



Masterarbeit

Maximierung des Autarkiegrades bei sog. stromerzeugenden Heizungen

Alexander Knöttner, BSc

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger

Betreuer 2

Dipl.-Ing. Lukas Kriechbaum

Leoben, Juli 2015

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Leoben, am 3. August 2015

(Alexander Knöttner)

Kurzfassung

Der Einsatz von μ KWK-Anlagen für die elektrische und thermische Versorgung von Wohnhäusern, Gewerbebetrieben und Bürogebäuden hat aufgrund aktueller technischer Entwicklungen in den letzten Jahren einen Aufschwung erlebt. Um diese Nutzung wirtschaftlich attraktiv zu gestalten, ist es nötig die erzeugte elektrische Energie in möglichst hohem Ausmaß direkt und selbst zu verbrauchen. Andernfalls ist eine Einspeisung in das öffentliche Stromnetz erforderlich, die bei den heute herrschenden Bedingungen die wirtschaftliche Attraktivität solcher Anlagen zum Teil stark reduziert. Man spricht in diesem Zusammenhang vom elektrischen Autarkiegrad als Verhältnis des Anteils an verbrauchtem Strom aus Eigenerzeugung zur gesamten, benötigten elektrischen Energie eines Objektes. Die Maximierung des Autarkiegrades muss demnach das Ziel sein, um eine wirtschaftlich rationale Nutzung von μ KWK-Anlagen zu ermöglichen.

Aufbauend auf dieser Problemstellung werden in der vorliegenden Arbeit die Auswirkungen einer optimierten Anlagendimensionierung und Betriebsführung auf energetische Kennzahlen wie Autarkiegrad, Wirkungsgrad und Austauschenergie mit dem öffentlichen Stromnetz, sowie Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage untersucht. Ein System aus μ KWK-Anlage, Spitzenlastbrenner, thermischem Speicher und optional elektrischem Speicher wird auf Grundlage von Referenzlastprofilen der VDI-Richtlinie 4655 simuliert und die daraus erhaltenen Ergebnisse analysiert. Verschiedene Betriebsstrategien für μ KWK-Anlagen werden entwickelt und simuliert und die durch intelligente Regelungsstrategien erzielbaren Verbesserungen aufgezeigt. Aufgrund bisher kaum vorhandener Arbeiten zu diesem Aspekt liegt ein Fokus dieser Arbeit auf der Bewertung eines elektrischen Speichers als zusätzliche Komponente in dem beschriebenen System aus Teilanlagen. Dabei wird sowohl die Auswirkung auf oben genannte energetische Kennzahlen analysiert, als auch eine wirtschaftliche Bewertung mittels Annuitätsrechnung nach VDI 2067 durchgeführt. Dieses Vorgehen wird einerseits für μ KWK-Anlagen mit Erdgas als Energiequelle und andererseits für μ KWK-Anlagen mit Biomassevergasung und anschließender Verbrennung durchgeführt.

Die Analyse weist ein großes Verbesserungspotential der energetischen und wirtschaftlichen Betriebsparameter einer μ KWK-Anlage durch geeignete Dimensionierung und Wahl der Betriebsstrategie auf. Trotz Verbesserungen zeigt die Arbeit eine herkömmliche, getrennte Energieversorgung unter den aktuellen Rahmenbedingungen wirtschaftlich attraktiver.

Abstract

Due to several technical improvements the number of μ CHP-plants in residential buildings, industrial buildings and office buildings has increased in the last years. To achieve an economical justifiable use of the μ CHP-plant it is necessary to consume the produced electrical energy on site. If an on-site consumption is not possible the electrical energy has to be sold. Selling the electrical energy at the actual electricity market conditions in Austria reduces the economic efficiency of a μ CHP-plant. The degree of self-sufficiency is the quotient of the produced electrical energy of the μ CHP-plant which is used on-site, and the total electrical energy demand of the building. Therefore it is one of the aims to maximise this parameter for a better economic efficiency.

Based on this assumptions the aim of this work is to analyse the possibilities for an optimisation of the degree of self-sufficiency and other essential operation parameters of a μ CHP-plant. To make an analysis of different systems and operation strategies a system consisting of a μ CHP-plant, a thermal storage, an auxiliary burner and an electrical storage is simulated. The reference demand profiles which are published in the VDI guideline 4655 are the basic data for this simulation. Different operation strategies and the benefits of these strategies are analysed. The impact of an electrical storage in a system with a μ CHP-plant has not been extensively analysed in the past. Therefore a focus of this work is the rating of an electrical storage system in an energetic and economic sense. For economic rating the annuities of the different systems are calculated. μ CHP-plants with a natural gas engine and also μ CHP-plants with a biomass gasifier are analysed in this work.

The analysis identifies room for improvement for the energetic and economic operation parameters with the right dimensioning of the plant and a good operation strategy. Despite these improvements, the work shows the traditional separate supply as the better way in an economic sense.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Sommersemester 2015, dem letzten meines Studiums der industriellen Energietechnik, am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben entstanden. Ich möchte diese Gelegenheit nutzen mich bei den Menschen in meinem Umfeld, die diese Arbeit ermöglicht haben, zu bedanken.

Zu allererst möchte ich meiner Familie für die jahrelange, geduldige Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung danken. Meinen Eltern danke ich für die Möglichkeit ein Studium absolvieren zu können und ihre finanzielle und moralische Unterstützung auf diesem Weg. Meinen Schwestern, meinem Schwager und meinen Großeltern danke ich für ihre Unterstützung bei meinem zweijährigen Projekt „Studium Leoben“ und ihre Geduld mit mir. Natürlich haben auch meine Freunde und Kollegen meinen Dank für die Begleitung während meines Studiums verdient.

Ich möchte mich bei meinen beiden Betreuern DI Lukas Kriechbaum und Univ.-Prof. Thomas Kienberger für ihre Betreuung bei der Erstellung meiner Abschlussarbeit bedanken. Die großzügige Freiheit bei der Umsetzung der Arbeit verbunden mit konstruktiven Diskussionen bei außergewöhnlich angenehmer Atmosphäre am Lehrstuhl hat es mir ermöglicht diese Arbeit mit viel Freude zu schreiben.

Zum Schluss möchte ich meiner Freundin für ihre Geduld, Liebe, umfassende Unterstützung und ihren Glauben an mich danken.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufbau	1
1.1. Aufgabenstellung	1
1.2. Methoden	2
1.3. Aufbau der Arbeit	3
2. Literaturstudie - Stand der Technik von μKWK-Anlagen und elektrischen Energiespeichern	5
2.1. Aufbau und grundlegende Definitionen	5
2.2. Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung für häusliche Anwendungen	8
2.2.1. Verbrennungskraftmaschine.....	9
2.2.2. Gasturbine - Mikroturbine	10
2.2.3. Dampfkolbenmotor - Dampfturbine	11
2.2.4. Stirlingmotor	12
2.2.5. Hochtemperaturbrennstoffzelle	13
2.2.6. Zusammenfassung und Ausblick	15
2.3. Stand der Technik bei der Dimensionierung und den Einsatzstrategien von μ KWK-Anlagen	17
2.3.1. Dimensionierungsvorschriften.....	17
2.3.2. Regelungsstrategien von bereits eingesetzten Anlagen	22
2.4. Technologien zur Speicherung elektrischer Energie	23
2.4.1. Überblick über Technologien zur elektrischen Energiespeicherung ...	23
2.4.2. Entwicklungsstand ausgewählter Technologien	24
2.4.3. Anforderungen an eine Speichertechnologie	27
2.4.4. Marktstudie	29
3. Versuchsaufbau und Modellbeschreibung	32
3.1. Grundlegende Systemgestaltung und Datenherkunft	32
3.2. Grundlegender Aufbau der Simulationen	33
3.3. Unterschiedene Anlagenkonfigurationen und Regelungsstrategien	38

