

DIPLOMARBEIT

Interfaces für Energiemanagement

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Dietrich
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Palensky
sowie
Dipl.-Ing. Friederich Kupzog
als verantwortlich mitwirkende Assistenten am
Institutsnummer: 384
Institut für Computertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Thomas Haiden
Matr.Nr. 9725898
Schubertweg 15, 4204 Haibach im Mühlkreis

Abstract

In order to balance the energy supply system in terms of generation and consumption, new flexible solutions are needed, because of increasing power demand and growing share of generation from renewable energy sources. This masters thesis gives options to make power supply more efficient by influencing the consumer side of the energy system. To make that possible, defined interfaces are needed in order to adapt and connect consumption processes to an automation infrastructure. Different types of interfaces are presented and chances as well as problems of these options are being discussed.

Due to the fact that inert thermal processes can store thermal energy, they can be used very efficiently for energy management purposes in the electricity grid. A simple and generally valid concept has been developed, which can be applied to a large number of different kinds of consumption processes.

For demonstrating the possibilities of interfaced loads, an external temperature regulation has been designed for an exemplary refrigerator system. This experiment verified the model on the basis of simulation and measurements, and clearly shows that effective load management can be conducted.

Kurzfassung

Für die Anpassung von Erzeugung und Verbrauch im elektrischen Energieversorgungssystem (Energiemanagement) bedarf es aufgrund des stetig steigenden Energiebedarfs und dem vermehrten Einsatz von Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen neuer flexibler Lösungen. Ziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten aufzuzeigen, das Energiemanagement mit Hilfe der Beeinflussung von Verbrauchern effizienter zu gestalten. Hierzu bedarf es definierter Interfaces zur Anbindung von Verbrauchsprozessen an eine Automatisierungsinfrastruktur. Verschiedene Interfacevarianten werden aufgezeigt und die mit ihnen verbundenen Möglichkeiten und Hürden einer Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement diskutiert.

Aufgrund der Tatsache, dass thermische Prozesse durch ihre Trägheit die Fähigkeit besitzen, thermische Energie zu speichern, ist es sinnvoll, diese in das Energiemanagement einzubeziehen. Es wurde ein einfaches, allgemein gültiges Modell für thermische Prozesse entwickelt, welches universell anwendbar und für eine große Anzahl potentiell beeinflussbarer Verbraucher gültig ist. Für ein Demonstrationsobjekt zur Veranschaulichung einer der erarbeiteten Interfacevarianten wurde eine externe Temperaturregelung entwickelt und die Modellierung des thermischen Prozesses anhand von Simulation und Messungen verifiziert. Sowohl Simulation als auch die Messungen zeigen, dass eine positive Beeinflussung des Energiemanagements möglich ist.

Danksagung

„Wenn du meinst, dass im Alter die Weisheit dich nähren soll, dann eigne sie dir in deiner Jugend an, so dass dir im Alter die Nahrung nicht fehle.“ Zitat vom italienischen Universalkünstler Leonardo da Vinci (*1452-†1519).

Meinen Eltern Elfriede und Josef Haiden möchte ich an dieser Stelle herzlich danken, dass Sie mir die Aneignung der Weisheit ermöglichten und durch die ständig begleitende Unterstützung meine Ausbildung förderten und deshalb sicher auch selbst auf so manches verzichten mussten. Meine Schwester Rebekka stand mir auch in schlechten Zeiten immer als seelischer Beistand zur Seite.

Meine Freundin Elke Ruprecht unterstützte mich in den letzten Jahren in jeder Hinsicht. Des weiteren korrigierte Sie diese Arbeit.

Bei allen Freunden und Bekannten, welche mich durch meine Studienzeit begleitet haben und mit Rat und Tat zur Seite standen möchte ich mich ebenfalls bedanken.

Danke auch meinem Betreuer Dipl.-Ing. Friederich Kupzog für die freundliche Betreuung und Zusammenarbeit.

Abschließend möchte ich der Firma Shell für die zur Verfügung gestellte Abbildung danken, sowie den Firmen Liebherr und Vaillant für die freundlichen Auskünfte bezüglich Kälte- und Wärmeanlagen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	IRON-Projekt	1
1.2	Persönliche Motivation	2
1.3	Aufgabenstellung	3
2	Stand der Technik und Umfeld	4
2.1	Energieversorgung	4
2.1.1	Erzeugerseitige Energieanpassung	6
2.1.2	Energieanpassung Verbraucherseitig	8
2.2	Gebäudeautomation	10
2.2.1	Energieeinsparung	13
2.2.2	Diskussion	14
2.2.3	Pilotprojekte	14
2.3	Kälte- und Wärmespeicher	15
2.3.1	Kühlgeräte	15
2.3.2	Klimageräte	18
2.3.3	Wärmepumpen	19
2.3.4	Durchlauferhitzer und Warmwasserboiler	19
2.4	Interfaceproblematik	20
2.4.1	Interfaces für Energiemanagement	21
2.4.2	Visionärer Ausblick	22
3	Potentiale zur verbraucherseitigen Lastverschiebung	24
3.1	Eingriffsmöglichkeiten	25
3.1.1	Beispiele zur Industrie und Gewerbe	25
3.1.2	Privathaushalte	29
3.2	Simulation von thermischen Prozessen	29
3.2.1	Simulationsmodell	29
3.2.2	Betriebszustände	32
4	Interfacevarianten zur Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement	39
4.1	Zeitschaltuhr	39
4.2	Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung	42
4.3	Beobachtung des Schaltverhaltens	46
4.3.1	Erster Realisierungsansatz	49
4.3.2	Fazit	49
4.4	Sensorsignal verändern	50

4.5	Sensorsignal neu generieren	54
4.6	Externe Temperaturregelung	56
4.7	Ersatz der gesamten Steuereinheit	59
4.8	Gerät mit vorhandenes Interface verwenden	62
4.9	Vergleich und Bewertung der Möglichkeiten	64
5	Realisierung einer externen Temperaturregelung	66
5.1	Beschreibung der Realisierung	66
5.1.1	Verwendete Hardware	67
5.1.2	Verwendete Software	71
5.2	Testergebnisse und Messungen	75
5.2.1	Messungen mit der vorhandenen Geräterege- lung	75
5.2.2	Messungen mit extern realisierten Regler	78
5.2.3	Ermittlung der Wärmekapazität und des Wärmewiderstands	80
5.3	Aufgetretene Probleme	81
5.3.1	Schaltbilder	82
5.3.2	Temperatursensor	82
5.3.3	Stromsensor	82
5.3.4	Regelparameterfindung	82
5.3.5	Öffnen der Gerätetür	83
6	Diskussion und Bewertung	84
6.1	Vergleich Simulation und Messung	84
6.2	Temperaturmessung verbessern	85
6.3	Vorschlag für zukünftiges Interface	86
6.4	Allgemeine Betrachtung	86
7	Zusammenfassung	89
7.1	Gewonnene Erkenntnisse	89
7.2	Ausblick	90
A	Hardwaredokumentation	92
B	Protokolldokumentation	96
	Abkürzungen	110
	Literaturverzeichnis	111
	Internetverzeichnis	116

Kapitel 1

Einführung

„Die Energie, die wir benötigen, bekommen wir nur aus dem Strom gegen den wir schwimmen.“ Dieses Zitat von Leander Segebrecht verdeutlicht, dass wir, um zu Energie zu gelangen, einen Aufwand treiben müssen. Dementsprechend sollen wir auch sorgfältig damit umgehen. Die Anpassung von energietechnischen Erzeugereinheiten an den Verbrauch ist Aufgabe des Energiemanagement. [Bra05] Diese Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit diesem Thema.

1.1 IRON-Projekt

Das Projekt „Integral Resource Optimization Network“ (IRON) [IRO07] wird vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) [BMV07] gefördert und verfolgt das Ziel eine integrale Automatisierungsinfrastruktur zur effizienteren Nutzung der Ressource „elektrische Energie“ zu spezifizieren. Einzelne Verbraucher können über diese Infrastruktur gemeinsam in ein umfassendes Energiemanagement einbezogen werden.

Betrachtet man die aktuelle Entwicklung, die von steigendem Energieverbrauch und eher rückläufiger Erzeugungskapazität geprägt ist, so ist eine zuverlässige Versorgung während Spitzenzeiten in absehbarer Zeit gefährdet. Der Bau neuer Kraftwerke ist sehr kostenintensiv und bedarf einer langen Investitions- und Planungsphase. Studien [Pal06], [Mit06] haben ergeben, dass das elektrische Energieversorgungssystem noch ungenutzte Optimierungspotentiale aufweist. Energieverbraucher (Kunden) können durch gezielte Lastverschiebung Spitzenlasten vermeiden beziehungsweise reduzieren.

In das erforderliche Kommunikationssystem sollen möglichst viele Verbraucher eingebunden werden, um die Effektivität zu erhöhen. Da hierfür ein größeres Maß an Koordination erforderlich ist, ist es nötig, den Informationsfluss zwischen Energieerzeugung und -verbrauch zu erhöhen. Zur Zeit existiert noch keine Infrastruktur für diese Koordinationsaufgaben. Nur große Kraftwerke und Umspannwerke sind kommunikationstechnisch miteinander verbunden.

Auf der Verbraucherseite ist jedoch noch kaum eine Infrastruktur zu den Geräten, welche Lastverschiebung ausführen können, gegeben. Damit das IRON-System mehr Geld einspart als es kostet, sollen vorrangig bestehende Netzwerke und Übertragungssysteme verwendet werden.

Es ist wichtig, Initiativen für die Teilnahme am IRON-System zu bieten. Die Komplexität

der Benutzung soll möglichst gering gehalten, der Komfort für den Energiekunden nur minimal beeinträchtigt und Anschaffungskosten des Kunden möglichst gering gehalten werden. Nur sehr wenige Verbraucher (5%) haben nach der Liberalisierung den Energielieferanten gewechselt. [RPW⁺05] Dies zeugt davon, dass Energiekunden meist lieber beim Altbewährten bleiben. Für eine erfolgreiche Nutzung von verbraucherseitigen Potentialen muss das entwickelte System also sehr billig und einfach sein.

Für Energiemanagement nutzbare elektrische Verbraucher lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Einerseits in *intelligente Verbraucher*, welche in der Lage sind, ihren eigenen Energieverbrauch vorhersagen zu können und sich daher gut in ein koordiniertes Energiesystem eingliedern lassen. Andererseits in *Energiespeicher*, welche elektrische Energie in einer anderen Energieform speichern können. Diese Form von Speicher kann allerdings die gespeicherte Energie nicht wieder in elektrische Energie umformen. Vielmehr können sie nur ihren Energieverbrauch kurzzeitig verringern und zu einem anderen Zeitpunkt zum Ausgleich kurzzeitig erhöhen. Solche Energiespeicher sind vorwiegend träge thermische Prozesse, wie Kühltheken, Klimaanlage, Wasserboiler, etc. bei denen die Energie als Wärme oder Kälte gespeichert wird.

IRON-Zielgruppen, die nutzbare Verbraucher zur Verfügung stellen können, sind Industriebetriebe, Kleingewerbe und der Gebäudebereich vom Bürokomplex bis zum Einfamilienhaus. Aber auch die Einbindung von kleinen Kraftwerken wie beispielsweise Windkraftwerken ist denkbar.

Die technische Herausforderung für ein solches IRON-System ist in erster Linie die sichere und zuverlässige Koordination und Verwaltung in Echtzeit von einer sehr großen Zahl von Netzwerkteilnehmern. Aber auch die Anbindung bestehender, nutzbarer Verbrauchsprozesse an das neue IRON-System stellt ein beträchtliches Hindernis dar. Fehlende Beeinflussungsmöglichkeiten und Inkompatibilitäten müssen überwunden werden. IRON muss sowohl in der Lage sein bestehende Lastwächter als auch vorhandene Gebäudeautomation zu nutzen und die entstehenden Kosten möglichst gering halten. Große Unternehmen haben normalerweise ihr eigenes Energiemanagementsystem. Die Kommunikationsinfrastruktur setzt sowohl auf globale Übertragungsmedien wie z. B. das Internet also auch auf lokal in Gebäuden und Firmen bestehende Netzwerke.

1.2 Persönliche Motivation

Die Motivation, einen Teil des IRON-Projektes im Zuge dieser Arbeit zu behandeln, war groß, weil nach langer Studienzeit endlich ein produktiver und praktischer Beitrag zu einem Projekt eingebracht werden konnte, dass durch seinen zukunftsweisenden Ansatz eine große Herausforderung darstellt. Die im Rahmen des IRON-Projektes entstandene Aufgabenstellung lässt aber auch viel Freiraum für eigene Überlegungen zu. Die Aufgabe ermöglicht die interdisziplinäre Anwendung von Wissen und Fähigkeiten aus Bereichen, welche normalerweise eher wenig miteinander zu schaffen haben. Das Wissen über Energietechnik, Computertechnik, Kältetechnik, Automation und andere technische Bereiche kann vereint werden.

1.3 Aufgabenstellung

Zur Erreichung einer möglichst effizienten Nutzung der vorhandenen Ressourcen steigt der Koordinations- und Kommunikationsbedarf in Energieverteilnetzen. Zukünftige Energiesysteme werden nicht auf Maßnahmen zum koordinierten Lastmanagement (Demand Side Management) verzichten können. Viele Verbraucher in Industrie, Gewerbe und Privathaushalten können, eine entsprechende Infrastruktur vorausgesetzt, als verteilte Energiespeicher dienen und somit dazu genutzt werden, Lastgänge zu beeinflussen. Dieses zur Zeit weitestgehend ungenutzte Beeinflussungspotential kann dazu genutzt werden, Energieerzeugung und -verbrauch effizienter als bisher aufeinander abzustimmen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Möglichkeiten der Anbindung verschiedener Verbrauchertypen an eine Kommunikations-Infrastruktur für Energiemanagement untersucht werden. Besonders Verbraucher mit thermischen Prozessen kommen als Energiespeicher in Frage. Ziel der Arbeit ist, die möglichen Interfaces zwischen potentiellen Verbrauchergeräten und Energiemanagement-Tools zu untersuchen, existierende technische Hürden zu identifizieren und deren Lösungsmöglichkeiten in Hinblick auf einen zukünftigen weitverbreiteten Einsatz von Lastmanagement-Maßnahmen zu diskutieren. Anhand eines Demonstrations-Verbrauchers sollen verschiedene Stufen der Einflussnahme gezeigt und exemplarisch das Lastabwurf-Potential des gewählten Verbrauchertyps modelliert werden.

Kapitel 2

Stand der Technik und Umfeld

Eine umfangreiche Recherchearbeit hat ergeben, dass zur Zeit keine Schnittstellen für eine effiziente Einbindung von Verbrauchern in das Energiemanagement existieren. Dieses Kapitel soll einen Überblick über bereits vorhandene Möglichkeiten und technische Realisierungen geben und als Grundlage für weitere Arbeiten dienen.

2.1 Energieversorgung

Ein Leben ohne elektrischer Energie kann und will sich in der heutigen Zeit mit ständig steigendem Komfort und Wohlstand wohl kaum jemand vorstellen. Aufgrund der Tatsache, dass die Weltbevölkerung noch weiter ansteigt und Schwellenländer wie China oder Indien immer mehr industrialisiert werden, wird auch der weltweite Energiebedarf weiter ansteigen. Alleine in den nächsten fünfzig Jahren wird sich der Energiebedarf mehr als verdoppeln. [Kar06] In Abbildung 2.1 [She07] ist ein drastischer Anstieg des prognostizierten Weltenergieverbrauches speziell ab dem Jahr 2020 erkennbar. Dieser Mehrbedarf soll vor allem durch regenerative Energie wie Biomasse, Windenergie und Photovoltaik abgedeckt werden da die übrigen Rohstoffe wie Kohle, Erdöl oder Erdgas nicht ausreichen und zusätzliche Wasserkraftwerke nicht immer möglich sind. Ein Problem bei der Energiegewinnung aus erneuerbaren Ressourcen wie Wind und Solarenergie ist das nicht ständige und konstante Vorhandensein der Energiequelle. [Sch93] Photovoltaikanlagen ändern ihre Leistungsfähigkeit z. B. an einem leicht bewölkten Tag ständig. Abbildung 2.2 zeigt die Beeinflussung der Leistung einer Solarzelle bei verschiedenen Bewölkungsgraden. Eigene Messungen ergaben, dass bereits bei einer kleinen Wolke eine Halbierung des Stromes und somit auch der Leistung, bei einer größeren Wolke am Himmel die Photovoltaikzelle [Kyo07] aufgrund des Stromeinbruches beinahe wirkungslos ist. Windanlagen sind nicht minder problematisch, da sie nicht nur bei Windstille keine Energie liefern, sondern bei zu starkem Wind¹ aus Sicherheitsgründen ebenfalls abgeschaltet werden müssen. Solche meist unvorhersehbaren Stillstandszeiten von regenerativen Energiequellen sind für die Sicherstellung der Energieversorgung sehr unangenehm. [LR01] Um die Schwankungen des Energiebedarfes (auch hervorgerufen durch Unregelmäßigkeiten der erneuerbaren Energieerzeugung) ausgleichen zu können sind aufwendige Regelungen notwendig. Es ist notwendig, innerhalb von kurzer Zeit die gesamte regenerative Energie durch Kraftwerke mit

¹bei Windgeschwindigkeiten ab zirka $24 \frac{m}{sek}$

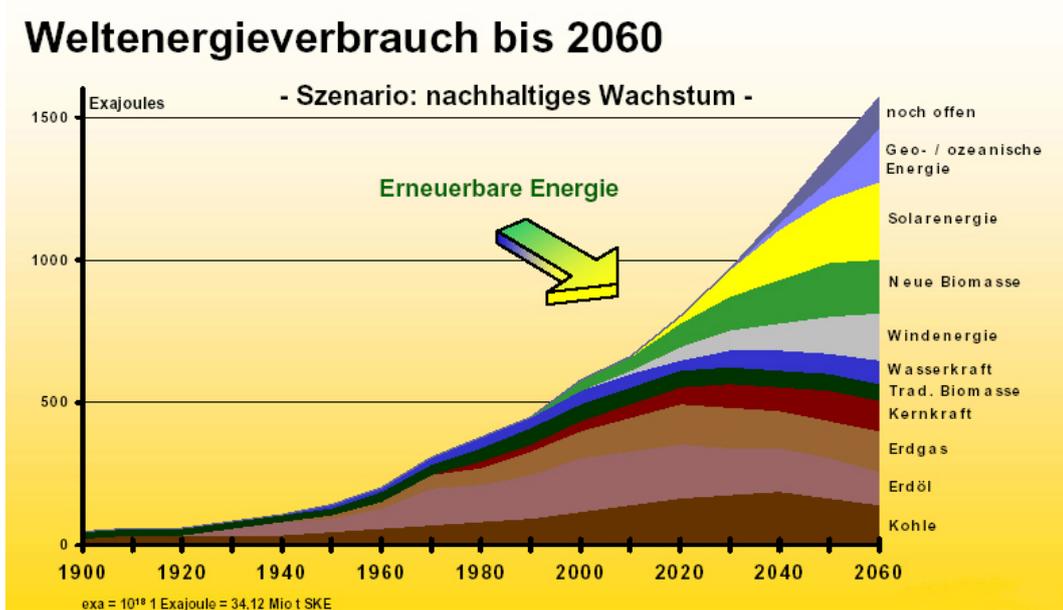


Abbildung 2.1: Weltenergieverbrauch bis 2060. Szenario mit „nachhaltigem Wachstum“. Mit freundlicher Genehmigung der Firma Shell [She07]

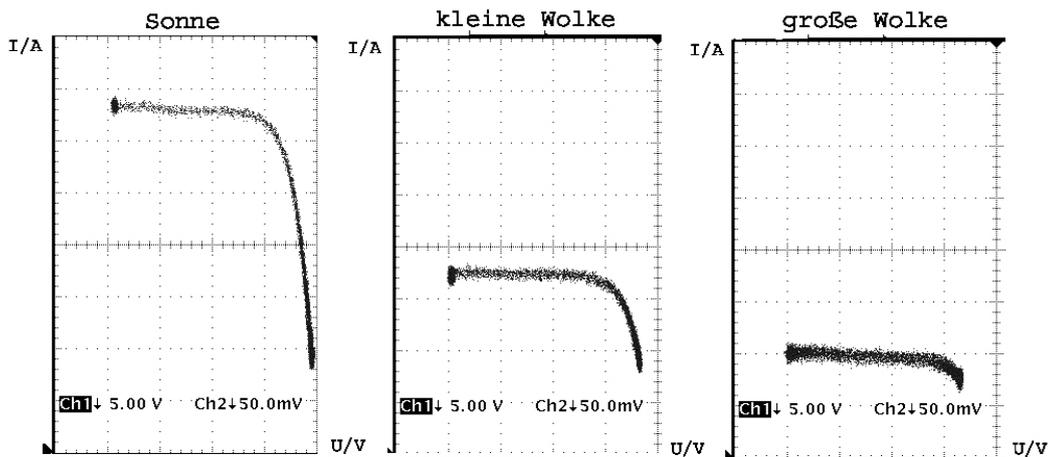


Abbildung 2.2: Einfluss des Bewölkungsgrades auf die Kennlinie einer Photovoltaikzelle

gezielt regulierbarer Energiegewinnung (z. B. Wasserkraftwerke, Speicherkraftwerke) bereitzustellen. [Sch93] Solche „Reservekraftwerke“ laufen im Sparbetrieb und werden bei Bedarf auf Volllast geschaltet.

Energiemanagement

Ein effizientes Energiemanagement ist bei der Energieerzeugung von entscheidender Bedeutung.

Unter Energiemanagement versteht man die Anpassung von energietechnischen Erzeugereinheiten an den Verbrauch. Für solch einen Angleich ist es sowohl erforderlich den Energieverbrauch zu planen als auch eine Entscheidung über die Auswahl und den Betrieb der

einzusetzenden Anlage zu treffen. [Bra05]

Ziel des Energiemanagements ist es, ein intaktes, funktionsfähiges, sicheres und zuverlässiges Übertragungsnetz mit möglichst geringen Kosten für alle Beteiligten mit hoher Versorgungsqualität zu realisieren und auf Veränderungen des Energiebedarfes zu reagieren.

Aufgrund der Tatsache, dass ein ständiges Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter elektrischer Energie vorhanden sein muss und die Möglichkeit der direkten Speicherung von elektrischer Energie nicht besteht bzw. sehr teuer ist, ist die Energiebereitstellung zur richtigen Zeit eine zentrale Aufgabe des Energiemanagements. [Mül01]

Die Herstellung des Energiegleichgewichtes zwischen Energieerzeugung und Energieverbrauch kann sowohl auf Seiten der Erzeuger als auch der Verbraucher geschehen, worauf in den nächsten Unterpunkten näher eingegangen wird.

2.1.1 Erzeugerseitige Energieanpassung

Energieerzeuger und -verteiler haben wie fast alle Unternehmen das primäre Ziel den Fortbestand der Firma zu sichern und somit den Gewinn zu maximieren. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Energieabnehmer mit der zur Verfügung gestellten Leistung zufrieden sein, was in erster Linie eine möglichst gleichmäßige und unterbrechungsfreie Versorgung mit Energie voraussetzt. Seit der Deregulierung und Liberalisierung ist die Kundenzufriedenheit noch wichtiger geworden, da der Markt vollkommen „geöffnet“ ist und jeder Verbraucher seinen Anbieter frei wählen kann. Die einzelnen Energieerzeuger stehen also im Wettbewerb. Alleine das Übertragungsnetz bleibt als Monopol bestehen. [Bra05]

In den folgenden Unterkapiteln wird auf verschiedene Szenarien eingegangen, welche ein aktives Energiemanagement auf der Erzeugerseite erfordern. Zur Zeit wird nur erzeugerseitig ausgeglichen.

Lastmodellierung

Die Praxis hat gezeigt, dass sich das Verhalten von Verbrauchergruppen wie Haushalte und bestimmte Gewerbe grob vorhersagen lässt und somit aus einer Summe von Verhaltensmustern eine Prognose der notwendigen Energie für den Folgetag („Fahrplan“) erstellt werden kann. Dies ermöglicht bereits eine relativ gute Abschätzung des Elektrizitätsbedarfes. Eine Einteilung in ein bestimmtes Verbrauchsverhaltensmuster dieser Art wird als „Lastprofil“ bezeichnet. [Kar06] Abbildung 2.3 stellt ein typisches Lastprofil eines privaten Haushaltes dar. [Fün00] Es ist ersichtlich, dass bei Arbeitsbeginn der Energieverbrauch drastisch ansteigt. Speziell an Wochenenden zur Mittagszeit, wo vermutlich gekocht wird, besteht ein erhöhter Energiebedarf. Auch in den Abendstunden kann man einen Anstieg der benötigten Elektrizität z. B. für Beleuchtung, Unterhaltungselektronik als auch für erhöhten Warmwasserbedarf erkennen. In der Nacht hingegen schläft der Großteil der Menschen und es wird deshalb kaum Energie benötigt. Die verbleibende Restenergie, welche trotzdem verbraucht wird, kommt vor allem durch Stand-by-Betrieb und Geräte für die Kühlung und Heizung zustande. [Mül01] Bemerkenswert ist, dass zwischen Sommer und Winter kaum ein Unterschied besteht. Lediglich in den Abendstunden wird im Winter mehr elektrische Energie benötigt, da es früher dunkel wird. Der Energiepreis des „Kleinkunden“ ist immer gleich, was bedeutet, dass keine Anreize für eine spezielle Anpassung des Verbraucherverhalten der Kunden an die Uhrzeit gegeben sind. Für die Energieunternehmen hingegen wird der Preis pro Kilowattstunde von

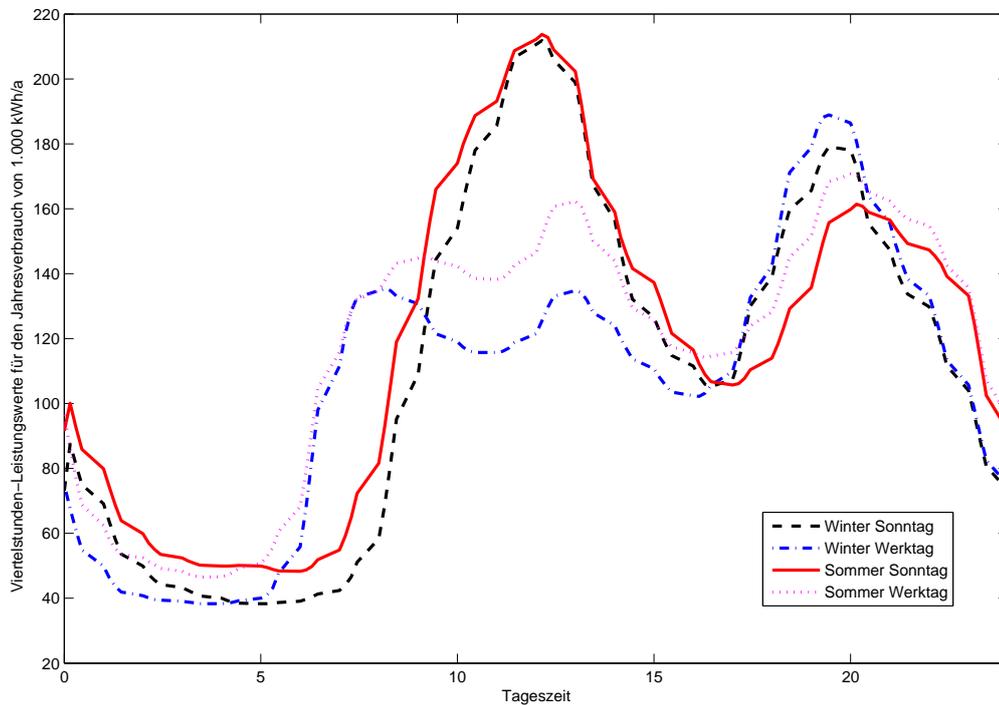


Abbildung 2.3: Lastprofil eines Haushaltes [Fün00]

Angebot und Nachfrage bestimmt, was folglich einen relativ teuren Wertbetrag zu Spitzenzeiten bedeutet, wo hingegen bei Energieflauten ein verhältnismäßig geringer Betrag anfällt. Für den Endverbraucher wird jedoch ein zeitliches Preismittel gebildet, um den kostenintensiven Einsatz einer zeitgenauen beispielsweise viertelstündigen Abrechnung vermeiden zu können. [Mül01]

Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung

Die Netzfrequenz ist ein direktes und eindeutiges Maß für die Energiesituation bzw. Leistungsbilanz im gesamten Netz. Bei jeder größeren Änderung der Verbrauchersituation ändert sich auch die Frequenz des ganzen Netzes. Kommt es beispielsweise zu einem Ausfall eines Kraftwerkes, fehlt schlagartig einiges an Energie was ein kurzfristiges Einbrechen der Netzspannung zur Folge hat. Die Schwungmassen der Turbinen werden verstärkt abgebremst, was eine Reduzierung der Frequenz hervorruft. Ziel ist es, dass die Frequenzabweichung so gering wie möglich gehalten wird. [Kar06]

Bei relativ kleinen, kurzzeitigen Änderungen und großer Trägheit des Netzes sind keine zusätzlichen Eingriffe erforderlich. Es besteht ein linearer Zusammenhang der Frequenz mit der Leistungsaufnahme von Asynchronmaschinen. Des weiteren erzwingt eine Frequenzabweichung eine lineare Spannungsänderung, welche sich auf die Wirkleistung von ohmschen Verbrauchern auswirkt. Somit kann sich der Vorgang selbst ausregeln und wieder in einen stabilen Arbeitspunkt zurückkehren. Ist die Frequenzabweichung größer, müssen zusätzliche Maßnahmen wie Primärregelung, Sekundärregelung oder Tertiärregelung eingeleitet werden.

Primärregelung Wie bereits zuvor beschrieben, führt eine Laständerung zu einer Frequenzänderung und diese wiederum zu einer Drehzahländerung. Die Primärregelung kann an jedem Turbinensatz eines Kraftwerkes selbst stattfinden und erwirkt ein Öffnen bzw. Schließen der Ventile um die Drehzahl wieder auf Solldrehzahl zu bringen und somit die Frequenz anzupassen. Diese Regelung sollte nach zirka 30 Sekunden abgeschlossen sein. Ist ein weiterer Ausgleich notwendig, muss die Sekundärregelung aktiv werden. [WV05]

Sekundärregelung Jede Regelzone² muss nach maximal 30 Sekunden selbst für 15 Minuten dafür sorgen können, dass eine Kompensation durch eigene Kraftwerke erfolgt und die Frequenz von 50 Hz wieder bestmöglich erreicht wird. Alles was in dieser Zeit nicht ausgeglichen werden kann, muss von der Tertiärregelung (Minutenreserve oder später von der Stundenreserve) übernommen werden. [WV05]

Engpassmanagement

Netzengpässe treten auf, wenn zum Beispiel durch vorhandenen Lastfluss das (n-1)-Kriterium im Betrieb nicht eingehalten werden kann und sich somit ein Fehler auf das gesamte Versorgungsnetz auswirkt. Für die Erfüllung des (n-1)-Kriteriums muss nach einer Störung sichergestellt werden, dass keine Unterbrechung erforderlich ist, keine dauerhafte Grenzwertverletzung besteht, sich die Störung nicht im gesamten Netz ausbreitet und das Betriebsmittel nicht überlastet wird. [IEC] Engpässe sind meist länderübergreifend und betreffen somit mehrere Regelzonen. [DV01]

Kurzfristige Engpässe Bei den kurzfristigen Engpässen handelt es sich um nicht vorhersehbare Ereignisse wie Ausfall von Betriebsmitteln (z. B.: Transformatoren), nicht geplante Flussverschiebungen, innere Fehler in der Isolation oder durch äußere Beschädigungen (z. B. Blitzschlag). Diese Engpässe können durch Änderung der Einsatzweise von Kraftwerken, betriebliche Schaltmaßnahmen, automatische Schutzeinrichtungen oder durch Lastabschaltungen behoben werden. [Bra05]

Langfristige Engpässe Vorhersehbare Energiedefizite werden als langfristige Engpässe gesehen. Ist aufgrund von gemeldeten Fahrplänen schon im Vorfeld ersichtlich, dass die zur Verfügung stehende Energie nicht erbracht werden kann, so ist dies dem Regelzonenführer zu melden. An einem Ausgleich des Defizits müssen sich dann alle beteiligen. Hauptproblem für Engpässe dieser Art sind schlecht ausgebaute Übertragungsleitungen, über welche nicht genügend Energie transportiert werden kann. [Bra05]

2.1.2 Energieanpassung Verbraucherseitig

Für die Verbraucher ist es, wie bereits in Kapitel 2.1.1 angemerkt, von Interesse, eine möglichst gleichmäßige und unterbrechungsfreie Versorgung bereitgestellt zu bekommen. Der Energiepreis spielt meist auch eine nicht mindere Rolle, da die meisten Verbraucher³ bestrebt sind

²In Österreich existieren drei Regelzonen, wobei nur die Austrian Power Grid (APG) der Verbundgesellschaft ausschließlich für Österreich aktiv ist und einen eigenen Reglblock bildet. Die beiden anderen Regelzonen im Westen gehören zum deutschen Regelblock

³Manche sind auch bereit, für Ökoenergie etwas mehr zu bezahlen

einen möglichst günstigen und auf Ihre Bedürfnisse angepassten Tarif zu bekommen. Mit steigendem Energiepreis wird diese Tendenz zunehmen.

Zu unterscheiden ist zwischen großen Betrieben (siehe 2.1.2) und privaten Haushalten bzw. Kleinunternehmer (siehe 2.1.2), da diese unterschiedliche Möglichkeiten und Potentiale der Lastverschiebung haben.

Für einfache Aufgaben wie die zeitliche Steuerung von Haushaltsgeräten mit großen Energieverbrauch (z.B. Waschmaschinen) sind bereits Einzellösungen vorhanden welche jedoch vom Endverbraucher programmiert werden müssen. Bei komplexere Aufgaben, speziell im gewerblichen Bereich, ist solch eine einfache Zeitsteuerung nicht mehr möglich. [DPPR97] Aufgrund der Tatsache, dass solche Einzellösungen nicht sehr häufig verwendet werden und eine genaue Abrechnung des Energiepreises mit zusätzlichen Kosten verbunden ist findet eine Energieanpassung auf Seiten der Verbraucher leider nur relativ selten statt.

Speziell in diesem Bereich setzt diese Arbeit an, um Möglichkeiten aufzuzeigen, wie verschiedene Verbrauchergeräte in die Lastverschiebung eingebunden werden können.

Große Betriebe

Größere Betriebe sind oft direkt ans Mittelspannungsnetz mit beispielsweise 10 kV angebunden und haben wegen ihres großen Energiebedarfs meist Sondertarife mit zeitlich genauer Abrechnung. Die Messungen werden in einem $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ oder 1 Stundentakt durchgeführt. Dies bedeutet für die Energieanbieter zwar einen etwas höheren Verwaltungsaufwand, erlaubt aber auch eine bessere Vorhersage für das Lastprofil (siehe Kapitel 2.1.1) und der prognostizierte elektrische Energiebedarf kann ermittelt werden. Die Betriebe profitieren ebenfalls davon, da die verbrauchte elektrische Energie zeitlich genau erfasst wird. Bei einem Verbrauch von elektrischer Energie zu Zeiten an denen allgemein weniger Energiebedarf besteht, muss ein geringerer Betrag pro kWh entrichtet werden. In solchen Sondertarifen ist neben dem Strompreis auch die geforderte Leistung enthalten. Ebenso ist eine Regelung bei einem Mehrbedarf nötig, als auch weitere rechtliche Punkte (z. B. Laufzeit, Kündigungsfrist, Lieferbedingungen, Meßeinrichtungen) werden genau festgehalten. Der Endgültige Strompreis setzt sich schließlich aus dem Leistungspreis, dem Verrechnungspreis und dem Arbeitspreis zusammen. Zur Ermittlung des Leistungspreises wird der Leistungsbedarf über den gesamten Abrechnungszeitraum gemittelt und davon der Maximalwert herangezogen. Der Arbeitspreis je nach Tarifzeit ein unterschiedlicher Preis für gerade aktuelle elektrische Energie. Des weiteren kann sowohl ein Mindestbezug als auch ein Mengenrabatt vereinbart werden. [Mül01]

Private Haushalte und Kleinunternehmen

Für „Kleinabnehmer“ existieren Tonfrequenzrundsteuerempfänger (TRE) (siehe Abb. 2.4), welche durch ein Rundsteuersignal ein- und ausgeschaltet werden können. Dabei wird der Grundschwingung von 50 Hz eine Tonfrequenz mit einem bestimmten Code für die Schalthandlung überlagert. Die Frequenz ist bei den verschiedenen Energieanbieter unterschiedlich und liegt in einem Bereich von 168 Hz bis 2000 Hz. Der TRE wandelt diese Signale in Steuerbefehle um. Die an das Rundsteuergerät angeschlossenen Geräte werden speziell zu den Spitzenzeiten vom Energieversorger gezielt für eine bestimmte Zeit abgeschaltet und anschließend wieder eingeschaltet. Für die Einschränkung in seiner Handlungsfreiheit erhält der Kunde einen etwas günstigeren Tarif. Meist wird solch eine Variante für Wärmepumpen und

Elektrospeicherheizungen eingesetzt, wo je nach Energieversorger meist eine tägliche Unterbrechung an Werktagen von 11:00 bis 12:00 Uhr stattfindet [Lin07]. Auch die Straßenbeleuchtung wird durch eine Tonfrequenz gezielt geschaltet. Eine etwas modernere Variante ist die Übermittlung der Steuerbefehle an den TRE mittels Funk, was durch ein Kooperations mehrerer Energieversorger ermöglicht wird, welche gemeinsame Sendemasten verwenden. Dabei wird mit einer Trägerfrequenz im Langwellenbereich (129,1 Hz) der Befehlscode übertragen. [Mül01]

Nachteilig ist der zusätzlich benötigte Energiezähler in Verbindung mit einem extra Rundsteuergerät was natürlich mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Des Weiteren sind zwei Zählerplätze mehr im Zählerkasten erforderlich, was nicht immer möglich ist. Abbildung 2.4



Abbildung 2.4: Rundsteuergerät mit zusätzlichen Zähler. Quelle: Author

zeigt auf der linken Seite ein Zähler, welcher mit zwei Zähleinheiten ausgestattet ist. Dadurch können Tag- und Nachttarife realisiert werden. Der Pfeil zeigt an, welcher der beiden Tarife gerade aktiv ist. Die Umschaltung veranlasst der Tonfrequenzrundsteuerempfänger, welcher sich auf der rechten Seite befindet. Die drei Schalter zeigen den aktuellen Zustand an.

2.2 Gebäudeautomation

Damit ein effizienter Einsatz von Energiemanagement in Gebäuden realisiert werden kann, bedarf es einer Automation von Objekten. Worte wie „Home Automation“ oder „Smart

Homes“ werden jetzt auch im deutschsprachigen Raum schon fast genau so oft benutzt wie „Gebäudeautomation“. Primär geht es darum, dem Menschen das Leben in Gebäuden so angenehm und leicht wie möglich zu machen und Energiekosten zu reduzieren. [KNSN05] Es ist beispielsweise denkbar, dass

- sich die Waschmaschine über das Internet steuern lässt. [BHP02]
- sich der Elektroherd automatisch abschaltet sobald man den Raum verlässt. [BHP02]
- sich das Badewasser vom Wohnzimmer aus kontrollieren lässt. [Grö03]
- sich das Licht bei Betreten eines Raumes einschaltet. [Sch02]
- ein Kühlschrank erkennt, dass neue Waren hinein gelegt wurden. [PD04]
- die Klimaanlage auf die Personenzahl im Raum reagiert. [KNSN05]
- ein Energiemanagement realisiert wird. [BHP02]
- ...

Grundvoraussetzung für die Realisierung solcher Szenarien ist ein vernetztes Gebäude. Darunter wird eine Verbindung von möglichst vielen Aktoren und Sensoren zu einem Netzwerk verstanden. Ob die Verbindung physikalisch mit Drahtleitungen hergestellt wird oder über Funkkanäle realisiert wird spielt dabei keine Rolle. Obwohl in den letzten Jahren die Kosten für Mikroelektronik drastisch gesunken sind, ist eine nachträgliche Vernetzung und Einbau von notwendigen Aktoren und Sensoren in ein Haus relativ kostenintensiv. Eine Vernetzung zahlt sich meist nur in größeren Neubauten aus. Da Österreich kaum Hochhäuser besitzt, findet man hier auch sehr wenig vernetzte Komplexe, in welchen die Gebäudeautomation wirklich zum Einsatz kommt. In anderen Ländern mit vielen Hochhäusern in den Zentren und starker Industrialisierung wie Amerika oder Japan ist der Anteil jener Gebäude, welche über ein Kommunikationsnetz verfügen, deutlich höher. Für die Vernetzung kommen fast ausschließlich Feldbussysteme zum Einsatz, welche durch die enorme Weiterentwicklung und Miniaturisierung immer vielseitiger eingesetzt werden können. [Sch02] In Europa hat sich vor allem der „Europäische Installationsbus“ (EIB) [EIB07] für kleinere Gebäude wie Familienhäuser und sein Konkurrent „Local Operating Network“ (LON) [LON07] für größere Gebäude wie Bürogebäude durchgesetzt. Speziell in Amerika findet man auch öfter BACnet [BAC07], ein weiterer Standard der Gebäudeautomation. Die Tatsache, dass in der heutigen Zeit fast alle Bürogebäude über Local Area Networks (LAN) verfügen, schafft bereits eine gute Voraussetzung für die Gebäudeautomation. Solch eine Vernetzung verbindet bereits viele Computer miteinander und mit dem Internet. Der Zugang zum Internet, welcher mit viel Aufwand verbunden sein kann, ist bereits vorhanden ist und stellt keine zusätzliche Hürde dar. Anforderungen an Gebäudenetzwerke sind neben der großen Anzahl an Knoten welche bewältigt werden müssen eine robuste Ausführung, flexibles Netzwerkmanagement und natürlich auch möglichst geringe Kosten. [KNSN05]

Die Wurzeln der Gebäudeautomation liegen vor allem im industriellen Bereich bei der Kontrolle von Ventilatoren, Heizungssystemen und der Warmwasseraufbereitung mit dem Ziel den Energiebedarf zu reduzieren und somit Kosten zu senken. [KNSN05], [KPRR04]

Sicherheit von Gebäuden ist ebenfalls ein Teil der Gebäudeautomation. Das Konzept der Sicherheit beginnt mit einfachen Tür- bzw. Fensterkontakten, welche das Öffnen signalisieren, anschließend einen Alarm auslösen und endet bei der vollständigen Videoüberwachung.

