau und Analyse einer skalier- und erweiterbaren Systemplattform zur Entwicklung eines Smart Energy Managers," TU Graz, 2016.
- [26] T. Fuchs, "Seminar \ Projekt Elektronik Hardwareentwicklung und EMV Messungen eines elektronischen Gerätes," 2017, p. 50.
- [27] S. Reg, "SMARTFOX REG extended," pp. 3–4.
- [28] "MyPV." [Online]. Available: <http://www.my-pv.com/>. [Accessed: 06-May-2018].
- [29] "Software Design Specification Z-Wave Application Command Class Specification," vol. 29, 2016.
- [30] "Software Design Specification Z-Wave Management Command Class Specification," *Sigma Designs.*, vol. 29, 2016.
- [31] "Software Design Specification Z-Wave Transport-Encapsulation Command Class Specification," *Sigma Designs*, 2018.
- [32] "Software Design Specification Z-Wave Network-Protocol Command Class Specification," *Sigma Designs*, 2018.
- [33] Sigma Designs, "General Purpose Z-Wave® SiP Module ZM5101."

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht eines Haushaltes mit einer Photovoltaikanlage und Verbrauchern, wie Elektroauto, Warmwasseraufbereitung und Haushaltsgeräten	2
Abbildung 2: Übersicht verschiedener Protokolle - Teil 1 [13]	8
Abbildung 3: Übersicht verschiedener Protokolle - Teil 2 [13]	9
Abbildung 4: Z-Wave Layer Architektur	12
Abbildung 5: Z-Wave Spezifikation [18]	13
Abbildung 6: Z-Wave Protokollaufbau [19]	14
Abbildung 7: Z-Wave Plus Übersicht der Spezifikation	15
Abbildung 8: Übersicht der Role Types [21]	18
Abbildung 9: Endlicher Automat eines einfachen Lichtschalters	20
Abbildung 10: Endlicher Automat für Z-Wave Gerätekopplung	21
Abbildung 11: Anwendungsgebiete von SEMS	22
Abbildung 12: Gesamtsystem für die Warmwasseraufbereitung	24
Abbildung 13: Schematischer Temperaturverlauf im Warmwasserspeicher	25
Abbildung 14: Hardwarekonzept Analog-Z V1	27
Abbildung 15: Hardwarekonzept Analog-Z V2	28
Abbildung 16: Analog-Z V3	35
Abbildung 17: Hardwarekonzept Analog-Z V3	38
Abbildung 18: Analog-Z Endpunkte	40
Abbildung 19: Kommandoklassen des Analog-Z	42
Abbildung 20: Blockschaltbild ZM5101 [33]	47
Abbildung 21: Endlicher Automat des Analog-Z V3	50
Abbildung 22: NTC Widerstandskennlinie mit Berücksichtigung von Toleranzen des Beta Temperaturkoeffizienten (B) und Vorwiderstandes (R_v)	51
Abbildung 23: Schematischer Aufbau des Temperatureingangs	52

Abbildung 24: ADC-Wert und Spannung in Abhängigkeit der Temperatur	54
Abbildung 25: Differenzspannungsverlauf $U_{NTC(i)} - U_{NTC(i+1)}$	55
Abbildung 26: Grundstruktur eines Regelkreises	56
Abbildung 27: Strukturbild der Temperaturregelung für die Warmwasseraufbereitung	57
Abbildung 28: Kennlinie eines Zweipunktreglers ohne (a) und mit (b) Hysterese	58
Abbildung 29: Zweipunktregler mit Hysterese.....	58
Abbildung 30: Schematischer Temperaturverlauf des Reglers für den analogen Ausgang	59
Abbildung 31: Blockdiagramm Konfiguration Analogausgang	63
Abbildung 32: Blockdiagramm Konfiguration Digitalausgang.....	65
Abbildung 33: Z-Wave Softwarearchitektur	69
Abbildung 34: Programmmodule und deren Abhängigkeiten zueinander	70
Abbildung 35: Flussdiagramm zur Berechnung des arithmetischen Mittelwertes.....	73
Abbildung 36: Ringpuffer.....	76
Abbildung 37: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 1.....	79
Abbildung 38: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 1	80
Abbildung 39: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 2.....	80
Abbildung 40: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 2	81
Abbildung 41: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 3.....	82
Abbildung 42: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 3	82
Abbildung 43: Tagesübersicht-Leistungsverlauf 4.....	83
Abbildung 44: Temperaturverlauf zu Tagesübersicht-Leistungsverlauf 4	83

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Frequenznutzungsparameter für das 860 MHz Band.....	11
Tabelle 2: Z-Wave Frequenzbereiche verschiedener Länder	11
Tabelle 3: Device Types mit der Beziehung zu den Generic und Specific Device Classes.....	16
Tabelle 4: Bedienkonzept Button	44
Tabelle 5: Betriebszustand Analog-Z	45
Tabelle 6: Betriebsmodus des Analog-Z	45
Tabelle 7: Zusammenhang der Temperatur-, Widerstands-, Spannungs- und Digitalwerte eines 10k-NTC Temperaturfühlers.....	53
Tabelle 8: Parameterliste für Analog-Z V3	60
Tabelle 9: Berechneter Energieverbrauch zur Warmwassererzeugung und die daraus erfolgende Erwärmung des Wassers durch den Analog-Z.....	84

Schaltplan Analog-Z V3 - Aufsteckplatine