Inhaltsverzeichnis

3.3.1.	Erdgasbetriebene μ KWK-Anlagen	39
3.3.2.	μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser	46
3.4.	Ergebnisausgabe der Simulation	48
4.	Auswertung der Simulationen	49
4.1.	Grundlagen und Vorgehensweise	49
4.2.	Ergebnisse für erdgasbetriebene μ KWK-Anlagen	51
4.2.1.	Objekt- und Anlagendaten	51
4.2.2.	Rein wärmegeführte Betriebsstrategie mit therm. Speicher	51
4.2.3.	Stromoptimierte Betriebsstrategie mit therm. Speicher.....	54
4.2.4.	Stromoptimierte Betriebsstrategie mit therm.- und el. Speicher	57
4.3.	Ergebnisse für μ KWK-Anlagen mit Biomassevergaser	63
4.3.1.	Objekt- und Anlagendaten	63
4.3.2.	Stromoptimierte Betriebsweise ohne elektrischen Speicher	63
4.3.3.	Stromoptimierte Betriebsweise mit elektrischem Speicher	66
5.	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	71
5.1.	Annuitätskostenrechnung nach VDI 2067	71
5.2.	Datengrundlage	73
5.3.	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis der Simulationen	75
5.3.1.	Ergebnisse für μ KWK-Anlage mit Erdgasmotor.....	76
5.3.2.	Ergebnisse für μ KWK-Anlage mit Pelletsvergaser	79
6.	Allgemeine Anlagendimensionierung.....	89
6.1.	Formeln für die Auslegung eines Gesamtsystems	90
6.1.1.	System ohne elektrischen Speicher	90
6.1.2.	System mit elektrischem Speicher	93
6.2.	Kritik	95
7.	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	97
7.1.	Überblick der Ergebnisse	97
7.2.	Ausblick	99
8.	Literaturangaben.....	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Aufbau eines Versorgungssystems mit μ KWK-Anlage.....	1
Abbildung 2 - Vergleich zwischen Kraft-Wärme-Kopplung und getrennter Erzeugung [5]	6
Abbildung 3 - Schema einer μ KWK-Anlage mit Verbrennungsmotor [6]	7
Abbildung 4 - Erdgasbetriebene μ KWK-Anlage der Firma Wolf GmbH [8]	9
Abbildung 5 - μ KWK-Anlage mit Holzvergaser und Verbrennungsmotor der Firma Spanner Re ² GmbH [14]	10
Abbildung 6 - Schema einer KWK-Anlage mit Mikroturbine [18]	11
Abbildung 7 - Schema einer μ KWK-Anlage mit Dampfkolbenmotor [20]	12
Abbildung 8 - Aufbau eines Stirlingmotors [24]	13
Abbildung 9 - Aufbau einer Brennstoffzelle [25]	14
Abbildung 10 - „Maximum rectangle method“ zur optimalen Auslegung der μ KWK- Anlage [43]	20
Abbildung 11 - Überblick über Technologien zur elektrischen Energiespeicherung [49]	24
Abbildung 12 - Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie [50]	26
Abbildung 13 - Simulationsablauf	34
Abbildung 14 - Zustände des thermischen Energiespeichers	36
Abbildung 15 - Zustände des elektrischen Energiespeichers.....	38
Abbildung 16 - Ablauf der rein wärmegeführten Regelungsstrategie.....	40
Abbildung 17 - Ablauf einer stromoptimierten Regelungsstrategie ohne elektrischen Speicher	42
Abbildung 18 - Ablauf einer stromoptimierten Regelungsstrategie mit elektrischem Speicher	45
Abbildung 19 - Anfahrvorgang der Anlage E3 der Firma ENTRADE aus einem abgekühlten Zustand	46
Abbildung 20 - Ablauf der Regelungsstrategie für eine μ KWK-Anlage mit Biomassevergasung.....	48
Abbildung 21 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von thermischer Nennleistung bei verschiedenen Szenarien	52
Abbildung 22 - Abhängigkeit des Autarkiegrades vom Volumen des thermischen Speichers	52
Abbildung 23 - Verlauf von Erzeugung und Verbrauch an einem bewölkten Winterarbeitstag bei rein wärmegeführter Strategie	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 24 - Abhängigkeit der verkauften elektrischen Energie von der thermischen Nennleistung	55
Abbildung 25 - Abhängigkeit des Autarkiegrades vom thermischen Speichervolumen bei stromoptimierter Strategie	56
Abbildung 26 - Verlauf von Erzeugung (stromoptimierte Strategie) und Verbrauch an einem bewölkten Arbeitstag während der Übergangszeit.....	57
Abbildung 28 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von der nutzbaren elektrischen Speicherkapazität	58
Abbildung 27 - Abhängigkeit der Bezugsenergie von der thermischen Nennleistung der Anlage.....	58
Abbildung 30 - Abhängigkeit der Ladezyklenzahl von der Speichergröße.....	59
Abbildung 29 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von der therm. Speichergröße bei Anlagen mit el. Speicher	59
Abbildung 31 - Verlauf von Erzeugung und Verbrauch an einem bewölkten Übergangstag (Werktag) für Szenario 3	61
Abbildung 32 - Autarkiegrad in Abhängigkeit der Parteienzahl bzw. dem Jahreswärmebedarf.....	63
Abbildung 33 - Abhängigkeit des Autarkiegrades vom therm. Speichervolumen bei verschiedenen Szenarien und Objekten	64
Abbildung 34 - Tagesverlauf bei Biomasseanlage ohne elektrischen Speicher	65
Abbildung 35 - Abhängigkeit der Jahresvolllaststunden von der Parteienzahl	66
Abbildung 36 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von elektrischer Speicherkapazität bei Versorgung von 36 Parteien	67
Abbildung 37 - Tagesverlauf der Leistungen bei ENTRADE E3 mit elektrischem Speicher an einem bewölkten Übergangstag.....	69
Abbildung 38 - Aufteilung der Annuitätskosten bei Anlagenkonfiguration 1	77
Abbildung 39 - Aufteilung der Annuitätskosten bei Anlagenkonfiguration 2	78
Abbildung 40 - Aufteilung der Annuitätskosten bei Anlagenkonfiguration 3	79
Abbildung 41 - Aufteilung der Annuitätskosten für Anlagenkonfiguration 1.....	80
Abbildung 42 - Aufteilung der Annuitätskosten für Anlagenkonfiguration 2.....	81
Abbildung 43 - Aufteilung der Annuitätskosten für Anlagenkonfiguration 3.....	81
Abbildung 44 - Sensitivitätsanalyse für die Entwicklung von Brennstoff- und Strompreis.....	84
Abbildung 45 - Abhängigkeit vom Verhältnis der spezifischen Energiekosten bei 45 Parteien	85
Abbildung 46 - Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit vom garantierten Stromeinspeisetarif für die Versorgung eines Objektes mit 45 Parteien in Österreich	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 47 - Wirtschaftlichste Strategie je nach Strommarkt	88
Abbildung 48 - Vorgehensweise bei der Auslegung eines Systems ohne elektrischen Speicher	90
Abbildung 49 - Auslegungsgrundlage für die μ KWK-Nennleistung bei Szenario 2	91
Abbildung 50 - Auslegungsgrundlage für die Zusatzbrennerleistung bei Szenario 2.	92
Abbildung 51 - Grundlage zur Auslegung des thermischen Speichers	93
Abbildung 52 - Auslegungsschma für eine Anlagenkonfiguration mit elektrischem Speicher	93
Abbildung 53 - Grundlage zur Auslegung der thermischen μ KWK-Nennleistung für Szenario 3	94
Abbildung 54 - Grundlage zur Auslegung des elektrischen Speichers	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1- Auswahl von μ KWK-Anlagen am Markt	16
Tabelle 2- Übersicht über Typtage der VDI 4655 - vgl. [1].....	18
Tabelle 3 - Überblick über wichtige Kenndaten elektrischer Speicher	29
Tabelle 4 - Überblick über verfügbare Speicher.....	30
Tabelle 5 - Getrennte Betrachtung des Sommers für Szenario 3.....	61
Tabelle 6 - Überblick über Anlagenparameter und Ergebnisse bei einem Objekt mit 3 Parteien	62
Tabelle 7 - Daten der ENTRADE E3	63
Tabelle 8 - Getrennte Betrachtung des Sommers für ENTRADE E3 ohne el. Speicher	66
Tabelle 9 - Getrennte Betrachtung des Sommers für ENTRADE E3 mit elektrischem Speicher	69
Tabelle 10 - Anlagenparameter und Simulationsergebnisse bei Versorgung eines Objektes mit 36 Parteien mittels ENTRADE E3	70
Tabelle 11 - Quellen der Daten zur Wirtschaftlichkeitsanalyse	74
Tabelle 12 - Anlagenkenndaten für ein Objekt mit 3 Parteien.....	76
Tabelle 13 - Ergebnisse der Annuitätskostenrechnung für 3 Parteien bei Referenzszenario.....	77
Tabelle 14 - Annuitätskosten für ein Objekt mit 3 Parteien bei Alternativszenario	78
Tabelle 15 - Anlagenkenndaten für Objekt mit 36 Parteien	80
Tabelle 16 - Ergebnisse der Annuitätskostenrechnung für 36 Parteien bei Referenzszenario.....	80
Tabelle 17 - Annuitätskosten für ein Objekt mit 36 Parteien bei Alternativszenario	82
Tabelle 18 - Annuitätskosten für ein Objekt mit 45 Parteien bei Referenzszenario	83
Tabelle 19 - Ergebnisse der Annuitätsrechnung für ein Objekt mit 45 Parteien in Deutschland.....	83
Tabelle 20 - Einfluss von wirtschaftlichen Parametern auf die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage.....	85

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen:

μKWK	Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage
GuD	Gas- und Dampfkombinationskraftwerk
ORC	Organic Rankine Cycle
VKM	Verbrennungskraftmaschine
DM	Dampfmaschine
wg	wärmegeführt
so	stromoptimiert
NG	Natural Gas (Erdgas)
LPG	Liquified Petroleum Gas (Flüssiggas)
bzw.	beziehungsweise
u.a.	unter anderem
NPV	Net Present Value (Kapitalwert)
PES	primary energy saving (Primärenergieeinsparung)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)
DoD	Depth of Discharge (Entladetiefe)
ZB	Zusatzbrenner bzw. Spitzenlastbrenner

Formelzeichen und Einheiten:

P	Leistung
Q	Energie
\dot{Q}	Leistung

Abkürzungsverzeichnis

S Stromkennzahl

kW Kilowatt

η Wirkungsgrad

kWh Kilowattstunde

h Stunde

l Liter

€ Euro

ct Eurocent

a Jahr

Indizes:

el elektrisch

th thermisch

zu zugeführt

Nutz genutzt

Ges Gesamt

1. Einleitung und Aufbau

In den letzten Jahren stagniert der Zubau von Anlagen zur Stromerzeugung aus Biomasse in Österreich. Dies ist mit den gegebenen Einspeisetarifen ins Stromnetz begründet, die eine wirtschaftliche Realisierung und Betrieb solcher Anlagen kaum oder gar nicht zulassen. Konkurrieren die Stromgestehungskosten von Biomasseanlagen mit den Endkundenpreisen auf Netzebene 7 (Niederspannungsnetz: 230/400V) scheint eine wirtschaftliche Umsetzung deutlich einfacher möglich. In diese Konkurrenz können Mikro-KWK-Anlagen (μ KWK) unter der Bedingung der Eigenstromnutzung treten. KWK-Anlagen basieren auf dem Prinzip der gleichzeitigen Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie, wodurch ein deutlich höherer Primärenergieausnutzungsgrad als bei getrennter Erzeugung erzielt werden kann. Dieses Prinzip wird bereits seit geraumer Zeit in großem Maßstab bei Kraftwerken eingesetzt, in den letzten Jahren wurden darüber hinaus Anlagen mit geringeren Leistungen zur Energieversorgung von Mehrparteienhäusern, Bürogebäuden oder Schwimmbädern entwickelt. Die Wirtschaftlichkeit dieser, auch als stromerzeugende Heizungen bezeichneten, Anlagen scheint unter den jetzigen Bedingungen am Strommarkt vor allem vom elektrischen Eigennutzungsgrad der Anlage abhängig zu sein.