[BHP02] Zur Sicherheit gehören jedoch nicht nur Maßnahmen um sein Heim vor unerwünschtem Besuch zu schützen, sondern auch vor anderen Beschädigungen wie Feuer, Wasser oder Wind. Dazu werden z. B. Rauchmelder installiert. Beim Ansprechen der Rauchmelder werden weitere Maßnahmen wie Abdrehen der Gaszuleitung, Öffnen bzw. Schließen von strategisch günstig gelegenen Fenstern und eine Alarmierung eingeleitet. Das U.S. Pentagon war eines der ersten Gebäude, welches über ein ausgeklügeltes Sicherheitssystem in Kombination mit Gebäudeautomation verfügte. Ein funktionierendes Zusammenspiel von digitalen Sensoren und Aktoren konnte das Feuer nach dem Flugzeugabsturz im Jahr 2001 auf einen Teil des Gebäudes beschränken, da gezielt Ventilatoren abgeschaltet und Zugklappen geschlossen wurden. Um diese Technik weiter entwickeln zu können wurden daraufhin die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse der „intelligenten“ Vernetzung der kommerziellen Industrie weitergegeben. [Sno03]

Mittels Feuchtigkeitssensoren kann bei einem Wasserrohrbruch die Wasserleitung abgedreht werden bzw. kann mit Hilfe eines Windsensors ein Rolllöcher oder eine Markise automatisch eingezogen werden, um diese bei zu großen Windstärken zu schützen. Die Kommunikation mit bzw. über Mobiltelefon zur Sicherheitszentrale und gegebenenfalls auch mit entsprechenden Einsatzkräften wie Polizei, Rettung oder Feuerwehr ist ebenfalls wesentlicher Bestandteil des Sicherheitsaspektes. Immer häufiger wird die Gebäudeautomation auch für Zutrittsberechtigungen verwendet, wo mittels einer Karte oder eines Magnetschlüssels die Identität festgestellt und anhand dieser die Berechtigung zum Betreten des Raumes erteilt wird oder auch nicht. [BHP02]

Im Bereich Komfort geht es in erster Linie um die Unterstützung des Menschen in seinem Wohn- bzw. Arbeitsbereich. Einige Aufgaben könnte der Mensch nur schlecht und ineffizient steuern (z. B. Heizungseinstellung), weshalb die Automation als hilfreich angesehen werden kann. Die einfachste und älteste „Automatisierung“ im Gebäudebereich ist die Heizungsregelung. Durch gezielte Regelung der Vorlauftemperatur wird ein angenehmes Wohnklima erzeugt. Auch in diesem Bereich geht die Gebäudeautomatisierung weiter und bindet Klimaanlage und das Belüftungssystem ein. Die Steuerung der einzelnen Komponenten kann an die Anzahl der im Raum befindlichen Personen angepasst werden und auf weitere Faktoren wie Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, oder anderen der Entscheidung dienlichen Komponenten eingegangen werden. Dadurch ist es möglich Energie effizient einzusetzen. [KMW03] Eine individuelle Anpassung verschiedener Profile (Arbeiten, Erholen, Schlafen, ...) ist ebenfalls möglich und bietet somit einen zusätzlichen Komfortgewinn. [BHP02]

Durch die immer billiger werdende Mikroelektronik gewinnt die Gebäudeautomation und im speziellen die Verbindung von unterschiedlichen Geräten auch im Bereich der Unterhaltungselektronik mehr an Bedeutung. In sehr vielen Geräten werden bereits zusätzliche Mikrochips für eine Vernetzung zwischen einzelnen Geräten eingebaut und für die Kommunikation vorbereitet. Eine vollständige Vernetzung der einzelnen Geräte ist der erste Schritt. Die Stereoanlage kann sowohl den Ton vom Fernseher, dem DVD-Recorder, dem Videorecorder, der Spielekonsole oder dem Computer liefern. Durch solch eine Verbindung ist es z. B. möglich über die bestehende Internetverbindung des Computers ein MP3-Stream mit der Stereoanlage abzuspielen. Sämtliche Übertragungswege müssen nicht zwangsläufig verkabelt sein, sondern die Geräte können zum Teil auch via Funk miteinander kommunizieren. In solch einer Anlage kann natürlich auch das Telefon eingebunden sein, was ein Freisprechen von jeder beliebigen Position im Haus ermöglicht. Alle Geräte können über ein gemeinsames Bedienteil gesteuert werden. [KMW03], [BHP02] Speziell für ältere Menschen und Personen mit körperlicher oder geistiger Einschränkung, kann die Gebäudeautomation entscheidende Vorteile bringen. Tritt

ein Notfall ein, so kann die betreffende Person über ein Armband direkt einen Notruf absetzen und es wird automatisch veranlasst, dass Hilfe geholt wird. Dies geht sogar schon so weit, dass der Aktivitätszustand überwacht wird und bei etwaigen Abnormalitäten (z. B. Sturz, epileptischer Anfall), wo der Betreffende keine Hilfe mehr holen kann, sofort und selbstständig Einsatzkräfte angefordert werden. [BHP02]

Die Diagnosen sowie laufende ärztliche Untersuchungen bei schweren Krankheiten können ebenfalls erheblich erleichtert werden. Patienten können selbstständig einfache Messungen wie Blutdruck oder Zuckergehalt durchführen und diese direkt dem Arzt übermitteln. Dadurch entfallen sowohl die für gebrechliche Personen oft umständlichen Arztbesuche, als auch die teilweise langen Wartezeiten beim Arzt. Dieser wiederum erhält in regelmäßigen Abständen die Patientendaten und hat in sehr kurzer Zeit Aufschluss über dessen Befinden und kann gegebenenfalls rasch weitere Schritte einleiten. [BHP02] Durch Smart Office [BHP02] wird versucht, dem Arbeitnehmer das Arbeiten und im Speziellen sein Arbeitsumfeld möglichst angenehm zu gestalten. Dies betrifft vor allem größere Bürogebäude. Dadurch steigt die Mitarbeiterzufriedenheit und somit auch die Produktivität des Einzelnen. Klimageräte und Heizung können z. B. vom Computer aus gesteuert werden, Kopiergeräte nur von Berechtigten mittels Mitarbeiterausweis benutzt werden, oder durch eine Identifizierung des Aufenthaltsortes des Mitarbeiters sein Telefon automatisch in den jeweiligen Raum weitergeleitet werden in dem er sich gerade aufhält. In der Kantine oder beim Getränkeautomaten kann man bargeldlos zahlen, da man mittels Karte identifiziert wird und die bezogenen Waren automatisch verrechnet und zu einem Gesamtbetrag zusammengefasst werden, welcher auf einer Monatsrechnung aufscheint. [BHP02] Des Weiteren ist durch die Gebäudeautomation auch eine wirtschaftliche Erleichterung spürbar. So lassen sich z. B. Reinigungsfirmen anhand der Anwesenheit von Personen in einzelnen Räumen bestellen, Beleuchtung und Klimageräte personenabhängig steuern. Durch diese situationsbedingte Anpassung können Vorgänge optimiert und auch Geld gespart werden. [BHP02]

2.2.1 Energieeinsparung

Die Ölkrise in den frühen 70er Jahren veranlasste die Menschen dazu, Maßnahmen zur Energiereduzierung durch Automation zu erarbeiten. Energiekosten können durch eine zentrale Überwachungs- und Steuereinheit gesenkt werden. [KNSN05] Ein Beispiel dafür ist der in Kapitel 2.1.2 beschriebene Rundsteuerempfänger, wodurch der Verbraucher zu gewissen Zeiten auf Energie verzichtet, dafür aber einen günstigeren Tarif vom Energieanbieter erhält.

Energie kann auch durch intelligentes Zusammenspiel einzelner Komponenten eingespart werden. So kann die Sonnenblende in Verbindung mit der Klimaanlage und den Fenstern stehen, und aufgrund der Raumtemperatur die sinnvollste Aktivität setzen. [KMW03]

Natürlich können auch für jeden Heimbesitzer eigene Profile erstellt werden, welche jedoch genau auf die entsprechenden Bedürfnisse angepasst sind. So kann es beispielsweise für manche Leute Sinn machen, wenn bei Aktivierung des Computers automatisch der Fernseher und das Radio abgeschaltet wird. Für Andere wiederum ist dies vollkommen inakzeptabel, da sie sich während der Bildschirmarbeit berieseln lassen oder vielleicht sogar einen Film vom Computer am Fernsehgerät betrachten wollen.

2.2.2 Diskussion

In der Gebäudeautomation steckt ein großes Potential, den Menschen ihr Leben einfacher und bequemer zu machen, das sich jedoch aufgrund des relativ hohen Anschaffungspreises noch in der Entwicklung befindet. Es fallen nicht nur die Installationskosten an, sondern auch weitere Wartungs- und Servicarbeiten. In privaten Haushalten ist ein fortschrittlicher Einsatz der Automatisierung ungefähr dreimal so teuer wie eine normale Elektroinstallation. [KPRR04] Erschwerend kommt noch hinzu, dass die EDV-Hardware in der Regel alle fünf Jahre gegen neuere und leistungsfähigere Geräte getauscht werden muss beziehungsweise soll. Aufgrund der Tatsache, dass sowohl haustechnische Anlagen als auch elektrische Haushaltsgeräte wie z. B. Kühlschränke und Elektroherde eine relativ hohe „Lebensdauer“ aufweisen, finden neue Geräte mit Schnittstellen für die Gebäudeautomation nur sehr langsam Einzug in die Häuser. [Grö03], [BHP02]

Ein weiteres Problem ist die Bedienerfreundlichkeit. Viele der angebotenen Geräte erfordern eine sehr umständliche Bedienung mit einigen Programmierschritten, was dem durchschnittlichen Verbraucher nicht zugemutet werden kann. Durch solch komplexe Vorgänge verliert der Benutzer den Überblick und das Interesse an den angebotenen Geräten und kann das enorme Potential der Gebäudeautomation nicht verstehen beziehungsweise überschauen. Die Beschränkung auf ein Minimum an Eingaben über wenige Knöpfe und Ausgaben auf einem Display ist Grundvoraussetzung für eine leichte Bedienbarkeit. Dass sich die Erzeugerfirmen auf keinen Standard einigen können, kommt noch als erschwerende Tatsache hinzu und hemmt die Weiterentwicklung. Verbraucher wollen in erster Linie Komfort und legen relativ wenig Wert auf komplizierte, überflüssige Anwendungen. [GL92]

Ein weiteres Problem liegt in der Angst der Menschen vor Veränderungen und dem Neuen. Sie befürchten, dass durch den Einsatz von vernetzter Haustechnik mit Automatisierung Arbeitsplätze abgebaut werden. Bei einzelnen Berufsschichten wird sich die Arbeitsweise ändern und der Umgang mit neuen Komponenten muss erlernt werden. Wenn die Arbeiter flexibel sind und die nötige Einsatzbereitschaft zeigen, ändert sich der nur der Aufgabenbereich etwas.

2.2.3 Pilotprojekte

In einigen Ländern wie beispielsweise Deutschland, Frankreich, Schweiz, Japan, Großbritannien, oder USA [BHP02] wurden beziehungsweise werden im Rahmen von Pilotprojekten Gebäude mit integrierten Gebäudesystemen ausgestattet. Meist haben diese Projekte einen bestimmten Schwerpunkt und haben sich auf einen speziellen Bereich der Automation beschränkt und spezialisiert. Die meisten Bauten beschäftigen sich mit der Gebäudesicherheit und/oder dem Komfort beziehungsweise Wohlfühlaspekt in Verbindung mit Energieeinsparungen und Gesundheit. Im Bereich Entertainment und Smart Office wurden noch relativ wenige Projekte gestartet, da hier kein großes Einsparungspotential gesehen wird. Lediglich Großbritannien hat sich diese Punkte als Schwerpunkt gesetzt. [BHP02], [Sno03]

Ziel der Versuchsgebäude ist die Untersuchung der Machbarkeit, das Vorantreiben neuer Entwicklungen und die Findung eines einheitlichen Standards. Durch die Einbindung der Endverbraucher wird auch versucht, die Akzeptanz und das Interesse zu erhöhen, damit die Gebäudeautomation bald in jedem Haus zu finden ist. [BHP02]

2.3 Kälte- und Wärmespeicher

Geräte mit thermischen Prozessen wie z. B. Kühlschränke, Klimaanlage, Wärmepumpen oder Warmwasserboiler können aufgrund der Trägheit der thermischen Vorgänge zur Speicherung von Temperatur verwendet werden. Genau dieser Effekt wird bei einer Lastverschiebung ausgenutzt und im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht, weshalb hier auf die Grundlagen der Kälte- bzw. Wärmegeräte eingegangen wird.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in eine andere Energieform umgewandelt werden kann. Eine verlustlose Umwandlung ist nicht möglich und so entsteht in den meisten Fällen Wärme als Verlustleistung. Für einen Wärmetransport ist immer eine Temperaturdifferenz erforderlich. [Sch60]

2.3.1 Kühlgeräte

Unter Kühlen versteht man ein Herabsetzen der Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur. Wird eine Flüssigkeit zum Verdampfen gebracht, benötigt sie dazu sehr viel Wärme, welche aus der Umgebung entzogen wird und diese somit abkühlt. Durch geeignete Wahl von Kältemittel und Druck kann ein Verdampfen auch bei niedrigen Temperaturen erfolgen. Früher wurde hauptsächlich Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) als Kältemittel verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass dies die Ozonschicht angreift, wird heute meist Tetrafluorethan R134A ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) oder Isobutan R600a ($(\text{CH}_3)_3\text{CH}$) verwendet. Beide haben durch eine relativ niedrige Siedetemperatur von $-26,2\text{ °C}$ bzw. $-11,7\text{ °C}$ bei einem Druck von 1 bar sehr gute Kühlleistungen und kommen den guten Eigenschaften von FCKW sehr nahe. [Tie97] Da nahezu jeder Haushalt mit einem Kühlschrank ausgestattet ist, wird im nächsten Abschnitt die Funktionsweise von Kühlgeräten im Allgemeinen anhand eines Kühlschranks erklärt.

Funktionsweise von Kühlgeräten gezeigt am Beispiel Kühlschrank

Abbildung 2.5 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Kühlgerätes und dessen wichtigste Komponenten, welche anschließend erklärt werden.

Ein Kompressor, welcher von einem Elektromotor angetrieben wird, verdichtet das Kühlmittel. Kompressoren benötigen beim Anlauf ein hohes Drehmoment und somit auch einen hohen Anlaufstrom, weshalb Kühlgeräte mit größeren Motoren ausgestattet werden als im Normalbetrieb erforderlich wäre. Durch solch eine Überdimensionierung kann das erforderliche Drehmoment leichter aufgebracht werden und der Anlaufstrom bleibt geringer. [Sch60]

Im Kondensator, welcher sich im Kühlkreis gleich nach dem Kompressor befindet, baut sich Druck auf und somit wird das Kältemittel verflüssigt. Dabei wird Wärme freigesetzt, welche über eine möglichst große Oberfläche in den Außenraum abgeführt werden muss. Die Kondensatortemperatur ist um ca. 10 bis 20 °C wärmer als die Umgebung, damit durch die Temperaturdifferenz ein Wärmestrom entstehen kann. Dadurch wird die umliegende Luft erwärmt und steigt aufgrund des geringeren spezifischen Gewichtes auf. Verstärkt wird dies durch den natürlichen „Kamineffekt“, wo kalte Luft unten angesaugt und oben warme abgegeben wird. Deshalb befindet sich der Kondensator meist auf der Geräterückseite und darf nicht blockiert werden. Bei größeren Geräten wird diese Wärmeabgabe noch zusätzlich mit Ventilatoren verstärkt. [Sch60]

Das Reduktionsventil verringert den Druck, der durch den Kompressor im Kondensator aufgebaut wird. Durch eine kleine variable Öffnung, welche mechanisch den Druck so anpasst, dass die Verdampfer Temperatur größtmöglich aber unterhalb der Innentemperatur ist, strömt das Kältemittel weiter zum Verdampfer. Die Druckanpassung kann sowohl durch konstant halten des Verdampferdruckes als auch des Flüssigkeitsstandes mittels Schwimmventil im Verdampfer oder durch Druckentspannung über Kapillareffekt erfolgen. [Sch60]

Das eigentliche Kühlelement ist der Verdampfer. In diesen tritt das nebelartige Kältemittel ein und entzieht der Umgebung aufgrund der Verdampfung Wärme. Verdampfer sind meist schlangenförmig aufgebaut, befinden sich im hinteren oberen Teil des Kühlgerätes und müssen wegen der ständigen Feuchte im Kühlschrank widerstandsfähig sein. In unmittelbarer Nähe des Kühlelementes ist die Temperatur am geringsten. Da kalte Luft durch ihr spezifisches Gewicht schwerer als warme ist, sinkt sie nach unten, wo die Luft wieder etwas erwärmt wird und nach oben steigt. Es entstehen also verschiedene Temperaturzonen in einem Kühlgerät, was vorteilhaft genutzt werden kann, indem man gezielt den Kühlschrank befüllt. Eine Temperatur von 6 bis 8 °C im Innenraum ist ein gutes Mittelmaß zwischen einer effizienten Ausnutzung und trotzdem Haltbarkeit der Produkte. [Sch60]

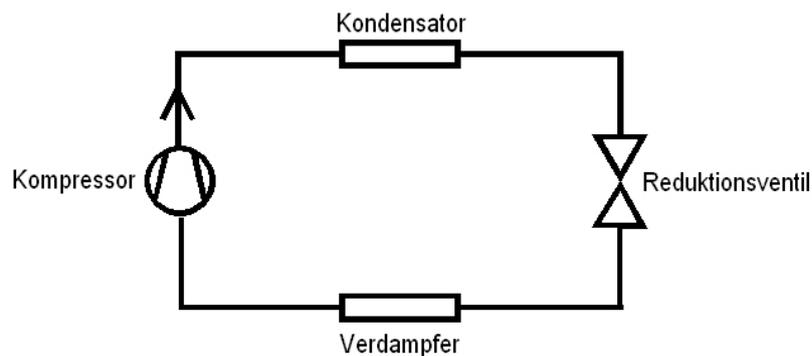


Abbildung 2.5: Kältekreislauf eines Kühlgerätes

Von entscheidender Bedeutung ist auch die Isolation eines Kühlgerätes. Etwa 80% der Kühlleistung müssen dazu verwendet werden die Kälteverluste durch die Isolation wieder abzudecken. Der Rest wird zur Kühlung des Inhaltes und der warmen Luft welche durch das Öffnen der Tür eindringt benötigt. Je dicker und besser ein Gerät isoliert ist, desto länger hält es die Kälte gespeichert. Der Kompressor muss also nicht ständig laufen. Im Normalfall beträgt die Einschaltdauer aufgrund der Überdimensionierung des Motors ca. 30 bis 40% und wird von der Temperaturregelung gezielt gesteuert. [Tie97]

Die Regelung der Temperatur ist ein wichtiger Bestandteil sowohl von Kühlgeräten als auch von Wärmegegeräten. Die eingestellte Temperatur soll möglichst genau erreicht und eingehalten werden. Exakt könnte dies bei einer einfachen Ein/Ausschaltung nur realisiert werden, wenn das jeweilige Gerät sehr viele Schalthandlungen und Temperaturmessungen durchführen würde. Ein ständiges Ein- und Ausschalten verkürzt die Lebensdauer von thermischen Geräten jedoch drastisch, weshalb sich die Temperatur innerhalb eines bestimmten Toleranzbandes befinden darf. Je nach Anforderungen ist diese tolerierte Abweichung mehr oder weniger groß. Unterschreitet bzw. überschreitet die gewünschte Temperatur diese Abweichung, wird eine Schalthandlung eingeleitet. Aufgrund der Tatsache, dass es zwei relevante Schalthandlungen gibt, wird diese Art der Regelung auch Zweipunktregelung genannt. Durch

solch eine Auslegung wird ein Kompromiss zwischen Temperatureinhaltung und Schonung des Gerätes geschlossen. [Sch04]

In Kühlschränken kann solch eine Regelung durch ein Thermostat, ein Pressostat oder einer elektronischen Schaltung realisiert werden.

Thermostat Bei einem Thermostat (siehe Abb. 2.6) wird die Temperatur als nichtelektrische Größe zum mechanischen Schalten herangezogen. Der Temperatursensor kann sowohl im Innenraum als auch direkt am Verdampfer angebracht werden. Die Messung am Verdampfer bringt den Vorteil, dass bei gleichbleibender Temperatur im Inneren das Toleranzband größer ist als bei Messung im Kühlraum. Des weiteren wird eine unangenehme Vereisung des Verdampfers reduziert, da direkt dort Einfluss auf die Temperaturregelung genommen werden kann. [Sch04], [Sch60]



Abbildung 2.6: Thermostat eines Kühlschranks. Quelle: Author

Pressostat Hier wird der Druck im Kältekreislauf⁴ gemessen, welcher direkt proportional der Temperatur am Verdampfer ist und dieser wiederum mit der Innenraumtemperatur zusammenhängt. Schwankungen der gewünschten Temperatur sind hier etwas größer. [Sch04] Diese Art der Temperaturregelung kommt jedoch oft bei großen Kühlvitrienen mit mehreren Kompressoren zum Einsatz, wo aufgrund wechselnder Temperaturen und somit auch wechselnder Drücke gezielt einzelne Kompressoren mechanisch ein- bzw. ausgeschaltet werden können.

Elektronische Schaltungen Speziell in moderneren Kühlschränken wird die Zweipunktregelung von einem Mikrocontroller übernommen, welcher seine Daten von einem elektrischen Temperatursensor erhält. Sowohl Sensoren als auch Aktoren sind elektrisch mit dem Regler verbunden.

⁴im Verdampfer

Neben den zuvor erwähnten Kühlschränken gibt es noch andere Kühlgeräte, wovon exemplarisch ein paar weiter herausgegriffen wurden. Sowohl Gefriertruhen als auch Gefrierschränke ermöglichen aufgrund der niedrigen Temperatur von ca. -18 °C eine Verlängerung der Haltbarkeit von Lebensmitteln. Die Funktionsweise dieser Geräte unterscheidet sich von der eines Kühlschranks nicht. Der Verdampfer wird zur Erreichung einer niedrigeren Temperatur lediglich über die gesamte Innenwand verteilt und zusätzlich wird die Isolierung erhöht. [Sch60] Bei großen Kühlräumen, welche sich durch Begehbarkeit auszeichnen, werden größere Anlagen mit guter Wärmeisolierung der Wände verwendet, die Funktionsweise bleibt jedoch auch hier die gleiche. Zusätzlich muss hier speziell auf die Kälteverteilung geachtet werden. Oft kommt dazu ein Ventilator zum Einsatz, welcher die Luft im Raum umwälzt und möglichst gleichmäßig verteilt. Durch geschickte Anordnung von zum Teil schrägen Trennplatten um den großen Verdampfer kann auch durch natürliche Konvektion eine relativ gleichmäßige Luftverteilung erwirkt werden. [Sch60]

Speziell im gewerblichen Bereich sind noch eine Unzahl an weiteren Kältegeräten im Einsatz. All diese Geräte (z. B. Kühlvitriolen, Eiswürfelmaschinen, Bierzapfanlagen, Speiseeisherstellung und -kühlung, Fischkühler, Blumenkühler, Laborkühlgeräte, ...) arbeiten meist mit nur sehr kleinen Modifikationen mit der Funktionsweise des zuvor beschriebenen Kühlschranks. [Sch60]

2.3.2 Klimageräte

Um Menschen ihren Aufenthalt in Räumen möglichst angenehm zu machen und die Produktivität bzw. Konzentration zu steigern, werden speziell in Firmen immer mehr Klimageräte eingebaut. Durch den Einsatz von Klimaanlageanlagen kann ein bestmögliches Raumklima erzielt werden. Grundsätzlich ist ein Klimagerät wie ein Kühlschrank (siehe Kapitel 2.3.1) aufgebaut, wobei die Leistung um das zehnfache bis zwanzigfache größer ist. Aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Kondensator und Verdampfer steigt jedoch der Stromverbrauch nicht um den gleichen Faktor an. [Sch60] Aufgrund der Tatsache, dass es sich um einen thermischen Prozess handelt, kann die elektrische Energie in Form von thermischer Energie gespeichert werden. Eine Teilnahme von Klimageräten am Energiemanagement ist somit möglich und aufgrund der relativ großen Leistungsaufnahme wünschenswert.

Neben der Kühlung gehört jedoch auch die Reinigung und Entfeuchtung der Raumluft sowie die Zufuhr von Frischluft zu den Aufgaben eines Klimagerätes. Gegebenenfalls wird die Klimaanlage auch als Heizung und zur Befeuchtung verwendet.

Jene Raumtemperatur, welche von den Menschen als angenehm empfunden wird, hängt sehr stark von der Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit ab. Bei einer Außentemperatur von z. B. 20 °C wird eine Innentemperatur von 22 °C als erwünschter Wert gesehen, bei einer Temperatur von 35 °C jedoch bereits ein weit aus höherer Wert von ca. 27 °C . Ähnlich verhält es sich mit der Luftfeuchtigkeit. Je geringer die Luftfeuchtigkeit ist, desto höher kann die Temperatur sein⁵. Steigt die relative Feuchte stark an, wird ohne Temperaturveränderung das Raumklima schnell als unangenehm empfunden. [Sch60], [AB99]

Die erforderliche Kälteleistung hängt stark von der Raumisolierung und den darin befindlichen Personen ab. Eine Klimaanlage muss sowohl die Wärme, welche von außen in den Raum eindringt (z. B. Sonneneinstrahlung, Frischluftzufuhr), als auch die in den Raum abgestrahlte Wärme der Menschen⁶ und einzelner Geräte kompensieren. [Sch60], [AB99]

⁵z. B. Sauna

⁶ca. 100 kcal pro Stunde

Die sich im Raum befindliche Luft wird beim Atmen zunehmend mit Kohlendioxid (CO₂) angereichert, wodurch eine zusätzliche Frischluftzufuhr erforderlich ist um diesen Gehalt wieder zu senken. Je mehr Menschen sich in einem Raum aufhalten, desto wichtiger wird diese Zufuhr. Allerdings steigt jedoch mit Zunahme der Frischluft auch die benötigte Kälteleistung des Klimagerätes, da die von außen zugeführte Luft im Normalfall wärmer ist als jene, welche sich im Raum befindet. [Sch60]

Sehr oft werden auch Komplettlösungen angeboten, welche vollständig für das Raumklima verantwortlich sind. Dazu gehört an kalten Tagen auch die Erwärmung des Raumes. Dabei wird der Kältekreis unterbrochen und mittels einer elektrischen Heizung oder direktem Anschluss an die Warmwasserheizung der Raum erwärmt. Aktive Lüfter sorgen für die nötige Luftumwälzung. Der Einsatz des Klimagerätes als Wärmepumpe (siehe Kapitel 2.3.3) ist auch eine Möglichkeit. [Sch60]

2.3.3 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe funktioniert wie ein Kältegerät (siehe Kapitel 2.3.1). [Höf05] Bei der Erzeugung von Kälte entsteht auch Wärme am Kondensator, welcher hier spezielles Augenmerk geschenkt wird. Der Verdampfer entzieht seinem Umfeld die dafür benötigte Wärme direkt aus der Luft, aus dem Wasser oder aber aus dem Erdreich, wo ab einer Tiefe von ca. 1,5 m eine konstante Temperatur⁷ herrscht. Die Außentemperatur, also die Temperatur am Verdampfer, bestimmt den notwendigen Energiebedarf. [Cla99] Ein wichtiger Faktor bei Wärmepumpen ist die Leistungszahl u , welche sich nach Gleichung 2.1 berechnen lässt. Typische Werte von u liegen zwischen 3 und 5. Die Leistungszahl gibt an, wie groß die Ausbeute ist, also das Verhältnis von abgeführter Wärme zur zugeführten Arbeit. (Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik)

$$u = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \quad (2.1)$$

Dabei ist T_1 die Kondensatortemperatur und T_0 die Temperatur am Verdampfer. Wie aus Gleichung 2.1 ersichtlich, ist die Leistungszahl umso besser, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator ist. [Sch60] [Cla99] Bei einer großen Temperatur am Verdampfer (z. B. bei einer Luftwärmepumpe im Sommer) kann auch eine relativ große Temperatur am Kondensator erreicht werden. Befindet sich der Verdampfer jedoch in einer kühleren Umgebung (z. B. bei einer Luftwärmepumpe im Winter oder Ausnutzung von Erdwärme) sollte die Wärmeentnahme nicht zu groß sein, um einen möglichst gute Leistungszahl gewähren zu können. Genau hier liegt auch das Problem. Will man eine Wärmepumpe als Heizgerät einer Warmwasserheizung effizient nutzen, darf keine große Vorlauftemperatur⁸ verlangt werden, was bei einer Radiatorheizung jedoch benötigt wird. Am besten können Wärmepumpen ihr Potential ausnutzen, wenn sie mit Fussbodenheizungen oder Wandheizungen betrieben werden, da hier die Vorlauftemperatur deutlich geringer ist als bei Radiatorheizungen. Auch zur Erwärmung von Wasser sind Wärmepumpen effizient einsetzbar.

2.3.4 Durchlauferhitzer und Warmwasserboiler

Generell kann man zwischen Durchlauferhitzer und Warmwasserboiler unterscheiden, wobei hier im speziellen jeweils auf die elektrische Variante eingegangen wird.

⁷unabhängig von der Jahreszeit und unabhängig von der (für Erdbohrungen relevanten) Tiefe

⁸Temperatur, welche in das Heizungsverteilsystem unmittelbar nach der Wärmequelle eingeleitet wird

Warmwasserboiler

Ein Warmwasserboiler verfügt über einen Vorratsbehälter, welcher mittels Heizschlangen erwärmt wird. Durch eine Temperaturregelung (vergleiche Kapitel 2.3.1) wird die Temperatur innerhalb eines Toleranzbandes konstant gehalten. Der Vorratsbehälter weist nur eine bestimmte Größe auf und nach Verbrauch des darin befindlichen Warmwassers muss der Behälter erst wieder mit Kaltwasser neu befüllt und erwärmt werden. Der Warmwasserboiler kommt deshalb meist nur bei kleinen benötigten Warmwassermengen zum Einsatz und wird nur noch selten verwendet. Nachteilig ist bei dieser Variante, dass das Wasser trotz Wärmedämmung wieder abkühlt und somit auch bei Nichtgebrauch ständig Energie zugeführt werden muss. [Rud99]

Durchlauferhitzer

Beim Durchlauferhitzer wird nur jenes Wasser aufgeheizt, welches im Moment benötigt wird. Dabei wird mittels eines elektrischen Leiters das Wasser in einem Rohrstück beim Durchlaufen erwärmt. Die dafür benötigte Leistung ist relativ groß, da in kurzer Zeit viel Wärme erzeugt wird. Kochendes Wasser kann durch Durchlauferhitzer nicht erzielt werden, da in der relativ kurzen Zeit des Vorbeiströmens dem Wasser zu wenig Energie zugeführt werden kann. Gegenüber dem Warmwasserboiler entfallen die Wärmeverluste für die Speicherung des Warmwassers, weshalb auch bei seltener Verwendung bzw. kleiner Wasserentnahme oftmals Durchlauferhitzer anstelle von Warmwasserboilern verwendet werden.

Durchlauferhitzer in das Energiemanagement einzubinden ist nicht sehr zielführend, da aufgrund der fehlenden thermischen Speicherung kein zusätzlicher Nutzen gewonnen werden kann.

Andere thermische Wärmeanwendungen wie beispielsweise Elektroherde verfügen einerseits über die Möglichkeit elektrische Energie thermisch zu speichern, sind andererseits jedoch nur in Betrieb, wenn tatsächlich Bedarf besteht. Eine Abschaltung, auch wenn diese nur kurzfristig stattfindet, ist meist nicht akzeptabel. Die Nutzbarkeit bei der Teilnahme am Energiemanagement ist somit kaum gegeben.

2.4 Interfaceproblematik

Für den Anschluss von Geräten an eine Kommunikationsinfrastruktur sind Schnittstellen beziehungsweise definierte Interfaces erforderlich. Ein Interface dient dem Austausch von Informationen zwischen von Geräten (Hardwarekomponenten) und/oder Programmen (Softwarekomponenten) also der Interoperabilität. Interoperabilität ist die Fähigkeit von unterschiedlichen Systemen, zusammenzuarbeiten und miteinander zu kommunizieren. Wenn Geräte untereinander ausgetauscht werden können, da die zur Verfügung stehenden Funktionen des Interfaces gleich aufgebaut sind, spricht man von Kompatibilität. Um die Interoperabilität zwischen Komponenten verschiedener Hersteller zu ermöglichen, bedarf es Standards. Dies sind einheitliche, öffentlich zugängliche Normen beziehungsweise Regeln, welche die genaue Beschaffenheit und Beschreibung der verwendeten Funktionen darstellen. Des Weiteren sind Standards herstellerunabhängig und die verwendeten Schnittstellen sind allgemein bekannt. Um ein verwendetes Interface zu vereinheitlichen, bedarf es einer genauen Beschreibung der Komponenten der Schnittstelle. Diese Arbeit zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten für verwendbare Interfaces für Energiemanagementanwendungen auf.

2.4.1 Interfaces für Energiemanagement

All die zuvor beschriebenen Bereiche wie Energieversorgung (siehe Kapitel 2.1), Gebäudeautomation (siehe Kapitel 2.2) oder Kälte- und Wärmespeicher (siehe Kapitel 2.3) lassen sich kombinieren um Synergieeffekte nutzen zu können. Kombinationen von jeweils zwei dieser Bereiche existieren bereits vereinzelt, eine Verbindung aller drei jedoch noch nicht, weshalb diese Arbeit auf die Überlappung und Vereinigung aller drei Gebiete (siehe Abbildung 2.7) abzielt.

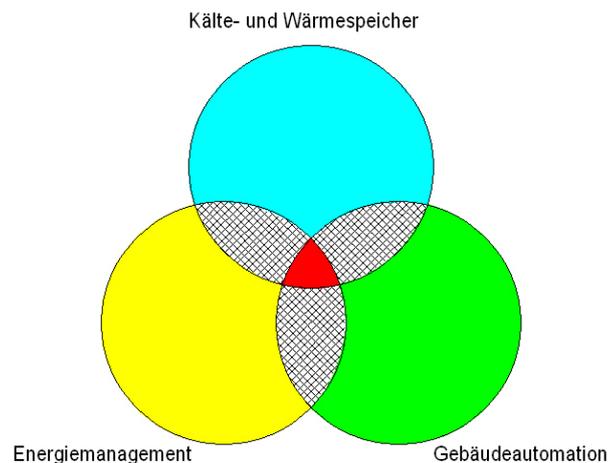


Abbildung 2.7: Darstellung des übergreifenden Zusammenspiels einzelner Themenbereiche

Ein effizientes Energiemanagement benötigt Speicher. Aufgrund der Tatsache, dass thermische Prozesse die Fähigkeit besitzen thermische Energie zu speichern und des weiteren sehr träge Systeme sind, ist es sinnvoll, sowohl Kälte- als auch Wärmespeicher in das Energiemanagement einzubeziehen. Für den erforderlichen Informationsaustausch wird eine Kommunikationsinfrastruktur benötigt, wobei auf bestehende Gebäudeautomation zurückgegriffen werden kann. Die Synergie zwischen den einzelnen Bereichen ermöglicht es, dass Verbraucher in das Energiemanagement eingebunden werden und sich somit an einer Lastverschiebung beziehungsweise einem Regelausgleich beteiligen. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, ist ein effizientes Energiemanagement von entscheidender Bedeutung. Um auch verbraucherseitig den Energieverbrauch positiv beeinflussen zu können, bedarf es einer Kommunikationsstruktur. Damit nicht zusätzliche Kosten entstehen, sollen dazu bereits bestehende Systeme verwendet werden. Dies legt Anwendungen im Bereich der Gebäudeautomation (siehe Kapitel 2.2) nahe, weil durch die Automation sowohl ein Kommunikationsnetz als auch einzelne Steueraufgaben bereits realisiert sind. Aufgrund der Tatsache, dass es nicht sinnvoll und wünschenswert ist, Geräte in das Energiemanagement einzubinden, welche bei einer Abschaltung die Lebensqualität der Nutzer herabsetzt, liegt ein Einbezug von thermischen Geräten (siehe Kapitel 2.3) auf der Hand, da diese thermische Energie speichern können.

Durch eine vernetzte Kommunikation, im speziellen zwischen Verbrauchern mit thermischen Prozessen, kann eine gezielte automatisierte Einflussnahme auf den Energieverbrauch erfolgen. Für eine erfolgreiche Kombination müssen gewisse Grundvoraussetzungen gegeben sein. Dazu gehört neben der Akzeptanz der Anwender für neue Technologien auch die Bereitschaft von Energieversorgern flexible Tarife anzubieten. Solche Tarife müssen in der Lage sein, Leistungen der Verbraucher (wie beispielsweise Beteiligung am Regelausgleich oder ei-

ner Lastverschiebung) entsprechend zu honorieren. Dadurch wird für die Verbraucher ein Anreiz geschaffen, sich am Energiemanagement zu beteiligen. Des weiteren ist eine Vernetzung möglichst vieler Einheiten erforderlich um durch den größeren Gesamtbedarf an elektrischer Energie einen größeren Wirkungsbereich sowie erhöhte Möglichkeiten einer Beteiligung am Energiemanagement zu erreichen. Für eine gut funktionierende Vernetzung von Geräten sind einheitliche und flexible Interfaces notwendig, welche speziell im Haushaltsbereich noch nicht existieren.

Leider existieren bis dato auch in der Gebäudeautomation mehrere unterschiedliche Standards. Lösungen wie z. B. X10, CEBus, LonWorks [EN 14908], EIB/KNX [EN 50090] sind bereits standardisiert, aber nicht kompatibel. Die Tatsache, dass bei der Vernetzung von Gebäuden keine Vereinheitlichung gefunden wird, erschwert die Lösungsfindung für Interfaces. Vereinzelt Lösungen für Interfaces existieren bereits, wobei einzelne, einfache Funktionen direkt im Gerät als Hardware realisiert sind und nur von Fachkräften verändert werden können. Bei komplexeren Aufgaben wird ein Mikrocontroller verwendet, welcher von einem Fachmann an die jeweilige Situation angepasst werden muss. [Nun06]

Einige Firmen arbeiten an Lösungen, um Geräte miteinander zu vernetzen und möglichst einfache Interfaces zu entwickeln. Meist sind dies jedoch „Einzellösungen“, welche manche Unternehmen entwickeln und speziell auf die Bedürfnisse ihrer Kunden anpassen. Solche Lösungsansätze funktionieren, sind aber jeweils nur mit den Produkten der jeweiligen Firma kompatibel und erlauben keine Erweiterungen mit Geräten anderer Firmen.

2.4.2 Visionärer Ausblick

Wünschenswert wären elektrische Verbraucher, welche über ein Kommunikationsinterface für Energiemanagement-Zwecke verfügen. Damit wäre nicht nur eine Abfrage des aktuellen Gerätestatus und Eingriff auf diesen möglich, sondern auch eine gezielte Einbindung in ein übergreifendes Netzwerk, wodurch eine verbraucherseitige Anpassung an das Energie-Dargebot erfolgen kann. Hier sind die Herstellerfirmen gefragt, solche Interfaces direkt in ihre Geräte einzubinden.

Eine erster Ansatz in diese Richtung ist Serve@Home. [Sie07] Idee davon ist es, dass Haushaltsgeräte ohne großen Aufwand miteinander verbunden werden können und den Komfort und die Sicherheit in Haushalten zu steigern. Ausgewählte Geräte besitzen die Möglichkeit, ein spezielles Interfacemodul zu implementieren. Über das Stromnetz erfolgt der Datenaustausch und somit kann auch in einen Bestandsbau dieses System einfach installiert werden. Über ein Informationsmodul, welches in jede beliebige Steckdose im Haus eingesteckt werden kann, erhält der Benutzer alle Informationen seiner Haushaltsgeräte. Somit kann er sich den Weg zum Gerät selbst sparen. Als Erweiterung ist auch möglich, dass der Anwender direkt die Information auf ein Schnurlostelefon erhält und damit einzelne Geräte auch steuern kann. Als Komplettlösung wird eine Steuerungseinheit mit allen wichtigen Funktionen verwendet, welche neben der Information über den aktuellen Gerätestand auch die Möglichkeit bietet sich z. B. eine Wetterprognose anzeigen zu lassen, einen elektronischen Notizzettel zu hinterlassen oder E-Mails zu verfassen. [BH05]

Serve@Home verwendet offene Standards und ist somit nicht auf eine Firma beschränkt. [BH05]

Leider handelt es sich hier offenbar eher um ein Konzept als um ein fertiges Produkt, auch wenn die Web-Präsenz [Sie07] anderes suggeriert.

Als Ziel sollte gesehen werden, dass jeweils die Vorteile verschiedener Technologien zu einer

Gesamtlösung kombiniert und standardisiert werden. Solch ein einheitlicher Standard wäre auch für die Gebäudeautomation wünschenswert und müsste flexibel auf verschiedenste Anforderungen anwendbar und leicht zu implementieren sein. Ein möglichst unkompliziertes Interface zu bestehenden Technologien ist ebenfalls Grundvoraussetzung. Das beste Interface für den Benutzer ist jenes, welches die wenigsten Anforderungen an diesen stellt. [Eva91]

Kapitel 3

Potentiale zur verbraucherseitigen Lastverschiebung

Dieser Abschnitt widmet sich vorrangig dem Demand Side Management (DSM), also dem verbraucherseitigen Energiemanagement. Ziel des DSM ist es, dass sowohl für die Energieerzeuger als auch für die Energieverbraucher Vorteile entstehen und Kosten gesenkt werden. Einerseits sollen Benutzer vom freien Energiemarkt profitieren können und den gerade aktuellen Energiepreis verrechnet bekommen. Somit sind die Kunden in der Lage ihre Energiekosten aktiv zu beeinflussen. Auf der anderen Seite profitieren auch die Energieerzeuger, da diese weniger Kraftwerke auf „Sparflamme“ laufen lassen müssen. Betrachtet man die aktuelle Entwicklung, die von steigendem Energieverbrauch und eher rückläufiger Erzeugungskapazität geprägt ist, so ist eine zuverlässige Versorgung während Spitzenzeiten in absehbarer Zeit gefährdet und der Bau neuer Kraftwerke ist sehr kostenintensiv. Durch eine Einbindung der Verbraucher in das gesamte Energiesystem ist ein effizienteres Energiemanagement möglich. [RPW+05]

Für ein effizientes DSM müssen jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein. Der Bedarf an elektrischer Energie für Einzelgeräte bewegt sich im Wattbereich. Um eine sichere Versorgung der Verbraucher mit elektrischer Energie gewährleisten zu können, müssen sowohl Energieerzeuger als auch -verteiler mit etlichen Megawatt arbeiten. Nehmen nur einzelne Geräte am Energiemanagement teil, so wirkt sich dies im Gesamtsystem kaum aus. Es ist also eine Vernetzung sehr vieler Einzelgeräte notwendig um im Verband eine Teilnahme am Energiemanagement effizient zu machen. Die Verbraucherseite muss zusätzlich Informationen über den aktuellen Energiepreis bekommen, um entscheiden zu können, wann und wie Einfluss auf den Energieverbrauch genommen werden soll. Auf Grundlage dieser Information kann eine Lastverschiebung (siehe Kapitel 3.1) eingeleitet werden. Des Weiteren muss das System in der Lage sein, den aktuellen Energiepreis weitergeben zu können. Anwendungen bzw. Geräte (gegebenenfalls auch im Verband) müssen auch in der Lage sein, den momentanen Verbrauch bei Bedarf sofort zu senken. [Wac91]

3.1 Eingriffsmöglichkeiten

Durch die Kombination von etlichen Geräten kann in das Energiemanagement eingegriffen werden. Hierbei muß man zwischen Lastverschiebung und Regelausgleich unterscheiden.

Lastverschiebung Durch Lastverschiebung kann erreicht werden, dass prognostizierte Lastspitzen (siehe Kapitel 2.1.1) durch Abschaltung von Geräten gezielt vermieden werden. Die fehlende elektrische Energie des Gerätes wird zu einer späteren Zeit, in der der prognostizierte Bedarf an elektrischer Energie geringer ist, wieder nachgeholt. Dafür bedarf es einer Speicherfähigkeit der Verbraucher. Vorrangig können thermische Prozesse (siehe Kapitel 2.3) mit guter Kälte- bzw. Wärmespeicherung dieser Anforderung gerecht werden. Eine Lastverschiebung ist nicht immer und nicht bei allen Geräten sinnvoll.

Regelausgleich Durch ständige Schwankungen der benötigten elektrischen Energie ist es erforderlich diese Änderungen auszugleichen um wieder ein Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter elektrischer Energie gewährleisten zu können. (siehe Kapitel 2.1) Auch zum Regelausgleich können Geräte der Verbraucherseite herangezogen werden und ihren Beitrag dazu leisten. In erster Linie kommen abermals thermische Prozesse (siehe Kapitel 2.3) aufgrund ihrer Speicherfähigkeit in Frage.