1.1. Aufgabenstellung

Ein System zur Versorgung eines Objektes (Mehrparteienhaus, Schwimmbad,...) mit elektrischem Strom und Wärme auf Basis einer μ KWK-Anlage könnte wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt aufgebaut sein. Die Integration eines thermischen Speichers als Pufferspeicher zwischen Erzeuger und Verbraucher ist üblich, während die Integration eines elektrischen Speichers bis dato selten durchgeführt und kaum

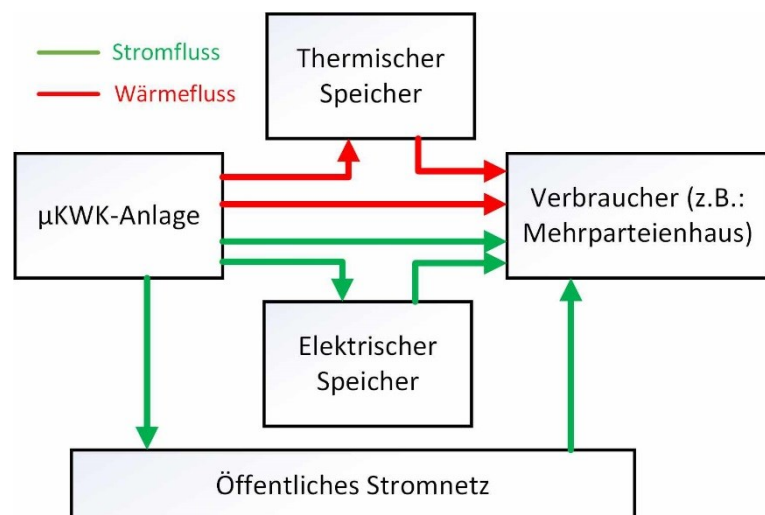


Abbildung 1 - Aufbau eines Versorgungssystems mit μ KWK-Anlage

wissenschaftlich untersucht wurde. Die Auswirkungen eines elektrischen Speichers auf die energetischen und wirtschaftlichen Betriebskennzahlen dieses Gesamtsystems in einem Simulationsmodell zu untersuchen stellt die Kernaufgabe dieser Arbeit dar. Eine optimale Auslegung der einzelnen Systemkomponenten in Verbindung mit speziellen Betriebsstrategien soll unter den jetzigen Marktbedingungen zur Verbesserung der wirtschaftlichen Attraktivität führen. Aus diesen Rahmenbedingungen entstammen folgende grundlegende Fragestellungen, dessen Beantwortung die Aufgabenstellung dieser Arbeit darstellt:

- Welcher Autarkiegrad ist durch eine optimierte Betriebsstrategie für Mehrparteienhäuser mit einer μ KWK-Anlage in Kombination mit einem thermischen Speicher möglich?
- Welche Verbesserung des Autarkiegrades und Verringerung des notwendigen Energieaustausches mit dem öffentlichen Stromnetzes ist durch die Integration eines elektrischen Speichers möglich?
- Ist es möglich einfache Auslegungsempfehlungen zu generieren, die gewährleisten alle Anlagenkomponenten optimal auszulegen?
- Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen Autarkiegrad, Volllaststunden, Einschalthäufigkeit und anderen wichtigen Kenngrößen und den vorgegebenen Eingabeparametern wie Nennleistung, Stromkennzahl und Speicherkapazitäten?
- Welche Unterschiede des Betriebsverhaltens und der Betriebsparameter ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Technologien von erdgas- bzw. biomassebetriebene μ KWK-Anlagen?
- Kann die Anschaffung eines elektrischen Speichers bei den jetzigen Marktbedingungen wirtschaftlich gerechtfertigt werden?

1.2. Methoden

Eine ausführliche Literaturstudie zu den Themen μ KWK-Anlagen und elektrische Speicher stellt die Grundlage dieser Arbeit dar. Aktuelle Marktbedingungen sowie Entwicklungsstände und Eigenschaften der unterschiedlichen Technologien geben den Rahmen für die folgenden Simulationen und wirtschaftlichen Berechnungen vor.

Das Verhalten einer Gesamtanlage, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist, wird über die Dauer eines Jahres minutenweise simuliert und dabei Anlagenkonfigurationen, Betriebsstrategien und Dimensionierungsgrößen variiert. Durch die umfangreiche, kontinuierliche Parametervariation wird eine Optimierung der Betriebsdaten des

Gesamtsystems ermöglicht. Die Daten dieser Simulationen werden genutzt um einfache Formeln zur besseren Auslegung eines Energieversorgungssystems mit μ KWK-Anlage zu generieren. Bei allen Simulationen werden Referenzlastprofile der VDI-Richtlinie 4655 [1] als grundlegende Verbrauchsprofile (thermisch und elektrisch) genutzt.

Die wirtschaftliche Bewertung der einzelnen Anlagenkonfigurationen erfolgt mit einer Investitionsrechnung aufbauend auf der Richtlinie VDI 2067 Blatt 1 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung“ [2].

1.3. Aufbau der Arbeit

Die notwendige Aufarbeitung der technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dieser Arbeit wird vorangehend in einer Literaturstudie zu μ KWK-Anlagen und möglichen elektrischen Speichertechnologien durchgeführt. Der erste Teil dieser Studie stellt Funktionsweise, Entwicklungen und Betriebseigenschaften der unterschiedlichen μ KWK-Anlagen gegenüber und gibt einen aktuellen Marktüberblick. Anschließend an eine Analyse der üblichen Einsatzstrategien von μ KWK-Anlagen werden ausgewählte Technologien zur Speicherung elektrischer Energie beschrieben. Die genaue Vorgehensweise und die abgeleiteten Erkenntnisse der Literaturstudie sind in Kapitel 2 dargestellt.

Die Simulation der Anlage beruht auf dem physikalischen Energieerhaltungssatz - jegliche thermische und elektrische Energie, die von μ KWK-Anlage oder Zusatzbrenner aus im Brennstoff gespeicherter Energie generiert wird, muss entweder vom Verbraucher direkt genutzt, in den Speicher geladen, an das elektrische Stromnetz abgegeben oder als Verlust verbucht werden. Die Datengrundlage für die Anlagenkomponenten basiert auf Marktstudien, während die Daten der Verbraucher in Form von Referenzlastprofilen in die Simulation eingehen. Der genaue Ablauf der Simulation und die gewählten Szenarien werden in Kapitel 3 beschrieben.

Die aus den einzelnen Simulationsschritten erhaltenen Betriebsdaten der Anlagen für jede Berechnungsperiode werden am Ende der Simulation zu Gesamtergebnissen für ein Jahr zusammengerechnet. Diese und daraus abgeleitete Ergebnisse werden in Kapitel 4 ausführlich dargestellt und stellen die Grundlage der folgenden Analyse, Bewertung und Optimierung des Anlagensystems dar.

Eines der Hauptziele dieser Arbeit ist die Bewertung und Steigerung der wirtschaftlichen Attraktivität von μ KWK-Anlagen bei der Versorgung von Mehrparteienhäusern, wobei der Fokus auf der Integration eines elektrischen Speichers in das Gesamtsystem liegt. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse aufbauend auf den aufbereiteten Simulationsergebnissen und umgebend von herrschenden Marktbedingungen vergleicht verschiedene Systemkonfigurationen, Regelungsstrategien und Anlagendimensionierungen. Eine detaillierte Beschreibung der dafür angewandten Methoden und die Ergebnisse dieser Analyse sind in Kapitel 5 näher beschrieben.

2. Literaturstudie - Stand der Technik von μ KWK-Anlagen und elektrischen Energiespeichern

In diesem Kapitel werden die derzeit verfügbaren Technologien und deren Entwicklungsstand im Bereich der μ KWK-Anlagen und elektrischen Energiespeicher beschrieben. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Integration und Dimensionierung von elektrischen Speichern in ein Energieversorgungssystem mit μ KWK-Anlage, weshalb eine Abbildung des Standes der Entwicklungen von elektrischen Energiespeichern erforderlich ist. Dieses sehr umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsfeld wird auf Speichertechnologien beschränkt, die für die vorgesehene Anwendung (μ KWK-Anlagen) in Frage kommen.

Um eine fundierte technische Datengrundlage als Basis für die weitere Arbeit zu ermöglichen, werden aktuelle wissenschaftliche Arbeiten auf diesen beiden Gebieten analysiert. Darauf folgende Marktstudien schaffen einen Überblick über erhältliche Anlagen und deren technische Kenndaten und stellen die Datengrundlage für die am Ende der Arbeit beschriebene Wirtschaftlichkeitsanalyse dar.

2.1. Aufbau und grundlegende Definitionen

Die Untersuchung des Entwicklungsstandes von μ KWK-Anlagen beruht auf der Definition von μ KWK-Anlagen in der Richtlinie VDI 4656-Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen [3]. Dabei wird eine Anlage als μ KWK-Anlage definiert, die sowohl zur Wärme-, als auch zur Stromversorgung eines Objektes beiträgt und eine heizwertbezogene Brennstoffleistung von weniger als 70kW hat. Anlagen einer solchen Größenordnung können für Einfamilienhäuser, mit definitionsgemäß weniger als 12 Bewohnern, und für Mehrfamilienhäuser mit weniger als 40 Wohneinheiten als moderne Energieversorgung dienen. Eine weitere mögliche Anwendung für μ KWK Anlagen ist die Versorgung von kleinen Siedlungen und Hausverbunden. Die erwähnte Richtlinie VDI 4656 vom Verein deutscher Ingenieure (VDI) ist die erste Richtlinie zur Dimensionierung von kleinen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen im deutschsprachigen Raum. In einigen anderen Arbeiten ist die definitionsgemäße Leistungsgrenze von μ KWK-Anlagen teilweise anders gewählt, so werden μ KWK-Anlagen beispielsweise bis zu einer elektrischen Leistung von 50kW [4] definiert.

Das System (siehe auch Abbildung 1) zur Versorgung eines Ein- oder Mehrfamilienhauses mit thermischer und elektrischer Energie unter Einsatz einer μ KWK-Anlage kann aus folgenden Einzelaggregaten bestehen:

- μ KWK-Anlage
- Spitzenlastkessel
- Thermischer Speicher
- Elektrischer Speicher
- Steuer- und Regeleinheit

Hauptaufgabe einer solchen Anlage ist es, das Objekt jederzeit mit der benötigten Wärmeenergie zu versorgen. Damit dies ohne unwirtschaftlicher Überdimensionierung der μ KWK-Anlage gewährleistet werden kann, wird zur Abdeckung von thermischen Bedarfsspitzen ein Spitzenlastkessel in das System integriert. Zusätzlich wird in vielen Fällen ein thermischer Speicher eingesetzt, der die zeitliche Entkopplung der Erzeugung und des Verbrauches von thermischer

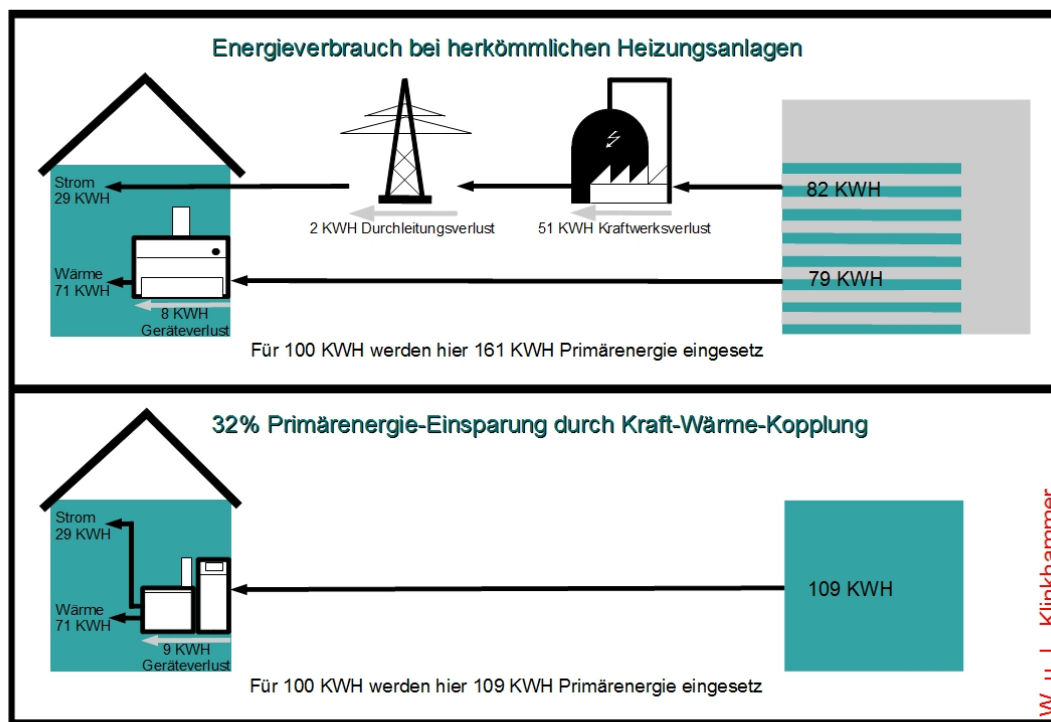


Abbildung 2 - Vergleich zwischen Kraft-Wärme-Kopplung und getrennter Erzeugung [5]

Energie und damit einen effizienteren Betrieb der μ KWK-Anlage ermöglicht. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Integration eines elektrischen Speichers, um weitere Möglichkeiten in der Wahl der Betriebsstrategie der μ KWK-Anlage zu

generieren. Die Steuer- und Regeleinheit dient zur Realisierung der gewählten Betriebsstrategie und ist für eine korrekte Funktion des Systems unbedingt erforderlich. Kraft-Wärme-Kopplung im Allgemeinen meint die gleichzeitige Umwandlung der in einem Brennstoff gespeicherten chemischen Energie in Wärme und elektrischen Strom. Der Vorteil der gemeinsamen Umwandlung besteht in der Ausnutzung der anfallenden Abwärme bei der Generation von elektrischem Strom, je nach Technologie sind dabei verschiedene Brennstoffe möglich (siehe Kapitel 2.2). Bei dem in Abbildung 2 dargestellten Vergleich zwischen der gemeinsamen Erzeugung von thermischer Energie und elektrischem Strom in einer KWK-Anlage und der getrennten Erzeugung werden 32% Primärenergie eingespart. Abhängig von KWK-Anlage einerseits und Art und Weise von Stromerzeugung und Erzeugung thermischer Energie andererseits sind verschiedene Wirkungsgrade und Brennstoffnutzungsgrade möglich, weshalb keine allgemeine Zahl für die Einsparung mittels KWK angegeben werden kann.

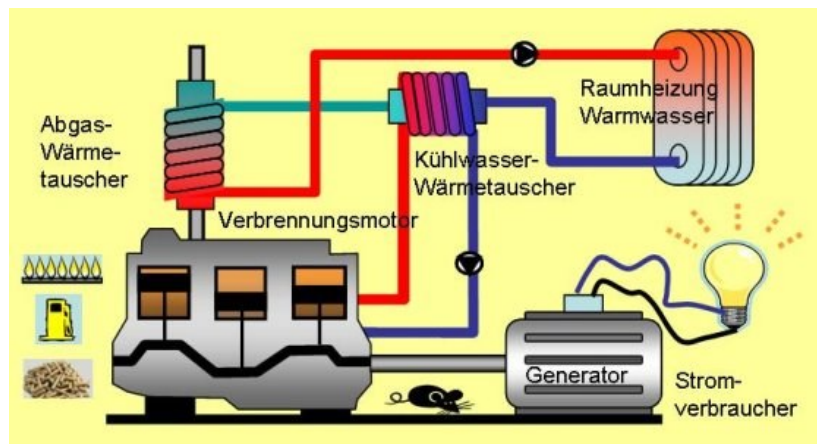


Abbildung 3 - Schema einer μ KWK-Anlage mit Verbrennungsmotor [6]

Der prinzipielle Aufbau von Blockheizkraftwerken, die zur Versorgung ganzer Orte oder Stadtteile dienen und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die zur Versorgung eines Hauses dienen, ist ident und besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten (siehe Abbildung 3):

- Ein Primärwandler, der die chemische Energie des Brennstoffes (durch Verbrennung) in thermische Energie umwandelt. In diesem Beispiel geschieht dies durch Verbrennung des Brennstoffes im Zylinder des Motors.
- Ein Sekundärwandler, der die thermische Energie in elektrische Energie umwandelt. Hier wandelt der Motor die thermische Energie in eine mechanische Drehbewegung um und der Generator erzeugt daraus elektrischen Strom.
- Ein System zur Nutzung der Abwärme. Die heißen Abgase des Motors werden durch einen Abgaswärmetauscher geleitet und so die thermische Energie dem Verbraucher (Heizung und Warmwasser) zugeführt.

Anstelle von Motor und Generator können eine Vielzahl anderer Aggregate eingesetzt werden, wie zum Beispiel Kessel und Dampfturbine bei Großanlagen oder eine Brennstoffzelle als Primär- und Sekundärwandler in einem. Dabei wird zwischen verschiedenen technischen Kenngrößen unterschieden, die für alle Arten und Größenordnungen von KWK-Anlagen in gleicher Weise gültig sind:

Der elektrische Wirkungsgrad eines Kraftwerkes ist als Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zu mittels Brennstoff zugeführtem Wärmestrom definiert [7]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (1)$$

Bei einer KWK-Anlage wird neben der abgegebenen elektrischen Energie auch die abgegebene thermische Energie (Abwärme) genutzt, weshalb auch diese Energie bei der Beurteilung der Güte der Umwandlung betrachtet werden muss. Man spricht dabei vom Brennstoffnutzungsgrad [7]:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (2)$$

Gerade bei μ KWK-Anlagen kann eine hohe Laufzeit nur erreicht werden, wenn das Erzeugungsverhältnis zwischen thermischer und elektrischer Energie zum Verbrauchverhältnis des zu versorgenden Objektes passt. Die dazugehörige Kennzahl wird als Stromzahl bezeichnet [7]:

$$S = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} \quad (3)$$

2.2. Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung für häusliche Anwendungen

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über verfügbare Technologien, die in μ KWK-Anlagen eingesetzt werden können. Dabei wird die Marktreife der angeführten Technologien bewertet und verglichen. Für detailliertere Erklärungen der Funktionsweisen der einzelnen Technologien wird auf in großer Zahl verfügbare Fachliteratur verwiesen. Anschließend an die Vorstellung der einzelnen Technologien wird ein Querschnitt über aktuell verfügbare Anlagen dargestellt. Dies dient dazu

die aktuelle Bedeutung der jeweiligen Technologie auf dem Gebiet der μ KWK-Anlagen für die Anwendung im häuslichen Bereich abschätzen zu können.