Eine Teilnahme am Energiemanagement ist für Anwender meist nur dann akzeptabel, wenn damit keine merkbaren Änderungen bzw. Einschränkungen verbunden sind. Im Hintergrund laufende Einflussmaßnahmen auf den Prozess werden leichter akzeptiert als eine offensichtliche zeitliche Einschränkung der Geräteverwendung. Das Fernsehgerät lässt sich kaum jemand während eines Films abdrehen, nur weil der aktuelle Strompreis gerade gestiegen ist. Bei Kühlschränken, Warmwasserboilern, Klimaanlage oder Wärmepumpen ist eine kurzfristige Abschaltung durchaus denkbar. [DDB04] Unter kurzzeitiger Abschaltung wird eine Energieunterbrechung kleiner als eine Stunde verstanden. Eine Unterbrechungen zwischen einer und zwei Stunden wird laut [Cov03] als lange Abschaltung bezeichnet.

Ansätze des DSM können sowohl im Bereich „Industrie und Gewerbe“ als auch im kleineren Rahmen, nämlich bei privaten Verbrauchern realisiert werden.

3.1.1 Beispiele zur Industrie und Gewerbe

Zur Zeit gibt es einige Pilotprojekte welche sich mit Demand Side Management (DSM) beschäftigen. Eine allgemein zufriedenstellende Lösung ist jedoch noch nicht gefunden worden.

In den Vereinigten Staaten von Amerika wurden im Auftrag von „Lawrence Berkeley National Laboratory“ einige Fallstudien durchgeführt [BHFFS06]. Dazu wurden fünf möglichst unterschiedlich Gebäude ausgewählt, welche einen großen Bereich der Vielzahl von Gebäudentypen abzudecken und widerspiegeln sollen. Aufgrund der Tatsache, dass für ein erfolgreiches Energiemanagement eine gut funktionierende Kommunikations- und Kontrolleinheit vorhanden sein muss, wurde spezielles Augenmerk auf deren Test gelegt. Anfänglich traten bei manchen Gebäuden Probleme bei der Kontrolle bzw. Kommunikation auf, welche bei einem zweiten Testlauf jedoch beseitigt werden konnten. Die Testphase betrug eine Woche.

Das Einsparungspotential, durch gezielten Eingriff in das Energiemanagement, war nur zweit-rangig. Sondertarife mit zeitlich genauer Abrechnung waren die Basis des Versuchs. Im Vorfeld

wurde der Verlauf der Energiekosten sowohl beobachtet als auch bewertet und anhand dieser Analysen ein Trend für die Testphase festgelegt. Als Einsparung wurde der Unterschied zwischen dem vorhergesagten elektrischen Energieverbrauch und dem tatsächlich gemessenen Verbrauch an elektrischer Energie betrachtet. Mindestens alle fünfzehn Minuten wurde eine Messung durchgeführt und anhand dieser Ergebnisse Aktionen gesetzt. Zwei Preisschwellen wurden festgelegt, bei denen ein Handlungsbedarf besteht. Bei Überschreiten von $0,3 \frac{\$}{kWh}$ entschied man sich für ein sanftes Einschreiten, wohingegen bei Erreichen eines Preises für elektrische Energie von über $0,75 \frac{\$}{kWh}$ drastischere Maßnahmen eingeleitet wurden. Diese festgelegten Schwellen sind beliebig festgelegt worden und galten für alle fünf Gebäude in gleicher Weise. Alleine die eingeleiteten Schritte waren bei den verschiedenen Gebäuden unterschiedlich. (siehe Tabelle 3.1)

Beim ersten ausgewählten Gebäude handelte es sich um einen Supermarkt mit inkludierter Klimaanlage. Die benötigte Spitzenleistung beträgt ca. 400 kW. Bei diesem Objekt sah man elektrisches Einsparungspotential in der Beleuchtung und entschied sich deshalb ab einem Preis für elektrische Energie von $0,3 \frac{\$}{kWh}$ das Licht um 50% zu reduzieren. Erreichte der Preis pro bezogene Kilowattstunde einen Wert von über $0,75 \$$, so wurde zusätzlich die Türheizung, welche zur Reduktion der Feuchtigkeit dient, in den Nachtmodus geschaltet. Innerhalb eines Tages war das Demand Side Management (DSM) durchschnittlich vier mal aktiv und brachte eine Einsparung von ca. 40 kW, was 10% der gesamt benötigten Gebäudeenergie entspricht. (siehe Tabelle 3.1)

Ein großes Bankgebäude war ebenfalls Teil des Feldversuches. Die benötigte Spitzenleistung, ohne installierter Klimaanlage, betrug für dieses Objekt ca. 1000 kW. Nach Erreichen der ersten Schwelle wurden Ventilatoren für zu und Abluft von der Drehzahl reduziert. Die Einsparung betrug nur ca. 10 kW, also 1% der Spitzenleistung. Das DSM war dreimalig aktiv. Die nur sehr kleine Reduktion der elektrischen Energie ist dadurch begründet, dass die Ventilatoren tatsächlich einen größeren Bedarf an elektrischer Energie hatten als zuvor angenommen. Das Modell war also nicht passend gewählt, weshalb das errechnete Einsparungspotential nicht aussagekräftig war. (siehe Tabelle 3.1)

Bei einem Regierungsbürogebäude mit Klimaanlage beträgt die benötigte Spitzenleistung ca. 2700 kW. Bei diesem Gebäude nahm man Einfluss auf Raumtemperatur. Ab einem momentanen Energiepreis von $0,3 \frac{\$}{kWh}$ wurde die Heizung von 21°C auf 20°C reduziert. Um beim Einsatz einer Klimaanlage eine Einsparung erwirken zu können, muss eine höhere Temperatur als ursprünglich vorgesehen, zugelassen werden. Dies war auch hier der Fall. Von 22°C wurde die Temperatur auf 24°C angehoben. Ab dem Erreichen des nächsten Energiepreises wurde abermals die Temperatur verändert. Dies wirkt sich bei der Heizung durch eine Veränderung von 20°C auf 19°C und bei der Kühlung von 24°C auf 26°C aus. Zur Realisierung standen regelbare Ventilatoren und Pumpen zur Verfügung. Es stellte sich heraus, dass eine Veränderung der Temperatur nicht immer zum gewünschten Ziel führte, da die Temperatur fallweise schon im neuen Toleranzband war und somit keine Abschaltung erfolgen konnte. Trotzdem konnte eine Energieeinsparung von ca. 250 kW erzielt werden, was 9% entspricht. (siehe Tabelle 3.1)

Beim Pilotprojekt eines pharmazeutischen Labors handelte es sich um ein Gebäude ohne Klimaanlage mit einer Spitzenleistung von ca. 700 kW. Als Energieeinsparungsmaßnahme entschied man sich in diesem Fall für eine gezielte Abschaltung von Ventilatoren. Als erster Schritt wurde die Hälfte der Zuluftventilatoren abgeschaltet. Bei einem abermaligen Preisanstieg der elektrischen Energie wurden zusätzlich zur Reduktion der Zuluftventilatoren auch die Hälfte der Abluftventilatoren deaktiviert. Ein Ersparnis von ca. 100 kW also 14% konnte durch diese Maßnahme erzielt werden. (siehe Tabelle 3.1)

In einer Universitätsbibliothek wurde ein weiterer Eingriff in das Energiemanagement untersucht. Es handelte sich um ein Gebäude mit einer Klimaanlage und einer Spitzenleistung von ca. 850 kW. Die Drehzahl der Ventilatoren wurde auf 70% reduziert und dafür Lüftungsklappen geöffnet, wenn eine Erhöhung des Preises für elektrische Energie auf $0,3 \frac{\$}{kWh}$ festgestellt wurde. Bei $0,75 \frac{\$}{kWh}$ entschied man sich dazu, die Drehzahl der Ventilatoren auf 60% zu reduzieren. Die dadurch eingesparte Leistung betrug ca. 130 kW also 15%. Im Anschluss an die Drehzahlreduktion trat jedoch ein Mehrbedarf an elektrischer Energie von ca. 40 kW auf, um die zuvor versäumte Kühlung wieder nachzuholen. (siehe Tabelle 3.1)

Ein anderes Pilotprojekt zeigte anhand eines Universitätsgebäudes, dass nach genauer Analyse des Elektrizitätsbedarfs 1840 kWh pro Tag eingespart werden können. Dies wurde dadurch erreicht, dass die Ventilatoren in der Nacht auf 50% reduziert wurden. Des Weiteren konnte eine Abkühlung des Gebäudes durch Schließen der Dampfklappen in der Nacht verhindert werden. Alleine durch diese Maßnahmen konnte der elektrische Energieverbrauch um ca. 14% gesenkt werden. Der Spitzenverbrauch ist um 16% gesunken. Diese Einsparungen sind vor allem durch eine effiziente Beleuchtung und der Optimierung von Dampfklappen und Ventilatorenreduktion erklärt. Eine Abschaltung von nicht benötigter Beleuchtung, sowie nicht benötigten Geräten und Energiesparmoden von Druckern, Kopierern und Computern reduzierte den Verbrauch um 6,5%. Eine Einbindung von Kälte- und Wärmegeräten erzielte eine Einsparung von 9,7%. Nach einem einwöchigen Test konnte durch eine Kombination aus beiden Einsparungsmöglichkeiten im Durchschnitt eine Reduktion von 14,1% gemessen werden. Die somit entstandene Verminderung des Verbrauches rührte sowohl aus der Energieeinsparung als auch der Lastspitzenvermeidung. Des Weiteren wurden durch diese Optimierungsmaßnahmen Arbeitsstunden eingespart. [MPKD03]

Tabelle 3.1: Lastverschiebungspilotprojekte [BHFFS06]

	Spitzenlast kW	Energiepreis		Einsparung	
		$0,3 \frac{\$}{kWh}$	$0,75 \frac{\$}{kWh}$	kW	%
Supermarkt	400	Lichtreduktion um 50%	Türheizung auf Nachtmodus	40	10
Bankgebäude	1000	Drehzahl der Ventilatoren reduzieren		10	1
Regierungsbüro	2700	Heizung von 21 °C auf 20 °C reduzieren, Kühlung von 22 °C auf 24 °C ändern	Heizung von 20 °C auf 19 °C reduzieren, Kühlung von 24 °C auf 26 °C ändern	250	9
Labor	700	Hälfte der Zuluftventilatoren abschalten	Hälfte der Zu- und Abluftventilatoren abschalten	100	14
Bibliothek	850	Ventilatoren auf 70% Drehzahl reduzieren	Ventilatoren auf 50% Drehzahl reduzieren	130	15

Fazit

Die Pilotprojekte haben gezeigt, dass es sehr viel leichter ist Daten über ein gesamtes Gebäude zu sammeln als einzelne Verbraucher zu analysieren. Es gibt bereits Energieinformationssysteme (EIS), welche in der Lage sind, den Energieverbrauch von Gebäuden aufzuzeigen, zu analysieren und auch über das Internet zu versenden. Eine Studie, welche auf der Befragung von Energiemanagern und den Benutzern von EIS basiert, hat gezeigt, dass die benötigte Gebäudeenergie um 5 bis 20% reduziert werden kann. [MPKD03]

Das Einsparungspotential kann noch zusätzlich gesteigert werden. Zum Einen wurden die Messungen des Pilotprojektes im November durchgeführt. Zu dieser Zeit sind aufgrund der geringeren Außentemperaturen kaum Klimaanlageanlagen im Einsatz. Zum Anderen ist ein aggressiverer Ansatz denkbar, welcher den Verbrauch von elektrischer Energie zu Zeiten hoher Energiepreise noch zusätzlich senkt. [MPWS04]

Der Bereich Industrie und Gewerbe benötigt rund 40% der gesamten zur Verfügung stehenden elektrischen Energie. Für 60% der Unternehmer sind die Energieeffizienz und das Energiesparen aktuelle Themen. Je größer das Unternehmen ist, desto wichtiger werden diese Punkte, da mit der Firmengröße auch die benötigte Energie steigt. Einsparungspotentiale werden vor allem in den Bereichen der Beleuchtung und bei Motoren für Pumpen und Ventilatoren gesehen. Bei den Antrieben wird versucht den Wirkungsgrad zu erhöhen und Leerlaufphasen zu reduzieren. Triebkraft des gezielten Energiemanagements ist die Reduzierung der Kosten. [Brü05], [KFW07]

Innovative Ansätze

Einzelne Pilotprojekte haben bereits gezeigt, dass speziell bei großen Unternehmen und Gewerben viel elektrische Energie benötigt wird, diese aber auch gezielt reduziert werden kann. Zukünftig wird nicht nur eine Reduktion von Energie angestrebt, sondern auch die Möglichkeit der Lastverschiebung beziehungsweise der Einbindung von Verbrauchern in den Regelausgleich. Erste Ansätze in diese Richtung sind Lastwächter, welche verhindern, dass zu viel elektrische Energie vom Energieanbieter zu einem höheren Energiepreis bezogen werden.

Durch eine Einbindung von thermischen Prozessen, welche in der Lage sind, Wärme bzw. Kälte zu speichern, ist ein effizientes Eingreifen in das Energiemanagement möglich. Speziell Prozesse mit relativ geringen Anforderungen an die Temperaturgenauigkeit und Zweipunktregelsystemen mit einer großen Bandbreite können herangezogen werden. Gerade in der Industrie befinden sich etliche Anlagen, welche Kühl- und/oder Wärmeprozesse inkludieren. Diese Anlagen stellen aufgrund ihres meist enormen Ausmaßes und großen Leistungsbedarfs eine gute Möglichkeit dar, elektrische Energie in Form von thermischer Energie zu speichern. Ein kurzfristiges Abschalten solcher Geräte im Sekundenbereich um einen Regelausgleich im Sinne der Primärregelung (siehe Kapitel 2.1.1) zu erzielen, stellt meist kein Problem dar. Aufgrund des hohen Bedarfs an elektrischer Energie kann bereits durch eine kurze Abschaltung weniger Großverbraucher ein Regelausgleich erfolgen. Eine längerfristige und geplante Lastverschiebung zur Vermeidung von Lastspitzen ist bei thermisch unproblematischen Aufgaben auch denkbar.

Der Gewerbebereich bietet auch Möglichkeiten an der Teilnahme am Energiemanagement, da hier viele thermisch unkritische Prozesse inkludiert sind. Dadurch ist nicht nur ein Regelausgleich möglich, sondern auch eine gezielte Lastverschiebung. Speziell bei Klimaanlageanlagen, Kühlsystemen, Heizungssystemen und der Warmwasseraufbereitung kann aufgrund der thermischen Speicherwirkung auf vorhersehbare Lastspitzen reagiert und somit vermieden

werden. Der energetische Mehrbedarf, welcher im Anschluss zur Wiederherstellung des Normalbetriebs erforderlich ist, wird dann zu einem Zeitpunkt in Anspruch genommen, wo keine Lastspitzen auftreten.

3.1.2 Privathaushalte

Im privaten Bereich sind zur Zeit leider noch kaum Möglichkeiten gegeben, beim Energiemanagement mitzuwirken. Lediglich die Verwendung eines Tonfrequenzrundfunkempfängers (siehe Kapitel 2.1.2) ist möglich, mit welchem Lastspitzen etwas gedämpft und der Marktpreis an die Kunden weitergeben werden kann. Eine geschätzte Einsparung von nur 2,7% für den Verbraucher bietet jedoch wenig Anreiz für einzelne Kunden. [Kup06]

Ein Haushalt alleine kann aufgrund seines verhältnismäßig geringen Energieverbrauches nicht sehr viel zum Regelausgleich bzw. zur Lastverschiebung beitragen. Es muss jedoch die Möglichkeit der Kombination vieler Einzelkunden gesehen werden. Auch durch die Tatsache, dass fast alle Haushalte über ein oder mehrere thermische Geräte wie zum Beispiel

- Kühlgeräte wie Kühlschrank, Gefrierschrank (siehe Kapitel 2.3.1)
- eine Klimaanlage (siehe Kapitel 2.3.2)
- eine Wärmepumpe (siehe Kapitel 2.3.3)
- einen Durchlauferhitzer (siehe Kapitel 2.3.4)

besitzen, erhöht, bedingt durch die Summe von vielen Einzelgeräten, die Möglichkeiten der Lastverschiebung und des Regelausgleiches.

3.2 Simulation von thermischen Prozessen

Aufgrund der Tatsache, dass sehr viele thermische Prozesse im elektrischen Netz existieren und diese wegen ihrer Trägheit gut zur Speicherung von thermischer Energie verwendet werden können, macht es Sinn, diese Prozesse genauer zu betrachten. Das hier erarbeitete Modell gilt für viele Anwendungen wie beispielsweise Kühlschränke, Kühlräume, Getränkeautomaten mit Kühlung, Eiswürfelbereiter, Gefriertruhen und -schränke, Bierzapfanlagen, Speiseeisherstellung, Fischkühler, Kühlvitriolen, Laborkühlgeräte, Klimageräte, Wärmepumpen, Warmwasserboiler, Aufgrund der Tatsache, dass anhand eines Kühlschranks eine Interfacevariante realisiert wird, werden die Modellparameter so eingestellt, dass ein Kühlgerät simuliert wird. Ein direkter Vergleich zwischen Simulation und Messung ist somit möglich.

3.2.1 Simulationsmodell

Damit eine realistische Simulation erfolgen kann, ist ein dem realen System möglichst nahekommenes Modell zu entwerfen. Aufgrund der Tatsache, dass ein Kühlgerät aus einer Menge an temperaturspeichernden Elementen als auch Wärmeverluststellen besteht, ist eine genaue Modellierung relativ kompliziert. Die einzelnen Parameter können zwar aufgestellt

werden, doch die Bestimmung und Messung dieser stellt sich als schwierig dar. So können beispielsweise die tatsächlichen Wärmeverluste bei der Umformung von elektrischer Energie in thermische Energie, die auftretenden Wärmeverluste durch die Gerätetür und jene durch die Isolation kaum genau bestimmt werden. Aus diesem Grund müssen einige Vereinfachungen getroffen werden und alle speichernden Elemente zu einem einzelnen zusammengefügt werden sowie alle Wärmeverluste ebenfalls auf einen reduziert werden. Mit dieser Vereinfachung entsteht ein elektrisches Ersatzschaltbild nach Abbildung 3.1. Dabei stellt der Kondensator

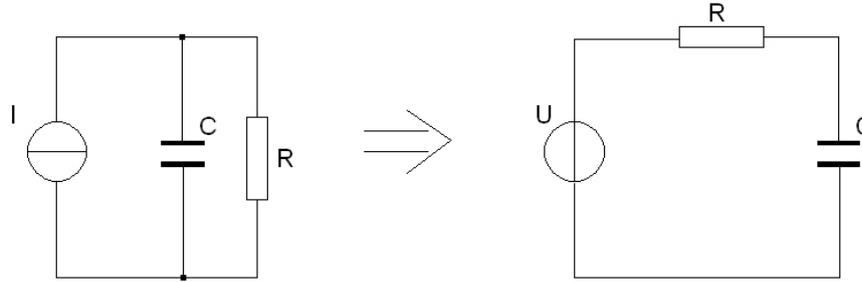


Abbildung 3.1: vereinfachte, elektrische Ersatzschaltung eines Kühlgerätes

C den thermischen Speicher dar und der Widerstand R modelliert die thermischen Verluste. Es bestehen folgende Beziehungen:

- Strom I entspricht dem Wärmestrom ϕ
- Spannung U entspricht der Temperatur ϑ

Aufgrund der Tatsache, dass der Wärmestrom ϕ mit der zugeführten elektrischen Leistung P , vermindert um den Wirkungsgrad η , äquivalent und somit konstant ist, ist die Energiezufuhr der Ersatzschaltung eine Stromquelle. Diese wiederum kann in eine Spannungsquelle umgewandelt werden (siehe Abbildung 3.1).

Die genäherte Ersatzschaltung nach Abbildung 3.1 stellt die Regelstrecke des Simulationsmodell dar. Zusammen mit dem Zweipunktregler entsteht ein geschlossener Regelkreis, welcher simuliert werden kann. Dafür ist die Kenntnis der Übertragungsfunktion $G(s)$ der Strecke erforderlich. Mithilfe von Abbildung 3.2 und den Kirchhoff-Regeln können die Gleichungen 3.1 und 3.2 aufgestellt werden.

$$x(t) = i(t) \cdot R + y(t) \quad (3.1)$$

$$i(t) = C \cdot y'(t) \quad (3.2)$$

Mit Hilfe der Laplace-Transformation erhält man die Übertragungsfunktion $G(s)$ (siehe Gleichung 3.3) der Regelstrecke.

$$G(s) = \frac{Y}{X} = \frac{\frac{1}{R \cdot C}}{\frac{1}{R \cdot C} + s} = \frac{1}{1 + s \cdot T} \quad (3.3)$$

Die in Gleichung 3.3 berechnete Regelstrecke stellt ein PT_1 -Element dar. Die erforderliche Zeitkonstante τ wurde mit 3500 Sekunden so gewählt, dass die Simulationsergebnisse mit den in Kapitel 5.2 dargestellten Messergebnissen, verglichen werden können.

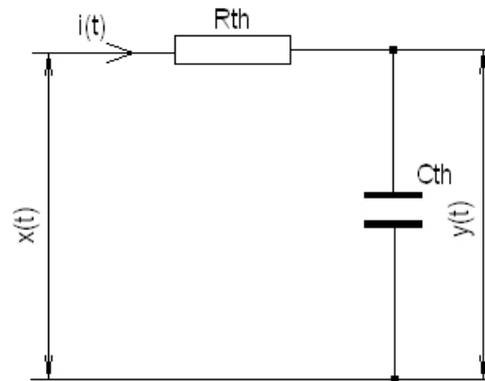


Abbildung 3.2: Bestimmung der Übertragungsfunktion

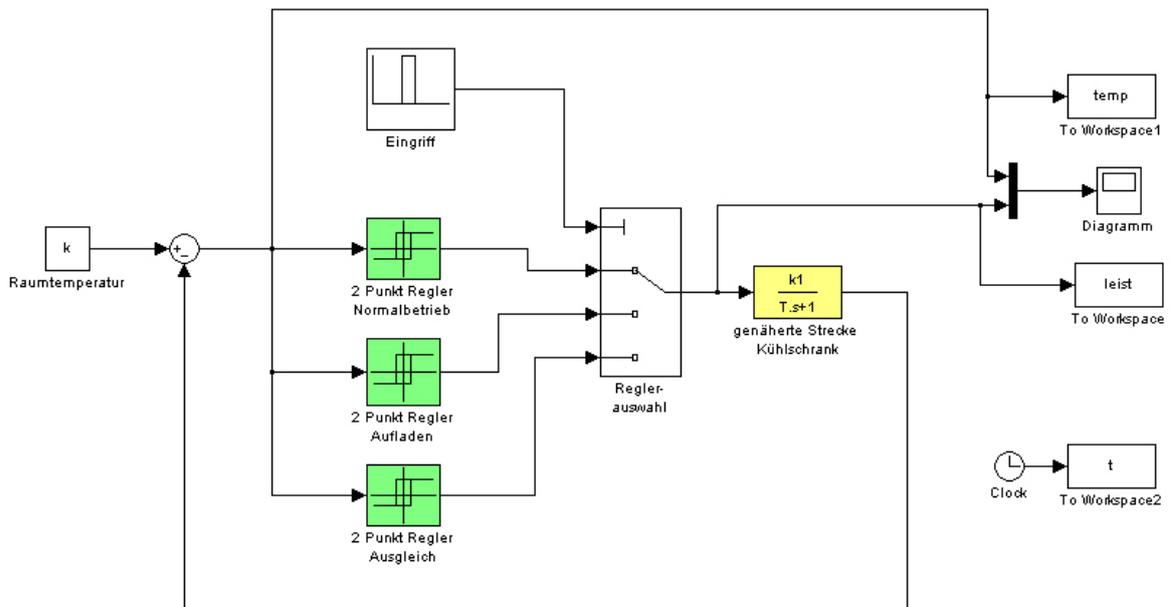


Abbildung 3.3: Modell für die Simulation

Der Zweipunktregler für die Temperatur stellt ein nichtlineares Element dar. Abbildung 3.3 zeigt das verwendete Simulationsmodell. Für eine effiziente Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement sind verschiedene Reglereinstellungen erforderlich, was in Abb. 3.3 durch drei verschiedene Regler modelliert ist. Die Auswahl erfolgt durch einen vorher festgelegten Zustand über die Blöcke *Eingriff* und *Reglerauswahl*.

3.2.2 Betriebszustände

Normal Zum Großteil der Zeit befindet sich das System im *Normalzustand*. Der Normalzustand ist übliche Funktionsweise des Kühlschranks. Die Einstellungen der Temperaturschwellen für die Zweipunktregelung ist gut an die Bedürfnisse des Kühlgutes angepasst. Für die Simulation wurden die Grenzwerte, welche eine Schalthandlung veranlassen, mit den Werten $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ festgelegt, da dies einem typischen Temperaturbereich für einen Kühlschrank darstellt. Der daraus resultierende Temperaturverlauf sowie die Schaltzustände sind aus den Abbildungen 3.5, 3.4, 3.6 ersichtlich. Die Schaltzustände stellen die jeweils benötigte elektrische Leistung normiert auf eins dar.

Aufladen Damit die Speicherfähigkeit des Kühlschranks möglichst gut ausgenutzt werden kann, wird kurzfristig mehr elektrische Energie zugeführt und damit das Gerät quasi aufgeladen. Dies wird durch eine Veränderung der Schaltschwellen des Zweipunktreglers realisiert. Für die Simulation wurde, wie aus Abbildung 3.4 ersichtlich, eine Verschiebung der ursprünglichen Temperaturwerte um 3 K vorgenommen. Die neuen Werte liegen nun bei $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Impuls für das Aufladen wurde nach 40 Minuten gesetzt. Nach 25

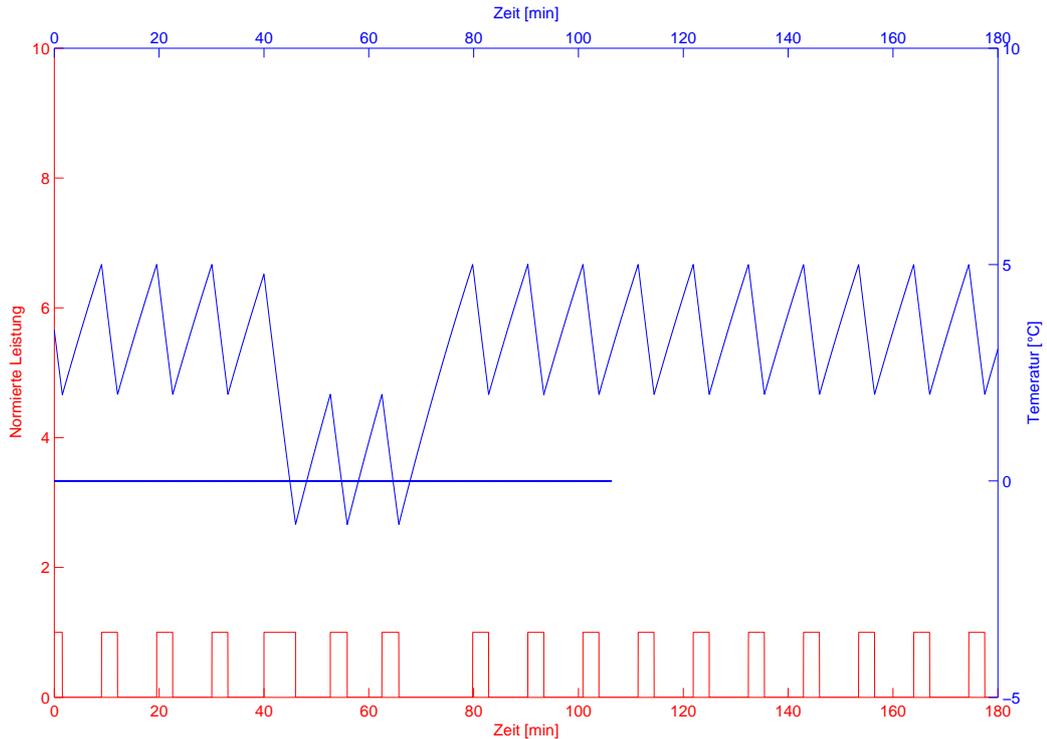


Abbildung 3.4: Simulation einer Aufladung

simulierten Minuten in dieser Betriebsart wurde wieder zum Normalbetrieb zurückgekehrt. Aufgrund der gewünschten tieferen Temperatur muss mehr elektrische Leistung zugeführt werden, was durch einen längeren Impuls bei 40 Minuten ersichtlich ist. Solange nicht in den Normalbetrieb zurückgekehrt wird, wird die tiefere Temperatur gehalten und somit pendelt

der Wert zwischen den neu gewählten Schwellen. Durch einen neuen Impuls kehrt das System wieder in den ursprünglichen Zustand zurück. Die im Gerät gespeicherte thermische Energie steht nun zur Verfügung und ermöglicht, dass der Kühlschrank für eine etwas längere Zeit nicht eingeschaltet werden muss um im Temperaturbereich zu bleiben. Der größere Abstand zwischen 70 und 80 Minuten verdeutlicht diesen Effekt.

Je nachdem, wo der Impuls zum Rückkehren in den Ursprungszustand kommt, kann mit den eingestellten Parametern ein Einschalten um zirka 10 bis 15 Minuten hinausgezögert werden. Bei einer Umschaltung der Betriebsart im ungünstigsten Fall, also wenn gerade der obere Schwellwert erreicht ist, kann kein Zeitgewinn erzielt werden, da dieser Temperaturpunkt der unteren Schwelle des Normalbetriebs entspricht. Ein gut gewählter Schaltzeitpunkt ist also ausschlaggebend für eine effiziente Realisierung.

Ausgleich Für einen gewollten Ausgleich wird der dritte Zweipunktregler verwendet. Dieser erwirkt durch eine Verschiebung der Grenzwerte nach oben, also zu höheren Temperaturen, ein frühzeitiges Abschalten des Gerätes. Die verwendeten Werte betragen $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (siehe Abbildung 3.5). Dauert der Vorgang länger, bleiben die Einstellungen für den Aus-

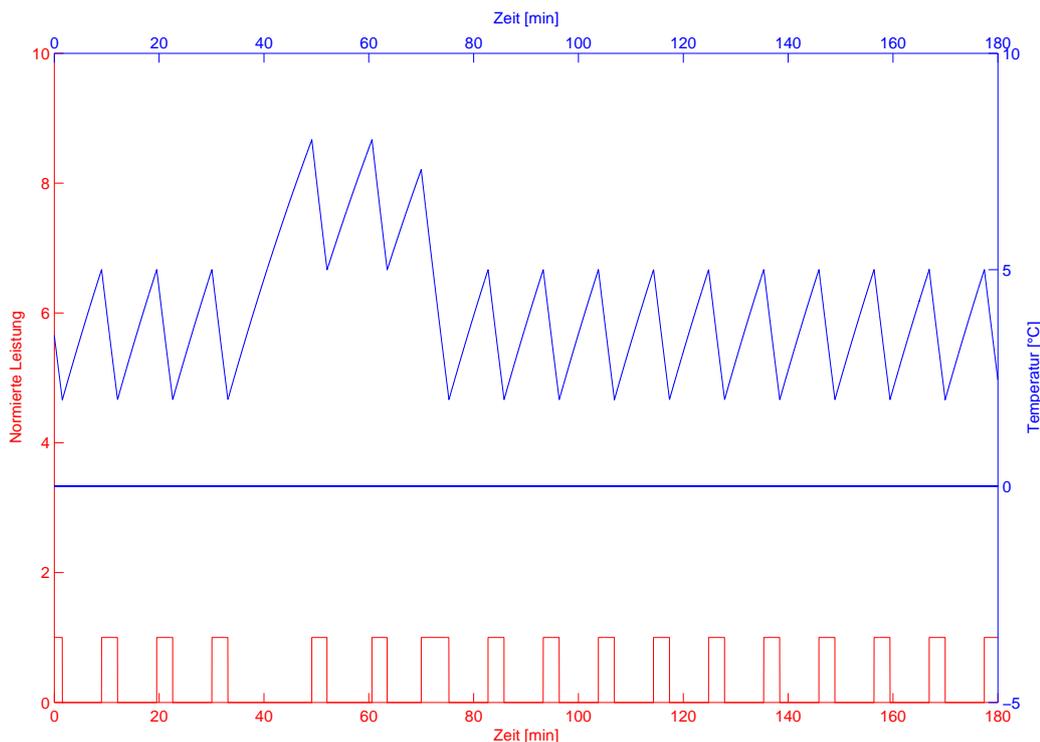


Abbildung 3.5: Simulation eines Ausgleichvorgangs

gleichsregler aktiv und es wird durch eine Wiedereinschaltung verhindert, dass das Kühlgut zu stark erwärmt und somit beschädigt wird.

Eine Mithilfe der Primärregelung (siehe Kapitel 2.1.1), welche sich nur im Sekundenbereich abspielt, hat keine Auswirkung auf das träge thermische System. Im Falle einer Beteiligung an der Sekundärregelung oder einer Lastverschiebung kann erwirkt werden, dass das Gerät

für längere Zeit nicht eingeschaltet wird. Beim verwendeten Simulationsmodell tritt ein Impuls nach 35 Minuten auf. Durch die Temperaturerhöhung kann zirka ein 10 bis 15 minütiges Abschalten des Kühlschranks erwirkt werden. Auch hier ist die Wahl des Schaltzeitpunktes von entscheidender Bedeutung für den Erfolg. Im ungünstigsten Fall wirkt sich der Eingriff nicht aus.

Idealeingriff

Ist eine verbraucherseitige Teilnahme am Energiemanagement genau auf das Gerät angepasst beziehungsweise abgestimmt, kann in Hinsicht auf eine Lastverschiebung ein optimaler Erfolg durch eine lange Ausschaltung erzielt werden. Dazu ist es erforderlich, dass die aktuelle Gerätedaten als Information zur Verfügung stehen.

Damit eine lange Ausschaltung realisiert werden kann ohne das Kühlgut zu beeinträchtigen, ist es sinnvoll, dem Gerät zuerst zusätzliche elektrische Energie zuzuführen und gleich darauf den Ausgleichvorgang einzuleiten. Dadurch entsteht die größtmögliche Temperaturbandbreite, was eine große Zeitspanne der Erwärmung zur Folge hat. Abbildung 3.6 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Durch die Schalthandlungen jeweils bei den Extremwerten kann ein

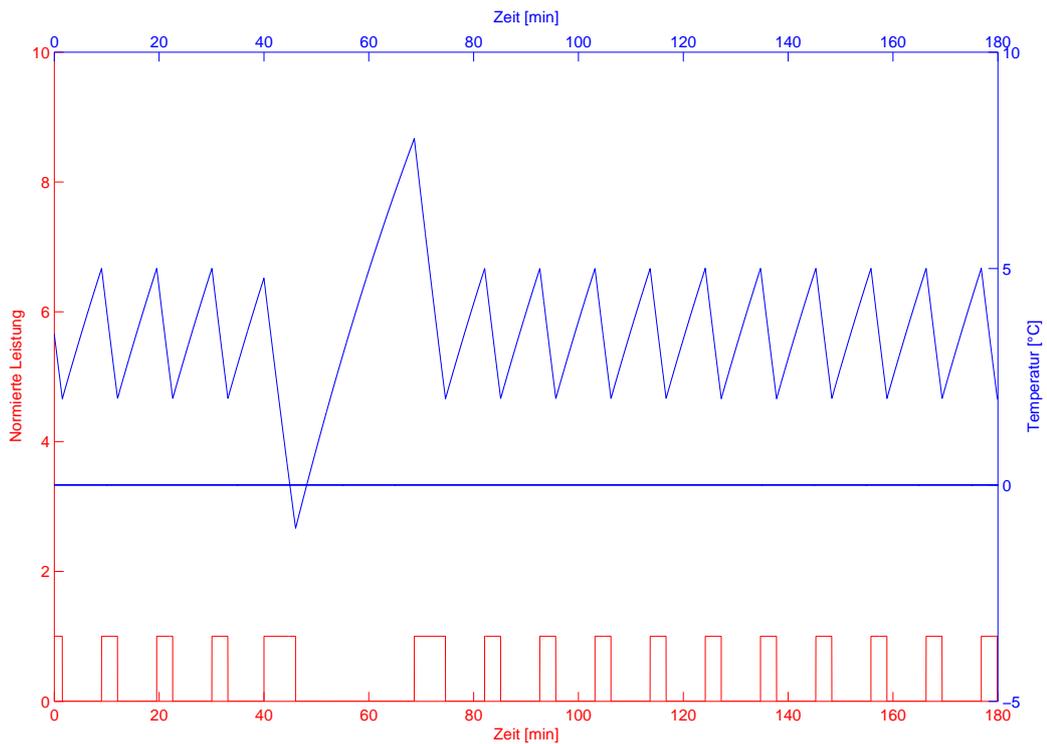


Abbildung 3.6: Simulation eines Idealeingriffs

Zeit von zirka 20 Minuten überbrückt werden. Dies entspricht mehr als der doppelten Stillstandszeit im Normalbetrieb.

Lastverschiebung

Ein effizienter Eingriff in das Energiemanagement kann nur durch eine Kombination vieler Einzelverbraucher zu einem großen Verbund erfolgen. Dadurch wird ein große Gesamtlast gebildet, welche nennenswerten Einfluss auf das gesamte Versorgungsnetz haben kann. Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen eine Simulation von 110 Kühlschränken. Die jeweiligen Geräteparameter wie beispielsweise die Wärmezeitkonstante τ_{th} , die Schaltschwellen der Geräte als auch die Raumtemperatur wurden jeweils verändert um unterschiedliche Geräte wiederzuspiegeln. Die ersten drei Teilbilder von 3.7 und 3.8 zeigen stellvertretend vier verschiedene Kühlschränke. Die elektrische Leistung wurde dabei auf eins normiert, da davon ausgegangen werden kann, dass die elektrische Anschlussleistung von Kühlschränken annähernd als gleich betrachtet werden kann. Das letzte Teilbild stellt den Summenverlauf der elektrischen, normierten Leistungen dar. Die Schwankungen im Summenverlauf kommen durch die Simulation von verschiedenen Geräten zustande, welche mit Parameterveränderungen erwirkt wurde. Jedes Gerät schaltet aufgrund seiner aktuellen Temperatur und den vorgegebenen Temperaturschwellen zu einem anderen Zeitpunkt ein beziehungsweise aus.

Abbildung 3.7 zeigt die Möglichkeiten einer möglichst effektiven Teilnahme am Energiemanagement durch eine Lastverschiebung. Dies wurde durch eine gezielte Veränderung der Regelparameter, bei allen Geräten gleichzeitig, erzielt. Kurz vor dem gewünschten Verschiebungszeitpunkt wurde den Kühlschränken für eine Zeitspanne von zirka 10 Minuten (durch eine Veränderung der Temperaturschwellen nach unten) zusätzliche Energie zugeführt. Dies kann auch in Abbildung 3.7 erkannt werden. In dieser Zeit speichert das Gerät thermische Energie. Anschließend wurde in den Betriebszustand *Ausgleich* gewechselt. Dies entspricht dem in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Verhalten. Nach ungefähr 30 Minuten erfolgte wieder ein Übergang in den Normalzustand. Aus Abbildung 3.7 kann erkannt werden, dass durch diesen gezielten Eingriff eine allgemeine Abschaltung der Geräte für zirka zwanzig Minuten erwirkt werden konnte. Danach haben einzelne Geräte wieder ihr oberes Limit erreicht und schalten sich wieder ein um das Kühlgut vor zu hoher Temperatur zu schützen. Die benötigte elektrische Leistung ist jedoch auch für die nächsten Minuten noch deutlich geringer als im Normalbetrieb. Der anschließend erhöhte Energiebedarf kommt daher zu Stande, dass alle Geräte wieder ihre Normaltemperatur erreichen müssen und somit länger in Betrieb sind (Lastverschiebung).

Natürlich sind dem System auch Grenzen gesetzt und die Lastverschiebung kann nicht dazu benutzt werden, Geräte beliebig lange vom Versorgungsnetz zu trennen. Die gewählten Zeiten müssen in einem realistischen Bereich liegen, ansonsten sind die Auswirkungen des Eingriffes in das Energiemanagement eher gering. Abbildung 3.8 zeigt ein Beispiel eines Eingriffes mit sehr langer Verschiebedauer, so dass einzelne Geräte immer wieder aktiv werden müssen um das Kühlgut nicht zu beschädigen. Dadurch, dass verschiedene Kühlgeräte wieder einschalten, verringert sich jene Zeit, wo alle Geräte inaktiv sind. Es wurde sowohl die Zeit für das Aufladen, als auch jene für den Ausgleich, gegenüber der vorherigen Simulation, verdoppelt. Eine zusätzliche Zufuhr an elektrischer Energie ist in Abb. 3.8 erkennbar, wirkt sich aufgrund der langen Phase des Aufladebetriebs nicht mehr unmittelbar auf die Lastverschiebung aus. Durch die ebenfalls sehr lang gewählte Zeit der gewünschten Ausgleiches müssen immer wieder verschiedene Geräte eingeschaltet werden um das Kühlgut zu schützen. Dadurch kann nur für eine relativ kurze Zeit von zirka 10 Minuten eine gänzliche Abschaltung vieler Geräte erreicht werden.

Für einen optimalen Eingriff in das Energiemanagement sind die Parameter der Verbraucher

in die Entscheidung der Abschaltung mit einzubeziehen. Ist dies der Fall, so kann durch eine Kombination bzw. Vernetzung vieler Einzelverbraucher ein gutes Ergebnis erzielt werden.