2.2.1. Verbrennungskraftmaschine

Beim Einsatz von Verbrennungskraftmaschinen als Aggregate zur Erzeugung von Wärme und Strom in einer μ KWK-Anlage wird üblicherweise eine Anordnung, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist, realisiert. Je nach Ausführungsform der Kolbenmaschine kann entweder Erdgas beziehungsweise Flüssiggas ([9], [10]) oder alternativ Heizöl beziehungsweise Biodiesel ([10], [11]) als Brennstoff zum Einsatz kommen. Bei gasbetriebenen Verbrennungsmotoren wird auf konventionelle Gas-Motoren zurückgegriffen, die auf dem Otto-Prozess basieren (Funktionsweise siehe u.a. [12]).

Bei heizölbetriebenen μ KWK-Anlagen wird üblicherweise ein speziell auf den Betrieb mit Heizöl angepasster Dieselmotor verwendet.

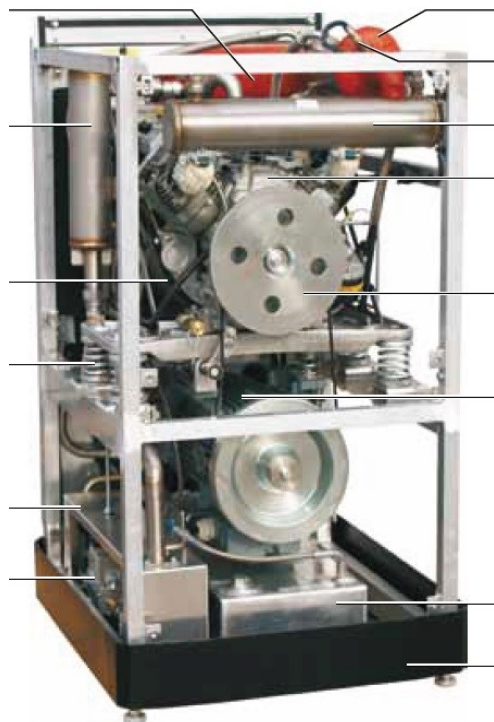


Abbildung 4 - Erdgasbetriebene μ KWK-Anlage der Firma Wolf GmbH [8]

Aufgrund langjähriger Erfahrung und großtechnischer Industrie sind heute verfügbare μ KWK-Anlagen zum Großteil mit Otto- und Dieselmotoren als Primärenergiewandler ausgestattet. Die damit einhergehende Ausgereiftheit der Technologie und die Vielzahl an Anbietern von Motoren ermöglichen es vielen Herstellern von μ KWK-Anlagen das Hauptaggregat ihrer Anlage bei namhaften Motorenherstellern zuzukaufen. Vorteile der Verbrennungskraftmaschinen sind sehr kompakte Ausführungsweise (siehe Abbildung 4) bei geringem Wartungsaufwand und guter Regelbarkeit.

2.2.1.1. Biomassevergaser

Dem einleitend erwähnten Zubau von stromerzeugenden Anlagen auf Basis von Biomasse kann mit μ KWK-Anlagen nur bei Verwendung eines Biomassevergasers ein Aufschwung verliehen werden. Die Verfeuerung fester Biomasse (Hackschnitzel,

Scheitholz, Pellets) wird durch einen vor die eigentliche Anlage geschalteten Vergaser möglich. Dieser wandelt die feste Biomasse in Biogas um, welches dann in einer Verbrennungskraftmaschine mit nahezu identem Aufbau wie bei Erdgasmotoren zu mechanischer und thermischer Energie umgewandelt wird. Solche Anlagen sind bereits verfügbar (siehe [13], [14], [15]). Neuartigkeit und eine hohe Komplexität der Prozessführung führten bisher zu einer im Vergleich mit erdgasbetriebenen μ KWK-Anlagen deutlich geringeren Marktdurchdringung von μ KWK-Anlagen mit Biomassevergaser. Der Einsatz von Vergasertechnologien bei μ KWK-Anlagen erfordert einen deutlich erhöhten Platzbedarf (siehe Abbildung 5), weshalb eine Nachrüstung in ein bestehendes Objekt mit entsprechend höherem Aufwand verbunden ist.

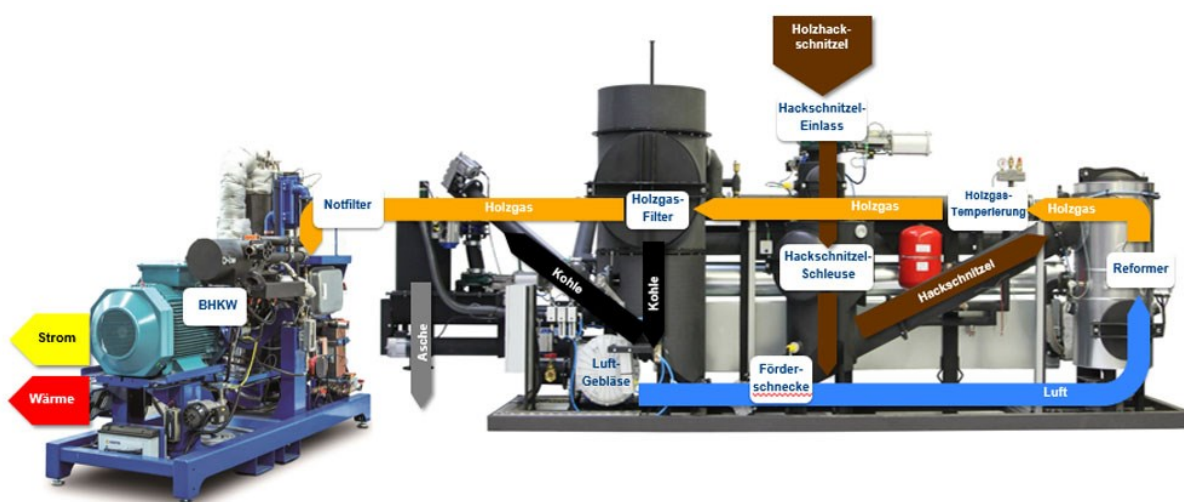


Abbildung 5 - μ KWK-Anlage mit Holzvergaser und Verbrennungsmotor der Firma Spanner Re² GmbH [14]

Diese Technologie wird bisher vor allem in ländlichen Regionen ([4]) eingesetzt, wo eine Versorgung mit Erdgas bzw. Flüssiggas nur schwer oder gar nicht möglich, Biomasse allerdings schnell und günstig verfügbar ist.

2.2.2. Gasturbine - Mikroturbine

Eine für Mittel- und Großkraftwerke aufgrund ihrer Flexibilität häufig eingesetzte Technologie ist die Gasturbine. Ähnlich aufgebaute Aggregate mit einer Leistung in der Größenordnung von typischen μ KWK-Anlagen werden als Mikroturbinen bezeichnet. Für größere Blockheizkraftwerke (ab 100kW Brennstoffleistung) sind Mikroturbinen bereits erhältlich ([16]). Eine mögliche Marktreife in

Größenordnungen (10 kW_{el}) für μ KWK-Anlagen ist schwer zu prognostizieren, es gibt jedenfalls einige Forschungsprojekte ([17]) auf diesem Gebiet. Um Mikroturbinen in diesen Größenordnungen zur Marktreife zu bringen, müssen vor allem die Investitionskosten und die Instandhaltungskosten (hochqualifiziertes Personal nötig) gesenkt und gleichzeitig die Effizienz gesteigert werden ([18]). Neben einer kompakten, leichten Bauweise sowie kurzen Anfahrzeiten haben Mikrogasturbinen die Eigenschaft Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau zu erzeugen.

Die letztgenannte Eigenschaft ist bei der häuslichen Anwendungen von Kraft-Wärme-Kopplung allerdings nicht ausschlaggebend, wodurch die geplanten Einsatzgebiete von Mikrogasturbinen bisher im Industriebereich zu finden waren ([18]). Bei Mikroturbinen werden einstufige Verdichter mit Rekuperatoren eingesetzt

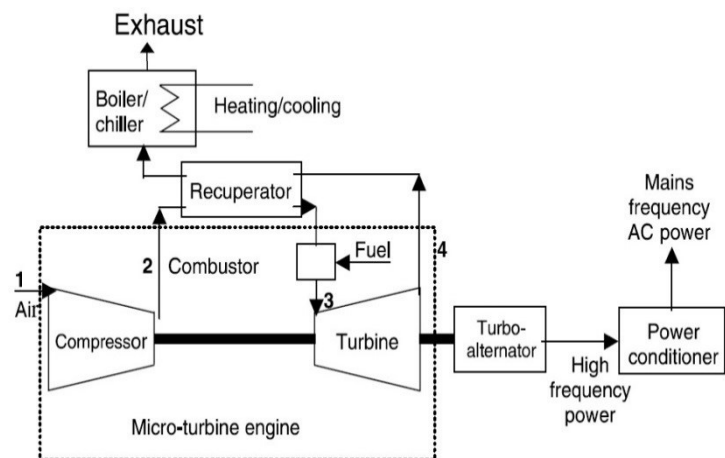


Abbildung 6 - Schema einer KWK-Anlage mit Mikroturbine [18]

(siehe Abbildung 6), weshalb der elektrische Wirkungsgrad einer solchen Turbine nicht mit den Wirkungsgraden von großen Gasturbinen - mehrstufige Verdichter, größeres Verdichtungsverhältnis, höhere Temperaturen - verglichen werden kann ([19]).

2.2.3. Dampfkolbenmotor - Dampfturbine

Dampfkolbenmotoren beruhen auf dem lange bekannten Prinzip der Dampfmaschine und wurden für die speziellen Anforderungen von μ KWK-Anlagen adaptiert. Ein vereinfachtes Schema ist in Abbildung 7 dargestellt. Im Rohrverdampfer wird Dampf erzeugt, welcher abwechselnd auf beide Seiten des Doppelfreikolbens eingeleitet wird und diesen daher in eine lineare Bewegung versetzt. Mit der Kolbenbewegung verbunden wird im Lineargenerator ein Magnet durch eine Kupferspule bewegt und dabei elektrischer Strom generiert.

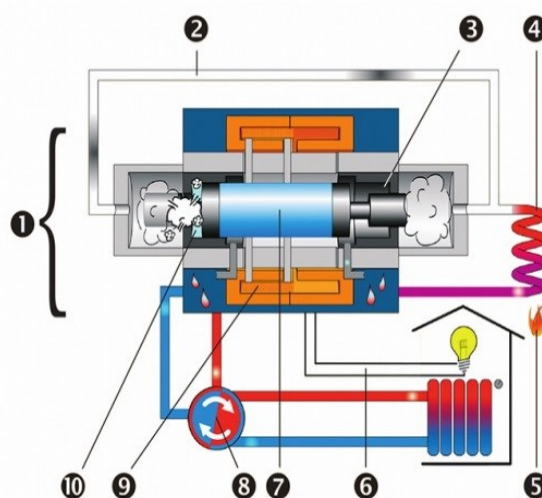
Die Wärme des Dampfes wird über Wärmetauscher dem Heizkreislauf zugeführt. Bei der hier skizzierten Anlage wird ein Brennstoffnutzungsgrad von 94% ([21]) erreicht. Als Brennstoff wird Erdgas eingesetzt, wobei technisch gesehen auch andere Brennstoffe denkbar sind. Die Flexibilität bezüglich des Brennstoffes ist der große Vorteil von Dampfkolbenmotoren.

Klassische Dampfturbinen, wie sie in großen thermischen Kraftwerken üblich sind, werden in μ KWK-Anlagen bisher nicht eingesetzt, es existieren lediglich einige Versuchsanlagen (Überblick siehe [22]). Die hohen Temperaturen und Drücke, die in einer Dampfturbine notwendig sind um einen guten elektrischen Wirkungsgrad zu erreichen, sind für μ KWK-Anlagen nicht realisierbar, weshalb am Einsatz spezieller organischer Fluide für μ KWK-Anlagen geforscht wird. Anlagen mit organischen Fluiden werden als ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle) bezeichnet und haben denselben thermodynamischen Kreisprozess zugrunde liegen wie gewöhnliche Dampfturbinen. Durch die Verwendung von speziell designten Fluiden anstelle von Wasser können Verdampfungstemperatur und der herrschende Druck gesenkt werden, wodurch die mechanischen Anforderungen an die Anlage deutlich sinken. Aufgrund der geringeren Verdampfungstemperatur besteht die Möglichkeit Solarenergie als Primärenergiequelle einzusetzen ([4]). μ KWK-Anlagen auf Basis eines Organic Rankine Cycles befinden sich zurzeit in einem Forschungs- und Entwicklungsprozess, wobei eine mögliche Markteinführung noch nicht absehbar ist.

2.2.4. Stirlingmotor

Stirlingmotoren zählen ebenso wie Otto- und Dieselmotoren zu den Kolbenmaschinen ([23]). Der grundlegende Prozessablauf besteht aus Komprimierung von kaltem Gas und einer anschließenden, durch die bei der Verbrennung des Primärenergieträgers entstehenden Wärme induzierten,

VEREINFACHTES FUNKTIONSSCHEMA DES *lion*



Wichtige Bauteile des *lion*-POWERBLOCKS:

- | | | |
|--------------------|------------------|--------------------|
| 1 LINATOR | 4 Rohrverdampfer | 7 Doppelfreikolben |
| 2 Dampfleitung | 5 Brenner | 8 Wärmetauscher |
| 3 rechter Zylinder | 6 Stromabführung | 9 Spule |
| 10 linker Zylinder | | |

Abbildung 7 - Schema einer μ KWK-Anlage mit Dampfkolbenmotor [20]

Expansion. Im Unterschied zu Otto- und Dieselmotoren findet die Verbrennung des Kraftstoffes außerhalb des Zylinders statt und die dabei entstehende Wärme wird anschließend auf das Arbeitsgas übertragen. Dabei werden Arbeitskolben und Kompressionskolben (siehe Abbildung 8) aufgrund der abwechselnden Expansion

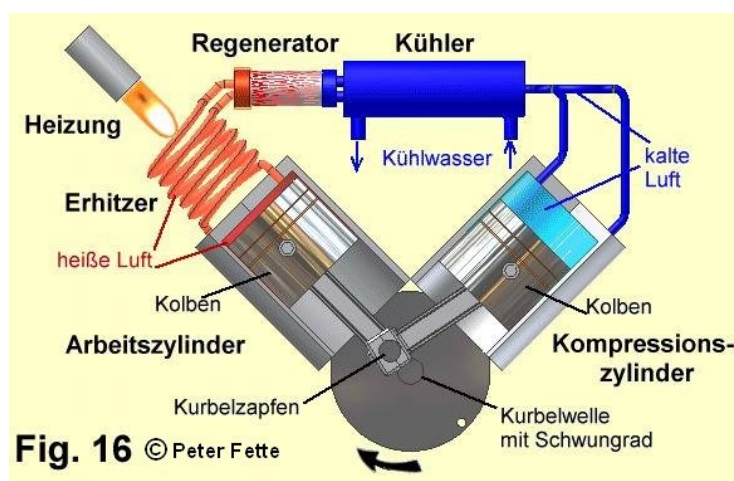


Abbildung 8 - Aufbau eines Stirlingmotors [24]

und Kompression des Arbeitsgases zyklisch linear bewegt. Die Linearbewegung wird über die Kurbelwelle in eine Drehbewegung umgewandelt. Genaue Funktionsweise und Ausführungsformen von Stirlingmotoren sind in entsprechender Fachliteratur ([23]) beschrieben. Die äußere Verbrennung ist der große Vorteil des Stirlingmotors, da so eine optimale Verbrennung realisiert werden kann und verschiedenste Brennstoffe möglich sind. Die komplexere und damit teurere Anfertigung und schlechtes Teillastverhalten verhinderten bisher eine industrielle Umsetzung abgesehen von Spezialanwendungen.

μ KWK-Anlagen können als eine solche Spezialanwendung bezeichnet werden, schließlich sind Stirlingmotoren nach Gasmotoren die am häufigsten verbauten Kraftmaschinen. Dabei werden Stirlingmotoren vor allem in μ KWK-Anlagen mit sehr geringen elektrischen Leistungen ($< 2\text{kW}$) eingesetzt (siehe Tabelle 1). Aufgrund des geringen Anteils an erzeugter elektrischer Energie im Vergleich zur erzeugten thermischen Energie werden μ KWK-Anlagen mit Stirlingmotor zusehends von solchen mit Gasmotoren abgelöst.

2.2.5. Hochtemperaturbrennstoffzelle

Brennstoffzellen ermöglichen eine direkte Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie ohne einen Umweg über thermische und mechanische Energie. Dies ermöglicht einen theoretisch sehr hohen Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Strom aus Brennstoffen. Eine spezielle Ausführung von Brennstoffzellen ist die Hochtemperaturbrennstoffzelle, die üblicherweise mit SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) abgekürzt und nun kurz beschrieben wird.

Der chemische Vorgang in einer Brennstoffzelle entspricht einer Umkehrung der Elektrolyse von Wasser zu Sauerstoff und Wasserstoff. Die Brennstoffzelle benötigt während des Betriebs an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff, wobei diese beiden Elektroden durch ein Elektrolyt getrennt sind. Der Elektrolyt ist in diesem Fall ein Feststoff, typischerweise kommt hier yttriumstabilisiertes Zirkoniumoxid (YSZ) zum Einsatz. Diese Trennschicht zwischen den Elektroden leitet Sauerstoffionen bei gleichzeitiger Verhinderung eines Flusses von Elektronen.