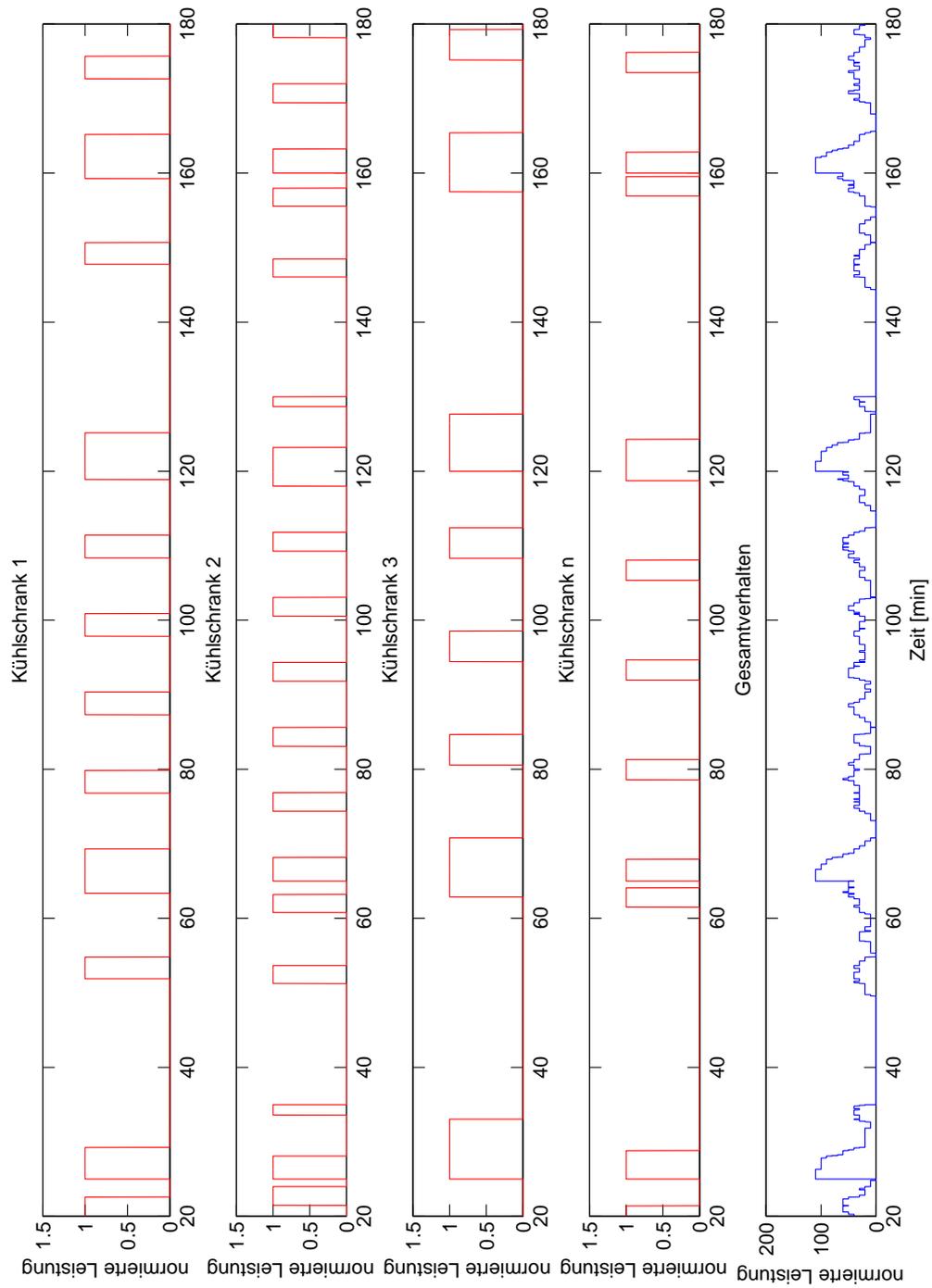


Abbildung 3.7: Simulation Lastabwurf

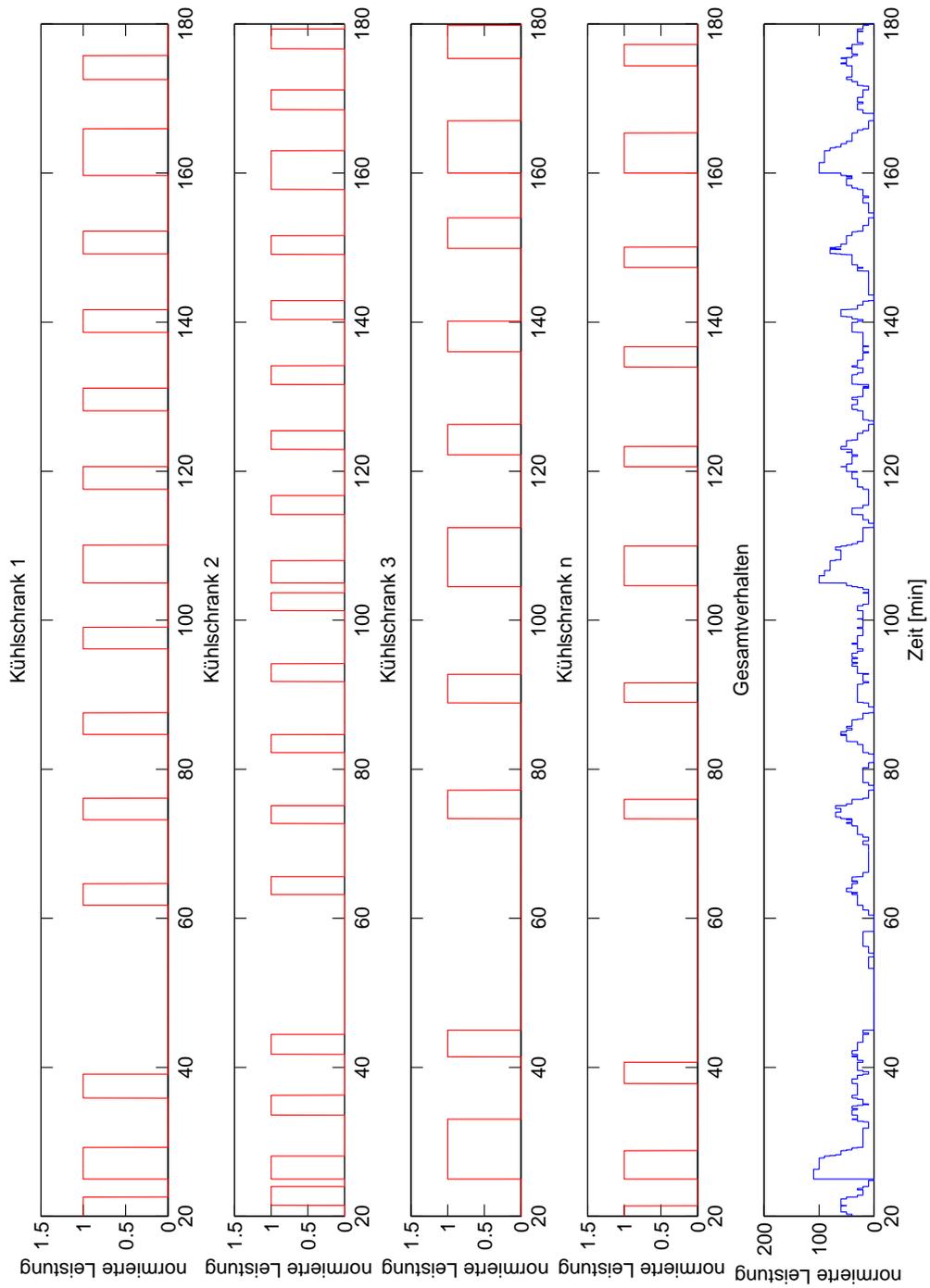


Abbildung 3.8: Simulation einer langen Lastverschiebung

Kapitel 4

Interfacevarianten zur Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement

Um eine Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement zu ermöglichen, ist es erforderlich, dass die eingebundenen Geräte Informationen zum Ein- bzw. Ausschalten mitgeteilt bekommen. Je mehr Möglichkeiten zur Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement bestehen, desto größer sind die Anforderungen an die informationsverarbeitende Einheit der Geräte. Wünschenswert wäre eine Interface, welches bereits in den Geräten implementiert ist. Ein solches Interface ermöglicht eine Kommunikation mit einer Koordinationseinheit, welche die Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement koordiniert. Da zur Zeit noch keine Verbraucher mit einem Kommunikationsinterface ausgestattet sind, müssen andere Möglichkeiten gefunden werden, um einzelne Geräte mit Informationen für eine Teilnahme an einer Lastverschiebung oder zur Beteiligung am Regelausgleich zu veranlassen. Nachstehend wird auf Möglichkeiten der Einbeziehung von Verbraucher in das Energiemanagement mit bereits bestehenden Geräten genauer eingegangen.

4.1 Zeitschaltuhr

Bereits mit sehr einfachen Mitteln wie einer Zeitschaltuhr ist ein verbraucherseitig eine Teilnahme am Energiemanagement möglich. Mit Hilfe einer Zeitschaltuhr kann man eine Lastverschiebung von einzelnen Verbrauchern erzwingen. Durch die von der Zeitschaltuhr veranlassten Trennung vom Versorgungsnetz während einer bestimmten Zeitspanne wird das Gerät abgeschaltet. Zu einem späteren Zeitpunkt, nämlich genau dann, wenn die Zeitschaltuhr wieder einschaltet, wird die durch die vorangegangene Abschaltung fehlende Energie wieder zugeführt. Dies äußert sich durch einen längeren Betrieb des Gerätes als ursprünglich, um wieder in den gewünschten Temperaturbereich zu gelangen. Durch gezielte Programmierung beziehungsweise Einstellung der gewünschten Ein- und Ausschaltzeitpunkte können also Lastspitzen vermieden werden. Dazu ist es erforderlich, dass das prognostizierte Lastprofil (siehe Kapitel 2.1.1) dem Kunden bekannt ist. Mit der Kenntnis der erwarteten Zeitspannen von Lastspitzen ist es dem Kunden möglich, entsprechend darauf einzugehen und seinen Beitrag zur Vermeidung von Lastspitzen zu leisten. Eine Teilnahme an der Primärregelung (siehe

Kapitel 2.1.1) des Regelausgleiches ist nicht möglich. Dazu fehlt zum Einen die Information, wann ein solcher Ausgleich erforderlich ist. Zum Anderen könnte solch eine Information von einer einfachen Zeitschaltuhr nicht verarbeitet und entsprechende Schritte eingeleitet werden, da die Schalthandlung nur auf Basis der eingestellten Zeit beruht.

Mittels einer Zeitschaltuhr können alle mit elektrischem Anschluss versehenen Geräte problemlos zeitgenau geschaltet werden. Bestehende Geräte können weiter verwendet werden und müssen nicht durch neue ersetzt werden. Somit fallen außer der benötigten Zeitschaltuhr keine zusätzlichen Kosten an. Die einfache Anwendung kann auch von einem Laien durchgeführt werden und bedarf keiner speziell ausgebildeten Fachkraft. Aufgrund der Tatsache, dass keine Manipulation am Gerät, welches seinen Beitrag zum Energiemanagement leistet, erforderlich ist, muss dieses nicht verändert werden. Dadurch bleiben auch noch bestehende Garantieansprüche bestehen.

Bei einem im Vorhinein bekannten Überschuss an elektrischer Energie ist mit dieser Variante kein Aufladen möglich. Dies betrifft vor allem thermische Prozesse, wo kurzfristig mehr Energie zugeführt wird als ursprünglich notwendig wäre. Der so entstandene Überschuss wird als thermische Energie im Gerät gespeichert und steht dann zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Verfügung.

Bei einer Zeitschaltuhr handelt es sich um eine sehr kostengünstige Möglichkeit Einfluss auf die zeitliche Zufuhr von elektrischer Energie zu nehmen.

Die Funktionsweise zur Realisierung einer verbraucherseitigen Lastspitzenvermeidung mittels einer Zeitschaltuhr zeigt Abbildung 4.1. Das zu schaltende Gerät ist mit der Zeitschaltuhr

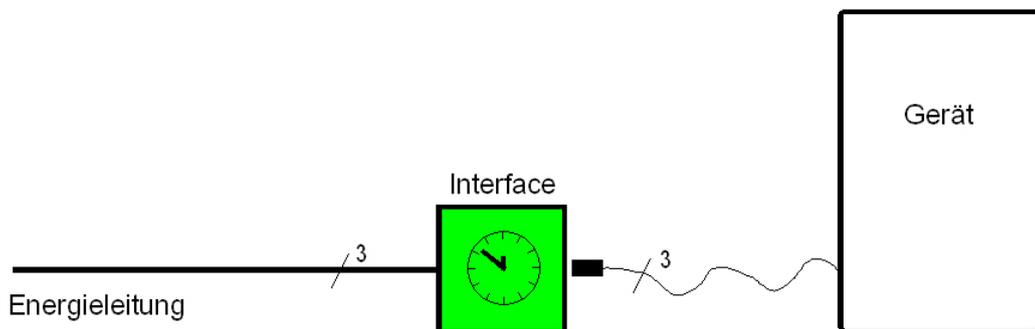


Abbildung 4.1: Zeitschaltuhr

zu verbinden und diese an das bestehende Stromnetz anzuschließen. Je nach Anforderung kann eine in den Zählerkasten fix eingebaute oder eine lokal angebrachte Schaltuhr verwendet werden. Bei der Variante einer Schaltuhr im Zählerkasten wird auf den gesamten, an die Schaltuhr angeschlossenen, Stromkreis Einfluss genommen. Diese Möglichkeit ist vor allem bei jenen Geräten sinnvoll, welche eine eigene Absicherung benötigen und direkt an das Hausnetz angeschlossen werden (z. B. eine Wärmepumpe). Sind mehrere, verschiedene Verbraucher an einem Stromkreis angeschlossen, so wirkt sich eine Teilnahme am Energiemanagement auf alle Geräte dieses Stromkreises aus. Dadurch kann es beispielsweise auch zu einer unerwünschten Abschaltung der Beleuchtung kommen. In Ausnahmefällen ist es sinnvoll, durch die Verwendung einer Zeitschaltuhr auf einen Stromkreis, alle Geräte dieses Stromkreises im Verbund zu beeinflussen. Speziell für kleiner Verbraucher wie beispielsweise Kühlschränke ist eine lokale Schaltuhr, welche sich nur auf ein Gerät auswirkt, zu bevorzugen. Bei Verwendung einer lo-

kalen Zeitschaltuhr wird diese einfach zwischen Steckdose und Anschlusskabel gesteckt. Dies stellt somit eine sehr einfache und flexible Möglichkeit dar.

Die Programmierung beziehungsweise Einstellung der gewünschten Schalthandlungen kann von einem Laien durchgeführt werden. Grundvoraussetzung ist jedoch das Wissen über das prognostizierte Lastprofil und somit über das zeitliche Auftreten von Lastspitzen. Mit dem Wissen des zeitlichen Auftretens von Lastspitzen können diese vermieden werden. Bei analogen Zeitschaltuhren kann man meist in viertelstündigen Intervallen entscheiden, wann ein- bzw. ausgeschaltet werden soll. Dies erfolgt durch eine einfache mechanische Verstellung von kleinen Schiebern, welche in der Uhr eine Schalthandlung auslösen. Die vorgenommenen Einstellungen sind dann für jeden Tag gleich. Digitale Zeitschaltuhren haben den Vorteil, dass eine minutengenaue Entscheidung über Schalthandlungen getroffen werden kann. Des Weiteren kann eine Woche im Voraus programmiert werden und somit die Lastverschiebung speziell auf einzelne Tage optimiert werden. Diese Einstellung ist etwas komplizierter, kann jedoch auch von einem Laien durchgeführt werden.

Durch eine Abschaltung wird das Gerät vom Stromnetz getrennt und somit nicht mehr mit Energie versorgt. Bei thermischen Prozessen tritt durch eine Trennung vom Netz eine Temperaturänderung auf, welche zu einem späteren Zeitpunkt wieder durch eine größere Energiezufuhr als üblich ausgeglichen werden muss.

Die Anforderungen an das Interface sind bei dieser Variante sehr gering. Zu bewältigen ist einzig die Unterbrechung der Energiezufuhr. Aufgrund der Tatsache, dass es im Bereich der Hausinstallation Normen und Vorschriften gibt (beispielsweise [TAE05]) ist der Anschluss genau definiert und spezifiziert. Somit ist eine Kompatibilität zu anderen Geräten gewährleistet.

Wird mit Hilfe einer handelsüblichen Zeitschaltuhr das Lastprofil berücksichtigt und verbaucherseitig das Energiemanagement unterstützt, so treten auch einige Probleme auf. Abgesehen von leicht bewältigbaren Herausforderungen wie der Tatsache, dass dem Benutzer ein genaues Lastprofil und somit der genaue Fahrplan bekannt sein muss um die Schalthandlungen richtig zu setzen, kann diese Variante zu einigen Einschränkungen führen.

Die gänzliche Trennung von der elektrischen Energiezufuhr stellt für manche Geräte ein Problem dar. Bei einigen Maschinen muss zumindest die Steuereinheit permanent mit elektrischer Energie versorgt werden um einen reibungslosen Betrieb gewährleisten zu können. Ist dies nicht der Fall, so müssen teilweise andere Einbußen in Kauf genommen werden. Bei einem Kühlschrank beispielsweise würde die Innenbeleuchtung nicht mehr funktionieren.

Speziell bei thermischen Geräten kann die aktuelle Temperatur nicht mitberücksichtigt werden. Dies kann dazu führen, dass man kurz vor dem geplanten Wiedereinschalten des Zweipunktreglers das Gerät mittels Zeitschaltuhr vom Netz trennt. Somit kommt es zu einem deutlichen Überschreiten der Schwellentemperatur, welches unter Umständen Schäden verursachen kann. Wird beispielsweise ein Kühlraum mit sensiblen Arzneimitteln im oberen, gerade noch zulässigen Temperaturbereich einfach für längere Zeit abgeschaltet, kann dies eine Zerstörung der Medikamente zur Folge haben.

Neben der Nichtberücksichtigung der Temperatur bei thermischen Geräten stellt die Tarifanpassung das größte Problem dieser Variante dar. Die gezielte Abschaltung von Geräten wirkt sich positiv auf die Lastverschiebung aus. Leider werden diese Auswirkungen jedoch nicht finanziell vergütet. Der Energielieferant beziehungsweise Netzbetreiber erhält keinerlei Informationen über Schalthandlungen und kann somit keine Kostensenkung an den Verbraucher weitergeben. Es wird also weiterhin der normale Tarif verrechnet, weshalb kaum jemand eine Veranlassung zur zeitweisen Abschaltung seiner Geräte sehen wird. Eine denkbare Möglichkeit zeigt Abbildung 4.2. Über eine zusätzliche Datenleitung wird der Energieanbieter über even-

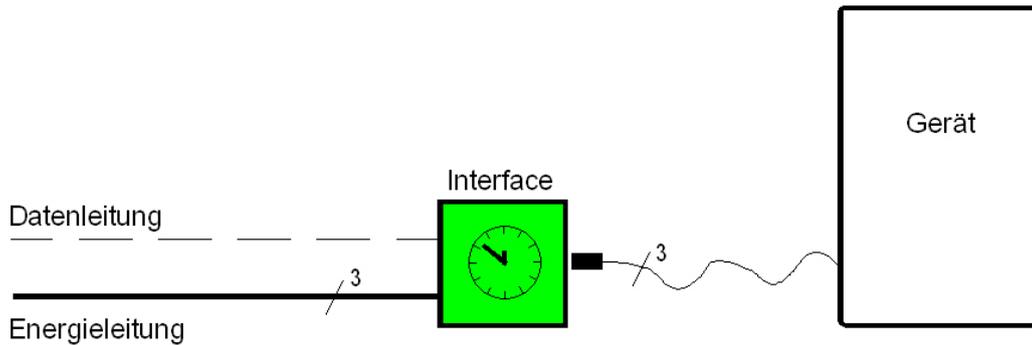


Abbildung 4.2: modifizierte Zeitschaltuhr

tuelle Abschaltungen informiert, damit diese vergütet werden können. Dazu ist neben einem notwendigen Informationskanal zum Energieanbieter auch eine spezielle Schnittstelle zur Zeitschaltuhr nötig. Aufgrund des Fehlens von einheitlichen Standards für einen Kommunikationsanschluss kann diese Variante schwer allgemein realisierbar werden. Es muss sich für eine der zur Verfügung stehenden Kommunikationsmöglichkeiten entschieden werden. Wenn dann schon eine Datenleitung vorhanden wäre, dann könnte die koordinierende Einheit für die verbraucherseitige Teilnahme am Energiemanagement auch gleich den Schaltzeitpunkt bekannt geben was eine Zeitschaltuhr überflüssig macht bzw. dann nicht mehr unter die Kategorie „handelsübliche Zeitschaltuhr“ fällt und die zuvor beschriebenen Vorteile der Einfachheit wegfallen würden.

Mittels einer Zeitschaltuhr kann auf relativ einfache und kostengünstige Weise eine Lastverschiebung realisiert werden. Dazu ist das Wissen über das prognostizierte Lastprofil erforderlich, um eine entsprechende Abstimmung damit zu verwirklichen. Die Last wird direkt von der elektrischen Energiezufuhr getrennt, was sich bei gewissen Geräten negativ auswirken kann. Bei thermischen Prozessen kann auf die Temperatur keine Rücksicht genommen werden.

Die Variante der Zeitschaltuhr hat den großen Vorteil, dass diese mit einem geringen Aufwand angebracht und bei fast allen Geräten angewendet werden kann.

Demgegenüber steht der Nachteil, dass die Schalthandlungen nicht an den Energieanbieter weitervermittelt werden können, weshalb eine finanzielle Entlastung nicht realisierbar ist. Aus diesem Grund wird diese Möglichkeit der Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagements theoretisch machbar und denkbar, wird in der Praxis jedoch mittels einer handelsüblichen Zeitschaltuhr ohne zusätzlichen Veränderungen nicht realisiert werden.

4.2 Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung

Ebenfalls eine relativ kostengünstige Möglichkeit verbraucherseitig am Energiemanagement teilzunehmen ist die Überwachung der Netzspannung beziehungsweise der Netzfrequenz.

Eine Überwachung der Netzspannung (U) bzw. der Netzfrequenz (f) ermöglicht einen aktiven Regelausgleich auf der Verbraucherseite. Wenn sich die Belastung ändert, verändert sich im gleichen Zuge auch die Frequenz bzw. die Spannung im gesamten Übertragungsnetz. Diese

Änderung kann dazu verwendet werden um die Notwendigkeit eines Regelausgleiches zu erkennen und darauf zu reagieren. Eine Lastverschiebung ist durch eine reine Überwachungsfunktion von U und f nicht möglich, da nicht vorausschauend gehandelt werden kann, sondern immer nur auf die gerade aktuelle Situation eingegangen und reagiert werden kann. Genau aus demselben Grund ist bei thermischen Prozessen kein Aufladen, also kein zukunftsorientiertes Speichern von thermischer Energie möglich.

Der Implementierungsaufwand ist ähnlich wie bei der Variante mit der Zeitschaltuhr (siehe Kapitel 4.1) relativ gering, da die Überwachungseinheit einfach in die Zufuhr der elektrischen Energie geschaltet wird. Somit ist kein Eingriff in das Gerät, welches zum Regelausgleich verwendet wird, notwendig. Es entstehen also keine Probleme mit der Gerätegarantie. Der Anschluss kann von einem Laien durchgeführt werden. Die erforderlichen Kosten sind ähnlich wie bei der Zeitschaltuhr gering, da kein neues Gerät angeschafft werden muss, sondern bereits bestehende in das Konzept eingebunden werden können.

Die Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement basiert auf der Beobachtung, dass das vorübergehende Verhalten einer elektrischen Last stark von der Aufgabe beeinflusst wird, die die Last durchführt bzw. welche Verbraucher zu- und abgeschaltet werden. [CLSL] Bei einer größeren Änderung der Gesamtlast ändert sich auch der Bedarf an elektrischer Leistung und somit indirekt auch die Spannung und die Frequenz.

Die treibende Spannung ändert sich aufgrund der harmonischen Stromkomponenten, welche durch die Kabelimpedanz entsteht. Diese kann als R-L-Serienschaltung modelliert werden (siehe Abbildung 4.3). Der Widerstand R und die Induktivität L repräsentieren die Kabelim-

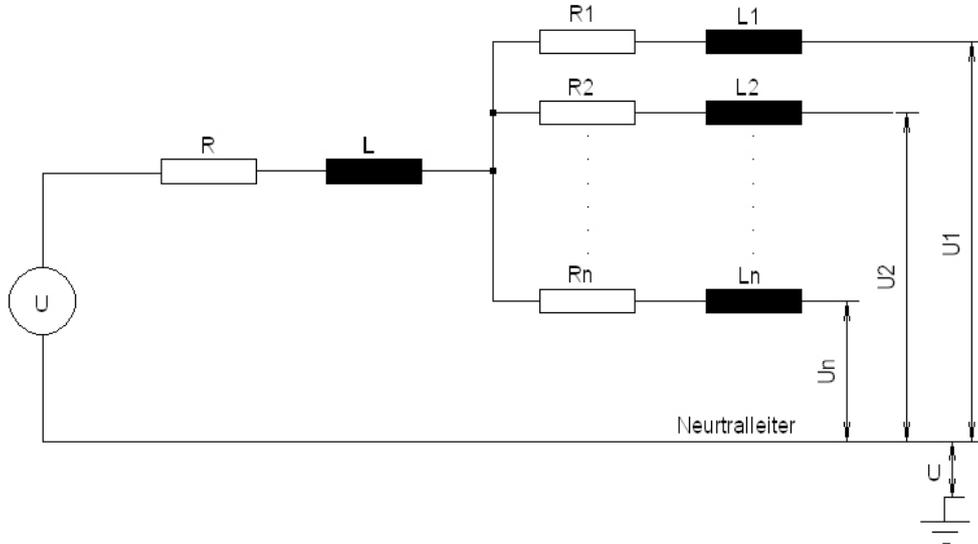


Abbildung 4.3: Modell zur Betrachtung der Spannungsänderung

pedanz und den dominanten Transformator. Die Widerstände R_1 bis R_n sowie die Induktivitäten L_1 bis L_n stellen die jeweiligen Impedanz von den einzelnen Stromkreisen dar, welche vom Transformator gespeist werden.

Ausgehend von einer direkten Erdung des Neutralleiters bei der Transformatoreinheit steigt die Spannung im Neutralleiter gegenüber Erde bei einer Lastzuschaltung im eigenen Haus an. Wird bei einem Nachbarn, welcher vom gleichen Transformator gespeist wird, eine große

Leistung eingeschaltet, sinkt die Spannung im Neutralleiter gegenüber Erde. Dieser Effekt ist für den Regelausgleich nicht von Bedeutung, kann jedoch zur Lokalisierung der Lastzuschaltung verwendet werden. Auftretende Spannungsänderungen können im Neutralleiter leichter erfasst werden, weshalb eine Messung zwischen Neutralleiter und Erdleiter zu empfehlen ist. [CLSL]

Auch bei der Frequenz ist eine Änderung bei Schalthandlungen von größeren Lasten bemerkbar. Die Netzfrequenz pendelt mit kleinen Abweichungen um den Mittelwert von 50 Hz. Bei plötzlichen Zuschalten von großen Lasten bzw. Ausfall von Einspeisungen werden die Generatoren der Stomerzeugung mehr abgebremst und die Frequenz sinkt dadurch. Werden hingegen Verbraucher vom Netz genommen oder Einspeisungen aktiv, so erhöht sich die Frequenz. (siehe Kapitel 2.1.1) Ziel ist nun die kurzfristige Ausschaltung von Verbrauchern bei geringeren Frequenzperioden und das Zuschalten von Geräten bei höheren Frequenzperioden. [Gha95]

Als Richtwerte für Änderungen von U bzw. f gelten folgende Werte: Eine Reduktion der Spannung 1% führt ca. zu einer Reduktion der Leistung um 1%. Verringert sich die Frequenz um 1%, so führt dies zu einer Leistungsabnahme von ca. 1 bis 8%. [Gha95]

Aufgrund der Tatsache, dass sich sowohl die Spannung als auch die Frequenz bei Laständerungen verändern, ist ein verbraucherseitiger Eingriff in die Primärregelung möglich.

Eine entsprechende Messeinrichtung mit einer softwaretechnischen Realisierung der Schaltbefehle bei bestimmten Schwellwerten wird in die Energiezufuhr des einzubindenden Gerätes schalten (siehe Abbildung 4.4). Ein Ausschaltbefehl trennt das Gerät vom Versorgungsnetz, was bei thermischen Prozessen zu einer Zwangsänderung der Temperatur führt, welche nach einem Wiedereinschalten wieder ausgeglichen werden muss.

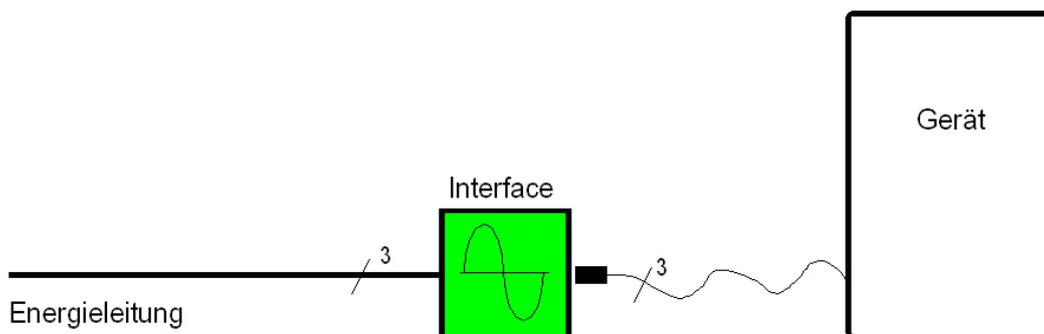


Abbildung 4.4: Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung

Das Interface hat in diesem Fall lediglich die Aufgabe, die elektrisch zugeführte Energie zu schalten. Dementsprechend ist sowohl der Eingang als auch der Ausgang standardisiert (siehe [TAE05]). Durch diese genormte Ausführung kann die Überwachung der Frequenz beziehungsweise der Spannung leicht implementiert werden. Bestehende Geräte können somit einfach in die verbraucherseitige Primärregelung eingebunden werden.

Bei der Einbindung der Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung treten auch einige Probleme auf. Die gänzliche Trennung von der Versorgung kann sich negativ auf die Maschinen auswirken. Einerseits kann dadurch ein Datenverlust vom programmierten Verbrauchern entstehen, welche sich nach einem Stromausfall wieder neu initialisieren müssen. Zum Anderen wird wie

bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, der Bedienungskomfort von bestimmten Geräten beeinträchtigt, da beispielsweise das Licht im Kühlschrank fehlt.

Auf die jeweils aktuelle Temperatur kann bei thermischen Geräten keine Rücksicht genommen werden, was zu Problemen führen kann, wenn die Temperatur innerhalb eines genau definierten Temperaturbereiches bleiben muss. Ein Überschreiten bzw. Unterschreiten der Temperatur außerhalb des Toleranzbandes kann im ungünstigsten Fall also nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Überwachung von U und f nicht als Lastverschiebung zum Einsatz kommt, sondern nur für den Regelausgleich funktioniert, ist diese Temperaturänderung nicht so entscheidend wie bei der Zeitschaltuhr. Für den Ausgleich ist in erster Linie die Primärregelung (siehe Kapitel 2.1.1) zuständig, welche nach ca. 30 Sekunden bereits abgeschlossen ist und somit kaum Einfluss auf die relativ trägen thermischen Prozesse hat. Wesentlich bedeutender ist jedoch die Tatsache, dass durch eine Realisierung der Temperatursteuerung mittels eines Zweipunktreglers das Gerät sowieso nicht ständig in Betrieb ist und ein erzwungenes Abschalten nicht zwangsläufig auch einen Beitrag zum Ausgleich der Regelleistung leistet.

Bei der Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung tritt so wie auch bei der Zeitschaltuhr (4.1) das Problem der Tarifanpassung auf. Es besteht für das Energieanbieter keine Möglichkeit den aktiven Beitrag der Verbraucher zum Regelausgleich zu vergüten, da nicht nachvollzogen werden kann wann mitgeholfen wurde. Würde man zusätzlich zur Überwachung von U und f noch eine extra Datenleitung für die Information der Schalthandlungen einfügen (vergleiche Abbildung 4.2), hätte man ein neuerliches Interfaceproblem. Der Austausch der Daten müsste genau spezifiziert werden und die Einfachheit dieser Variante würde verloren gehen. Des weiteren kann eine zusätzliche Datenleitung gleich die Befehle zum Schalten senden, was ein Messen der Spannung bzw. der Frequenz überflüssig macht.

Hauptproblem der Beobachtung von Spannungs- und Frequenzschwankungen ist der Wiedereinschaltzeitpunkt. Da die Veränderung der Spannung oder Frequenz natürlich nicht nur ein Verbraucher bemerkt, sondern alle Geräte, welche in solch einen Regelausgleich eingebunden sind, schalten sich all diese Geräte ab. Dieser Effekt ist aber auch sinnvoll, da man eine große Anzahl von Verbrauchern benötigt, um effizient in das Energiemanagement eingreifen zu können. Selbstverständlich bemerken auch alle Verbraucher gleichzeitig, dass sich das Energienetz wieder erholt und wollen somit wieder Strom beziehen. Genau hier liegt auch das Problem. Durch das gleichzeitige Einschalten vieler kleiner Verbraucher entsteht eine riesen Last, welche zugeschaltet wird. Dadurch entsteht eine enorme Stromspitze und des weiteren eine große Leistungsspitze, welche das System gefährden würde, aber auch einen neuerlichen Regelausgleich erfordert. Das gesamte System könnte instabil werden. Um dies zu verhindern, ist eine zeitliche Staffelung der Wiedereinschaltung von Nöten. Somit würden die einzelnen Verbraucher wieder schrittweise an das Versorgungsnetz gehen und einzelne, jeweils kleinere Stromspitzen beim Einschalten würden verteilt auftreten. Um einen optimalen Versatz der Zeit zu erreichen, ist abermals eine zusätzliche Datenleitung notwendig, um über den Zustand der jeweils anderen Bescheid zu wissen bzw. von einer zentralen Einheit gesteuert zu werden. Auch hier stößt man dann wieder auf die Interfaceproblematik und verliert die Vorteile.

Die Frequenz- und Spannungsüberwachung ermöglicht auf einfache Weise eine Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement. Kostengünstig kann bei der Primärregelung mitgewirkt werden. Zur Lastverschiebung und zum Aufladen ist diese Möglichkeit nicht geeignet, da keine Vorhersagen über den Leistungsbedarf getroffen werden können. Aufgrund der Trennung des einbezogenen Gerätes vom Versorgungsnetz kann beinahe jeder Verbraucher problemlos angeschlossen werden. Der Aufwand des Anschlusses ist einfach und kann von

Laien ebenfalls durchgeführt werden.

Nachteilig wirkt sich aus, dass bei thermischen Prozessen der Verbraucher nicht abgeschaltet werden kann, wenn dieser aufgrund der thermischen Zweipunktregelung bereits abgeschaltet ist. Des weiteren müssen bei einem Wiedereinschalten die Einschaltzeitpunkte gestaffelt werden, um große Lastspitzen zu vermeiden. Die Tatsache, dass ohne zusätzlicher Datenleitung die aktive Beteiligung am Energiemanagement nicht berücksichtigt werden kann, hemmt die Anwendung der Überwachung von Spannung und Frequenz zusätzlich.

Theoretisch ist also auch diese Variante denkbar und realisierbar, wird jedoch praktisch im Sinne des Demand Side Managements keine zufriedenstellende Alleinlösung darstellen können.

4.3 Beobachtung des Schaltverhaltens

Durch reines Beobachten des Schaltverhaltens und entsprechender Abschätzung der inneren Zustände ist eine grobe Vorhersage der Zustandsentwicklung und entsprechende Schalthandlungen möglich. Aufgrund der Tatsache, dass thermische Prozesse mit einer Zweipunktregelung nicht ständig in Betrieb sind, kann durch Beobachten der Einschaltdauer abgeschätzt werden, wie sich die Temperatur verändert. Ist das Gerät beispielsweise erst seit kurzer Zeit eingeschaltet, kann davon ausgegangen werden, dass die obere, zulässige Temperaturschwelle kürzlich erreicht wurde und das Gerät noch länger in Betrieb sein wird, bis die Schwelle für ein Ausschalten des Gerätes erreicht ist. In diesem Zustand wäre es nicht sehr sinnvoll das Gerät zur Teilnahme am Energiemanagement zu veranlassen, da durch eine erzwungene Abschaltung die Temperatur im Inneren des Kühlschranks weiter ansteigen würde und somit das Kühlgut beschädigt werden könnte. Ist das Geräte jedoch schon länger Zeit eingeschaltet, kann vermutet werden, dass die Schwelle zum Ausschalten bald erreicht ist und eine Teilnahme des Verbrauchers am Energiemanagement kann erfolgen. Der große Vorteil dieser Variante ist, dass keine zusätzlichen Temperatursensoren benötigt werden. Eine Beobachtung des Geräteverhaltens bietet bereits größere Möglichkeiten verbraucherseitig am Energiemanagement teilzunehmen. Es kann sowohl eine Lastverschiebung als auch ein Regelausgleich realisiert werden. Aufgrund der Abschätzung der inneren Zustände kann auf die Geräteparameter rückgeschlossen und entsprechende Aktionen eingeleitet werden. Ein Aufladen, also vorübergehender, zusätzlicher Energieaufwand, ist nicht möglich. Es kann kein direkter Einfluss auf das Gerät genommen werden. Dementsprechend ist es nicht möglich, dass das Gerät erzwungen, länger eingeschalten bleibt. Insbesondere bei thermischen Geräten ist die Möglichkeit der Beobachtung gut anwendbar, da diese Prozesse relativ träge sind und sich somit nur langsam Änderungen ergeben.

Der Implementierungsaufwand ist sehr gering, da ein entsprechendes Gerät wiederum nur in die Energiezufuhr eingebunden wird. Dementsprechend kann solch ein Zusatzgerät auch ohne großartigen Aufwand von einem Laien angebracht werden. Für die Programmierung der Vorhersage und Abschätzung ist eventuell eine Fachkraft erforderlich. Aufgrund der Tatsache, dass kein direkter Eingriff in das Gerät erforderlich ist, kann es auch zu keinerlei Garantieproblemen kommen.

Die durch diese Variante entstehenden Kosten sind sehr gering, da keine aufwendige Implementierung erforderlich ist. Des weiteren können beinahe alle Geräte in das Demand Side Management eingebunden werden.

Eine Tarifanpassung beziehungsweise Rückvergütung bei einer verbraucherseitigen Lastverschiebung oder bei einem verbraucherseitigen Regelausgleich kann aufgrund der zusätzliche erforderlichen Datenleitung relativ leicht erfolgen.

Die Einbeziehung von Verbrauchern in das Energiemanagement durch Beobachtung des Schaltverhaltens ist relativ einfach. Aufgrund der benötigten elektrischen Energie des Gerätes und der bereits bezogenen Energie kann eine Vorhersage über den inneren Zustand erfolgen. Speziell bei thermischen Geräten, welche in der Lage sind Temperatur zu speichern und aufgrund einer Zweipunktregelung nicht immer aktiv sind, lässt sich der thermische Betriebspunkt grob abschätzen. Die Temperatur kann also indirekt und annähernd in die Schaltentscheidung einfließen, weshalb ein ungünstiger Ein- bzw. Ausschaltzeitpunkt vermeidbar ist.

Als Grundlage für die Vorhersage des Gerätezustandes kann beispielsweise ein Kalman-Filter verwendet werden. Dieser vielseitig einsetzbare Filter kann sowohl für die Schätzung und Vorhersage verwendet werden, als auch zur Bestimmung von Zuständen, welche nicht gemessen werden. [Vin06]

Durch eine Beobachtung des Bedarfs an elektrischer Energie kann bei thermischen Geräten, wie beispielsweise einem Kühlschrank, auf die inneren Zustände (z. B. Temperatur) rückgeschlossen werden. Des weiteren sind im eingeschwungenen Zustand die Schaltintervalle annähernd gleich. Mit Hilfe dieser Information kann die aktuelle Temperatur abgeschätzt werden und auf dieser Grundlage eine Entscheidung über eine Schalthandlung getroffen werden. Beispielsweise kann auf Grundlage der Information, dass das Gerät schon länger in Betrieb ist, davon ausgegangen werden, dass sich ein Ausschalten nicht negativ auf den jeweiligen Prozess auswirken wird, da sich die Innentemperatur voraussichtlich schon in der Nähe der oberen Schaltschwelle befindet, an welcher das Gerät selbstständig abschalten würde.

Die Beobachtungseinheit wird direkt in die Versorgungsleitung, also in die Zufuhr der elektrischen Energie geschaltet. Dadurch wird beim Ausschalten das jeweilige Gerät vom Versorgungsnetz getrennt. Wie Abbildung 4.5 zeigt, ist eine neben der Leitung für die Energiezufuhr noch eine zusätzliche Datenleitung für die Information erforderlich. Über diese muss der

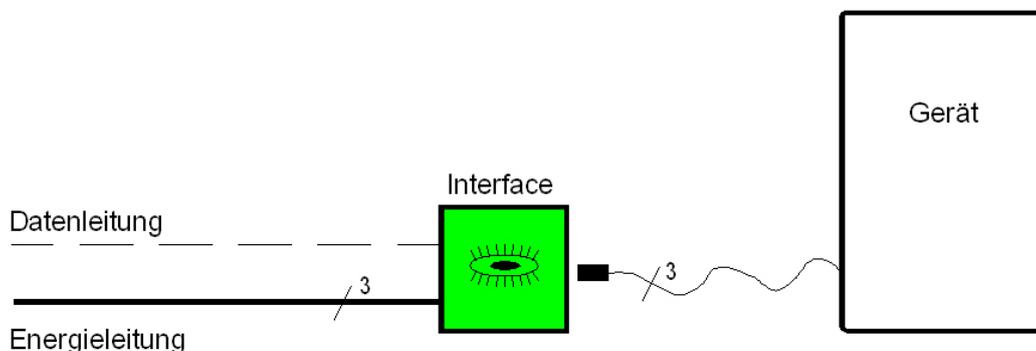


Abbildung 4.5: Beobachtung des Schaltverhaltens

Beobachtungseinheit mitgeteilt werden, wann eine Eingriff in das verbraucherseitige Energiemanagement erforderlich, beziehungsweise wünschenswert ist. Die Steuerbefehle für eine etwaige Beteiligung an der Primärregelung sowie einer geplanten Lastverschiebung werden über die Datenleitung gesendet. Die Information zum Wiederherstellen des Normalbetriebes ist ebenfalls darüber vorgesehen. Aufgrund der Tatsache, dass gezielt Schaltbefehle von einer Koordinationseinheit kommen, kann die Mithilfe am Energiemanagement auch direkt davon honoriert und rückvergütet werden.

Die Anforderungen an das Interface sind bei der Beobachtung des elektrischen Energieverbrauches gegenüber der in Kapitel 4.1 beschriebenen Zeitschaltuhr und der im Kapitel 4.2

beschriebenen Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung deutlich höher. Neben der genormten Verbindung der elektrischer Energieleitung ist hier eine zusätzliche Datenleitung erforderlich. Sinnvollerweise sollte die Verbindung zum Datenaustausch über ein bereits bestehendes System erfolgen, um zusätzliche Kosten zu vermeiden. Denkbar wäre hier beispielsweise Wireless Local Area Network (WLAN), Global System for Mobile Kommunikation (GSM) als auch bestehende Internetverbindungen oder Telefonnetze zu verwenden. Wünschenswert ist der direkte Anschluss an eine bestehende Gebäudevernetzung wie beispielsweise EIB, LON oder BACNet. Je nach Gegebenheiten kann das jeweils beste System verwendet und eingesetzt werden.

Ein Anschluss von Sensoren zu jenem Gerät, welches einen aktiven Beitrag zum Demand Side Management (DSM) liefert, entfällt. Dadurch stellt sich hier nicht das Problem mit etwaig notwendigen Standards. Des weiteren können so auch Geräte mit in das DSM eingebunden werden, wo der Zugang mittels externer Sensoren nicht oder nur schwer möglich ist (z. B. Durchlauferhitzer).

Ein Problem beziehungsweise eine Einschränkung stellt die Datenleitung dar. Mit der Auswahl des Übertragungsmediums muss auch die Beobachtungseinheit mit diesem Medium kompatibel sein. Sollte sich die Art und Weise des Informationsaustausches ändern, so ist auch eine Änderung der Einheit bzw. des Interfaces erforderlich. Als Alternative dazu ist eine Ausstattung mit verschiedenen Schnittstellen möglich. Dadurch kann die Beobachtungseinheit flexibler und mit mehreren Übertragungsmedien eingesetzt werden. Die zusätzlich entstehenden Kosten für mehrere Schnittstellen wirken sich jedoch negativ auf die Herstellungskosten und somit auch auf den Endpreis aus.

Durch die Trennung von Geräten vom Versorgungsnetz können Probleme entstehen. Neben den in Kapitel 4.1 und 4.2 beschriebenen Problemen können Geräte zusätzlich mit Sicherheitsfunktionen ausgestattet sein, welche den Benutzer auf einen Fehler, also ein Fehlen der Versorgungsspannung, aufmerksam machen. Solche Warnfunktionen können meist deaktiviert werden, erfordern aber ein genaues Studium der Bedienungsanleitung seitens des Benutzers. Da nicht direkt Einfluss auf die Geräteparameter genommen werden kann ist ein Aufladen nicht möglich. Somit kann nicht im Vorhinein auf eine kommende Lastverschiebung eingegangen werden. Durch eine Verschiebung der benötigten elektrischen Energie zu einem späteren Zeitpunkt, kommt es zu einem kurzzeitigen Fehlen von Energie. Diese muss bei einem Wiedereinschalten durch eine spätere, länger andauernde Einschaltperiode wieder nachgeholt werden.

Bei thermischen Prozessen spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle. Schaltbefehle kommen oft nur aufgrund der voreingestellten Schaltschwellen eines Zweipunktreglers. Fehlt diese Information beziehungsweise steht diese nur als vermuteter Wert zur Verfügung, so können Fehlentscheidungen getroffen werden. Bei der Beobachtung des elektrischen Energieverbrauches von Geräten kann nur eine grobe Vorhersage über die Zustände und dementsprechend auch über die innere Temperatur getätigt werden. Somit ist eine Verwendung der Beobachtungsmöglichkeit für Prozesse mit sehr genauen Temperaturanforderungen nicht oder nur beschränkt geeignet. Je genauer die Temperatur im vorgegebenen Toleranzband bleiben muss, desto „vorsichtiger“ ist die Vorhersage zu wählen. „Vorsichtig“ soll hier bedeuten, dass bei einer angenommenen Einschaltzeit von zehn Minuten im Normalbetrieb, ein Ausschalten keinesfalls vor acht Minuten erfolgen darf. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Temperatur beinahe beim Endwert befindet deutlich höher als wenn bereits zu Beginn des Einschaltens gleich wieder eine Anforderung zum Regelausgleich bzw. zur Lastverschiebung kommt.