Die daher möglichen getrennten Teilreaktionen an Anode und Kathode (siehe Abbildung 9) erzeugen als Produkt Wasser an der Anode, wobei eine Spannungsdifferenz zwischen den Anschlüssen der beiden Elektroden entsteht. Die dabei theoretisch auftretende Nernst-Spannung bei Normalbedingungen beträgt 1,23V. Aufgrund des Feststoffelektrolytes ist eine Betriebstemperatur zwischen 800°C und 1000°C erforderlich, womit die mechanischen Anforderungen an

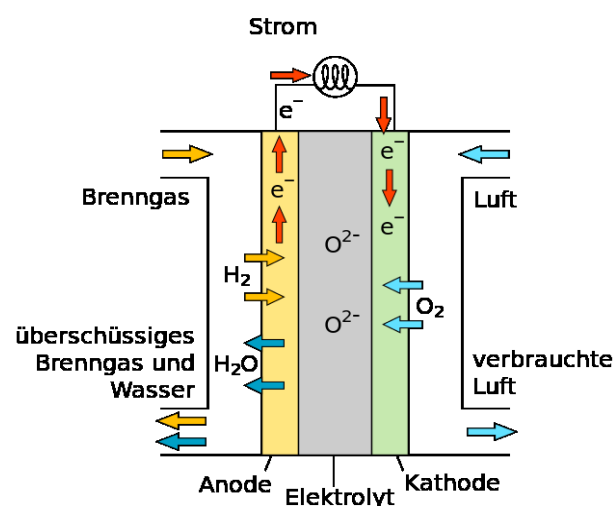


Abbildung 9 - Aufbau einer Brennstoffzelle [25]

die Zelle aufgrund der hohen Temperaturen stark steigen. Vorteile dieses Typs im Vergleich zu Niedrigtemperaturbrennstoffzellen mit flüssigem Elektrolyten sind der hohe Wirkungsgrad und die Möglichkeit des Einsatzes von Erdgas oder Methan als Brenngas. Die Reaktion an den Elektroden bleibt auch bei Einsatz eines anderen Brenngases unverändert, allerdings findet innerhalb der SOFC eine interne Reformierung statt. Der elektrische Wirkungsgrad von SOFCs liegt je nach Brennstoff zwischen 55% (Erdgas) und 65% (reiner Wasserstoff [26]).

Für μ KWK-Anwendungen sind SOFCs besonders interessant, da die entstehende Abwärme beim Betrieb zur Deckung des thermischen Bedarfs des zu versorgenden Objektes genutzt werden kann. Brennstoffzellen sind bereits in μ KWK-Anlagen im Einsatz ([22], Tabelle 1) und erreichen dabei (auf den Heizwert bezogene) Brennstoffausnutzungsgrade zwischen 85 und 105%. Durch die Technologie bedingt ist der Anteil der Primärenergie, der in Strom umgewandelt wird, deutlich höher als bei anderen Technologien ([22], Tabelle 1). Nachteile im Vergleich zu Gasmotoren sind der vergleichsweise lange Anfahr- und Abfahrvorgang und das sehr schlechte Teillastverhalten.

2.2.6. Zusammenfassung und Ausblick

In Tabelle 1 wird eine Auswahl der zurzeit am Markt verfügbaren μ KWK-Anlagen dargestellt. Bei der Auswahl der Anlagen liegt der Fokus auf dem deutschen Markt. Der Großteil wird mit konventionellen Verbrennungskraftmaschinen betrieben, die aufgrund der guten und günstigen Verfügbarkeit das Risiko von hohen Entwicklungskosten vor einer Markteinführung der μ KWK-Anlagen deutlich verringern. Diese Anlagen weisen in der Regel die Möglichkeit einer stromoptimierten Betriebsführung aus, wobei üblicherweise keine genauen Angaben zum Aufbau dieser Regelstrategien gemacht werden. Ebenso wird der Vorteil der guten Regelbarkeit von Erdgasmotoren bei den meisten dieser Anlagen genutzt und eine Regelbarkeit bis zu 20-50% der Nennlast gewährleistet. Die technologiebedingten Unterschiede werden auch bei Betrachtung des Verhältnisses von thermischer und elektrischer Nennleistung deutlich. Bei Stirlingmotoren ist die elektrische Leistung deutlich geringer, während bei Gasmotoren deutlich höhere relative Werte möglich sind und bei Brennstoffzellen die elektrische mitunter sogar die thermische Nennleistung übersteigt. Bei der durchgeführten Recherche kristallisierte sich folgender Trend heraus: Zu Beginn des vergangenen Jahrzehntes gab es einen regelrechten Boom und vor allem in Deutschland haben viele Unternehmen versucht μ KWK-Anlagen zu entwickeln. Einige dieser Unternehmen haben es - bedingt durch die Wirtschaftssituation oder technische Probleme - nicht geschafft einen langfristigen Erfolg zu erwirtschaften, weshalb gerade in den Jahren 2008-2012 eine auffallend hohe Anzahl dieser Unternehmen wieder vom Markt verschwunden sind.

Name	Technik	Brennstoff	P_{el}	\dot{Q}_{th}	η_{ges}	Regelung		Teillast	Quelle
			kW	kW	%	wg	so		
Kirsch micro	VKM	NG, LPG	4	12	95	Ja	Ja	3 Stufen	[27]
Wolf GTK-4	VKM	NG	4	12	100	Ja	Ja	3 Stufen	[8]
Buderus Loganova EN12	VKM (Otto)	NG	12	23,6	89,7	Ja	Ja	k. A.	[28]
KWE Smartblock 7,5	VKM (Otto)	NG, LPG	7,5	23	107,8	Ja	Ja	Stufenlos bis 50%	[29]
Clever Piko	VKM (Diesel)	Heizöl	2,2	6	91	k.A.	k.A.	k.A.	[30]
EAW K10S	VKM (Diesel)	Heizöl	10	19	87,2	Ja	Ja	Stufenlos bis 50%	[11]
EC Power XRGI 6	VKM	NG, LPG	6	13,5	93	Ja	Ja	Stufenlos bis 40%	[31]
Energie-werkstatt ASV 21/46	VKM	NG, LPG	21	46	105	k.A.	k.A.	Stufenlos bis 25%	[32]
Steinecke Elcon 8	VKM (Otto)	NG	8,4	23,3	103,9	k.A.	k.A.	k.A.	[33]
Vaillant Eco Power 1.0	VKM (Otto)	NG	1	2,5	92	Ja	Ja	k.A.	[9]
Senertec Dachs G5.5	VKM (Otto)	NG	5,5	14,8	99	Ja	k.A.	k.A.	[10]
Senertec Dachs Stirling	Stirling	NG, LPG	1	5,8	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	[34]
Whispergen	Stirling	NG	1	7,8	96	k.A.	k.A.	k.A.	[35]
Ökofen e0.6	Stirling	Holzpellets	0,6	9	102	Ja	k.A.	k.A.	[36]
EcoGen WGS 20.1	Stirling	NG	1	5	107,4	Ja	k.A.	k.A.	[37]
SpannerRe HKA 19	VKM	Hackschnitzel	19	45	k.A.	Ja	k.A.	k.A.	[14]
BlueGEN	SOFC	NG	1,5	0,61	85	k.A.	k.A.	k.A.	[38]
Galileo 1000N	SOFC	NG	1	1,8	95	Ja	k.A.	k.A.	[39]
Lion Powerblock	DM	NG, LPG	2	16	94	Ja	Ja	Stufenlos bis 20%	[40]

Tabelle 1- Auswahl von μ KWK-Anlagen am Markt

2.3. Stand der Technik bei der Dimensionierung und den Einsatzstrategien von μ KWK-Anlagen

In den letzten zehn Jahren wurden viele wissenschaftliche Arbeiten über Dimensionierung und Optimierung von μ KWK-Anlagen verfasst. Unter anderem in Deutschland wurde hier - mit Sicherheit auch aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen - ein verstärktes Interesse gezeigt. Dabei liegt der Fokus der meisten Arbeiten auf der Dimensionierung des gesamten μ KWK-Systems, inklusive eines Zusatzbrenners und thermischen Speichers.

2.3.1. Dimensionierungsvorschriften

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, hat im deutschsprachigen Raum der Verein Deutscher Ingenieure mit der Herausgabe der „VDI 4656 Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen“ [3] im Jahr 2013 eine grundlegende Hilfestellung zur Dimensionierung solcher Anlagen geliefert. In dieser Richtlinie wird mittels eines eigens angefertigten Berechnungsprogramms [41] ein μ KWK-System entsprechend den gestellten Anforderungen (Klima, Lastprofile) ausgelegt. Im Folgenden wird dieses Simulationsprogramm - stellvertretend für viele andere Arbeiten ([42], [43], [44], [45]) - kurz erläutert, da es das Potential besitzt im deutschsprachigen Raum zu einem hilfreichen Standardtool bei der Auslegung von μ KWK-Anlagen zu werden. Anschließend an eine kritische Betrachtung zur VDI 4656 werden einige ausgewählte wissenschaftliche Arbeiten zur Dimensionierung von μ KWK-Anlagen präsentiert, um verschiedene Ansätze aufzuzeigen.

2.3.1.1. VDI 4656

Das Simulationsprogramm der VDI 4656 ermöglicht den Vergleich zweier verschiedener Szenarien zur Versorgung eines Objektes. Simulationsgrundlage ist die Eingabe von „Objekt/Messdaten“, wobei folgende Parameter zur Beschreibung des zu versorgenden Objektes notwendig sind:

- Baujahr/Jahr der letzten Sanierung
- Standort
- Haustyp
- Anzahl der Bewohner
- Bauweise und Dämmung des Gebäudes
- Gesamtfläche

- Wohnfläche

Aus diesen Spezifikationen des Objektes werden die voraussichtlichen Jahresverbräuche berechnet. Durch die Angabe des Standortes generiert die Software ein Referenzlastprofil auf Basis der „VDI 4655 Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“ [1]. Diese Richtlinie stellt auf Basis von Messwerten verschiedener deutscher Ein- und Mehrfamilienhäuser Referenzlastprofile zu Verfügung, die für Einfamilienhäuser im 1-Minutentakt und für Mehrfamilienhäuser im 15-Minutentakt den Verbrauch von elektrischer Energie und thermischer Energie (getrennt in Heizwärme und Warmwasseraufbereitung) angeben. Dabei definiert diese Richtlinie 10 Typtage, die zwischen drei Jahreszeiten, zwei Tagtypen und zwei Bewölkungsgraden unterscheiden (siehe Tabelle 2). Der erste Buchstabe der Abkürzung gibt die Jahreszeit an, der zweite Buchstabe unterscheidet zwischen Werktag und Sonntag/Feiertag, während der dritte Buchstabe den Tag in heiter bzw. bewölkt einteilt.