4.3.1 Erster Realisierungsansatz

Einen ersten Ansatz zur Beobachtung des Schaltverhaltens mittels eines bereits bestehenden Interfaces zeigt die Steckdosenleiste PM 211-MIP (siehe Abbildung 4.6) der Firma Infrac. [Inf07] Es handelt sich dabei um eine internetfähige Master/Slave Steckdosenleiste zum



Abbildung 4.6: Steckdosenleiste mit Ethernetanschluss. Quelle: Autor

Schalten von elektrischen Verbrauchern über ein TCP/IP Netzwerk. Die Steckdosenleiste verfügt über einen Ethernetanschluss. Die zwei Slavesteckdosenpaare können mittels eines Webbrowsers gezielt geschaltet werden. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit mittels Wireless Application Protocol (WAP) Schalthandlungen auszulösen.

Die Master/Slave-Funktion ermöglicht ein Schalten der Slavesteckdosen, sobald der Master geschaltet wird. Abbildung 4.7 veranschaulicht den Schaltplan. Zur Erkennung, ob der Master eingeschaltet ist oder nicht wird eine einfache Strommessung durchgeführt. Dazu wird das Strommesszangenprinzip verwendet, wo die Phase durch einen Ringkern geführt wird. Ein aktiver Master wird ebenso wie die Schaltzustände der beiden Slavesteckdosen mittels LEDs signalisiert. Über den Webbrowser sind diese Daten ebenso ersichtlich.

Mit dieser Steckdosenleiste sind bereits Schalthandlungen durchführbar und somit ist auch ein Eingriff in das Energiemanagement möglich.

Durch eine kleine Modifikation könnten die Möglichkeiten noch etwas verbessert werden. Wird nicht die Phase von der Mastersteckdose, sondern jene von Slave 1 oder Slave 2 durch den Stromsensor geführt, kann über den Webbrowser auch der gerade aktuelle Gerätezustand abgefragt werden. Nachteilig dabei ist, dass die Master/Slave-Funktion somit deaktiviert wird. Das angeschlossene Gerät wird bei Schalthandlungen von der Energieversorgung getrennt. Eine zusätzliche Einschränkung seitens Steckdosenleistenhersteller ist die Beschränkung auf maximal 5 A pro Anschluss. Somit können nur kleinere Verbraucher wie beispielsweise Kühlschränke angeschlossen werden.

4.3.2 Fazit

Eine verbraucherseitige Teilnahme am Energiemanagement mittels Beobachtung der verbrauchten elektrischen Leistung des betrachteten Verbrauchers ermöglicht sowohl eine Last-

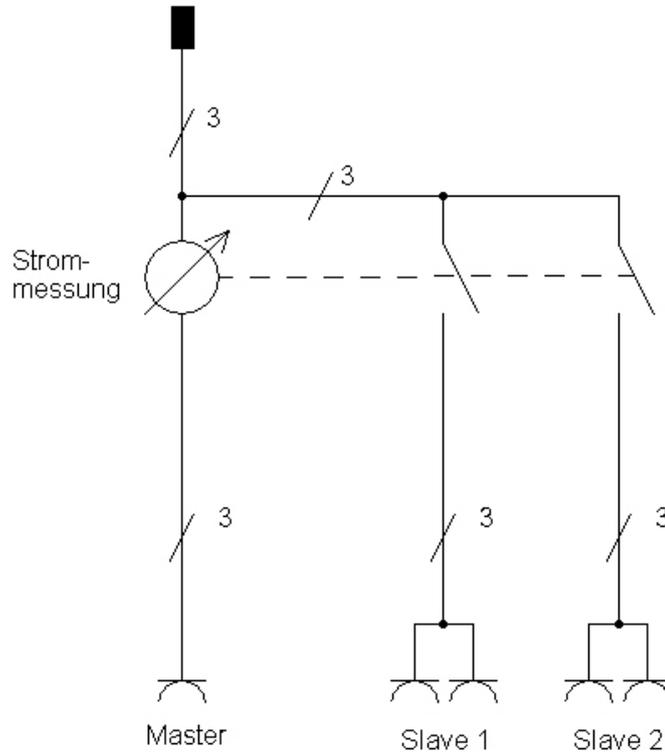


Abbildung 4.7: Schaltplan Steckdosenleiste

verschiebung als auch einen Regelausgleich im Sinne der Primär- bzw. Sekundärregelung (vergleiche Kapitel 2.1.1). Ein Aufladen ist aufgrund der Tatsache, dass auf die Parameter des Gerätes kein Einfluss genommen werden kann nicht möglich.

Da das Gerät selbst nicht verändert wird, verfällt ein etwaiger Garantieanspruch nicht. Die Möglichkeit der Beobachtung ist leicht zu implementieren und kann deshalb von einem Laien installiert werden. Des weiteren ist die Beobachtungseinheit, welche aus beispielsweise aus einem Stromsensor bestehen kann, für beinahe alle Geräte verwendbar und relativ kostengünstig.

Für die Schaltbefehle ist eine separate Datenleitung erforderlich, welche auch der Kostenvergütung seitens Energieanbieter dient.

Seine Stärken kann das Beobachtungssystem bei trägen Prozessen, insbesondere bei thermischen Geräten ausspielen, da keine zusätzlichen Information über das Gerät durch extra angebrachte Sensoren erforderlich sind.

4.4 Sensorsignal verändern

Speziell bei Geräten mit thermischen Prozessen besteht die Möglichkeit, in das Demand Side Management einzugreifen, indem die Sensordaten verändert beziehungsweise manipuliert werden. Durch eine gezielte Veränderung der Sensorwerte kann das gesamte Spektrum des verbraucherseitigen Energiemanagements ausgenutzt werden. Eine Lastspitzenvermeidung

durch eine Lastverschiebung ist möglich, da neben der Leitung für die elektrische Energie auch eine zusätzliche Datenleitung erforderlich ist. Über diese Leitung wird die Information der Schaltzeitpunkte für die zeitliche Verschiebung übertragen. Auch ein Mitwirken beim Regelausgleich ist wegen dem Informationsaustausch möglich. Zusätzlich zu den Schaltbefehlen können über die Datenleitung auch die tatsächlichen Schalthandlungen erfasst werden und somit vom Energieanbieter rückvergütet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass ein direkter Eingriff in das Gerät, insbesondere auf dessen Parameter stattfindet, kann ein Aufladen erfolgen. Kann im Vorfeld schon erkannt werden, dass in nächster Zeit eine Abschaltung erforderlich ist, so kann bereits vorher mehr Energie zugeführt werden. Dadurch ändert sich die Temperatur und eine Überbrückung der darauf folgenden Ausschaltzeit kann somit leichter erfolgen.

Wegen des direkten Eingriffes in das Gerät und dessen Parameter muss das Gerät nicht vom Versorgungsnetz getrennt werden. Die jeweilige Gerätesteuerereinheit wird durch die Parameterveränderung dazu veranlasst, dass sich das Gerät von selbst abschaltet. Bei thermischen Geräten wird durch die Veränderung des Temperatursignales gezielt ein Schaltbefehl ausgelöst. Die Funktionsweise ist in Abbildung 4.8 skizziert. Das entsprechende Gerät wird

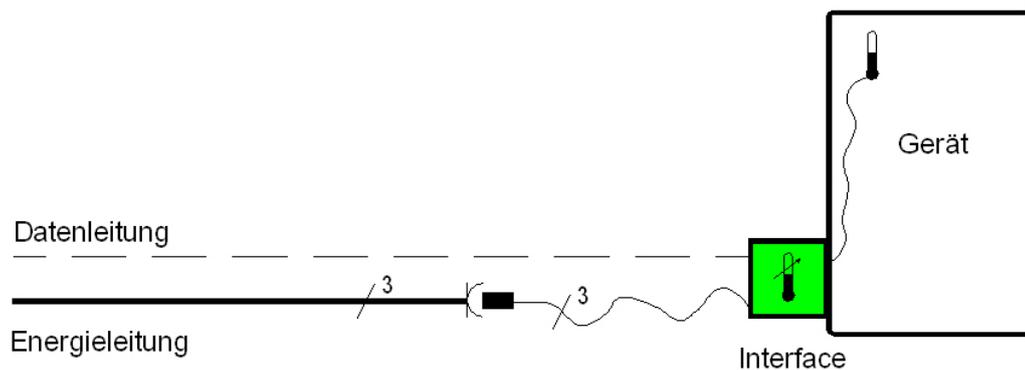


Abbildung 4.8: Sensorsignal verändern

an die Energieversorgung angeschlossen und somit mit elektrischer Energie versorgt. Eine zusätzliche Datenleitung ist für die jeweiligen Schaltbefehle und Informationen verantwortlich. Für die Datenübertragung selbst stehen einige Varianten zur Auswahl. Dies könnten zum Beispiel Wireless Local Area Network (WLAN), Global System for Mobile Kommunikation (GSM) sowie auch bestehende Internetverbindungen oder Telefonleitungen sein. Prinzipiell ist der Einsatz von bereits bestehenden Übertragungsmedien vorzuziehen, da somit keine zusätzlichen Kosten für den Informationsaufbau entstehen.

Um das Sensorsignal verändern zu können, ist ein direkter Eingriff in das Gerät erforderlich. Technische Kenntnisse sind hierfür notwendig, weshalb dies nur von einem Fachmann durchgeführt werden kann. Als Grundvoraussetzung für die Manipulation der Sensordaten für diese Zwecke, ist das Vorhandensein von elektrischen bzw. digitalen Sensorwerten. Der Messkreislauf muss nun sorgfältig aufgetrennt werden und eine separate Einheit zur Messwertveränderung eingebaut bzw. dazwischen geschaltet werden. Diese Aufgabe könnte beispielsweise ein zusätzlicher Mikrocontroller (MC) erfüllen. Der MC muss die tatsächlich gemessenen Sensordaten richtig interpretieren und mit den entsprechenden Veränderungen versehen. Je nach Eingriff in das Energiemanagement können die gemessenen Daten mit einem positiven oder einem negativen Wert beaufschlagt werden. Der somit verfälschte Messwert wird schließlich

der ursprünglichen Steuereinheit übermittelt, welche aufgrund der vorher definierten Regelaufgabe reagiert.

Beispielsweise kann bei einer Kältemaschine, wie einem Kühlschrank, durch eine Information bzw. einen Befehl zum Aufladen die gemessene Temperatur mit einem Wert addiert werden. Dies führt dazu, dass die integrierte Steuereinheit eine höhere Temperatur annimmt als tatsächlich vorhanden ist und somit das Gerät noch weiter abkühlt. Das passiert so lange, bis die vorgetäuschte Temperatur an der unteren Schaltschwelle des Reglers angelangt ist. Die tatsächliche Temperatur ist also um den addierten Wert geringer. Dadurch konnte erreicht werden, dass ein zusätzlicher Temperaturpuffer entstanden ist, welcher anschließend ein längeres Abschalten ermöglicht. Den anderen Extremfall stellt der Regelausgleich dar. Dabei sollte das Gerät Abschalten um keine Energie zu verbrauchen. Dies kann dadurch erreicht werden, dass vom gemessenen Temperaturwert ein bestimmter Wert subtrahiert wird. Dadurch wird die obere Schaltschwelle des Reglers quasi nach oben verschoben. Die Steuereinheit denkt, dass die Temperatur noch tief genug ist um nicht einschalten zu müssen. Tatsächlich wird jedoch ein um den vorgegebenen Wert höhere Temperatur erreicht. Bei der Lastverschiebung verhält sich das System ebenfalls so wie eben beschrieben. Vorteil dieser Variante ist, dass bei einer längeren Abschaltung durch eine Lastverschiebung sich das Gerät ab einem kritischen Temperaturwert trotzdem wieder einschaltet, um die darin befindlichen Güter zu schützen. Die Innentemperatur wird also mitberücksichtigt, was sich positiv auf den Inhalt auswirkt.

Wird das Sensorsignal verändert beziehungsweise manipuliert, werden bereits große Ansprüche an das Interface gestellt. Die Energiezufuhr kann als gegeben bzw. genormt angenommen werden (siehe [TAE05]) und stellt somit keine große Herausforderung dar.

Bei der Schnittstelle zur verwendeten Datenleitung stellen sich bereits die ersten Probleme dar. Wie bereits bei der Beobachtung des Energieverbrauches (siehe Kapitel 4.3) beschrieben, kommt es auch hier zum Problem, dass im Normalfall jeweils nur eine Übertragungsart (z. B. WLAN, GSM, Ethernet, EIB, LON, BACNet, ...) unterstützt wird. Eine Einbindung mehrerer dieser bestehenden Standards ist denkbar, jedoch mit zusätzlichen Kosten verbunden. Da die einzelnen Übertragungsarten nicht miteinander kompatibel sind, wird man sich in der Regel für eine Art der Übertragung entscheiden müssen und ist somit eingeschränkt.

Eine weitaus größere Herausforderung stellt die Schnittstelle zu den Sensordaten dar. Die Information der Schaltbefehle bzw. Befehle für den Eingriff in das Energiemanagement müssen an die Einheit für die Veränderung der Messwerte weitergeleitet werden. Wie bereits zuvor beschrieben, ist eine Realisierung dieser Einheit mit Hilfe eines Mikrocontrollers sinnvoll. Aufgrund der Tatsache, dass es eine Unzahl an verschiedenen Mikrocontrollern gibt, welche in den Geräten implementiert sind und spezielle Aufgaben erfüllen, kann die Schnittstelle dazu nur sehr speziell auf ein, oder maximal ein paar Typen ausgelegt werden. Eine Standardisierung dieser Schnittstelle ist also in nächster Zeit nicht wirklich realistisch.

Die Schnittstelle zum Mikrocontroller, welche nicht genau definiert und standardisiert werden kann stellt ein großes Problem bei der Vervielfältigung der Sensorveränderung dar. Des Weiteren muss auf die jeweiligen Gerätekomponenten genau eingegangen werden und somit ist jeder Umbau eine Herausforderung für den Fachmann, der diese Änderung vornehmen soll. Es entstehen Einzelgeräte, ohne Standards.

Der große Aufwand, welcher erforderlich ist um jedes Einzelstück in das verbraucherseitige Energiemanagement einbinden zu können, hindert die Vervielfältigung ebenfalls enorm. Geht man davon aus, dass nicht nur die Kosten für zusätzlich benötigte Bauteile zu bezahlen sind, sondern auch die Arbeitszeit des Fachmannes, dann wachsen die Gesamtkosten relativ schnell

an. Es kann rasch passieren, dass der Umbau bzw. die Nachrüstung eines Gerätes teurer ist, als der ursprüngliche Anschaffungspreis. Stellt man dies in Relation, dann muss ein Gerät, welches einen aktiven Beitrag zum Demand Side Management leistet, eine enorm hohe Lebenszeit aufweisen um die zusätzlichen Kosten zu decken und noch Gewinn zu erwirtschaften. Durch den nötigen Eingriff in das Gerät verfällt die Gerätegarantie. Dies kann bei versteckten Mängeln sehr nachteilig sein, da die defekte Ware aufgrund der Veränderungen nicht mehr umgetauscht bzw. zurückgegeben werden kann.

Reparaturen, welche im Nachhinein eventuell durchzuführen sind werden ebenfalls erschwert, da der zusätzliche Einbau zur Sensorüberlagerung dem Personal zumindest anfänglich nicht bekannt ist. Dadurch wird zusätzliche Zeit zum Einarbeiten in die neue Materie benötigt. Das Einlesen in die Dokumentation des neuen Elementes beansprucht auch wieder Zeit, wodurch die Kosten für eine Reparatur deutlich ansteigen.

Eine starke Einschränkung ist auch die Tatsache, dass eine Sensorwertveränderung nur bei Geräten möglich ist, welche elektrische bzw. digitale Sensorwerte zur Verfügung stellen. Da das Überlagerungsprinzip bzw. Veränderungsprinzip vorrangig bei thermischen Geräten zum Einsatz kommen kann, bleiben nicht sehr viele Geräte über, wo diese Variante eingesetzt werden kann. Der Großteil der Zweipunktregelungen bei thermischen Geräten, insbesondere der von Kühlgeräten, wird mechanisch ausgeführt. Zur Messung dient entweder ein Thermostat oder ein Pressostat (siehe Kapitel 2.3.1). In beiden Fällen wird aufgrund der Temperaturmessung bzw. der Druckmessung mechanisch ein Schaltbefehl ausgeführt. Die jeweilige Änderung wirkt sich also mechanisch aus. Dementsprechend kann kein Wert elektrisch verändert werden, da dieser nicht existiert. Diese Sensordatenüberlagerung bzw. -veränderung kann also nur bei einer sehr eingeschränkten Anzahl von Geräten verwendet werden, welche die Temperatur auf elektrische Weise messen.

Durch eine Überlagerung des Sensorsignales mit einem anderen Wert und somit einer Veränderung des Messergebnisses, kann eine verbraucherseitige Teilnahme am Energiemanagement gut realisiert werden. Sowohl eine Lastverschiebung als auch ein Regelausgleich kann realisiert werden. Ebenfalls ist es möglich das Gerät zu veranlassen mehr elektrische Energie aufzunehmen und diese in Form von Temperatur zu speichern. Das Gerät wird also aufgeladen.

Aufgrund der Tatsache, dass das eingebundene Gerät nicht vom Versorgungsnetz getrennt wird, sondern lediglich intern abschaltet, treten keine unangenehmen Nebeneffekte (z. B. Warnsignale, Lichtausfall, Neuinitialisierung, ...) auf.

Die durch den notwendigen Umbau erforderlichen Kosten sind relativ groß. Der Eingriff in das Gerät kann nur von einem Fachmann durchgeführt werden und ist sehr aufwendig. Durch die notwendige Veränderung gehen auch Garantieansprüche verloren.

Ein externes Steuersignal ist notwendig um die jeweiligen Befehle für einen Eingriff in das Energiemanagement zu erhalten. Für diesen Informationsaustausch wird eine zusätzliche Datenleitung benötigt.

Die benötigten elektrischen Sensordaten schränken die Anwendung bzw. die zu verwendenden Geräte stark ein. Aufgrund dieser Tatsache des großen Aufwandes bzw. der ebenfalls großen Kosten ist die Variante der Veränderung bzw. Überlagerung von Sensorsignalwerten theoretisch möglich, wird jedoch als Nachrüstvariante nur sehr selten bis gar nicht zum Einsatz kommen.

4.5 Sensorsignal neu generieren

Ebenfalls auf die Sensorsignale zielt diese Variante ab. In diesem Fall wird jedoch ein zusätzlicher Sensor angebracht und somit das Sensorsignal gänzlich neu generiert. Durch die Verwendung eines neuen, zusätzlichen Sensors kann ähnlich wie bei der Version, wo die Sensordaten verändert bzw. überlagert werden (siehe Kapitel 4.4), ein aktiver Beitrag zum verbraucherseitigen Energiemanagement geleistet werden. Eine Lastverschiebung lässt sich aufgrund der Information über eine notwendige Datenleitung realisieren. Dabei ist es nicht erforderlich, dass das Gerät vom Versorgungsnetz getrennt wird, da aufgrund der neuen Sensordaten eine andere Situation auftritt und somit von der bestehenden Steuereinheit entsprechend reagiert werden kann. Ähnlich verhält es sich beim Regelausgleich. Durch ein Signal seitens der Datenleitung kann das Gerät kurzfristig abgeschaltet werden und somit seinen Beitrag zum Demand Side Management leisten.

Ein Aufladen des Gerätes, also ein speichern von Temperatur, lässt sich ebenfalls realisieren, da ein direkter Einfluss auf einzelne Parameter des Gerätes genommen wird. Somit kann im Vorhinein gezielt zusätzliche elektrische Energie zugeführt werden.

Speziell bei thermischen Geräten wie z. B. Klimaanlage (siehe Kapitel 2.3.2), wo der Temperatursensor außerhalb des Gerätes angebracht ist, ist ein Anbringen eines neuen Sensors einfacher durchzuführen, als die Sensordaten zu verändern (siehe Kapitel 4.4).

Um verbraucherseitig am Energiemanagement teilnehmen zu können muss das einzubindende Gerät mit elektrischer Energie versorgt werden. Dies erfolgt über den dafür vorgesehenen Energieanschluss. Hierfür sind keine Änderungen erforderlich. Aufgrund der Tatsache, dass eine direkte Verbindung zum Versorgungsnetz besteht und diese bei einem etwaigen Eingriff in das Energiemanagement nicht zwangsweise getrennt wird, fallen die negativen Begleiterscheinungen einer Energieunterbrechung weg. Ein Ausschaltbefehl wirkt sich also nur auf die Steuereinheit aus, welche eine entsprechende Handlung einleitet.

Eine Vermeidung von Lastspitzen, durch eine gezielte Verschiebung der Betriebszeit von Geräten, ist wie bereits bei der Sensordatenveränderung (siehe Kapitel 4.4) beschrieben, durch eine Änderung der Sensorwerte möglich. Beim Spezialfall von thermischen Prozessen wird einfach eine andere Temperatur zur Steuereinheit gesendet. Durch den Einsatz eines neuen Sensors, im Speziellen eines neuen Temperatursensors ist man in der Anwendung etwas flexibler. Es kann zum Beispiel, falls dies erforderlich ist, ein Sensor mit einer größeren Auflösung verwendet werden oder durch gezielte Änderung des Messortes speziell auf die jeweiligen Bedürfnisse eingegangen werden. Auch hier ist der Einsatz eines Mikrocontrollers (MC) erforderlich, welcher die Sensordaten aufbereitet, entsprechend weiterleitet und auf Schaltbefehle vom Energiemanagement reagiert. Wie in Abbildung 4.9 gezeigt, ist auch hier eine Datenleitung erforderlich, welche dem Informationsaustausch zwischen Gerät und dem Energieanbieter beziehungsweise der koordinierenden Einheit für das Verwaltung der verbraucherseitigen Teilnahme am Energiemanagement gewährleistet. Für die Beteiligung am Regelausgleich ist ebenfalls diese Datenleitung notwendig um ein entsprechendes Signal zu übertragen. Eine vorübergehende, erhöhte Energiezufuhr wird auch durch eine Verschiebung der Schaltschwellen realisiert.

Insbesondere bei thermischen Prozessen kann auf die jeweilige Temperatur eingegangen bzw. können diese berücksichtigt werden, wodurch auf die Bedürfnisse des Kühlgutes eingegangen wird.

Je nach vorhandenem Gerät ist ein direkter Eingriff in das Gerät erforderlich oder auch nicht. Handelt es sich zum Beispiel um ein Klimagerät, so sind die erforderlichen Tempera-

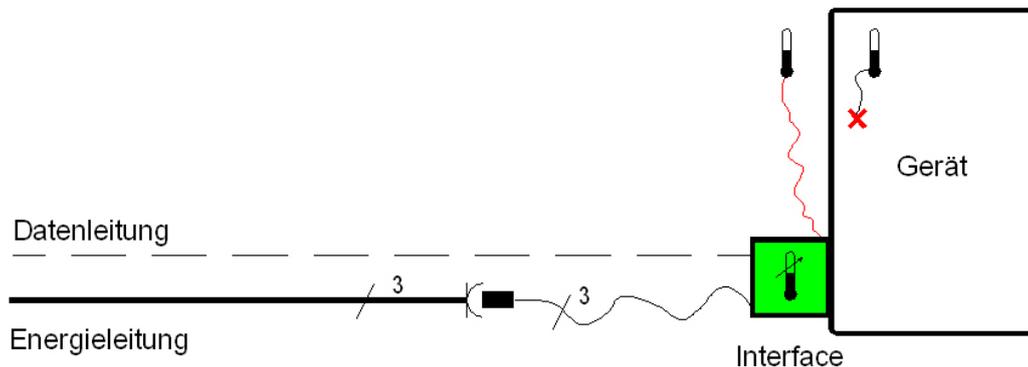


Abbildung 4.9: Sensorsignal neu generieren

tursensoren oft als Raumthermostate möglichst weit vom Gerät entfernt angebracht, um eine gleichmäßige Temperatur zu erfassen. Dazu hat die Klimaanlage einen direkten Anschluss für den Sensor und somit entfällt ein Eingriff bzw. eine Veränderung des Gerätes. Garantieprobleme treten also nicht auf. Die entstehenden Kosten halten sich in diesem Fall in Grenzen, da anstelle eines einfachen Raumthermostates jetzt ein Temperatursensor mit MC und Schnittstelle für das Demand Side Management erforderlich ist. Die notwendigen Arbeiten müssen von einem Fachmann durchgeführt werden, der Zeitaufwand ist jedoch nicht sehr groß. Ist jedoch ein Gerät vorhanden, wo ein Sensor direkt in das Gerät eingebettet ist bzw. keine Anschlüsse für einen Sensor vorhanden sind, so gilt das von Kapitel 4.4 über Veränderung von Sensordaten erläuterte. Der Aufwand sowie die damit verbundenen Kosten steigen sehr stark an.

Die Anforderungen an das erforderliche Interface sind in Anlehnung an die von der Überlagerung beziehungsweise Veränderung der Sensordaten (siehe Kapitel 4.4). Einerseits muss für eine Versorgung mit elektrischer Energie gesorgt werden. Dies geschieht durch bereits genormte Anschlüsse (siehe [TAE05]). Zum Anderen ist ein Austausch von Information erforderlich. Um die Kosten für die Kommunikation zum Energieanbieter möglichst gering zu halten, sind bereits vorhandene Möglichkeiten zu nutzen. Ist dies nicht machbar, stehen weitere Varianten wie beispielsweise WLAN, GSM, EIB, LON, BACNet, . . . zur Verfügung. Die Schnittstelle zum jeweils verwendeten Sensor stellt eine Herausforderung dar, da diese aufgrund der Vielzahl von Sensoren bzw. Mikrocontrollern nur schwer verallgemeinert werden kann. Eine gerätespezifische Lösung muss also jedes Mal neu gefunden werden.

Neben der Schnittstellenproblematik zum Mikrocontroller als auch zum Energieanbieter ist die gerätespezifische Einschränkung ein großes Problem. Wie bereits zuvor beschrieben ist diese Variante des Eingriffes in das verbraucherseitige Energiemanagement nur dann zielführend, wenn das Gerät über einen externen Sensoranschluss verfügt. Ist dies nicht der Fall, steht der Aufwand nicht dafür bzw. verschwinden die durch diese Variante möglichen Vorteile.

Als zusätzliches Problem kommt die Einschränkung auf elektrische Sensorwertverarbeitung hinzu. Es können nur solche Geräte sinnvoll verändert werden, welche die Sensorwerte elektrisch verarbeiten. Eine mechanische Messeinheit, wie dies bei der Temperaturregelung (siehe Kapitel 2.3.1) von thermischen Prozessen oft üblich ist und als Thermostat oder Pressostat realisiert ist, kann nicht verwendet werden. Dementsprechend schränkt sich die Geräteauswahl stark ein, da die Version mit einem neuen Sensor nur bei Geräten sinnvoll ist, welche sowohl die Messwerte elektrisch verarbeiten, als auch über einen externen Sensoranschluss verfügen.

Eventuelle Probleme kann die Anbringung eines neuen Sensors mit sich bringen. Da elektronische Bauteile möglichst von Feuchtigkeit geschützt werden sollen, kann eine Abdichtung bei Einsätzen in feuchten Räumen erforderlich werden. Dadurch kommt es aufgrund der Isolierung zwangsläufig auch zu einer Temperaturdifferenz zwischen gemessenen Wert und tatsächlichen Wert. Bei Prozessen, wo die Temperatur genau eingehalten werden muss, ist diese Differenz mitzubersichtigen bzw. gegebenenfalls auszugleichen.

Die Verwendung eines neuen, beziehungsweise zusätzlichen Sensors ermöglicht einen guten Eingriff in das Demand Side Management. Sowohl ein Regelausgleich als auch eine Vermeidung von Lastspitzen durch eine zeitliche Verschiebung des Verbrauches kann realisiert werden. Darüber hinaus ist auch ein Aufladen möglich, wodurch eine größere Flexibilität gewährleistet wird.

Da neue Sensordaten generiert und damit direkt der Steuereinheit des jeweiligen Gerätes zugeführt werden, wird das Gerät nicht von der Versorgungsspannung getrennt. Dadurch kann ein normaler Betrieb gewährleistet und eventuelle Einschränkungen in der Handhabung (z. B. durch Ausfall der Innenbeleuchtung) vermieden werden.

Aufgrund der Tatsache, dass auf die gerade aktuelle Temperatur eingegangen wird, sind die Inhalte vor Beschädigung durch große Temperaturänderungen geschützt.

Obwohl ein Fachmann erforderlich ist, hält sich der Aufwand und die entsprechenden Kosten im Rahmen. Im Idealfall muss das Gerät nicht verändert werden, weshalb eine bestehende Garantie nicht endet.

Es besteht eine relativ große Einschränkung in der Geräteauswahl. Lediglich Geräte mit einer elektrischen Sensorwertaufbereitung können verwendet werden. Darüber hinaus ist das Vorhandensein eines externen Anschlusses für einen externen Sensor erforderlich. In erster Linie trifft dies auf größere Klimaanlage zu, welche durch den Einbau eines neuen Sensors mit MC aktiv in das verbraucherseitige Energiemanagement eingebunden werden können. Ein nachträglicher Einbau in bereits bestehende Anlagen ist ebenfalls möglich.

4.6 Externe Temperaturregelung

Bei thermischen Prozessen mit geregelt Temperatur besteht die Möglichkeit, eine allgemeine Temperaturregelung außerhalb des Gerätes zu realisieren. Solch eine externe Regelung der Temperatur bietet eine sehr flexible und vielfältige Möglichkeit in das verbraucherseitige Energiemanagement einzugreifen. Eine Lastverschiebung kann durch einen Schaltbefehl ausgelöst werden. Genauso verhält es sich beim Mitwirken zum Regelausgleich. Ein Befehl zum Aufladen kann dem Gerät kurzfristig zusätzliche elektrische Energie zuführen, damit diese in Form von thermischer Energie gespeichert werden kann.

Der benötigte Aufwand ist sehr gering, da die neue Temperatureinheit einfach zwischengeschaltet wird. Es ist also kein Fachmann erforderlich, sondern ein Laie kann das neue System anschließen. Die entstehenden Kosten für solch ein System sind ebenfalls relativ gering, da nicht sehr viele elektronische Komponenten benötigt werden und die Kosten für einen Fachmann wegfallen. Da ein Eingriff in das Gerät nicht erforderlich ist, kommt es auch zu keinerlei Problemen mit der Garantie der Geräte.

Die externe Temperaturregelung wird in die Energiezufuhr geschaltet (siehe Abbildung 4.10). Dadurch wird die Zufuhr der elektrischen Energie unterbrochen. Dies kann einerseits zu Problemen führen, bringt jedoch den großen Vorteil, dass diese Art der Regelung beinahe bei jedem thermischen Gerät ohne größeren Aufwand eingesetzt werden kann.

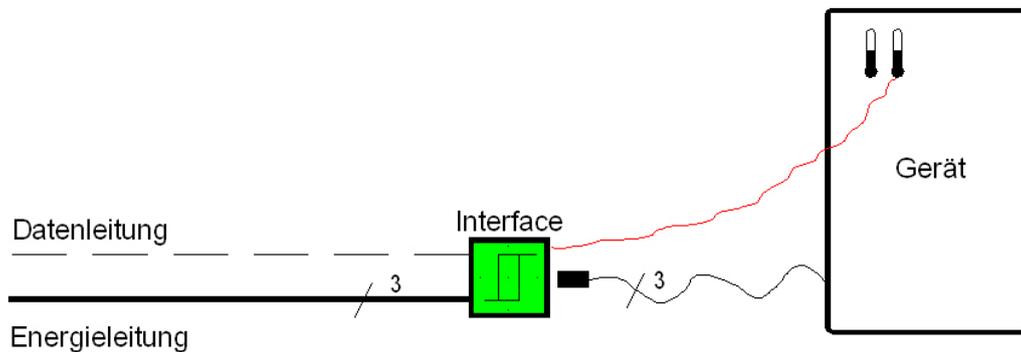


Abbildung 4.10: externe Temperaturregelung

Neben der externen Steuereinheit ist auch ein zusätzlicher Temperatursensor notwendig, welcher der neuen, außen liegenden Regeleinheit die aktuellen Temperaturwerte mitteilt. Wichtig ist hier, dass der Sensor an jenen Punkt befestigt wird, welcher für den jeweiligen Prozess von Bedeutung sind. Dies bringt den Vorteil, dass bei richtiger Sensoranordnung gut auf besondere Anforderungen eingegangen werden kann. Wird jedoch ein ungünstiger Platz gewählt, so kann genau das Gegenteil bewirkt werden, nämlich eine verfälschte Ermittlung der Temperatur.

Die Regeleinheit wird als einfacher Zweipunktregler ausgeführt. Mittels Mikrocontroller wird solch eine Regelung realisiert. Dabei sind die zwei Schaltschwellen den jeweiligen Prozess anzupassen und entsprechend einzustellen. Wird beispielsweise bei einem Kühlgerät ein Befehl zum Aufladen empfangen, werden die Temperaturschwellen um einen vorher festgelegten Wert nach unten geschoben. Dadurch kann erreicht werden, dass die Temperatur genau um den festgelegten Wert niedriger ist, als der ursprüngliche Wert. Somit ist thermische Energie im Gerät gespeichert und kann bei einer Abschaltung leichter den Energieausfall überbrücken. Ähnlich verhält sich die Situation bei einem Befehl des Regelausgleiches. Hier werden die Temperaturschwellen kurzfristig nach oben verlagert, was einer höheren Temperatur entspricht. Das Gerät schaltet sich erst später ein, also bei einer höheren Temperatur. Dauert der Ausgleich zu lange, und die Temperatur überschreitet auch den bereits angehobenen Temperaturwert, so schaltet das Gerät trotzdem wieder ein, kühlt aber nicht auf den normalen Endwert runter, sondern auch nur auf die angehobene untere Schwelle. Dadurch wird möglichst wenig elektrische Energie zugeführt und der Inhalt wird trotzdem geschont. Bei einer anstehenden Lastverschiebung verhält es sich ganz gleich. Durch gezielte Verschiebung der Schaltschwellen des programmierten Zweipunktreglers kann aufgrund der Isolierung und damit verbundenen Trägheit von thermischen Prozessen auch eine längere Abschaltung realisiert und dadurch eine Lastverschiebung erzwungen werden.

Um den Einsatz innerhalb eines möglichst breiten Temperaturbandes zu ermöglichen, muss der interne Temperaturregler auf jenes Extremum eingestellt werden, wo das Gerät am meisten in Betrieb ist. Bei einem Kältegerät beispielsweise wäre dies eine Einstellung auf minimale Temperatur. Diese untere Temperaturschwelle kann vom externen Regler nicht unterschritten werden, da ansonsten die ursprüngliche Geräteregeleinheit eingreift und sich das Gerät ausschalten würde.

Aufgrund der Tatsache, dass die ursprüngliche Regelung nicht deaktiviert ist, sondern quasi nur in Dauerbetrieb ist, sind sämtliche Schutzvorkehrungen des Gerätes noch aktiv. Dazu

zählt unter anderem der eingebaute Motorschutzschalter, welcher das Gerät vor Überlastung schützt. Wird beispielsweise ein Kühlgerät abgeschaltet und kurz darauf gleich wieder eingeschaltet kommt es zu einem sehr großen Anlaufstrom, welcher den Motor gefährden würde. Dieser große Anlaufstrom ist dadurch bedingt, dass der Kompressor gegen den noch bestehenden Druck im Kondensator anlaufen muss und dies gleich zu Beginn nicht möglich ist. Der erwähnte Motorschutz verhindert ein Wiedereinschalten nach einer sehr kurzen Ausschaltpause für ein paar Minuten. Als grober Richtwert sollte eine Pause von ca. zehn Minuten eingehalten werden. [Sch04]. Da der Motorschutz diese Aufgabe übernimmt, muss keine zusätzliche Schutzschaltung vorgesehen werden.

Für die einzelnen Steuerbefehle seitens des Energieanbieters ist eine separate Datenleitung erforderlich. Darüber hinaus werden jedoch auch Informationen übertragen wie zum Beispiel die jeweiligen Ausschalthandlungen aufgrund des Eingriffes in das verbraucherseitige Energiemanagement. Dadurch kann die Mithilfe honoriert und rückvergütet werden.

Der erforderliche Temperatursensor ist so zu wählen, dass dieser für einen möglichst breiten Anwendungsbereich eingesetzt werden kann. Ein Bauteil, welches die Werte gleich in digitaler Form weitergibt, ist empfehlenswert, da dadurch die Weiterverarbeitung im Mikrocontroller vereinfacht wird.

Die Verbindung zwischen Temperatursensor und externer Regeleinheit kann durch ein einfaches Kabel erfolgen. Aber auch eine Funkübertragung ist denkbar. Nachteilig dabei ist jedoch, dass der Sendeteil mit Batterien versehen werden muss, welche ausgetauscht werden müssen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Temperaturwerte mit Hilfe eines Resonanzschwingkreises zu bestimmen bzw. zu übertragen. Dabei ändert sich die Induktivität, welche als Spule mit Bimetallstreifen realisiert ist aufgrund der Veränderung des Bimetalls. Dies hat eine Veränderung der Resonanzfrequenz zur Folge, welche somit in direktem Zusammenhang zur Temperatur steht. Die Resonanzfrequenz kann mittels eines Mikrocontrollers erfasst und in einen proportionalen Temperaturwert umgerechnet werden. Für diese Variante ist keine zusätzliche Spannungsversorgung des Sensors notwendig. [SHS98] Je nach Anforderung wird man sich für eine entsprechende Variante entscheiden.

Das Interface muss den Anforderungen für die elektrische Energiezufuhr gerecht werden. Dafür gibt es die in den technischen Anschlussbestimmungen [TAE05] genaue Richtlinien, welche standardisiert sind und keine Kompatibilitätsprobleme darstellen.

Die Verbindung mit dem Sensor bedarf keiner speziellen Normung beziehungsweise Standardisierung, da dies eine vorgegebene und feste Verbindung zwischen externer Regeleinheit und Sensor darstellt welche aufeinander abgestimmt sind. Eine anderwertige Verwendung für diese Verbindung ist nicht vorgesehen.

Eine Verbindung zum Energieanbieter beziehungsweise zur Koordinationseinheit aufzubauen ist die größte Herausforderung an die Schnittstelle. Die externe Regeleinheit sollte mit möglichst vielen bekannten Schnittstellen ausgestattet sein, damit eine Kommunikation durch verschiedene Medien wie z. B. WLAN, GSM, Ethernet, EIB, LON, BACNet, ... möglich ist. Aus Kostengründen und eventuell auch aus Platzgründen wird man sich jedoch für nur eine dieser Übertragungsmedien entscheiden müssen und dementsprechend auch für die entsprechende Schnittstelle.

Hauptproblem der externen Temperaturregelung ist die Trennung des Gerätes vom Versorgungsnetz. Da die Regelung außerhalb erfolgt, findet die Unterbrechung nicht nur während eines Regelausgleiches oder einer Lastverschiebung statt, sondern auch im Normalbetrieb. Somit kann es, je nach verwendetem Gerätetyp, zu Einbußen im Komfort kommen. Dies äußert sich beispielsweise dadurch, dass die Beleuchtung im inneren eines Kühlschranks nicht mehr

aktiv ist.

Speziell beim Regelausgleich, wo beispielsweise durch die Primärregelung (siehe Kapitel 2.1.1) eine Ausschaltung des Gerätes von meist relativ kurzer Zeit im Sekundenbereich erfolgt, kann der Kompressor nicht gleich wieder in Betrieb gehen. Dies ist dadurch begründet, dass eine Wartezeit von cirka zehn Minuten erforderlich ist, bis sich der zuvor aufgebaute Druck im Kondensator wieder abgebaut hat und der Kompressor von neuem anlaufen kann. [Sch04] Dadurch entsteht bei der aktiven Beteiligung am verbraucherseitigem Regelausgleich eine cirka zehn minütige Stillstandszeit anstelle von ein paar Sekunden. Im Normalbetrieb wirkt sich dieser Effekt nicht aus, da durch die Trägheit des Systems ein Wiedereinschalten vor dieser Wartezeit nicht realistisch ist.

Ein Verstellen des internen Reglers auf ein Extremum, bei dem das Gerät am längsten in Betrieb ist, darf nicht vergessen werden. Ansonsten ist der extern realisierte Regler wirkungslos bzw. kann seine Fähigkeiten nur beschränkt einsetzen.

Der externe Temperaturregler ist auf thermische Prozesse beschränkt.

Ein Eingriff in das verbraucherseitige Energiemanagement mittels einer externen Temperaturregelung ermöglicht sowohl eine Lastspitzenvermeidung durch eine zeitliche Verschiebung als auch eine Beteiligung am Regelausgleich. Ein Aufladen ist mittels dieser Variante ebenfalls möglich. Nachteilig wirkt sich die Trennung vom Versorgungsnetz aus. Des weiteren ist die externe Regelung nur bei thermischen Prozessen bzw. Geräten zielführend.

Der erforderliche Aufwand ist sehr gering. Aufgrund der Tatsache, dass für den Einsatz der neuen, externen Temperaturregelung kein Fachmann und kein Eingriff in das Gerät erforderlich ist, bleiben die Kosten gering. Ebenfalls gibt es keine Probleme mit der Garantie der Geräte.

Der große Vorteil der außen liegenden Temperaturregelung besteht in der einfachen Handhabung und den flexiblen Einsatzmöglichkeiten. Dieses System kann sehr gut als Baukastensystem zum Nachrüsten von bereits bestehenden Geräten verwendet werden. Somit müssen keine neuen Geräte angeschafft werden.

4.7 Ersatz der gesamten Steuereinheit

Ein gänzlicher Austausch der Steuereinheit bietet auch Möglichkeiten in das verbraucherseitige Energiemanagement einzugreifen. Dabei wird die gesamte Steuereinheit neu entworfen. [Gad02] [Voi99] Durch den kompletten Austausch des Steuerbords kann gezielt auf die jeweiligen Anforderungen und Bedürfnisse eingegangen werden. Dies umfasst nicht nur die Möglichkeiten des Eingriffs in das Energiemanagement, sondern auch etwaig gewünschte Zusatzfunktionen.

Im Bereich des Demand Side Managements können Lastspitzen durch gezielte, zeitliche Verschiebungen der Zufuhr von elektrischer Energie vermieden werden. Ein etwaig erforderlicher Regelausgleich kann ebenso realisiert werden, wie das Aufladen.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Komfort und die Möglichkeiten des Gerätes auf die jeweiligen Bedürfnisse des Benutzers auszulegen. Es können zum Beispiel eigene Profile angelegt und realisiert werden. So kann beispielsweise eine extra Funktion mit dem Namen "Party" inkludiert werden, welche die Solltemperatur etwas verändert. Dies wird beispielsweise bereits bei neuen Wärmepumpen [Hel07] eingesetzt, wodurch abends eine Absenkung der Raumtemperatur um eine bestimmte Zeit später eingeleitet wird. Dadurch bleibt der Raum länger warm. Ebenso ist es beispielsweise möglich, einen Kühlschrank mit einem Profil

Die Anforderungen an das Interface können in zwei Bereiche geteilt werden. Zum Einen in die Energiezufuhr, aufgrund der bereits bestehenden Standardisierung bzw. Vorschriften (siehe [TAE05]) vereinheitlicht wurde.

Zum Anderen muss eine Verbindung für die Datenleitung bestehen, worüber ein Informationsaustausch erfolgen kann. Diese Schnittstelle kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht vereinheitlicht werden, weshalb eine Entscheidung über die zu verwendende Technik getroffen werden muss. Bereits bestehende System sollten aufgrund des Wegfalls von zusätzlichen Kosten bevorzugt werden. Neben bereits verbreiteten Möglichkeiten der Übertragung wie GSM, WLAN oder bestehende Internet- und Telefonverbindungen kommen auch Gebäudevernetzungs-systeme in Frage. Um einen effizienten Eingriff in das verbraucherseitige Energiemanagement und eine Steigerung des Komforts zu erreichen, ist den Gebäudevernetzungs-systemen wie beispielsweise EIB, LON, BACNet der Vorzug zu geben. Dies betrifft insbesondere große Gebäude und überall dort, wo noch keine Möglichkeit der Übertragung vorhanden ist.

Wenn das gesamte Steuerbord ausgetauscht wird, besteht das Hauptproblem im immensen erforderlichen Aufwand. Nicht nur, dass die Steuereinheit des jeweiligen Gerätes neu aufgebaut und entwickelt werden muss, ist es zusätzlich noch erforderlich, die Funktionsweise der alten Steuerung bzw. Regelung genau zu analysieren. Diese alten Elemente müssen natürlich beim neuen Entwurf auch mitberücksichtigt werden, damit das Gerät später wieder die volle Funktionsfähigkeit gewährleisten kann.

Eine Anpassung an das jeweilige Gerät ist erforderlich. Problem dabei ist auch, dass eine bereits realisierte Lösung nicht wieder verwendet werden kann, da aufgrund der gerätespezifischen Steuereinheit, welche mitberücksichtigt werden muss, kein Gerät dem anderen gleicht. Lediglich die gleichen Typen des gleichen Herstellers sind ident und somit kann die gleiche Entwicklung verwendet werden. Der sehr große Aufwand zum Entwickeln eines neuen Steuerbords kann also kaum auf mehrere Geräte, welche alle dieses neue Bord verwenden können, aufgeteilt werden. Es muss also für einzelne Gerät wieder eine neue Lösung gefunden werden. Die bereits angesprochenen Kosten stellen eine große Hürde dar. Neben den relativ geringen Kosten für Bauteile fallen aufgrund des großen zeitlichen Aufwandes natürlich enorme Kosten für die ausführende Fachkraft an. Diese zusätzlich zu den Gerätekosten anfallenden Kosten können schnell den Preis des ursprünglichen Gerätes übersteigen. Insbesondere bei kleineren Geräten wie beispielsweise Kühlschränken macht der Preis für die erforderliche Umrüstung ein Vielfaches vom Kaufpreis aus.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht nur ein Öffnen des Gerätes erforderlich ist, sondern etliche Komponenten ausgetauscht und verändert werden, verfällt natürlich jeglicher Garantieanspruch. Dies kann bei neu erstellten Geräten zu Problemen führen, wenn beispielsweise ein Kompressor, welcher nicht verändert wurde, nach kurzer Zeit einen Defekt aufweist. Dieser Defekt kann aufgrund von Geräteveränderungen nicht oder nur sehr schwer reklamiert werden.

Durch einen Austausch bzw. durch eine Neuentwicklung des Steuerbords von Geräten kann ein optimaler Eingriff in das verbraucherseitige Energiemanagement erfolgen.

Die zusätzlich notwendige Datenleitung sendet Steuerbefehle und empfängt Geräteinformationen. Dadurch ist es speziell bei thermischen Geräten möglich, dass das Gerät bei einer gewünschten Lastverschiebung abgeschaltet wird und zu einem späteren Zeitpunkt die so fehlende elektrische Energie wieder für sich beansprucht. Ein Regelausgleich kann ebenfalls auf diese Weise realisiert werden, mit dem Unterschied, dass die Abschaltung wesentlich kürzer erfolgt. Durch eine gezielte Aufladung bei thermischen Prozessen wird eine Lastverschiebung zusätzlich unterstützt.

Aufgrund der Tatsache, dass das Gerät nicht vom Versorgungsnetz und somit nicht von der Zufuhr von elektrischer Energie getrennt wird, treten keine unangenehmen Nebeneffekte und Einbußen wie beispielsweise Ausfall der Innenbeleuchtung auf. Eine Abschaltung erfolgt nur durch die Steuereinheit. Des weiteren können Sensordaten berücksichtigt werden.

Sowohl zusätzliche Messungen als auch eigene Profile können genauso eingebunden werden wie Protokolle erstellt und analysiert werden.

Hauptproblem ist der enorme Aufwand und die damit verbundenen Kosten. Es handelt sich um eine sehr teure Möglichkeit in das Energiemanagement einzugreifen. [PPL03] Das dies technisch möglich ist, zeigen die beiden Diplomarbeiten "Entwicklung einer EIB-Anschaltung für einen intelligenten Kühlschrank" [Gad02] und „Entwicklung eines Feldbus-Interfaces für eine Kühl-Gefrier-Gerätekombination“ [Voi99]. In beiden Arbeiten wird anhand eines Kühlschranks gezeigt, wie dieser beispielsweise verändert werden muss um an eine bestehende Gebäudevernetzung¹ anschließen zu können.

Ein Austausch des gesamte Steuerbords ist jene Möglichkeit, welche die größten Möglichkeiten bietet. Aufgrund des enormen Aufwandes jedoch als Nachbauvariante kaum zum Einsatz kommen wird. Bei dieser Variante, gezielt in das Demand Side Management einzugreifen, sind vorrangig die Gerätehersteller gefragt.

4.8 Gerät mit vorhandenes Interface verwenden

Der Idealfall wäre natürlich, wenn ein Gerät mit einem bereits vorhandenem Interface verwendet werden könnte. Das bestmögliche Resultat kann dann erzielt werden, wenn verbraucherseitiges Energiemanagement, Interface und Gerät aufeinander abgestimmt sind. In solch einen Fall können alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden.

Eine Lastverschiebung ist genauso möglich wie ein Mitwirken bei der Primärregelung. Auch der Aufladevorgang ist optimiert, da die genauen Geräteparameter bekannt sind und darauf genau eingegangen werden kann. Aufgrund dieser Tatsache ist eine Trennung vom Versorgungsnetz auch nicht nötig. Eine Abschaltung wird nur von der Steuereinheit erzwungen und somit ist eine Unterbrechung der Energiezufuhr nicht erforderlich.

Spezielle Sensordaten können mitberücksichtigt werden und zum Beispiel bei thermischen Prozessen kann beispielsweise die Innentemperatur eine Schaltentscheidung mittreffen.

Der erforderliche Aufwand ist relativ gering. Lediglich der Anschluss an das Versorgungsnetz sowie eine Datenleitung sind erforderlich. Dadurch entfällt auch ein Öffnen des Gerätes bzw. ein Eingriff in dieses, weshalb keine Probleme mit der Garantie entstehen. Der Anschluss bzw. die Installation kann auch von einem Laien durchgeführt werden, weshalb die Kosten für einen Fachmann entfallen.

Für einen effizienten Eingriff in den zeitlichen Energieverbrauch von Geräten zu ermöglichen ist ein zusätzlicher Informationskanal erforderlich. Diese Datenleitung dient sowohl der Übertragung von Steuerbefehlen als auch dem Informationsaustausch. Somit kann die Beteiligung am Energiemanagement vom Energieanbieter honoriert und vergütet werden.

Zusätzlich zu der Datenleitung ist eine Leitung für die Zufuhr von elektrischer Energie nötig (siehe Abbildung 4.12).

Aufgrund der Tatsache, dass alle erforderlichen Informationen und Steuerbefehle aufeinander abgestimmt sind, funktioniert der ganze Ablauf selbstständig. Der Benutzer muss sich also um nichts mehr kümmern. Nach erfolgreichem Anschluss des Gerätes kann dieses uneingeschränkt

¹in diesem Fall EIB bzw. LON

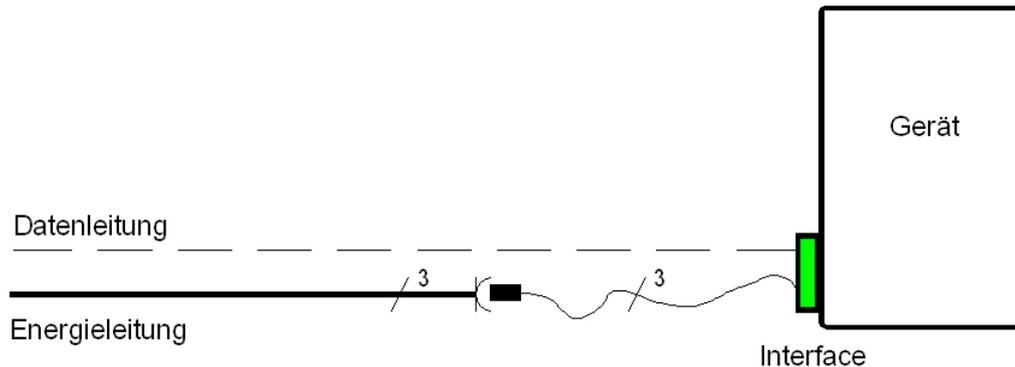


Abbildung 4.12: vorhandenes Interface benutzen

genutzt werden und entscheidende Schaltvorgänge des Demand Side Managements laufen unbemerkt im Hintergrund ab.

Aufgrund der möglichst großen Flexibilität sowie eines breiten Einsatzgebietes der Geräte sind sehr große Anforderungen an das Interface gestellt. Neben dem genormten Anschluss für die elektrische Energie ist eine zusätzliche Schnittstelle für den Informationsaustausch von Nöten.

Für die Schnittstelle der Datenleitung wäre ein einheitlicher Anschluss für alle gängigen Übertragungsmedien wünschenswert. Also einen Kombinationsstecker für GSM, WLAN, EIB, LON, BACNet, Ethernet, . . . Somit könnten die Geräte ohne Aufwand leicht und flexibel zumindest an die gängigen Systeme angeschlossen werden. Hierfür ist es jedoch erforderlich, dass man sich auf einen Standardanschluss einigt, welcher zu den meisten Systemen kompatibel ist. Da speziell in diesem Bereich jeder der Systemanbieter seine Technologie durchsetzen will, wird es noch einige Zeit dauern, bis ein einheitlicher Anschluss gefunden wird.

Da ein solcher Kombinationsstecker vorraussichtlich nicht so schnell realisiert werden kann, muss wieder auf die Variante der Einzellösung zurückgegriffen werden. Je nach Anwendung bzw. bereits vorhandenen Übertragungsmedien muss man sich für ein entsprechendes System mit dem jeweiligen Anschluss entscheiden. Vorzugsweise sollte dies ein System der Gebäudeautomation sein, um speziell in großen Gebäuden eine große Zahl an Verbrauchern einbinden zu können.

Trotz des relativ geringen Aufwandes können die erforderlichen Kosten groß werden, nämlich dann, wenn ein neues Gerät angeschafft werden muss. Eine Erweiterung von bereits bestehenden Geräten auf diese Technologie ist nicht möglich.

Das Hauptproblem besteht aber darin, dass ein einheitlicher Standard für die Datenübertragung gefunden werden sollte. Ist dies nicht der Fall, so müssten die Gerätehersteller je ein Gerät zu den gängigsten Übertragungsmedien erzeugen.

Des weiteren muss für jedes Gerät eine eigene Steuereinheit entwickelt und eingebunden werden.

Die Verwendung eines bereits vorhandene Interfaces ist noch in der Entwicklung bzw. ein visionärer Ausblick. Durch ein aufeinander abgestimmtes System von Steuerbefehlen seitens der Koordinationseinheit für die Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement, Datenübermittlung seitens des Gerätes und dem Gerät selbst kann eine optimale Einbindung in das Energiemanagement erfolgen. Sowohl eine Lastverschiebung als auch ein Regelausgleich

kann erwirkt werden. Des weiteren besteht die Möglichkeit des Aufladens. Aufgrund der Tatsache, dass das Gerät nicht vom Stromnetz getrennt wird, treten keine damit verbundenen unangenehmen Begleiterscheinungen auf.

Der Aufwand für den Anschluss eines Gerätes mit bereits integriertem Interface ist sehr gering und kann von einem Laien durchgeführt werden. Die entstehenden Kosten dieser Variante sind relativ groß, da ein neues Gerät angeschafft werden muss. Die Möglichkeit des Nachrüstens von bereits bestehenden Geräten besteht nicht.

Es existieren noch keine Standards für solch ein Interface, welches zu den gängigen Übertragungsmedien kompatibel ist. Einige Gerätehersteller von größeren Geräten wie beispielsweise Wärmepumpen haben sogar ihren eigenen Kommunikationsbus entwickelt, welcher zu anderen nicht kompatibel ist. Der Impuls für den Einsatz eines vorhandenen Interfaces muss von den Geräteherstellern kommen, welche auch bereit sein müssen sich auf einen oder wenige Standards zu einigen. Solange dies nicht geschieht, bleibt der Wunsch nach einem inkludiertem Dateninterface in Geräten eine Vision.

4.9 Vergleich und Bewertung der Möglichkeiten

In Tabelle 4.1 sind die Möglichkeiten verbraucherseitig in das Energiemanagement einzugreifen noch einmal gegenübergestellt und aufgelistet.

Bis auf den in Kapitel 4.8 beschriebenen Einsatz eines bereits vorhandenen Interfaces stellen alle anderen vorgestellten Lösungen Kompromisse dar.

Sowohl die Variante Zeitschaltuhr (siehe Kapitel 4.1) als auch die Variante Frequenz- bzw. Spannungsüberwachung (siehe Kapitel 4.2) stellen technisch machbare Szenarien dar, sind aber aufgrund ihrer Einschränkungen bezüglich Tarifabrechnung und Eingriffsmöglichkeiten in das Energiemanagement nicht zu empfehlen.

Die Veränderung des Sensorsignals (siehe Kapitel 4.4) als auch eine Erneuerung des kompletten Steuerbords (siehe Kapitel 4.7) werden aufgrund ihren großen Aufwandes nur in Sonderfällen zum Einsatz kommen.

Brauchbare Möglichkeiten der Nachrüstung mit kleinen Einschränkungen stellen die letzten drei Varianten dar. Die Beobachtung (siehe Kapitel 4.3) kann überall dort zum Einsatz kommen, wo eine grobe Abschätzung der Situation ausreichend ist und ein Anbringen von zusätzlichen Sensoren nicht möglich ist. Dies trifft beispielsweise auf einen Warmwasserboiler zu.

Speziell bei thermischen Geräten, wo der Temperatursensor elektrisch ausgeführt ist und außerhalb des Gerätes angebracht ist, stellt die Variante der Neugenerierung des Sensorsignales (siehe Kapitel 4.5) eine gute Alternative dar. Hauptanwendung hierfür ist ein Klimagerät.

Das unter Kapitel 4.6 vorgestellte Konzept der externen Temperaturregelung stellt den flexibelsten Nachrüstsatz dar. Durch einmalige Entwicklungskosten können besonders einfache, zweipunktgeregelte, thermische Geräte effizient in das Energiemanagement eingebunden werden.

Tabelle 4.1: Übersicht verschiedener Interfacemöglichkeiten

	Zeit- schaltuhr	Frequenz- bzw. Spannungs- über- wachung	Beobach- tung der Schalt- zustände	Sensor- signal verändern	Sensor- signal neu generieren	Tempe- ratur- regelung neu/extern	Ersatz der gesamten Steuer- einheit	vorhan- denes Interface einsetzen
Temperatur berücksichtigt	nein	nein	indirekt	ja	ja	ja	ja	ja
Trennung vom Netz	ja	ja	ja	nein	nein	ja	nein	nein
Lastverschiebung	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Regelausgleich	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Aufladen	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Aufwand	gering	sehr gering	sehr gering	groß	mittel	sehr gering	sehr groß	sehr gering
Kosten	sehr gering	gering	sehr gering	groß	mittel	gering	sehr groß	relativ groß
Garantieproblem	nein	nein	nein	ja	ja/nein	nein	ja	nein
Personal	Late	Late	Late	Fachmann	Fachmann	Late	Fachmann	Late
Einschränkungen	keine	keine	keine	elektr. Temp.- Messung	elektr. Temp.- Messung	keine	spezieller Gerätetyp	keine
benötigte Information	zur Tarif- anpassung	zur Tarif- anpassung	Steuersignal von außen	Steuersignal von außen	Steuersignal von außen	Steuersignal von außen	Steuersignal von außen	Steuersignal von außen
Bemerkung	Abschaltung im Vor- hinein anpassen	Gleich- zeitiges Einschal- ten vieler Geräte kann zu Problem führen	Geräteda- ten müssen beobachtet werden	Überlager- ung des Signales notwendig	Zusätzlicher Sensor notwendig; einfacher zu Imple- mentieren als Sensor- signal verändern	zusätzlicher Sensor er- forderlich; Mikro- controller gesteuerter Zweipunkt- regler; Baukasten- system	zusätzliche Messungen können realisiert werden; eigene Pro- file können erstellt werden; Protokoll	neues Gerät ist erfor- derlich; Problem mit Stan- dard; noch visionärer Ausblick

Kapitel 5

Realisierung einer externen Temperaturregelung

Für die Realisierung einer Möglichkeit der Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement wurde die Variante der externen Temperaturregelung (siehe Kapitel 4.6) gewählt. Ausschlaggebend für diese Auswahl war die einfache Möglichkeit des Nachrüstens von bereits bestehenden thermischen Geräten, sowie die relativ große Flexibilität bei den Einsatzmöglichkeiten. Die externe Temperaturregelung stellt nach Erachtens des Autors die beste, günstigste und einfachste Übergangslösung zur Einbindung von elektrischen Geräten in das Energiemanagement dar, bis integrierte Interfaces (siehe Kapitel 4.8) bei Geräten zum Einsatz kommen.

5.1 Beschreibung der Realisierung

Die durchgeführte Realisierung soll einerseits die Möglichkeiten, welche sich durch diesen Nachrüstungsatz ergeben aufzeigen. Andererseits werden auch entsprechende Hürden und Einschränkungen betrachtet und analysiert.

Als Versuchsobjekt wurde ein Kühlschrank gewählt. Diese Entscheidung wurde aus mehreren Gründen getroffen.

- Die Tatsache, dass ein Kühlschrank ein thermisches Gerät ist, schafft die Grundvoraussetzung für diese Realisierung.
- In Österreich sind Kühlschränke flächendeckend im Einsatz. Somit kann angenommen werden, dass beinahe jeder Haushalt bzw. jedes Gebäude einen Kühlschrank besitzt, welcher in das Energiemanagement eingebunden werden kann.
- Zumindest die Grundfunktionen sind bei allen Kühlschränken identisch
- Kühlschränke können für Testzwecke zu erschwinglichen Kosten erstanden werden.

5.1.1 Verwendete Hardware

Zur Realisierung des Versuchsaufbaues fiel die Entscheidung auf den Kühlschrank FR-063R (siehe Abbildung 5.1) der Firma Daewoo [Dae07], da dieser die preiswerteste Variante darstellte. Es handelt sich dabei um ein Gerät der Energieklasse A mit einem Nutzinhalt von



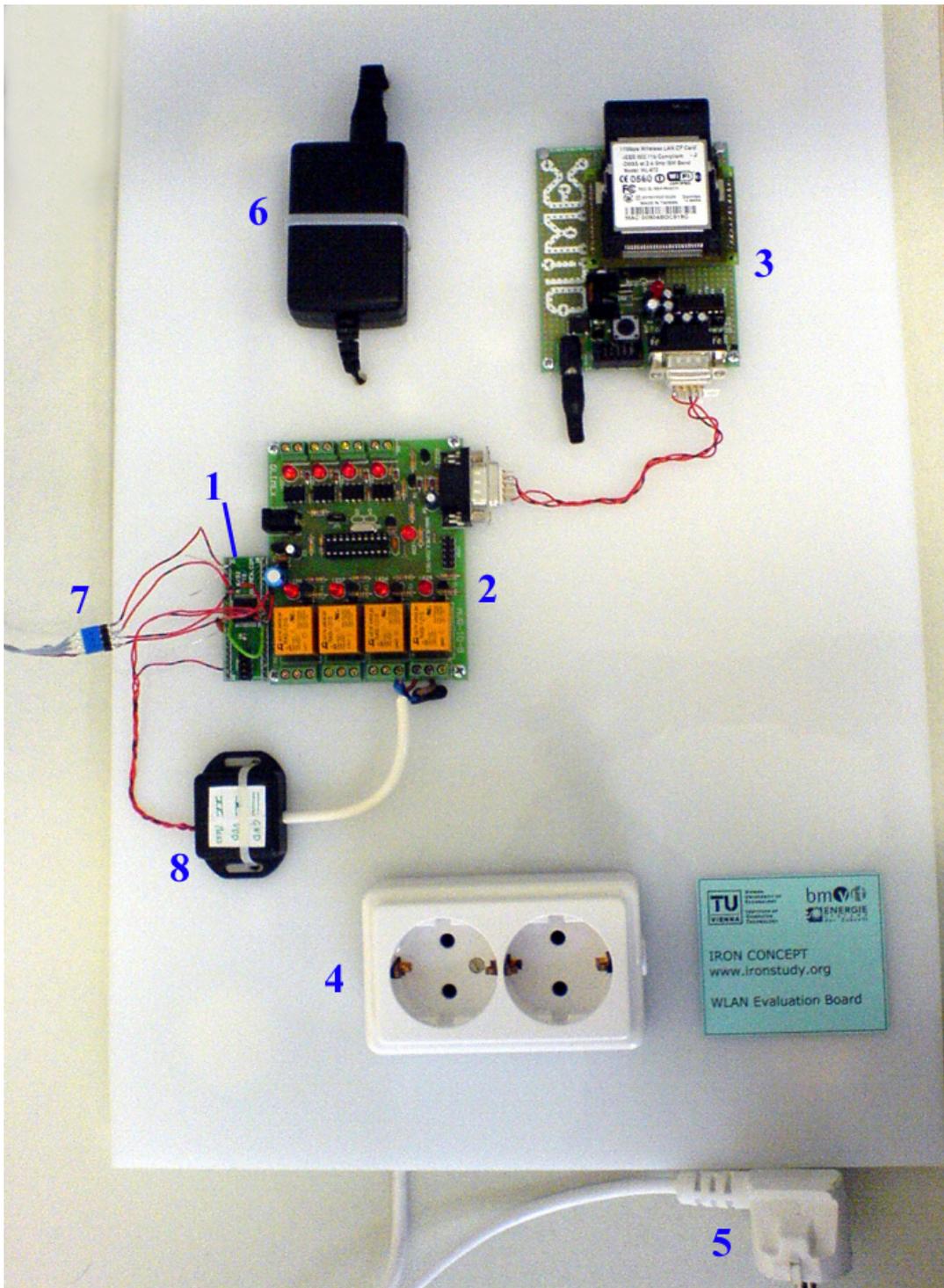
Abbildung 5.1: verwendeter Kühlschrank

45 Liter. Das verwendete Kältemittel ist FCKW-frei und vom Typ R-134A (siehe Kapitel 2.3.1). Die Temperaturregelung erfolgt mechanisch mittels Thermostat (siehe Kapitel 2.3.1). Der Kühlschrank hat ein Gewicht von 18 kg und Außenabmessungen von 440 mm x 511 mm x 452 mm (B/H/T).

Die Realisierung der externen Regelung erfolgte auf einem Versuchsbord. Wie Abbildung 5.2 zeigt, befinden sich auf dem zur Verfügung gestellten, verwendeten Versuchsbord folgende Module der Firma Olimex [Oli07]:

- AVR-M32 (siehe Abbildung 5.2 Position 1)
- AVR-IO (siehe Abbildung 5.2 Position 2)
- AVR-P40-8535 zusätzlich mit WLAN-Modul (siehe Abbildung 5.2 Position 3)

sowie eine Doppelsteckdose (siehe Abbildung 5.2 Position 4), ein Kabel zum Anschluss an das Versorgungsnetz (siehe Abbildung 5.2 Position 5) und ein Schaltnetzteil (siehe Abbildung 5.2 Position 6) zur Versorgung der einzelnen Baugruppen. In Abbildung 5.3 wird anhand eines vereinfachten Blockschaltbildes das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten veranschaulicht.



- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 ... Mikrocontroller | 5 ... Stecker für Versorgung |
| 2 ... AVR-I/O | 6 ... Netzteil für Platinen |
| 3 ... AVR-P40-8535 mit WLAN-Modul | 7 ... Anschluss für Temperatursensor |
| 4 ... geschaltete Steckdosen | 8 ... Stromsensor |

Abbildung 5.2: Verwendetes Entwicklungsbord

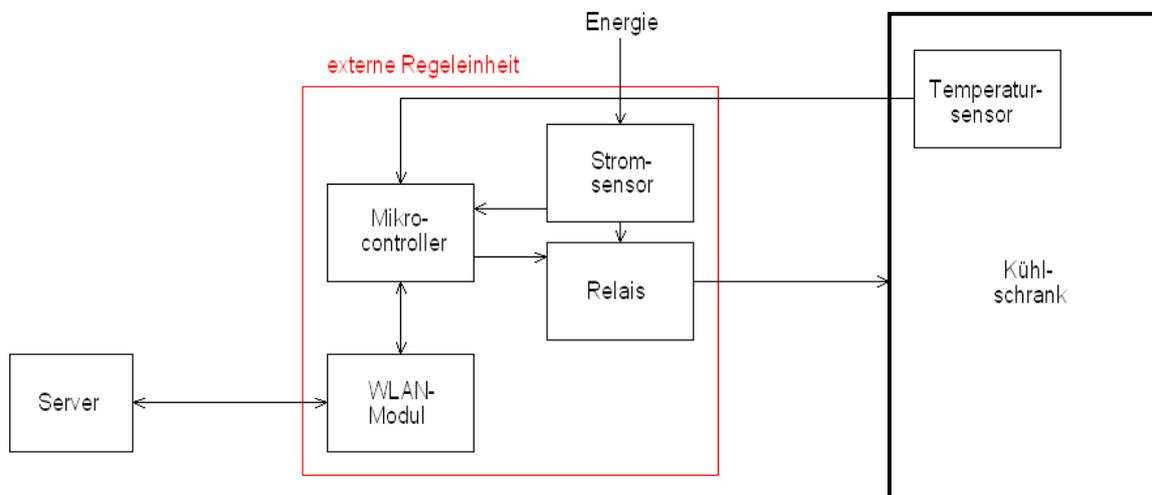


Abbildung 5.3: Blockschaltbild der Realisierung der externen Temperaturregelung

AVR-M32

Auf diesem Modul befindet sich der verwendete Mikrocontroller (MC). Es handelt sich dabei um den Typ ATMEGA32 der Firma Atmel [Atm07]. Zusätzlich ist diese Platine mit einer JTAG-Schnittstelle (Joint Test Action Group) ausgestattet, welche die Möglichkeit des Funktionstestes und der Programmierung von integrierten Schaltungen bietet. Für diese Zwecke wurde diese Schnittstelle jedoch nicht benötigt.

Jeder Pin des MC ist extra auf einer Pfostenleiste ausgeführt, was den Anschluss sowohl vom Temperatursensor *TC74* (siehe Abbildung 5.2 Position 7) über ein Flachkabel, als auch des Stromsensors *ACS706ELC-20A* (siehe Abbildung 5.2 Position 8) erleichterte.

AVR-IO

Dieses Modul stellt das eigentliche Interface der externen Regeleinheit dar. Die vier zur Verfügung stehenden Relais können Spannungen bis 250 V und Ströme bis 5 A schalten und sind für die Unterbrechung der elektrischen Energiezufuhr verantwortlich.

Für die Datenübertragung bzw. den Informationsaustausch wird die auf dem Modul vorhandene serielle Schnittstelle *RS232* verwendet. Ein serielles Kabel stellt die Verbindung zum Modul *AVR-P40-8535* her, auf welchem ein WLAN-Modul der Firma Avisaro [Avis07] montiert ist.

AVR-P40-8535

Das *AVR-P40-8535* ist eine Platine welche auf die Bedürfnisse des Benutzers angepasst werden kann. Standardmäßig befindet sich eine eigene Stromversorgung und eine serielle *RS232* Schnittstelle. Diese wird mit dem Modul *AVR-IO* verbunden.

Zusätzlich wurde diese Platine um ein WLAN-Modul erweitert, wodurch die Informationen

zu einem WLAN-Netzwerk übermittelt werden. Anstelle des WLAN-Modules ist beispielsweise auch ein GSM-Modul denkbar, welches dort zum Einsatz kommen kann, wo noch keine WLAN-Internetverbindung besteht.

Temperatursensor TC74

Der verwendete Temperatursensor *TC74* der Firma Microchip [Mic07] ist ein digitaler Sensor mit einem Messbereich von -40 °C bis $+125\text{ °C}$ und einer Auflösung von 1 °C . Dieser Bauteil wurde aufgrund seiner geringen Abmessung $3\text{ mm} \times 3,1\text{ mm} \times 1,45\text{ mm}$ (L/B/H) und der Möglichkeit der direkten digitalen Übertragung des gemessenen Temperaturwertes ausgewählt.

Der Sensor kommuniziert über das *Two Wire Interface* (TWI) mit dem Mikrocontroller (MC). Dieses Interface stellt einen Bus dar und kommt somit mit nur zwei Leitungen aus. Über eine wird der Takt gesendet und über die andere die Daten. Damit das TWI richtig funktioniert, müssen Pull-up-Widerstände an beiden Leitungen angebracht werden.

Aufgrund der Tatsache, dass der Bauteil mit Energie versorgt werden muss, sind zwei weitere Drähte, nämlich die Versorgungsspannung und Masse, ebenfalls erforderlich. Für den korrekten Anschluss des TC74 sind also vier Drähte erforderlich. Die Verbindung zwischen MC und Temperatursensor wurde laut Datenblätter der Hersteller durchgeführt. Weil die Drähte durch die Kühlschrantür geführt werden müssen und dadurch Kälte entweichen könnte, wurde ein vierpoliges Fachkabel verwendet. Die Türdichtung kann diese kleine Unebenheit gut abdichten, wodurch keine oder nur minimale Kälteentweichung stattfindet.

Ein Keramikkondensator mit $100\text{ }\mu\text{F}$ direkt beim Temperatursensor sorgt dafür, dass auch am Ende der langen Leitung eine stabile Versorgungsspannung gewährleistet wird.

Stromsensor ACS706ELC-20A

Die Leistungsmessung erfolgt indirekt über den Stromsensor *ACS706ELC-20A* der Firma Allegro [All07]. Dieser Bauteil ist für eine Stromstärke von bis zu 20 A geeignet und sowohl für Gleich- als auch Wechselstrom zu verwenden. Neben der kleinen Bauform war hier vor allem die Potentialtrennung zwischen Messkreis und Versorgungskreis ausschlaggebend. Die Messung liefert mit Hilfe des HALL-Effekts eine dem Strom proportionale Spannung.

Der Sensor liefert einen analogen Wert, welcher im Mikrocontroller (MC) mittels Analog Digital Converter (ADC) in einen digitalen Wert umgewandelt werden muss. Bei einem Strom von 0 A liefert der Bauteil eine Ausgangsspannung von $2,5\text{ V}$. Jedes Ampere verursacht eine Änderung um 100 mV .

Da der Stromsensor in den Stromzweig eingebunden sein muss, wurde dieser geöffnet und ein Teil der Strommeseinheit mit dem Steckdosenpaar verbunden. Der andere Anschluss wurde an das schaltende Relais der Platine *AVR-IO* geklemmt. Die Versorgungsspannung und Masse des Bauteils wurden an die Versorgungsklemmen des MC angelötet. Für die Messwertausgabe ist lediglich eine analoge Verbindungsleitung erforderlich, welche an den ADC-Eingang des MC angelötet wurde.

IRON-Box

Eine praxistaugliche Variante des zuvor beschriebenen Versuchsaufbaus stellt die im Rahmen des IRON-Projektes entwickelte *IRON-Box* (siehe Abbildung 5.4) dar. Diese Box beinhaltet

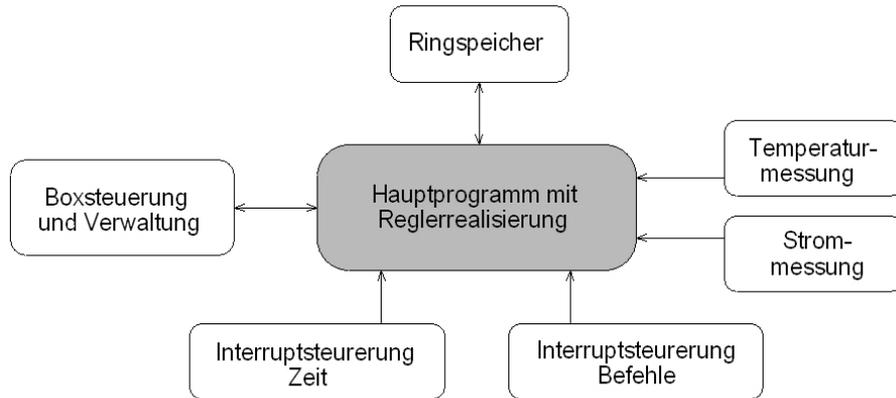


Abbildung 5.5: Blockdiagramm der Software

Verbindungsaufbau

Im Versuchsaufbau wird die Infrastruktur für das Energiemanagement durch eine einfache Server/Client Struktur realisiert. Befehle des Servers, also der koordinierenden Einheit, werden vom Client, also dem zu schaltendem Gerät, ausgeführt. Des weiteren sendet das Gerät auf Anfrage vom Server Informationen wie beispielsweise gemessene Werte.

Häufig sind Firewalls im Einsatz, welche den direkten Zugriff des Servers von außen auf das Gerät verhindern. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass jeder Verbindungsaufbau von Client ausgeht. Den genauen Ablauf zeigt Abbildung 5.6. Nach einem Systemstart muss das

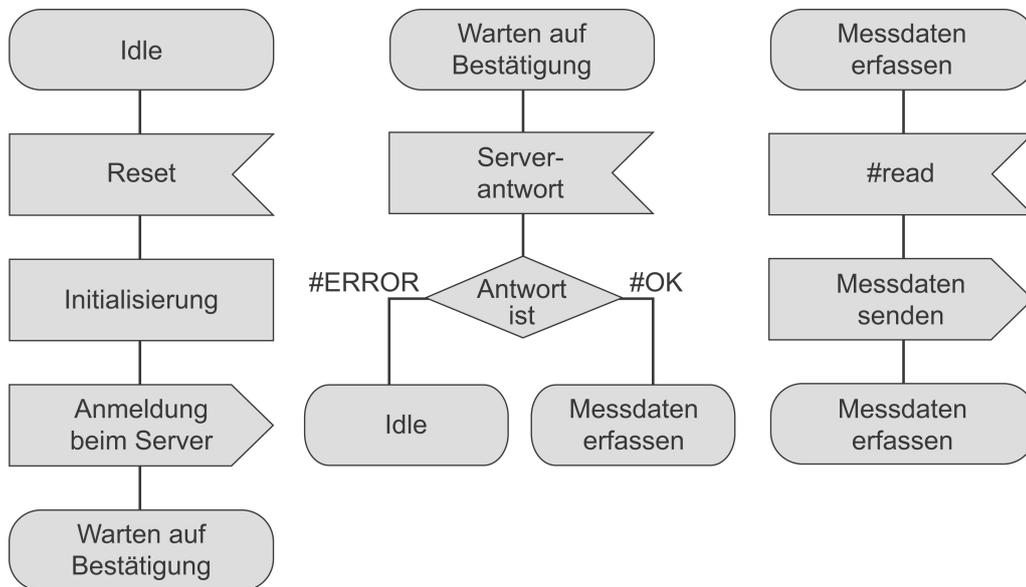


Abbildung 5.6: Ablaufdiagramm beim Verbindungsaufbau

Gerät erst einmal in einen definierten Anfangszustand gebracht werden. Dabei werden die internen Speicher initialisiert, die serielle Schnittstelle konfiguriert und Registereinstellungen für den Temperatursensor vorgenommen.

Im nächsten Schritt findet die Anmeldung des Gerätes beim Server statt. Dies erfolgt nach dem genau definierten IRON Protocol (siehe Anhang B). Zuerst wird die eindeutige Identifikation der Box gesendet, gefolgt von den zur Verfügung stehenden Messwerten und einer Abschlussbestätigung. Diese Schritte müssen jeweils vom Server quittiert werden. Kann keine Verbindung hergestellt werden, so wird die Anmeldung erneut durchgeführt.

Anschließend beginnt die interne Zeitmessung und die Interrupts werden aktiviert. Die Box führt nun selbstständig zyklische Messungen durch und speichert die Werte in einen Ringspeicher. Aufgrund der Tatsache, dass der Server durch die Anmeldung der Box die maximale Speichergröße kennt, veranlasst der Server vor Erreichen eines Speicherüberlaufes eine Übertragung der gemessenen Werte.

Die Serverstruktur war bereits vorhanden und konnte verwendet werden. Die Client-Seite wurde im Rahmen dieser Arbeit vollständig implementiert.

IRON-Protokoll

Das entwickelte IRON-Protokoll (siehe Anhang B) vereinheitlicht die Kommunikation zwischen dem Interface des Verbrauchers und der Koordinationseinheit für die Teilnahme am Energiemanagement. Es handelt sich dabei um genau definierte, textbasierte Befehle, welche anwendungsorientiert sind. Sowohl der Anmeldeablauf als auch die Steuerbefehle sind genau festgelegt. Bei der Anmeldung der Box beim Server werde diesem die genauen Daten des Verbrauchers bekannt gegeben. Mittels des Kommandos `#measurement` erfolgt eine Mitteilung der vorhandene Messungen und deren genaue Beschreibung wie beispielsweise Einheit, Offset, etc. Durch `#storage` wird dem Server bei der Anmeldung die Möglichkeit des Verbrauchers an einer Teilnahme am Energiemanagement bekannt gegeben. Um den Empfang der Daten zu bestätigen, wird seitens des Servers nach jedem Erhalt von Daten ein `#OK` zurück zur IRON-Box übermittelt.

Nach erfolgter Anmeldung des Verbrauchers beim Server sind nur mehr die Steuerbefehle von Bedeutung. Die Steuerung der Betriebsart erfolgt über den Befehl `#setpoint`. Um die IRON-Box mit der aktuellen Zeit der Koordinationseinheit synchronisieren zu können, steht der Befehl `#time` zur Verfügung. Eine Übertragung der gespeicherten Messdaten zum Server wird durch das Kommando `#read` veranlasst.

Das zuvor entwickelte IRON-Protokoll wurde in der im Anhang B spezifizierte Version boxseitig vollständig implementiert.

Temperaturmessung

Bei der Temperaturmessung muss darauf geachtet werden, dass der digitalisierte Wert im negativen Temperaturbereich nicht mehr direkt übernommen werden kann. Laut Datenblatt wird ein negativer Wert durch eine `1` im achten Bit signalisiert. Werden Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwartet, muss eine Korrektur vorgenommen werden.

Strommessung

Der verwendete Stromsensor liefert eine dem Strom proportionale Spannung mit einem Offset von $2,5\text{ V}$. Um Wechselströme richtig messen zu können, ist eine Abtastung mit mindestens der doppelten Frequenz erforderlich. Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz muss nach dem Abtasttheorem mindestens mit 100 Hz abgetastet werden. Damit ein genaues Ergebnis entsteht,

wurde hier eine Überabtastung von 1000 Hz gewählt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sowohl der minimale Amplitudenwert als auch der maximale Amplitudenwert des Stromsinus erfasst wird. Durch eine Differenzbildung der beiden Extremwerte kann der Offset egalisiert werden.

Zur Bestimmung des genauen Leistungswertes muss der gemessene Spannungswert mit der Auflösung des Analog Digital Converters (ADC) umgerechnet werden und mit der Versorgungsspannung multipliziert werden. Die Gleichung 5.1 stellt die Zusammenhänge dar.

$$P = \frac{ADCwert \cdot AV_{cc} \cdot Stromfaktor \cdot Versorgungsspannung}{ADCschritte \cdot 2} \quad (5.1)$$

$$= \frac{ADCwert \cdot 5 V \cdot 10 \cdot 230 V}{255 \cdot 2} = ADCwert \cdot 22,549 \quad (5.2)$$

Dabei ist AV_{cc} die Spannung am Referenzeingang des ADC. Der Stromfaktor von 10 resultiert aus der Sensor konstruktion und kann im Datenblatt nachgelesen werden. Der Teilungsfaktor von zwei kommt daher, dass sich durch die Differenzbildung der Spitzen-Spitzenwert ergibt. Damit der Amplitudenwert erhalten wird, muss durch zwei dividieren werden. Die Anzahl der ADC-Schritte von 255 erklärt sich durch die Tatsache, dass ein acht Bit ADC verwendet wird. Somit ergibt sich ein Multiplikationsfaktor von 22,549 um aus dem Messwert die Leistung zu bekommen.

Zeitmessung

Der Zeitpunkt, an dem eine Messung erfolgt, muss mit dem Messwert gespeichert werden. Dies ist deshalb von Bedeutung, da nachvollzogen werden können muss, wann die Messung stattgefunden hat. Aufgrund der fortlaufenden Erhöhung des Zählerstandes wirkt sich nach einigen Tagen bereits eine kleine Abweichung vom Sekundentaktes des kontinuierlichen Zeitimpulses enorm aus. Daher ist es erforderlich, dass der Timerinterrupts bestmöglich eingestellt wird. Mittels Teilungsfaktor und Zählerstandänderung kann aufgrund des verwendeten Quarzes eine hinreichend genaue Zeitmessung erfolgen.

Ringspeicher

Die Messergebnisse werden im Speicher des Mikrocontrolles, in einem Ringspeichers zwischengespeichert, um eine Einzelübertragung von Messdaten vermeiden zu können. Auf Anfrage vom Server wird der Speicher ausgelesen und die Messergebnisse werden mittels WLAN-Modul übermittelt. Sollte, wegen einer Unterbrechung der Verbindung, eine Übertragung nicht möglich sein, so aktualisiert das Gerät die Werte im Ringspeicher weiter, wobei die ältesten Werte überschrieben werden. Durch die zusätzliche Speicherung des Zeitpunktes der Messung kann der Server genau nachvollziehen, ob die gesendeten Messergebnisse aktuell sind, oder aufgrund einer Unterbrechung der Übertragung Werte verloren gegangen sind. Damit der realisierte Ringspeicher allgemein für verschiedene Messdaten gültig ist und für etwaige Erweiterungen von Messungen verwendbar ist, wurde der Speicher als wiederverwendbares Modul angelegt. In der Programmiersprache C wurde dies als *Struct* und entsprechenden, darauf operierenden Funktionen realisiert.

5.2 Testergebnisse und Messungen

Alle durchgeführten Messungen wurden in Anlehnung an die Deutsche Industrie Norm (DIN) [DIN06], [DIN05] durchgeführt. Dabei wurde insbesondere auf die Befüllung des Kühlschranks Wert gelegt, welche bei allen Messungen gleich war. Das eingebrachte Kühlgut besitzt die Fähigkeit einen Teil der thermischen Energie zu speichern. Dadurch ändert sich die Temperatur im Inneren nach einem Öffnen der Tür nicht dramatisch. Eine praxisnahe Situation kann somit nachgestellt werden.

Der Temperatursensor wurde wie Abbildung 5.1 zeigt mittels eines Schaumstoffklotzes in der Mitte des Kühlschranks platziert. Ein digitales Multimeter mit Temperaturfühler diente der Plausibilitätskontrolle.

5.2.1 Messungen mit der vorhandenen Geräterege lung

Damit eine effiziente Reglereinstellung der externen Realisierung erfolgen kann, ist es erforderlich, Kenntnis über die voreingestellten Parameter des verwendeten Gerätes zu haben. Deshalb wurden zuerst Messungen ausschließlich mit der Temperaturregelung des Gerätes vorgenommen.

Reglereinstellung 1

Bei einer Einstellung des internen Reglers auf 1 kühlt das Gerät am wenigsten. Wie aus Abbildung 5.7 ersichtlich ist, bewegt sich die Temperatur im eingeschwungenen Zustand in einem Bereich zwischen -2 °C und $+2\text{ °C}$. Die sprunghaften Änderungen der Temperatur sind durch den verwendeten Temperatursensor *TC74* erklärt. Dieser hat lediglich eine Auflösung von 1 °C . Dadurch sind speziell bei Temperaturen, welche um den Schalt punkt liegen, starke Schwankungen vorhanden, was in Abbildung 5.7 gleich zu Beginn erkennbar ist. Trotz des stufenförmigen Verlaufes der Temperatur ist ein Lade- beziehungsweise Entladevorgang in Form von Exponentialfunktionen erkennbar.

Bei der Leistungskurve kann gleich zu Beginn ein größerer Anstieg erkannt werden. Dies ist dadurch erklärt, dass der Kühlschrank kurz zuvor abgeschaltet wurde und der Kompressor somit gegen den zuvor aufgebauten Druck im Kondensator anlaufen müsste, was jedoch nicht gelingt. Dies ruft einen Strom, welcher zirka das Dreifache des Nennstromes beträgt, hervor. Um den Motor vor Beschädigung zu schützen, wird die Motorschutzschaltung aktiviert, welche den Kompressor ausschaltet. Bereits nach kurzer Zeit schaltet die Schutzschaltung wieder frei und der Kompressor kann anlaufen.

Die Einschaltstromspitzen sind zum Teil sehr groß. Abbildung 5.7 zeigt, dass der Anlaufstrom fallweise kurzfristig bis zu mehr als dem sechsfachen Nennstrom ansteigt.

Das Verhältnis zwischen Betriebszeit und Ruhezeit ist im eingeschwungenen Zustand etwas $\frac{1}{4}$. Die Ausschaltzeit beträgt etwa 8 min, wohingegen die Einschaltzeit in etwa nur 2 min beträgt. Eine Temperaturverminderung durch Leistungszufuhr erfolgt also wesentlich schneller als die Entladung des thermischen Speichers über die nicht-ideale Isolierung, welche zu einer Erwärmung des Innenraumes führt.

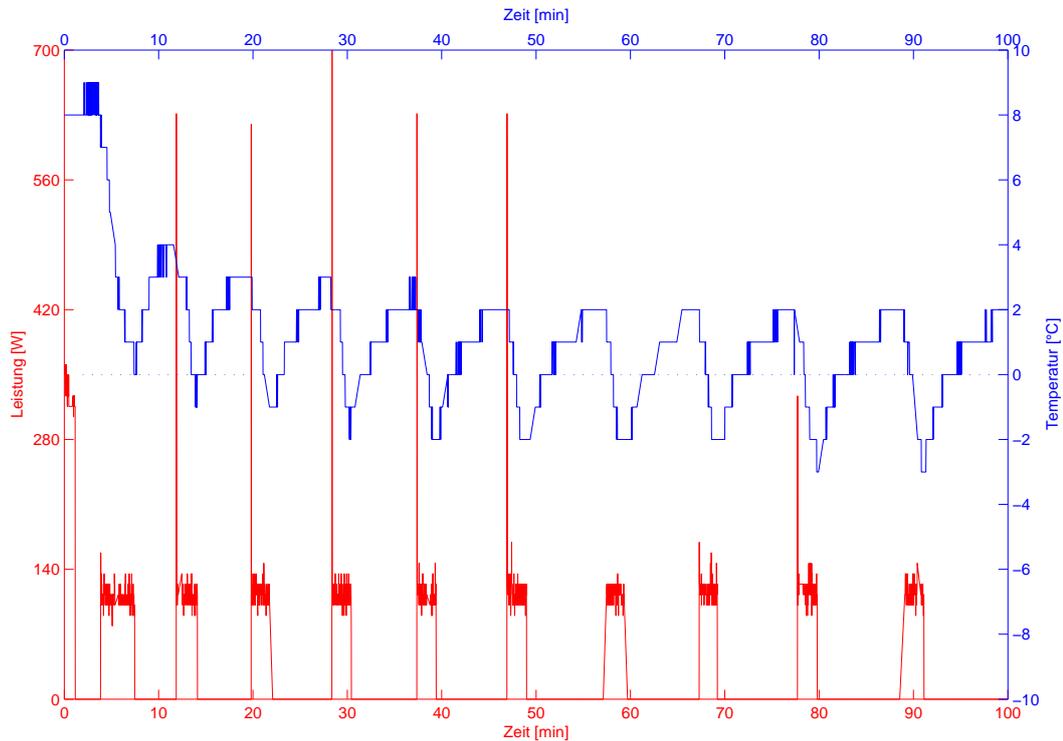


Abbildung 5.7: Temperatur- und Leistungsverlauf bei interner Regeleinstellung 1

Reglereinstellung 3,5

Eine Thermostateinstellung von 3,5 stellt den Mittelwert des auswählbaren Bereichs des Thermostates dar. Abbildung 5.8 veranschaulicht sowohl den gemessenen Temperaturverlauf als auch die zugeführte elektrische Leistung anhand derer die Schaltzustände ersichtlich sind. Im eingeschwungenen Zustand pendelt die Temperatur aufgrund der Zweipunktregelung zwischen den Werten -3 °C und 0 °C . Obwohl die Anfangstemperatur nur 8 °C betrug, dauert es mehr als eine Stunde bis die Temperatur innerhalb der eingeschwungenen Schwellwerte bleibt. Wie auch bei Abbildung 5.7 ist in Abbildung 5.8 ein stufenförmiger Temperaturverlauf ersichtlich, welcher von der Auflösung des verwendeten Temperatursensors stammt. Eine Annäherung an eine Exponentialfunktion ist auch in Abb. 5.8 ersichtlich. Die gemessene Regelung hat also wie bereits im Kapitel 3.2 erwähnt PT_1 -Verhalten, wodurch die Annahmen für die Simulation bestätigt werden.

Aufgrund der tieferen Temperatur ist die Zufuhr von mehr elektrischer Energie als beispielsweise bei einer Reglereinstellung von 1 erforderlich. Dies äußert sich durch eine längere erforderliche Einschaltzeit, welche in diesem Fall etwa drei Minuten beträgt. Demgegenüber steht ein zirka fünf minütiger Ruhezustand. Das Verhältnis Einschaltdauer zu Ruhezustand beträgt somit $\frac{3}{5}$. Dies entspricht in etwa der im Kapitel 2.3.1 beschriebenen Einschaltdauer. Auch hier sind Leistungsspitzen, verursacht durch einen großen Anlaufstrom, zu erkennen.

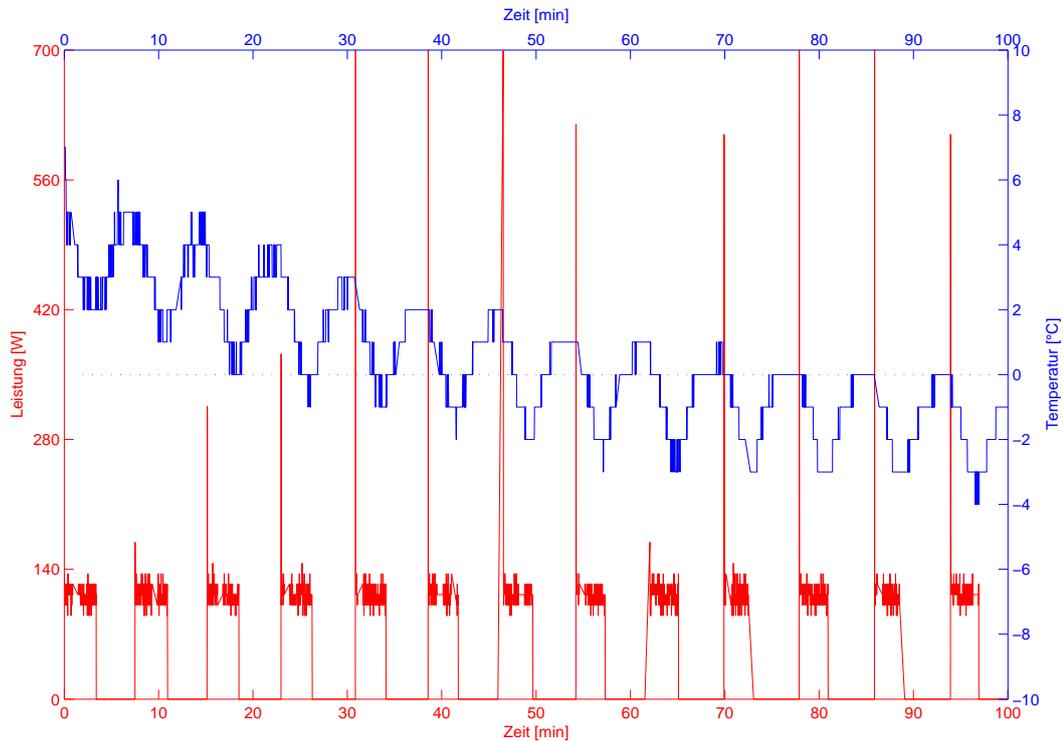


Abbildung 5.8: Temperatur- und Leistungsverlauf bei interner Regeleinstellung 3,5

Reglereinstellung 7

Eine Realisierung der geringsten Temperatur stellt die Auswahl der Thermostatstellung auf 7 dar. Diese Einstellung ist für die externe Temperaturregelung von entscheidender Bedeutung. Die hier erreichte untere Schwelle stellt ebenso den unteren Bereich der externen Regelung dar. Um ein möglichst breites Temperaturband ausnutzen zu können, muss der interne Regler auf den Wert 7 eingestellt werden. Abbildung 5.9 zeigt die sich einstellenden Endwerte der Zweipunktregelung bei $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies stellt für einen Kühlschrank eine tiefe Temperatur dar, weshalb das Gerät im Normalfall (mit Bestückung von Lebensmitteln) kaum mit der Reglereinstellung 7 betrieben werden wird.

Aufgrund der Tatsache, dass eine tiefere Temperatur abgekühlt werden muss, ist mehr elektrische Energie erforderlich als bei den zuvor beschriebenen Reglereinstellungen.

Gleich zu Beginn ist aus Abbildung 5.9 ersichtlich, dass der Kühlschrank relativ weit herunter kühlt, was durch eine längere Einschaltzeit am Anfang erkennbar ist. Dadurch wird mehr Energie benötigt, das System befindet sich jedoch schnell im eingeschwungenen Zustand. In diesem ist das Gerät für zirka 4,5 Minuten in Betrieb und anschließend für ca. 5,5 Minuten ausgeschaltet. Dies entspricht einem Verhältnis zwischen Einschaltdauer und Ruhezustand $\frac{9}{11}$.

Die Spitzen beim Einschalten des Kühlschranks sind auch hier deutlich erkennbar. Der Stromsensor hat einen Wertebereich von 20 A und kann somit auch die Einschaltspitzen messen. Das Rauschen bei der Leistung kommt von der Umwandlung des analogen Wertes in einen digitalen Wert. Wie bereits bei der Strommessung (siehe Kapitel 5.1.2) beschrieben, entspricht jede LSB-Änderung des eingelesenen Wertes einer Leistungsänderung von zirka

22 Watt.

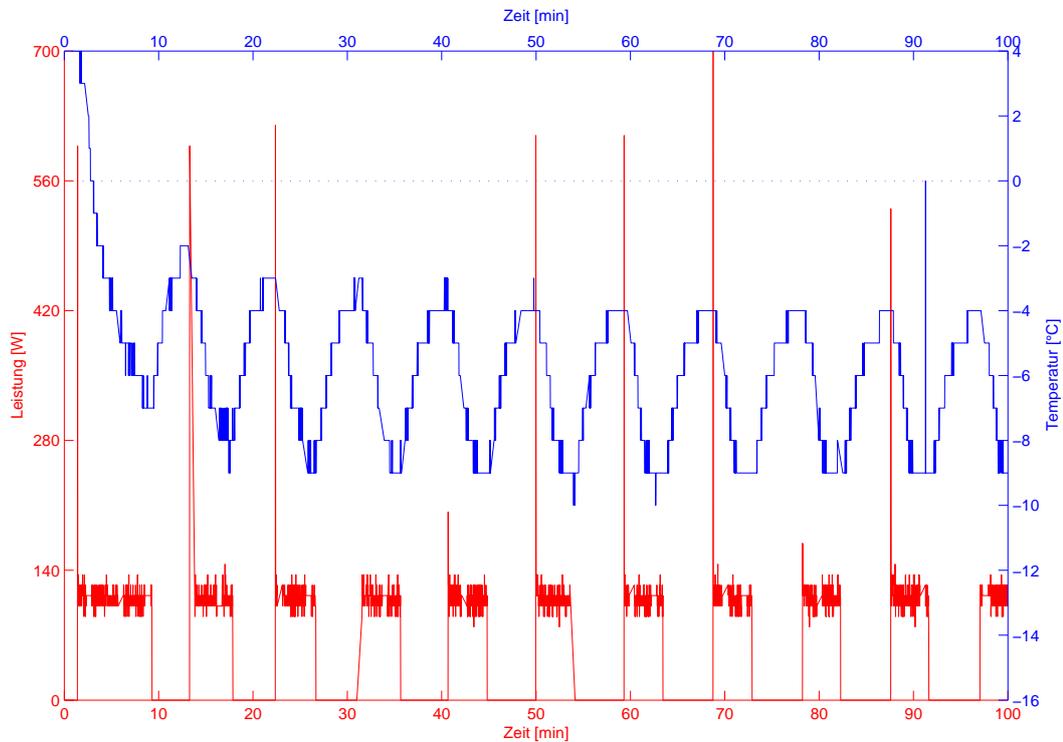


Abbildung 5.9: Temperatur- und Leistungsverlauf bei interner Regeleinstellung 7

5.2.2 Messungen mit extern realisierten Regler

Eine optimale Regeleinstellung zu finden, stellt eine große Herausforderung dar. Wird die Temperatur zu groß gewählt, so sind die Einschaltzeiten des Gerätes sehr gering, wodurch eine Teilnahme am Energiemanagement nur sehr selten möglich ist. Dies resultiert daher, dass bei einer höheren Temperatur die benötigte elektrische Leistung kleiner ist, da die Verluste geringer sind. Je weniger Leistung benötigt wird, desto geringer sind die Potentiale des Demand Side Managements. Abbildung 5.10 veranschaulicht dies. Die Temperaturschwellen wurden mit 3 °C und 6 °C angesetzt, was für das Kühlgut einen akzeptablen Temperaturbereich darstellt. Der Kühlschrank ist bei dieser Regeleinstellung jedoch nur zirka 15% eingeschaltet. Werden die Schwellwerte für die Zweipunktregelung bei zu tiefen Temperaturen gewählt, besteht Gefahr, dass das Kühlgut gefriert und somit beschädigt wird.

Die gewählten Grenzwerte für die Regelung wurden in Anlehnung an den Temperaturbereich der inneren Thermostatregelung gewählt. Minus zwei Grad Celsius stellt die untere Schwelle dar und plus ein Grad Celsius den oberen Schwellwert. Im Falle eines Eingriffes in das Energiemanagement wird die Zweipunktregelung um drei Grad Celsius verschoben. Bei einem erwünschten Regelausgleich oder einer Lastverschiebung werden die Grenzwerte nach oben verschoben, beim Aufladevorgang nach unten.

Tabelle 5.1 stellt eine Zusammenfassung sowohl der gemessenen Schwellwerte der Thermo-

statregelung dar, wie auch die gewählten Einstellungen für die externe Temperaturregelung.

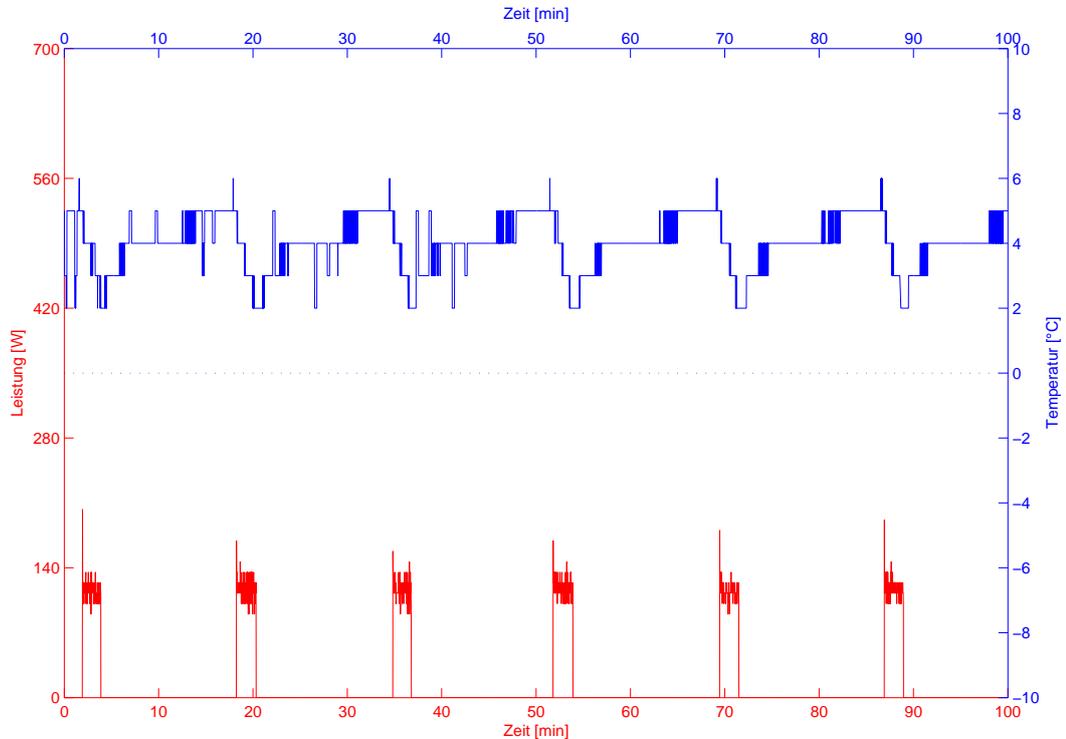


Abbildung 5.10: Temperatur- und Leistungsverlauf bei externer Temperaturregelung mit relativ hohen Temperaturschwellen

Tabelle 5.1: Temperaturen der Regeleinstellungen

	untere Schwelle °C	obere Schwelle °C
interner Regler 1	-2	2
interner Regler 3,5	-3	0
interner Regler 7	-7	-4
externer Regler „Normalbetrieb“	-2	1
externer Regler „Ausgleich“	1	4
externer Regler „Aufladen“	-5	-2

Normalbetrieb

Es wird davon ausgegangen, dass sich der Kühlschrank größtenteils im *Normalbetrieb* befindet. Die hier eingestellte Temperaturspanne stellt ein Optimum für das Kühlgut dar. Bei einem Eingriff in das verbraucherseitige Energiemanagement wird diese Betriebsart verlassen um in eine andere zu wechseln. Nach erfolgtem Eingriff wird wieder in den *Normalbetrieb* zurückgekehrt.

Ausgleichbetrieb

Im Falle einer erforderlichen Abschaltung des Gerätes wird in den *Ausgleichbetrieb* gewechselt. Dabei muss zwischen einer Trennung vom Netz aufgrund der Mithilfe bei der Primär- oder Sekundärregelung (siehe Kapitel 2.1.1), also ein Regelausgleich, und einer gewünschten Lastverschiebung unterschieden werden. Eine Trennung vom Versorgungsnetz wirkt sich selbstverständlich nur dann positiv auf das Energiemanagement aus, wenn das betroffene Gerät zur Zeit des Eingriffes eingeschaltet ist.

Ein Regelausgleich im Sekundenbereich, wie das bei der Primärregelung üblich ist, wirkt sich bei der Innentemperatur des Kühlschranks nicht aus. Das System ist so träge, dass eine kurzzeitige Unterbrechung keine Auswirkungen hat. Erst bei einer Teilnahme an der Sekundärregelung, welche sich im Minutenbereich abspielt, kann eine Temperaturänderung bemerkt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass eine Lastverschiebung meist für eine größere Zeitspanne gewünscht wird, wirkt sich eine längere Abschaltung des Kühlschranks auch auf die Innentemperatur aus. Damit das Kühlgut durch zu hohe Temperaturen nicht beschädigt wird, gibt es auch bei dieser Regelstruktur ein obere Schwelle, welche jedoch bei einer höheren Temperatur als beim Normalbetrieb ist. Wird diese erreicht, schaltet sich das Gerät wieder ein, auch wenn noch immer eine Lastverschiebung gewünscht wird. Auch die untere Schwelle ist im Ausgleichbetrieb angehoben, weshalb das Gerät nicht ganz runter kühlt. Somit wird weniger elektrische Energie verbraucht. Um das vorzeitige Einschalten des Kühlschranks noch zusätzlich hinauszögern, kann das Gerät vorher aufgeladen werden.

Aufladebetrieb

In der Betriebsart *Aufladen* werden die Schwellenwerte für die Zweipunktregelung der Temperatur nach unten verschoben. Somit kann erreicht werden, dass der Kühlschrank seinen Innenraum auf einen tieferen Wert abkühlt. Dafür ist mehr elektrische Energie notwendig, jedoch auch mehr thermische Energie gespeichert.

Im Falle einer optimalen Kombination vom *Aufladebetrieb* unmittelbar gefolgt vom *Ausgleichbetrieb* kann bei geschickt eingestellten Parametern eine größtmögliche Zeit ohne der Zufuhr von elektrischer Energie erreicht werden. Abbildung 5.11 zeigt, dass bei einer zeitlich genau aufeinander abgestimmten Schalthandlung mit dem verwendeten Kühlschrank eine Zeit von einer Stunde überbrückt werden kann. Dies ist angesichts der Tatsache, dass es sich beim verwendeten Messobjekt um einen sehr kleinen Kühlschrank mit lediglich 45 Liter handelt, ein beachtlicher Wert. Durch Verwendung von größeren Kühlgeräten kann durch das erhöhte Volumen mehr thermische Energie gespeichert werden, weshalb eine größere Zeitspanne überbrückt werden kann. Mit diesem Potential kann beispielsweise zur Mittagszeit ein Teil der Lastspitze weggenommen werden kann.

5.2.3 Ermittlung der Wärmekapazität und des Wärmewiderstands

Die Wärmeverluste des Gerätes fallen am Wärmewiderstand R_{th} an (siehe Abbildung 5.12). C_{th} im Bild 5.12 modelliert die thermische Speicherkapazität. Mittels Energiebilanz und Gleichung 5.3 lässt sich der Wärmewiderstand R_{th} berechnen. Dafür ist jedoch eine Elimination der Wärmekapazität C_{th} erforderlich. Eine Elimination von C_{th} kann dadurch erreicht werden, dass im Temperaturverlauf zwei Punkte mit gleicher Temperatur gewählt werden. Dann

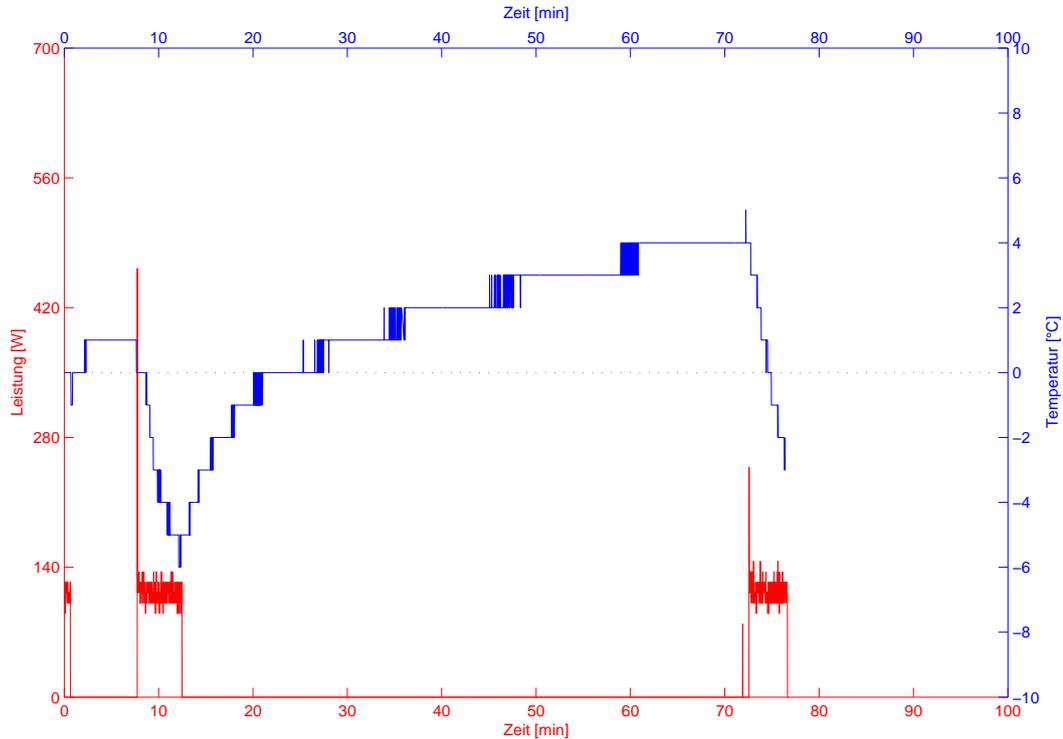


Abbildung 5.11: Temperatur- und Leistungsverlauf bei externer Temperaturregelung mit Lastverschiebung

gilt

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{th}} = \frac{\int T_0 - T_1 dt}{P_{zu} \cdot \eta} \quad (5.3)$$

. $T_0 - T_1$ in Gleichung 5.3 stellt die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur T_0 und der an der Wärmekapazität C_{th} anliegenden Temperatur T_1 dar. Die zugeführte Leistung multipliziert mit dem Wirkungsgrad η des Gerätes, welcher mit 0,8 angenommen wurde, ergibt die abgeführte Leistung. Mit Hilfe der Wärmezeitkonstante τ_{th} und Gleichung 5.4 kann die Wärmekapazität C_{th} ermittelt werden.

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th} \quad (5.4)$$

Für ein τ_{th} von 3500 Sekunden errechnen sich folgende Ersatzwerte:

- Wärmewiderstand $R_{th} = 1 \frac{K}{W}$
- Wärmekapazität $C_{th} = 3500 \frac{J}{K}$.

5.3 Aufgetretene Probleme

Um etwaige Fehler im Vorfeld auszuschließen, sind hier die aufgetretenen Probleme mit deren Lösungen zusammengefasst.

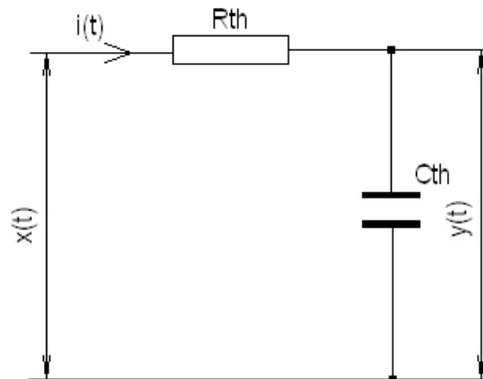


Abbildung 5.12: Bestimmung der Wärmekapazität und des Wärmewiderstands

5.3.1 Schaltbilder

Das Schaltbild des verwendeten Moduls AVR-M32 von Olimex [Oli07] ist leider etwas verwirrend. Die Pinbelegung der Pins 21 bis 40 ist nicht direkt als solche erkennbar. Wie im Anhang A ersichtlich ist, beginnt die Nummerierung der Pins 40 wieder mit 1 und endet bei Pin 20 mit der Pinnummer 21. Beim Anschluss zusätzlicher Bauteile ist also größte Sorgfalt geboten.

5.3.2 Temperatursensor

Der verwendete Temperatursensor *TC74* bereitete lange Zeit Probleme. Aufgrund der Tatsache, dass dieser über den TWI-Bus angesprochen wird, kann der Bauteil alleine nicht getestet werden. Somit kann nicht, beziehungsweise nur schwer festgestellt werden, ob ein vorhandener Fehler im Programm oder ein defekter Sensor für das Fehlschlagen der Kommunikationsverbindung auftritt. Hier war es so, dass der erste verwendete Sensor defekt war. Nach einem Austausch konnte abermals keine Verbindung zwischen Sensor und Mikrocontroller hergestellt werden, da der Temperatursensor nicht die standardmäßige Adresse verwendete. Trotz der Tatsache, dass laut Datenblatt [Mic07] Bauteile mit anderen Adressen als der Standardadresse ausdrücklich angefordert werden müssen, wurde ein Sensor mit einer der acht anderen möglichen Adressen geliefert.

5.3.3 Stromsensor

Das Einlesen der Werte des verwendeten Stromsensors *ACS706ELC-20A* darf nicht einmalig erfolgen. Der so herausgegriffene Wert stellte aufgrund der Sinusform des Stromes keine aussagekräftige Lösung dar. Eine Abtastung mit mindestens der doppelten Frequenz war erforderlich um einen repräsentativen Stromwert zu erhalten.

5.3.4 Regelparameterfindung

Die Findung der optimalen Regelparameter für die Zweipunktregelung ist immer ein Kompromiss zwischen bestmöglichem Temperaturverlauf für das Kühlgut und größtmöglichen

Eingriff in das verbraucherseitige Energiemanagement. Nach etlichen Varianten entschied ich mich für die Anlehnung an jene Temperaturen, welche sich bei den Messungen mit der internen Regelung ergaben. Dies stellte sich als guter Mittelweg heraus.

5.3.5 Öffnen der Gerätetür

Aufgrund der Tatsache, dass der verwendete Kühlschrank (siehe Abbildung 5.1) einen sehr kleinen Nutzinhalt von nur 45 Litern aufweist, wirkte sich ein Öffnen der Gerätetür relativ stark auf die Lufttemperatur im inneren des Kühlschranks aus. Wird anstelle des benutzten Versuchsobjektes ein größeres Gerät, wie auch in den meisten Haushalten üblich, verwendet, tritt ein geringerer Temperaturabfall auf.

Eine Anbringung des Temperatursensors direkt am Verdampfer würde dies Schwankungen beinahe gänzlich ausschalten. Aufgrund des entstehenden Wassers, welches durch die einzelnen Schaltzyklen entsteht, wurde eine Anbringung auf der Verdampferplatte vermieden, um den Sensors nicht zu beschädigen.

Kapitel 6

Diskussion und Bewertung

Auf Grundlage der vorangegangenen Kapitel folgt eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema sowie Verbesserungsvorschläge.

6.1 Vergleich Simulation und Messung

Durch einen direkten Vergleich zwischen Simulation und tatsächlich gemessenen Werten kann das verwendete Modell bewertet werden. Wie Abbildung 6.1 zeigt, stimmen die Simulation

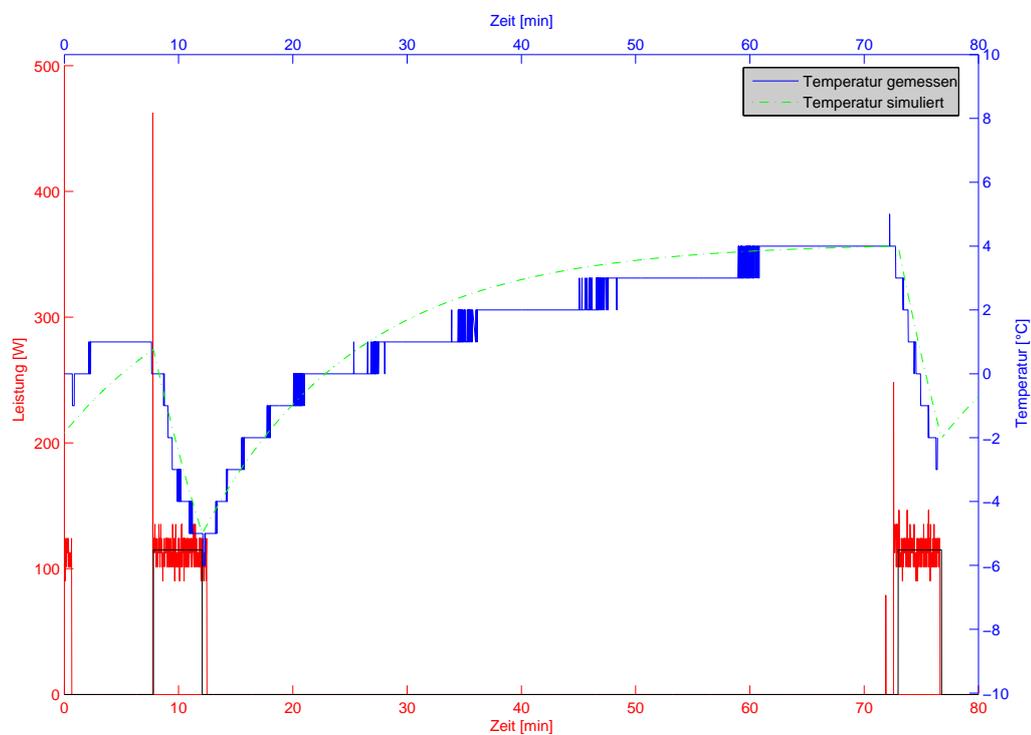


Abbildung 6.1: Vergleich des Temperatur- und Leistungsverlauf bei externer Temperaturregelung mit Lastverschiebung

und die Messwerte gut überein. Somit stellt das in Kapitel 3.2 verwendete, einfache Modell eine hinreichend genaues Analysesystem dar.

6.2 Temperaturmessung verbessern

Der digitale Temperatursensor *TC74* liefert wie aus den Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 und 5.11 ersichtlich, aufgrund der Auflösung von nur 1 °C relativ ungenaue Messungsergebnisse. Deshalb wurden die Messungen der externen Temperaturregelung mit einem anderen Temperatursensor wiederholt. Der neu verwendete Sensor *TMP101* der Firma Texas Instruments [TI07] besitzt eine Auflösung von 0,0625 °C. Abbildung 6.2 veranschaulicht aufgrund der besseren Auflösung des verwendeten Sensors *TMP101* einen gleichmäßigeren Temperaturverlauf. Die Vorteile der direkten digitalen Übertragung des gemessenen Wertes besteht auch

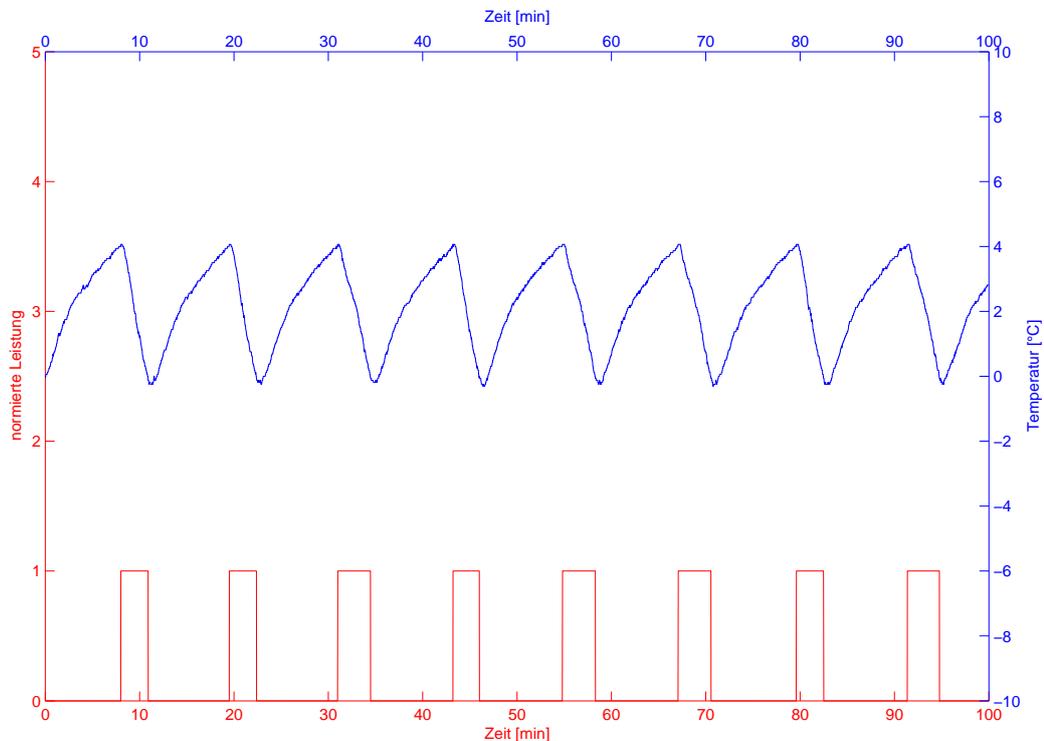


Abbildung 6.2: Temperaturverlauf mit Sensor TMP101

bei diesem Typ. Die Abmessungen von 3 mm x 3 mm x 1,45 mm (L/B/H) ähneln denen des Sensor *TC74*. Der Temperaturbereich des *TMP101* reicht von -55 °C bis 128 °C.

Der Sensor *TMP101* kommuniziert über das Two Wire Interface (TWI) mit dem Mikrocontroller. Damit eine Auflösung von 0,0625 °C realisiert werden kann, muss zuerst im *Controlregister* des Temperatursensors das richtige Bit gesetzt werden. Anschließend ist es erforderlich, das Register wieder auf das Temperaturregister zu setzen um Messergebnisse abrufen zu können. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem Sensor um einen 12 Bit Temperatursensor handelt, das Register jedoch nur 8 Bit groß ist, muss das Register des Sensors zweimal

hintereinander ausgelesen werden und anschließend zu einem 12 Bitwert zusammengesetzt werden um den richtigen Temperaturwert mit einer Auflösung von 0,0625 °C zu erhalten.

6.3 Vorschlag für zukünftiges Interface

Ein Gerät, welches ein Interface bereits integriert hat, sollte nach Meinung des Autors auch weiterhin ohne technische Kenntnisse von jedem angeschlossen und in Betrieb genommen werden können. Dies setzt voraus, dass keine zusätzlichen und komplizierten Verkabelungen von Sensoren oder Kommunikationsleitungen erforderlich sind. Lediglich der Anschluss für die elektrische Energie ist mittels Stecker ausgeführt. Äußerlich betrachtet sollte sich also nichts ändern.

Im inneren des Gerätes der Zukunft ist eine genau auf das Gerät abgestimmte Regelung realisiert. Des weiteren werden gemessene Daten im Gerät gespeichert und bei Bedarf an die Koordinationseinheit für die Teilnahme am Energiemanagement übermittelt. Für die Kommunikation sieht der Autor ein WLAN-Modul als zukunftsweisend, da somit keinerlei zusätzliche Kabel erforderlich sind. Des weiteren sind bereits sehr viele Gebäude und Häuser mit einem Internetzugang ausgestattet und somit gegebenenfalls lediglich ein WLAN-Router erforderlich ist. Dieser kann auch von mehrere Verbraucher genutzt werden. Durch den stetig steigenden Wunsch der Menschen an Mobilität kommen immer mehr WLAN-Router zum Einsatz, welche auch für eine Teilnahme am Energiemanagement genutzt werden können. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bei einer bereits bestehenden Internetverbindung nach einmaligen Anschaffungskosten für den Router (falls dieser noch nicht vorhanden ist) keine zusätzlichen Kosten für die Übertragung der Daten beziehungsweise der Kommunikation zwischen Verbraucher und Koordinationseinheit entstehen.

Für die Kommunikation ist ein einheitliches Protokoll zielführend, damit ein allgemein gültiger Betrieb erfolgen kann. Hierfür sollte in Anlehnung an das vorgestellte IRON-Protokoll ein Protokoll entwickelt und standardisiert werden.

6.4 Allgemeine Betrachtung

Die Messreihen haben gezeigt, dass eine Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement möglich ist. Die Testergebnisse von Kapitel 5.2 haben gezeigt, dass im Idealfall eine Abschaltung von beinahe einer Stunde möglich ist. Hierfür müssen die Regelparameter richtig eingestellt sein, und seitens der Koordinationseinheit für die Teilnahme am Energiemanagement durch die Wahl der Steuerimpulse richtig darauf eingegangen werden. Will man sich beispielsweise wegen der Lastspitze in der Mittagszeit ein zusätzliches Kraftwerk ersparen, müssen viele Verbraucher zur Spitzenzeit abgeschaltet werden. Für ein effizientes Demand Side Management ist also eine Menge an teilnehmenden Geräten erforderlich. Eine Teilnahme von etlichen tausenden von Geräten erfordert ein stabiles System für die Verwaltung der Information. Eine riesen Menge an Knoten, woran einzelne Systeme angeschlossen sind, müssen administriert werden.

In der Koordinationseinheit wird eine genaue Ablaufsteuerung benötigt, welche die genauen Schaltzeitpunkte festlegt und die Information an die jeweiligen Verbraucher weitergibt. Speziell beim Wiedereinschalten muss darauf geachtet werden, dass nicht schlagartig sehr viele zuvor abgeschaltete Verbraucher gleichzeitig ans Versorgungsnetz gehen. Dies würde einen

schlagartigen Anstieg des Bedarfs an elektrischer Energie mit sich bringen und könnte im schlimmsten Fall zum Ausfall des gesamten Versorgungsnetzes führen.

Für eine effiziente Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement muss jedoch versucht werden, zusätzliche Geräte mit möglichst großem Verbrauch in das Energiemanagement mit einzubeziehen. Als Ziel muss gesehen werden, dass zusätzlich zu den Kühlschränken noch andere thermische Geräte eingebunden werden. Andere Verbraucher wie beispielsweise Wärmepumpen (siehe Kapitel 2.3.3), Industriekühlgeräte oder Klimaanlage (siehe Kapitel 2.3.2) haben ein größeres Lastverschiebungspotential. Bei der gleichen Anzahl von eingebundenen Geräten kann somit eine größere Energiemenge verschoben werden.

Bei thermischen Prozessen in der Industrie wäre eine Einbindung aufgrund ihres meist sehr großen Verbrauchs sehr wünschenswert. Leider müssen die Herstellungsprozesse oft in sehr genau definierten Temperaturbereichen gehalten werden und können somit nicht in das verbraucherseitige Energiemanagement eingebunden werden.

Längerfristig sollte auch über eine Ausweitung auf andere Gerätetypen und Prozesse nachgedacht werden. Bei manchen Abläufen kommt es nicht zwangsläufig auf die Tageszeit an, wann etwas durchgeführt wird, sondern lediglich darauf, dass etwas geschieht. Ein Beispiel dafür wäre eine Waschmaschine. In den meisten Fällen ist es nicht relevant, ob die Maschine am Nachmittag wäscht und bereits fertig ist, wenn man das Haus betritt, oder ob der Waschvorgang abends gestartet wird, wo wieder eine Lastspitze auftritt (siehe Kapitel 2.1.1). Ganz im Gegenteil, ist die Waschmaschine dann fertig, wenn man nach Hause kommt, erspart man sich die eventuell störenden Geräusche des Waschvorganges. Des Weiteren ist eine Einbindung von Wäschetrocknern oder Geschirrspülern möglich. All diese Geräte verbrauchen relativ viel elektrische Energie und können zur Lastspitzenvermeidung beitragen. Eine Lastverschiebung oder gar ein Regelausgleich ist mit diesen Geräten jedoch nicht möglich, wenn der Waschvorgang bereits gestartet wurde. Eine Unterbrechung der Versorgungsspannung stört dann den gesamten Prozessablauf. Der gesamte Prozess kann aber meist sehr wohl zeitlich verschoben werden. Beachtet werden sollte außerdem, dass eine Aktivierung von Prozessen, welche mit einer Lärmentwicklung verbunden sind, nachts zu Problemen führen kann. Trotz der idealen Zeit angesichts des Lastprofils sollte solch eine Inbetriebnahme in nächtlichen Stunden genau bedacht sein.

Auch die Einbeziehung von Stand-by-Geräten stellt eine Möglichkeit dar. Der Verbrauch der Geräte in diesem Zustand ist meist sehr gering (einige Watt), durch die Summe kommt jedoch auch eine beachtliche Energiemenge zusammen, welche für etwaige Ausgleichsvorgänge herangezogen werden kann. Der erforderliche Aufwand hierfür ist jedoch so groß, dass eine Teilnahme von Stand-by-Geräten am Energiemanagement zumindest nicht vorrangig angestrebt wird.

Abschätzung der Möglichkeiten mittels Kühlschränken

In welchem Ausmaß sich eine Teilnahme von ausschließlich Kühlschränken am Energiemanagement bezahlt macht, soll anhand des nachstehenden Beispiels veranschaulicht werden.

Ausgehend von einer durchschnittlichen Anschlussleistung einer handelsüblichen Kühl- Gefrierkombination von zirka 400 Watt und der Tatsache, dass aufgrund der Überdimensionierung des Kompressors (siehe Kapitel 2.3.1) und der relativ guten Isolierung das Gerät normalerweise maximal zu 50% in Betrieb ist, stehen ungefähr 200 W für eine Teilnahme am Energiemanagement zur Verfügung. Diese Leistung steht also zur Verfügung, um bei einem etwaig erforderlichen Regelausgleich oder einer Lastverschiebung abgeschaltet zu werden.

Wählt man einen Windgenerator mit einer elektrischen Anschlussleistung von 2 Megawatt

aus, welcher durch eine Windflaute nicht mehr ins Versorgungsnetz einspeisen kann, so sind 10.000 Haushaltskühlschränke erforderlich, um das entstandene Energieloch wieder auszugleichen. Bei einer realistischen Annahme eines kleinen Windparks von ungefähr zehn Windrädern, sind bereits zirka 100.000 Kühlgeräte einzubeziehen und auszuschalten, um den Abfall der Energieerzeugung von 20 Megawatt auszugleichen. Damit die gesamte, in Österreich eingespeiste Windkraftenergie von ca. 1000 Megawatt ([Bra05]) einen Puffer für den Regelausgleich in Form von Kühlschränken hätte, wären zirka 5 Millionen Geräte einzubinden.

Tabelle 6.1 stellt noch einmal den erforderlichen Aufwand mit dem ausschließlichen Einsatz von Kühlschränken dar.

Tabelle 6.1: Erforderliche Kühlschränke für Eingriff in Energiemanagement

	Anzahl Kühlgeräte
Ausgleich einer Windanlage mit 2 MW	10.000
Ausgleich eines Windparks mit 20 MW	100.000
gesamte Windenergie Österreichs	5.000.000

Kapitel 7

Zusammenfassung

Ein effizientes Energiemanagement wird aufgrund des ständig steigenden Bedarfs an elektrischer Energie immer wichtiger. Auf der Erzeugerseite dienen prognostizierte Lastprofile (siehe Kapitel 2.1.1) und Frequenz- bzw. Leistungsregelungen (siehe Kapitel 2.1.1) zur Anpassung von Erzeugung und Verbrauch. Ein neuer Ansatz geht dazu über, auch die Verbraucher aktiv in das Energiemanagement einzubinden und somit koordiniertes Demand Side Management (DSM) zu realisieren. Durch eine Einbindung von Verbrauchern mit thermischen Prozessen (siehe Kapitel 2.3), welche in der Lage sind thermische Energie zu speichern, kann effizient am Energiemanagement teilgenommen werden.

Damit die Kosten für eine DSM-Realisierung möglichst gering bleiben, werden bereits bestehende Systeme wie beispielsweise Netzwerke der Gebäudeautomation (siehe Kapitel 2.2), Internet oder andere Übertragungsmedien genutzt.

Aufgrund der Tatsache, dass noch keine Geräte für die Einbindung in das Energiemanagement vorbereitet sind, müssen vorübergehende Lösungen gefunden werden, um eine Realisierung des Demand-Side-Managements zu ermöglichen.

Einige denkbaren Varianten, wie Geräte effizient bei einem gewünschten Regelausgleich, beziehungsweise einer Lastverschiebung in das Energiemanagement inkludiert werden können, bestehen. Dabei muss der jeweilige Aufwand und der entsprechende Nutzen genau betrachtet werden. Eine zielführende Möglichkeit, speziell bei thermischen Prozessen, stellt die Lösung der externen Regelung (siehe Kapitel 4.6) dar, welche im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurde (siehe Kapitel 5). Dieses einfache System kann als Nachrüstatz verwendet werden und von einem Laien installiert werden. Für die Kommunikation zwischen der Koordinationseinheit des DSM und dem Verbraucher wird ein WLAN-Modul verwendet.

7.1 Gewonnene Erkenntnisse

Sowohl die Simulation (siehe Kapitel 3.2) als auch die Realisierung (siehe Kapitel 5) haben gezeigt, dass sich eine Teilnahme von Verbraucher am Energiemanagement positiv auswirkt. Beim Versuchsobjekt *Kühlschrank* konnte mit optimalen Bedingungen und idealen Schaltzeitpunkten eine Lastverschiebung, also ein gezieltes Abschalten des Gerätes mit einem anschließenden Nachholen der benötigten elektrischen Energie, von beinahe einer Stunde gemessen werden. Grundidee dieser Realisierung ist eine Verschiebung der Temperaturschwellen des Zweipunktreglers. Um eine möglichst lange Zeit keine Energie zuführen zu müssen, wird

durch eine Veränderung der Schwellwerte nach unten, also zu niedrigeren Temperaturen, das Gerät aufgeladen. Es wird durch eine geringere Solltemperatur zusätzliche elektrische Energie in Form von thermischer Energie gespeichert. Ist der tiefste Temperaturpunkt erreicht, hebt man die Schwellwerte des Zweipunktreglers über den Normalbetrieb an. Dadurch wird eine höhere Temperatur zugelassen, wodurch eine Erwärmung bis zur maximalen Temperatur länger dauert und das Gerät in dieser Zeit nicht eingeschaltet ist. Dadurch kann bereits ein Großteil einer Lastspitze überbrückt werden.

Beim simulierten Verband mehrerer Geräte konnte festgestellt werden, dass durch eine geschickte Wahl der Schaltzeitpunkte auch mit vielen Geräten ein Bereich geschaffen werden kann, bei dem alle Geräte durch den Eingriff ausgeschaltet sind.

Die erforderlichen Parameter für die externe Temperaturregelung wurden in Anlehnung an die gemessenen Temperaturwerte des realen Versuchsobjektes gewählt. Für eine exakte Festlegung der erforderlichen Regelparameter wäre eine genaue Bestimmung aller möglichen Kühlinhalte und deren tolerierter Temperaturbereich erforderlich. Aufgrund dieser Ermittlung könnten die Schwellwerte für die Zweipunktregelung so eingestellt werden, dass keines der Inhalte Schaden leiden müsste.

Hauptproblem aller erarbeiteten, möglichen Varianten für ein Interface (siehe Kapitel 4) sind die entstehenden Kosten und die zum Teil stark eingeschränkten Möglichkeiten der Teilnahme am Energiemanagement. Als endgültige Lösung sollte ein standardisiertes Interface angestrebt werden, welches direkt vom Hersteller der Geräte integriert wird.

Für eine optimale und effiziente Realisierung des Demand Side Managements ist ein großes elektrisches Lastpotential erforderlich, welches abgeschaltet werden kann. Dies kann einerseits durch wenige sehr großer Verbraucher, oder andererseits mithilfe vieler kleiner Verbraucher, welche zu einer Einheit zusammengeschlossen sind, realisiert werden. Aus diesem Grund ist eine flächendeckende Einbindung möglichst vieler Geräte erforderlich.

7.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebene Realisierung verwendet für die Kommunikation zwischen Verbraucher und Koordinationseinheit für das DSM ein WLAN-Modul, welches sich in ein bestehendes Netzwerk über einen WLAN-Router einwählt. Diese Arbeit kann als Grundlage dafür dienen, dass auch andere Übertragungen realisiert werden, für den Fall, dass ein Senden der Daten über ein Wireless Local Area Network nicht möglich ist. Die Verwendung von GSM (Global System for Mobile Kommunikation) wäre eine weitere Variante. Damit kann ebenfalls eine Verbindung zu einem Netzwerk hergestellt und somit Daten ausgetauscht werden.

Um einen möglichst flexiblen Einsatz der Geräte zu ermöglichen, wäre im nächsten Schritt eine Einbindung an bestehende Gebäudeautomationssysteme wünschenswert. Durch die Verwendung eines Gebäudebusses entsteht, zumindest für große Gebäude mit solch einer Vernetzung, eine einfache und effiziente Möglichkeit Geräte anzuschließen und somit für das Demand Side Management zu rüsten.

Diese Arbeit zeigte die Machbarkeit einer Teilnahme von Verbrauchern am Energiemanagement, unter der Voraussetzung, dass die Steuereinheit bereits existiert. Diese sollte, bei Weiterführung des Gedanken, nicht vernachlässigt werden, da mit der Zahl der einzubindenden Geräte auch der Koordinationsaufwand erheblich anwächst. Eine gezielte Steuerung, auch im Hinblick auf Vermeidung von gleichzeitigen Einschaltungen, ist bei sehr vielen Geräten Grundvoraussetzung für ein effizientes Energiemanagement.

Im Zuge des IRON-Projektes (Integral Resource Optimization Network) werden in einem Feldversuch umfangreiche Tests bezüglich Demand Side Management durchgeführt. Diese werden weitere Stärken und Schwächen der Einbindung von Verbrauchern in das Energiemanagement aufzeigen.

Anhang A

Hardwaredokumentation

Anschlussbelegung des Steckers für IIC-Temperatursensor

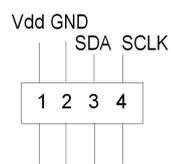


Abbildung A.1: Anschlussbelegung für Stecker von Temperatursensor

Nachstehend sind die Schaltbilder der verwendeten Module der Firma Olimex [[Oli07](#)] angeführt.

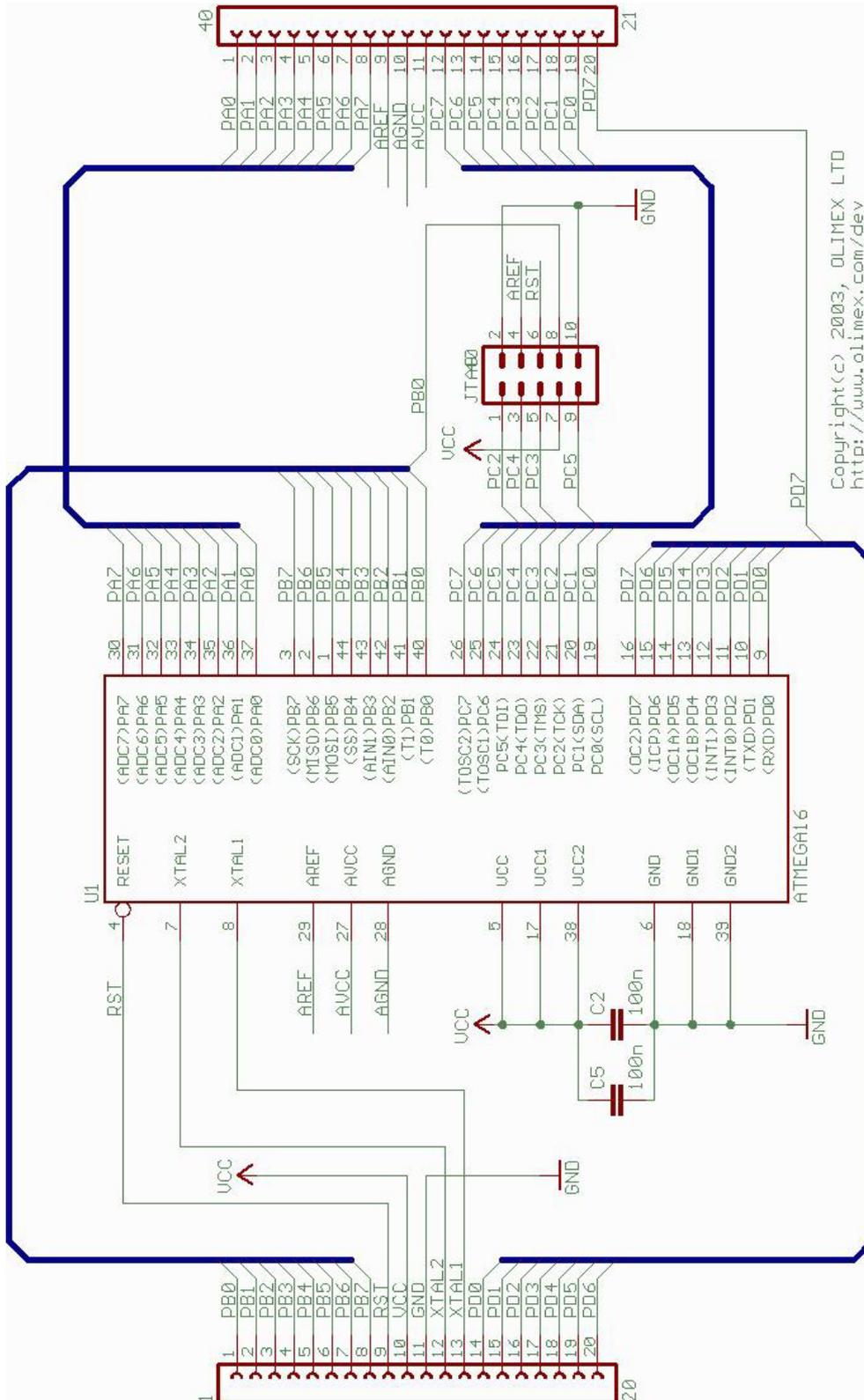
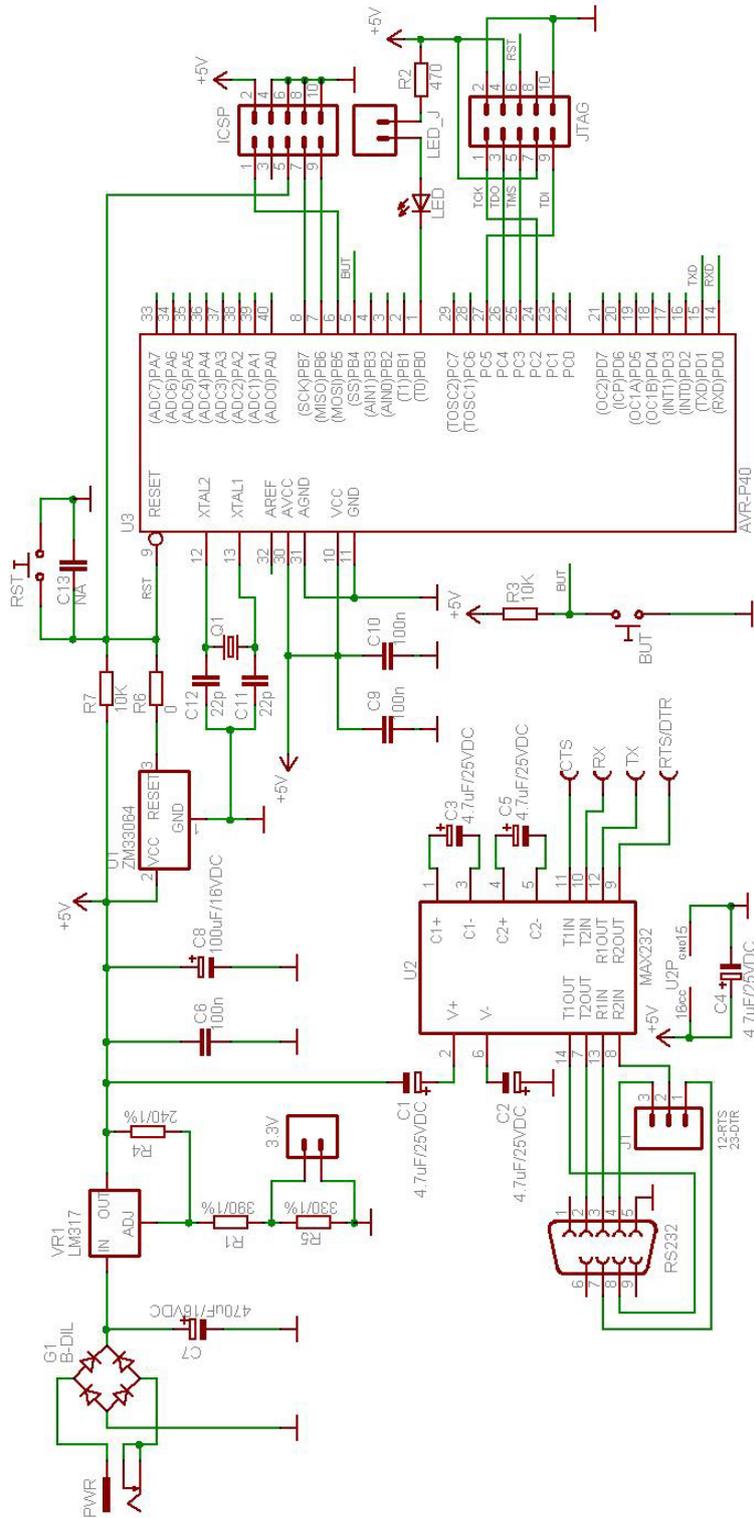


Abbildung A.2: Schaltbild des Moduls AVR-M32. Quelle: Olimex



Copyright (C) 2002, OLIMEX Ltd
<http://www.olimex.com/dev>

Abbildung A.4: Schaltbild des Moduls AVR-P40. Quelle: Olimex

Anhang B

Protokolldokumentation

Nachstehend ist das Protokoll für den Verbindungsaufbau zwischen Server und Client der IRON-Box angeführt.

Author: Friederich Kupzog

Created: 27.11.2006

IRON Protocol

Contents

IRON Network structure and communication scenarios.....	2
IRON Protocol History	3
New commands in Version 0.1 (27.11.2006)	3
New commands in Version 0.2 (19.12.2006)	3
IRON Protocol Details.....	3
Format of IRON commands.....	4
#iam	5
#storage.....	6
#measurement.....	7
#thatsit	8
#read.....	9
#hello	10
#time	11
#setpoint	12
#status	13

IRON Network structure and communication scenarios

Fig. 1 depicts an abstract view of the IRON network structure. The communication links are realised using different communication media, especially GPRS, WIFI and PLC.

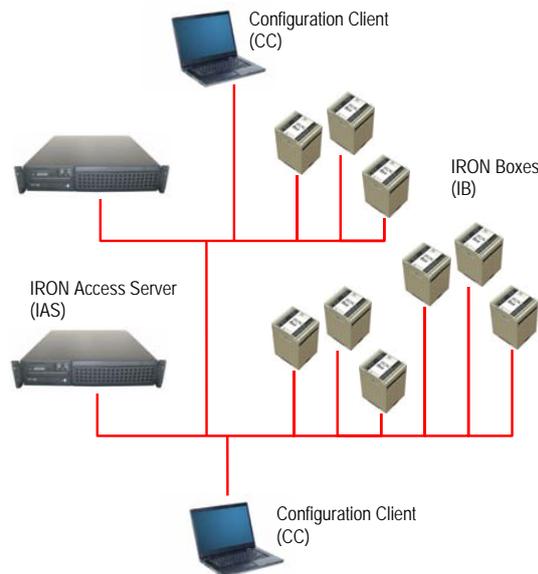


Fig. 1: IRON Network structure

A large number of *IRON Boxes* (IB) is distributed among households, small businesses and industry setups. In the extreme case, every household of a certain area is connected to the IRON system. Each IRON Box can have influence on the consumption patterns of one or more loads. Each box is able to connect to an IRON Access Server (IAS). The selection of the IAS to connect to depends on connection quality and load balancing strategies.

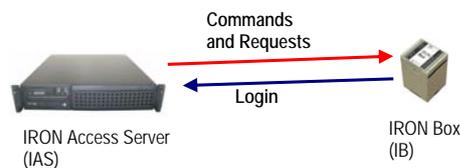


Fig. 2: After the IRON Box has connected to the IAS, it switches to server mode and handles commands and requests from the IAS.

Due to restrictions of the communication channel (Internet connection via firewalls, dynamic IPs etc.) the IRON Box has to initiate the connection to the IAS and not vice versa. During this login process, the Box has the role of a *client*. After the login process the box changes into a *server* mode where it handles commands and requests from the IAS. As long as the box is reachable from the IAS, the IAS calls diverse functionalities such as status requests, transmission delay measurements and

commands for load control. This process is either terminated by a connection breakdown or by a box logout.

IRON Protocol History

New commands in Version 0.1 (27.11.2006)

#measurement

#iam

#thatsit

#read

New commands in Version 0.2 (19.12.2006)

#storage

#hello

#time

#setpoint

#status

IRON Protocol Details

On the subsequent pages, all IRON Protocol commands are listed in detail.

 <p>VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY INSTITUTE OF COMPUTER TECHNOLOGY</p>	<p>IRON Protocol</p>	<p>Version 0.2</p>
<p>Description of: Format of IRON commands</p>	<p>Format of IRON commands</p>	
<p>Syntax <i>#comname argumentlist newline</i></p>	<p>Example: #measurement Temp1, Temperature, K, 1, 0.1, 273, 10, 1000</p>	
<p>Description:</p> <p>Each command is a text string that starts with a hash character (#) and is terminated by the two characters (ASCII 10, ASCII 13).</p> <p>The maximum length for the command name is 20 characters.</p> <p>The argument list is a comma-separated list of argument strings. These can have three different types:</p> <p>STRING: a string of characters. No commas allowed. Maximum length is 20 characters.</p> <p>INTEGER1, INTEGER2, INTEGER4, INTEGER8: The representation of an integer value. May have a trailing "-". Apart from that, only digits are allowed. The trailing number <i>n</i> in INTEGER_n specifies the number of bytes used to represent the value. This does not effect the textual representation of the values in protocol transmission, but the allowed value range.</p> <p>FLOAT: The representation of a floating point number. May have a trailing "-". The fraction is separated by a point ("."). Apart from that, only digits are allowed.</p> <p>All commands and parameter Strings in the IRON protocol are case sensitive.</p>		
<p>Possible answers:</p> <p>Answers and answer formats are specified for each command separately. In general, each answer is exactly one string, terminated by the two characters (ASCII 10, ASCII 13).</p> <p>Data items in the answer string can have the same three types STRING, INTEGER and FLOAT as defined above.</p> <p>Unknown commands cause the answer #UCMD.</p> <p>All commands and parameter Strings in the IRON protocol are case sensitive.</p>		
	<p>Author(s): Kupzog</p> <p>Updated: 19.12.2006</p>	 <p><small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small></p>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command Box → IAS	Name: #iam		
Syntax: #iam id	Example: #iam 00346		
Description: This command is used by the box after the connection to the IAS is established to inform the IAS about its presence and name. The parameter <i>id</i> is an INTEGER8.			
Possible answers: #OK or #ERROR if the parameter could not be interpreted correctly.			
	Author(s): Kupzog	Updated: 19.12.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command Box → IAS	Name: #storage		
Syntax: #storage: <i>name, type, capacity, charge time, discharge time</i>	Example: #storage fridge1, A, 50, 120, 278 #storage aircon, B, 2500, 360, 1453		
<p>Description:</p> <p>The box uses the #storage command to inform the IAS about the real or virtual storages connected to the box. For each storage, the command is issued once. Each storage has a <i>name</i> (STRING) that is unique among the storage names of this box. Each storage has also a <i>type</i> (STRING). Possible types are listed below. The parameter <i>capacity</i> (INTEGER4) is the storage capacity in Wh. <i>Charge time</i> (INTEGER4) and <i>discharge time</i> (INTEGER4) are the times in seconds it takes to charge or respectively to discharge the storage.</p> <p>Possible storage types:</p> <p>A – Setpoint variation storage. The storage has three energy levels: normal, low = normal – capacity and high = normal + capacity. The IAS is free to set the storage in any of these states.</p> <p>B – Immediate recharge storage. The storage has two energy levels: normal and low = normal – capacity. It usually is in normal state but can be transferred into low state by the IAS (power supply switched off). The storage itself changes back to normal state (and recharges) as soon as the internal energy level becomes too low.</p> <p>Note: In a future protocol version, a #restriction command will be present to communicate storage scheduling restrictions to the IAS.</p>			
Possible answers: #OK or #ERROR if the parameters could not be interpreted correctly.			
	Author(s): Kupzog	Updated: 19.12.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

 <p>VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY INSTITUTE OF COMPUTER TECHNOLOGY</p>	<p>IRON Protocol</p>	<p>Version 0.2</p>
<p>Description of: Protocol command Box → IAS</p>	<p>Name: #measurement</p>	
<p>Syntax: <i>#measurement: name, type, unit, bytesPerSample, lsbUnit, offset, interval, capacity</i></p>	<p>Example: <i>#measurement Temp1, Temperature, K, 1, 0.1, 273, 10, 1000</i></p>	
<p>Description: This command is used by the box after the connection to the IAS is established to inform the IAS about measurement values that can be read from the box.</p> <p>Parameters are comma-separated and can be of type STRING, INTEGER or FLOAT:</p> <p><i>name</i>: the name of the measurement value. Used for identification. Should be unique for each measured variable. STRING</p> <p><i>type</i>: the type of the variable, which can be: "Power", "Current", or "Temperature". STRING</p> <p><i>unit</i>: the unit in which the variable value is measured. E.g. "K" or "mA". STRING</p> <p><i>bytesPerSample</i>: the number of bytes used to represent a single sample of the variable (applies when measurement data is send to the IAS) INTEGER1</p> <p><i>lsbUnit</i>: the precision of the measurement. FLOAT <i>offset</i>: the offset of the measurement. FLOAT</p> <p>E.g. if unit is "mA", lsbUnit is 10 and offset is 5, then a transmitted value of 2 means actually 25 mA.</p> <p><i>interval</i>: the time between two sample measurements in seconds. INTEGER2</p> <p><i>capacity</i>: the number of samples for this variable the box is able to store. INTEGER4</p>		
<p>Possible answers: #OK or #ERROR if the parameters could not be interpreted correctly.</p>		
	<p>Author(s): Kupzog</p>	<p>Updated: 19.12.2006</p>  <p><small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small></p>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command Box → IAS	Name: #thatsit		
Syntax: #thatsit	Example: #thatsit		
Description: This command is used by the box after the connection to the IAS is established and it has informed the IAS about its name (using #iam) and its 0...n measurement variables (using #measurement) as well as its 0...m storages (using #storage). It terminates the initial communication with the IAS. After the #thatsit command is sent, the box listens for commands for the IAS.			
Possible answers: #OK or #ERROR			
	Author(s): Kupzog	Updated: 23.11.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

 <p>VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY INSTITUTE OF COMPUTER TECHNOLOGY</p>	<p>IRON Protocol</p>		<p>Version 0.2</p>
<p>Description of: Protocol command IAS → Box</p>	<p>Name: #read</p>		
<p>Syntax: #read varname, numOfSamples</p>	<p>Examples: #read Temp1, 100 #read Power2, all</p>		
<p>Description: The IAS requests the most recent <i>numOfSamples</i> samples of the measured variable <i>varname</i>. <i>numOfSamples</i> is INTEGER4 in this case. Alternatively, <i>numOfSamples</i> can be the STRING "all". In this case, all available samples are requested.</p>			
<p>Possible answers: The samples are transmitted as comma-separated INTEGER4 in order of their age (oldest first). The first value transmitted is the timestamp (INTEGER8) for the oldest sample. <i>The timestamp counts the number of seconds from a starting point, which for evaluation purposes is the box power up time. This should be updated as soon as possible to an absolute time value.</i> If not enough samples are available or <i>varname</i> is not available, #ERROR is returned.</p>			
	<p>Author(s): Kupzog</p>	<p>Updated: 19.12.2006</p>	 <p><small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small></p>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command IAS → Box	Name: #hello		
Syntax: #hello	Examples: #hello		
Description: The IAS uses the #hello command to find out whether a box is still on line. Additionally it is used to determine the data transmission time which is used for clock synchronisation (see #time command).			
Possible answers: The box shall answer #OK as quick as possible after receiving a #hello request.			
	Author(s): Kupzog	Updated: 19.12.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command IAS → Box	Name: #time		
Syntax: #time <i>milliseconds</i>	Examples: #time 2300239432		
Description: The IAS informs the box about the current time using this command. The parameter <i>milliseconds</i> is INTEGER8 and counts the number of milliseconds from 1.1.1970 0:00:00:00. The box should react on this command by synchronising in the given time. The IAS takes care that the time value is approximately correct when it arrives at the box by using the #hello command to determine the transmission delay.			
Possible answers: #OK or #ERROR			
	Author(s): Kupzog	Updated: 19.12.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command IAS → Box	Name: #setpoint		
Syntax: #setpoint storage, status	Examples: #setpoint fridge1, 1 #setpoint ballroom -1 #setpoint office_66 0		
Description: The #setpoint command sets the setpoint for a given storage. The parameter <i>storage</i> (STRING) identifies the storage (see also command #storage). The parameter <i>status</i> (INTEGER1) identifies the storage setpoint level relatively to the normal state, which is referred to as 0. For type A storages, <i>status</i> can be -1, 0 or 1. Negative values result in energy to be released, positive values result in energy to be stored. For type B storages, <i>status</i> can only be -1. Type B storages can only have energy levels low and normal; and the transition from low to normal is done automatically. For more information about storage types see command #storage .			
Possible answers: #OK or #ERROR			
	Author(s): Kupzog	Updated: 19.12.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

	IRON Protocol		Version 0.2
Description of: Protocol command IAS → Box	Name: #status		
Syntax: <i>#status storage</i>	Examples: # status fridge2 # status ballroom		
Description: The IAS can use the #status command to gain information about the current energy level of a storage. For more information about storage types see command #storage. See also command #setpoint for energy levels. The parameter <i>storage</i> (STRING) identifies the storage.			
Possible answers: <i>status, since</i> or #ERROR If no error occurs, the box sends back two comma-separated values, of which the first (<i>status</i> , INTEGER1) is the current storage status (-1, 0, 1) and the second (<i>since</i> , INTEGER8) is the timestamp of when this status became active. For type A storages, the status should read as the value set by the #setpoint command. For type B storages, the #status command can be used by the IAS to find out (by polling the box) for how long the storage level 'low' was active and when the storage changed to level 'normal'.			
	Author(s): Kupzog	Updated: 19.12.2006	 <small>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie</small>

Abkürzungen

ADC	Analog Digital Converter
APG	Austrian Power Grid
BACnet	Building Automation and Control Network
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
DIN	Deutsche Industrie Norm
DSM	Demand Side Management
EIB	Europäischer Installationsbus
EIS	Energieinformationssystem
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
GSM	Global System for Mobile Kommunikation
IRON	Integral Resource Optimization Network
JTAG	Joint Test Action Group
LAN	Local Area Network
LON	Local Operating Network
MC	Mikrocontroller
TRE	Tonfrequenzrundsteuerempfänger
TWI	Two Wire Interface
USART	Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter
WAP	Wireless Application Protocoll
WLAN	Wireless Local Area Network

Literaturverzeichnis

- [AB99] AST, H. ; BAUER, M.: Energieaufwand der Nutzenübergabe von Warmwasserheizanlagen (Blatt 20). In: *VDI-Berichte 1428 - Die neue VDI 2067 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*, 1999. – ISBN 3–18–091428–9
- [BH05] BAYERLEIN-HOPPE, Marianne: Serve@Home - Facility Management im privaten Wohnbereich. In: *Elektrobörse Handel 7'8* (2005)
- [BHFFS06] BUCHHOLZ, B. (Hrsg.) ; HATZIARGYRIOU, N. (Hrsg.) ; FURONES FARTOS, I. (Hrsg.) ; SCHLUECKINGER, U. (Hrsg.) ; Proceedings of 41st International Council on Large Electrical Systems Session, Paris (Veranst.): *Lessons Learned: European Pilot Installations for Distributed Generation - An overview by the Ired Cluster*. 2006
- [BHP02] BROY, Manfred ; HEGERING, Heinz-Gerd ; PICOT, Arnold: *Integrierte Gebäude-systeme - Technologien, Sicherheit und Märkte*. SecuMedia, 2002. – ISBN 3–922746–39–X
- [Brü05] BRÜGGEMANN, Anke: KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen. In: *Publikation der volkswirtschaftlichen Abteilung; KfW Bankengruppe* (2005), Dezember
- [Bra05] BRAUNER, Günther: *Energieversorgung*. Zweite Auflage. Vorlesungsunterlagen der Technischen Universität Wien, 2005
- [Cla99] CLAUS, R.: Energiebedarf für die Erzeugung. In: *VDI-Berichte 1428 - Die neue VDI 2067 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*, 1999. – ISBN 3–18–091428–9
- [CLSL] COX, Robert (Hrsg.) ; LEEB, Steven (Hrsg.) ; SHAW, Steven (Hrsg.) ; LESLIE, Norford (Hrsg.) ; APEC 06, Applied Power Electronics Conference and Exposition (Veranst.): *Transient Event Detection for Nonintrusive Loaded Monitoring and Demand Side Management Using Voltage Distortion*.
- [Cov03] COVINO, Susan (Hrsg.) ; Power Engineering Society General Meeting (Veranst.): *Demand Side Response 21st Century Style*. Bd. 4. 2003
- [DDB04] DUSA, Adrian (Hrsg.) ; DECONINCK, Geert (Hrsg.) ; BELMANS, Ronnie (Hrsg.) ; Power Systems Conference and Exposition (Veranst.): *Communication System for Intelligent Residential Electrical Installations*. Bd. 1. 2004 . – 269 – 274 S

- [DIN05] *Haushalt-Kühl-/Gefriergeräte - Eigenschaften und Prüfverfahren.* 2005. – DIN EN ISO 15502
- [DIN06] *Verfahren zur Messung der Aufnahme elektrischer Energie und damit zusammenhängender Eigenschaften netzbetriebener Haushalt-Kühlgeräte, -Tiefkühlgeräte, -Gefriergeräte und deren Kombinationen.* 2006. – DIN EN 153
- [DPPR97] DIETRICH, Dietmar (Hrsg.) ; POSTA, Ratko (Hrsg.) ; PALENSKY, Peter (Hrsg.) ; REITER, Heinrich (Hrsg.) ; IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (Veranst.): *Demand Side Management in private Homes by using LONWORKS.* 1997 . – 341 – 347 S
- [DV01] DOLL, Markus ; VERSTEGE, Johannes: Kurzfristiges Netzengpassmanagement zur Störungsvermeidung. In: *Internationaler ETG-Kongress 2001, Energietechnik für die Zukunft*, 2001. – ISBN 3-8007-2646-7
- [Eva91] EVANS, Grayson (Hrsg.) ; IEEE Transactions on Consumer Electronics (Veranst.): *Solving Home Automation Problems using Artificial Intelligence Techniques.* Bd. 37. 1991 . – 395 – 400 S
- [Fün00] FÜNFGELD, C. (Hrsg.) ; EUROFORUM Fachkonferenz Netznutzungs- und Bilanzkreismanagement, Berlin (Veranst.): *Repräsentative VDEW-Lastprofile.* 2000
- [Gad02] GADERER, Georg: *Entwicklung einer EIB-Anschaltung für einen intelligenten Kühlschranks*, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2002
- [Gha95] GHATPANDE, Ashok (Hrsg.) ; IEEE/IAS International Conference on Industrial Automation and Control (Veranst.): *Frequency Dependent Load Chipping in as a Demand Side Management (DSM) Tool - Concept and Issues.* 1995 . – 383 – 388 S
- [GL92] GREICHEN, John (Hrsg.) ; LITTLE, Arthur (Hrsg.) ; IEEE Transactions on Consumer Electronics (Veranst.): *Value based Home Automation for Today's Market.* Bd. 38. 1992 . – XXXIV – XXXVIII S
- [Grö03] GRÖGER, A.: Gebäudebetrieb - Wandel zur vernetzten Technik. In: *VDI-Berichte 1740 - Gebäudeautomation - Voraussetzung für das Gebäudemanagement*, 2003. – ISBN 3-18-091740-7
- [Höf05] HÖFLER, Bernd: *Wärmepumpen für Wohnungen, Haus und Schwimmbad.* Udo Pfrierner, 2005
- [IEC] *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbar elektronischer Systeme.* – IEC 61508
- [Kar06] KARL, Jürgen: *Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt.* Zweite Auflage. Oldenbourg, 2006. – ISBN 978-3-486-57722-8
- [KMW03] KOLBERG, Mario (Hrsg.) ; MAGILL, Evan (Hrsg.) ; WILSON, Michael (Hrsg.) ; IEEE Communications Magazine (Veranst.): *Compatibility Issues between Services Supporting Networked Appliances.* Bd. 41. 2003 . – 136 – 147 S

- [KNSN05] KASTNER, Wolfgang (Hrsg.) ; NEUGSCHWANDTNER, Georg (Hrsg.) ; SOUCEK, Stefan (Hrsg.) ; NEWMAN, Michael (Hrsg.) ; Proceedings of the IEEE (Veranst.): *Communication Systems for Building Automation and Control*. Bd. 93. 2005 . – 2225–2145 S
- [KPRR04] KASTNER, Wolfgang (Hrsg.) ; PALENSKY, Peter (Hrsg.) ; RAUSCH, Thomas (Hrsg.) ; ROESENER, Charlotte (Hrsg.) ; AFRICON, 7th AFRICON Conference in Africa (Veranst.): *A closer Look on Today's Home and Building Networks*. Bd. 2. 2004 . – 1239 – 1244 S
- [Kup06] KUPZOG, Friederich (Hrsg.) ; IEEE International Conference on Industrial Informatics (Veranst.): *Self-controlled Exploitation of Energy Cost saving Potentials by Implementing Distributed Demand Side Management*. 2006 . – 375 – 380 S
- [LR01] LUTHER, Matthias ; RADTKE, Uwe: Betrieb und Planung von Netzen mit hoher Windenergieeinspeisung. In: *Internationaler ETG-Kongress 2001, Energietechnik für die Zukunft*, 2001. – ISBN 3–8007–2646–7
- [Mit06] MITTELBOCK, M.: *Virtuelle Kraftwerke für Autarke Regionen*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hsg.), 2006
- [Mül01] MÜLLER, Leonhard: *Handbuch der Elektrizitätswirtschaft - Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen*. Zweite Auflage. Springer, 2001. – ISBN 3–540–67637–6
- [MPKD03] MOTEGI, Naoya (Hrsg.) ; PIETTE, Mary A. (Hrsg.) ; KINNEY, Satkartar (Hrsg.) ; DEWEY, Jim (Hrsg.) ; International Conference for Enhanced Building Operations (Veranst.): *Case Studies of Energy Information Systems and Related Technology: Operational Practices, Cost, and Benefits*. 2003
- [MPWS04] MOTEGI, Naoya (Hrsg.) ; PIETTE, Mary A. (Hrsg.) ; WATSON, David (Hrsg.) ; SEZGEN, Osman (Hrsg.) ; Proceedings of ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings (Veranst.): *Measurement and Evaluation Techniques for Automated Demand Response Demonstration*. 2004
- [Nun06] NUNES, Renato (Hrsg.) ; MELECON 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (Veranst.): *Decentralized Supervision for Home Automation*. 2006 . – 785 – 788 S
- [Pal06] PALENSKY, Peter: *Integral Resource Optimization Network Study*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hsg.), 2006
- [PD04] POTOČNIK, Bozidar (Hrsg.) ; DIVJAK, Matjaz (Hrsg.) ; MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (Veranst.): *Automated Recognition of Foodstuff Placed into Refrigerator*. Bd. 1. 2004 . – 331 – 334 S
- [PPL03] PENYA, Yoseba ; PALENSKY, Peter ; LOBASHOV, Maksim: Requirements and Prospects for Consumers of Electrical Energy Regarding Demand Side Management. In: *Die Zukunft der Energiewirtschaft im liberalisierten Markt - Kurzfassungsband*, 2003

- [RPW⁺05] ROESENER, C. (Hrsg.) ; PALENSKY, P. (Hrsg.) ; WHEIS, M. (Hrsg.) ; LORENZ, B. (Hrsg.) ; STADLER, M. (Hrsg.) ; INDIN '05. 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics (Veranst.): *Integral Resource Optimization Network - a new solution on power markets*. 2005 . – 578 – 583 S
- [Rud99] RUDAT, K.: Energieaufwand der Nutzenübergabe - Trinkwassererwärmung. In: *VDI-Berichte 1428 - Die neue VDI 2067 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*, 1999. – ISBN 3-18-091428-9
- [Sch60] SCHOLL, Paul: *Kühlschränke und Kleinkälteanlagen*. Siebte Auflage. Springer, 1960
- [Sch93] SCHULTEN, Rudolf: *Fortschritte in der Energietechnik - für eine wirtschaftliche, umweltschonende und schadenbegrenzende Energieversorgung*. Forschungszentrum Jülich, 1993. – ISBN 3-89336-119-7
- [Sch02] SCHLUCKEBIER, W.: Dezentralisierte und gewerkeübergreifende Gebäudeautomationskonzepte - Der Weg zur Gebäudeautomation der dritten Generation? In: *VDI-Berichte 1639 - Vernetzte Automation in der Gebäudetechnik*, 2002. – ISBN 3-18-091639-7
- [Sch04] SCHITTENHELM, Dietmar: *Kälteanlagentechnik, Elektro- und Steuerungstechnik*. Dritte überarbeitete Auflage. C.F. Müller, 2004. – ISBN 3-78807730-1
- [SHS98] SAMES, Andread ; HAUSER, Hans ; SMETANA, Walter: Sensor zur drahtlosen Fernmessung von Temperaturen. In: *Patentschrift Nummer: AT 403 322 B* (1998)
- [Sno03] SNOONIAN, Deborah (Hrsg.) ; IEEE Spectrum (Veranst.): *Smart Building*. Bd. 40. 2003 . – 18 – 23 S
- [TAE05] TAEV: *Technische Anschlußbestimmungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen unter 1000 Volt mit Erläuterung der einschlägigen Vorschriften*. Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, 2005
- [Tie97] TIEDEMANN, Thomas: *Untersuchungen zur Energieeinsparung von Haushaltskühlgeräten*, Universität Hannover, Diss., 1997
- [Vin06] VINCE, Markus: *Komponenten der Automation*. Vorlesungsunterlagen der Technischen Universität Wien, 2006
- [Voi99] VOIT, Rainer: *Entwicklung eines Feldbus-Interfaces für eine Kühl-Gefrier-Gerätekombination*, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 1999
- [Wac91] WACKS, Kenneth (Hrsg.) ; IEEE Transactions on Consumer Electronics (Veranst.): *Utility Load Management using Home Automation*. 1991 . – 168 – 174 S
- [WV05] WULFF, T. ; VERSTEGE, J.: Bewertung von Regelenergieangeboten im Rahmen der Betriebsplanung von Erzeugeranlagen. In: *VDI-Berichte 1908 - Optimierung in der Energiewirtschaft*, 2005. – ISBN 3-18-091908-6

Internetquellen

- [All07] ALLEGRO: Allegro microSystems Inc. In: <http://www.allegromicro.com> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Atm07] ATMEL: Atmel. In: <http://www.atmel.com> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Avi07] AVISARO: Avisaro. In: <http://www.avisaro.com> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [BAC07] BACNET: Building Automation and Control Networks. In: <http://www.bacnet.org> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [BMV07] BMVIT: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. In: <http://www.bmvit.gv.at> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Dae07] DAEWOO: Daewoo. In: <http://www.daewoo-electronics.de> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [EIB07] EIB: Europäischer Installationsbus. In: <http://www.konnex.org> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Hel07] HELIOTHERM: Heliotherm Wärmepumpen. In: <http://www.heliotherm.com> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Inf07] INFRATEC: Infratec AG. In: <http://www.infratec-ag.de> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [IRO07] IRON: Integral Resource Optimization Network. In: <http://www.ironstudy.org> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [KFW07] KFW: KFW-Bankengruppe. In: <http://www.kfw.de> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Kyo07] KYOCERA: Kyocera Solar Deutschland. In: <http://www.kyocerasolar.de> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Lin07] LINZ: Linz Strom AG. In: <http://www.linzag.at> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [LON07] LON: Local Operating Networks. In: <http://www.lonmark.org> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)
- [Mic07] MICROCHIP: Microchip Technologie Inc. In: <http://www.microchip.com> [abgerufen am 16.01.2007] (2007)

- [Oli07] OLIMEX: Olimex. In: *http://www.olimex.com/dev [abgerufen am 16.01.2007]* (2007)
- [She07] SHELL: Shell Austria. In: *http://www.shell.at [abgerufen am 16.01.2007]* (2007)
- [Sie07] SIEMENS: Serve@Home. In: *http://www.serveathome.de [abgerufen am 16.01.2007]* (2007)
- [TI07] TI: Texas Instruments. In: *http://www.ti.com [abgerufen am 16.01.2007]* (2007)