Jahreszeit	Werktag W		Sonntag/Feiertag S	
	Heiter H	Bewölkt B	Heiter H	Bewölkt B
Übergang Ü	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer S	SWX		SSX	
Winter W	WWH	WWB	WSH	WSB

Tabelle 2- Übersicht über Typtage der VDI 4655 - vgl. [1]

Die Typtage werden nun je nach Standort - hierfür wird Deutschland in 15 Klimazonen eingeteilt - verschieden aneinandergereiht und ergeben damit ein Jahreslastprofil für den elektrischen und thermischen Bedarf des Objekts. Alternativ besteht die Möglichkeit am realen Objekt gemessene Lastprofile mit dieser Software einzusetzen, wodurch die Qualität der Dimensionierung steigt.

Die Anlage und das System, das berechnet bzw. dimensioniert werden soll, muss in einem weiteren Schritt spezifiziert werden, wobei zuerst die Hydraulik des Heizkreises festgelegt und anschließend μ KWK-Anlage und optionales Zusatzheizgerät spezifiziert werden. Es werden die grundlegenden Leistungsdaten der μ KWK-Anlage sowie An- und Abfahrverhalten festgelegt und ein thermischer Speicher dimensioniert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Einsatzstrategie auszuwählen, wobei zwischen wärmebedarfsgeführt und stromoptimiert unterschieden werden kann und die Speichertemperaturen angegeben werden können, die als Grenzwerte für Ein- bzw.- Ausschaltvorgang der Anlage gelten. Um

zwischen zwei Anlagenkonfigurationen oder -dimensionierungen vergleichen zu können, besteht die Möglichkeit ein zweites Szenario auf Basis desselben Objektes mit anderen Systemspezifikationen zu berechnen.

Als Ergebnis der Simulation liefert die Software unter anderem folgende Daten, die sowohl in ASCII, als auch in Excel-Format ausgegeben werden können:

- Anzahl an Betriebsstunden und Startvorgängen der jeweiligen Geräte
- Gesamtenergieerzeugung (elektrisch und thermisch) der jeweiligen Geräte während des Simulationszeitraumes (typischerweise 1 Jahr)
- Wirkungsgrad und verbrauchte Brennstoffmenge jedes Gerätes
- Einsatzhistogramm der Geräte
- Anteil an Eigennutzung des erzeugten Stromes

Kritische Betrachtung der Software:

Die Software ermöglicht eine einfache Berechnung von μ KWK-Systemen und stellt dafür benötigtes Datenmaterial zur Verfügung. Es werden zusätzlich zu den mit der Software mitgelieferten Daten nur wenige Informationen benötigt, um mehrere Szenarien zu vergleichen und darauf aufbauend eine Investitionsentscheidung zu treffen. Die Handhabung und Bedienung der Software ist einfach und die ausgegebenen Ergebnisse werden übersichtlich dargestellt. Das System ermöglicht allerdings keine Dimensionierung bzw. Optimierung von einzelnen Systemkomponenten, so ist es nicht möglich, ausgehend von einer μ KWK-Anlage und einem Objekt, die optimale thermische Speichergröße zu bestimmen. Ein weiterer Kritikpunkt ist die fehlende wirtschaftliche Betrachtungsdimension, da es nicht möglich ist, Strom- und Brennstoffpreise einzugeben und damit einen wirtschaftlichen Vergleich zwischen mehreren Szenarien zu erhalten. Die Software liefert allerdings die notwendigen Betriebsdaten der Anlage um darauf aufbauend eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchzuführen. Trotz einer mitgelieferten Beschreibung der Software stehen keine detaillierten Informationen über den Ablauf der Berechnungen zur Verfügung, weshalb der genaue Simulationsvorgang nicht analysiert werden kann. Aus meiner Sicht erfüllt das Programm die gestellte Anforderung ein Tool für Planer einer μ KWK-Anlage zu sein, für detaillierte energetische und wirtschaftliche Analysen sind die ausgegebenen Ergebnisse allerdings nicht ausreichend.

2.3.1.2. Wissenschaftliche Arbeiten zur Anlagendimensionierung und -optimierung

Barbieri und Spina haben in ihrer Arbeit [42] über die Machbarkeit von μ KWK-Anlagen für Einfamilienhäuser einerseits die ökologische Seite mittels Primärenergieeinsparung (PES) und andererseits die ökonomische Seite mit Berechnung des Kapitalwertes (NPV) betrachtet. Dabei wird der thermische Speicher in Abhängigkeit des Gesamtwärmebedarfs, des täglichen Lastganges und der Leistungsdaten (thermische und elektrische Spitzenleistung) der μ KWK-Anlage optimal ausgelegt. Ausgehend von dieser Optimierung wird festgestellt, dass abhängig von der gewählten μ KWK-Technologie eine Primärenergieeinsparung von 20-28% erzielt wird. Bei optimaler Auslegung des thermischen Energiespeichers, stromoptimierter Einsatzstrategie und dem gewählten elektrischen Tarifszenario (Italien, 2009) wurden als Grenzkosten für die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage ein Wert von etwa 3000€ pro kW installierter elektrischer Leistung - abhängig vom gewählten Szenario - berechnet. Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zeigten, dass die optimale Dimensionierung des thermischen Speichers einen eklatanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten μ KWK-Anlage hat.

In der Arbeit von Shaneb und Coates [43] wurde folgende Methode zur idealen Auslegung der μ KWK-Anlage verwendet:

Die benötigte Wärme- bzw. Stromleistung wurde nach den geforderten Betriebsstunden geordnet, woraus sich eine geordnete Jahresganglinie (vgl.: [7]) ergibt. Unter diese Kurve wird ein Rechteck so eingeschrieben, dass es die maximal mögliche Fläche hat (siehe Abbildung 10). Nun kann die optimale Nennleistung der μ KWK-Anlage auf der Ordinate abgelesen werden.

Diese Methode zur Auslegung einer μ KWK-Anlage ist üblich und wird in vielen Lehrbüchern beschrieben. Der Nachteil hierbei ist, dass eine optimale Auslegung nach Jahresganglinie von Wärme- und Strombedarf kaum möglich ist, da das

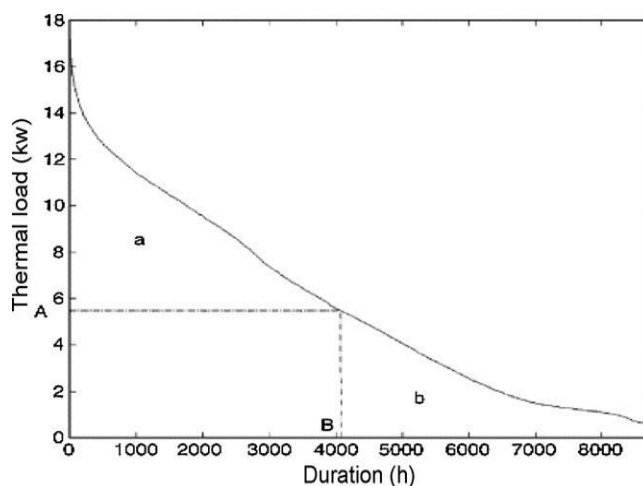


Abbildung 10 - „Maximum rectangle method“ zur optimalen Auslegung der μ KWK-Anlage [43]

Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leistung der μ KWK-Anlage im Allgemeinen nicht frei wählbar ist. Shaneb und Coates haben zuerst mittels Einschreibung des maximalen Rechtecks unter die Jahresganglinie des elektrischen Energieverbrauchs eine Auslegung von verschiedenen μ KWK-Anlagen (Verbrennungskraftmaschine, Stirlingmotor, Brennstoffzelle) vorgenommen. Anschließend wurde ein Algorithmus entwickelt um die μ KWK-Anlage so auszulegen, dass die jährlichen Kosten (inklusive Abschreibungskosten) minimiert werden. Aus den Ergebnissen dieser wirtschaftlichen Optimierung haben die Autoren folgende Schlüsse gezogen:

- Unterschiedliche μ KWK-Technologien führen zu unterschiedlichen Auslegungsgrößen der μ KWK-Anlage und des Zusatzheizgerätes.
- Die spezifischen Investitionskosten haben großen Einfluss auf die optimale Anlagengröße.
- Einführung eines Tarifmodells, das die Einspeisung von elektrischer Energie ins öffentliche Netz durch μ KWK-Anlagen höher vergütet, würde die Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen deutlich erhöhen.
- Je genauer die Daten der Lastprofile sind, desto besser können μ KWK-Anlagen dimensioniert werden.

Die optimale Auslegung von μ KWK-Anlage und thermischem Speicher sowie deren wirtschaftliche und technische Auswirkungen wurden in weiteren Arbeiten ([46], [47]) auf ähnliche Weise untersucht. Die Auswirkungen eines elektrischen Speichers auf Betriebsdaten und Wirtschaftlichkeit wurden bisher hingegen kaum betrachtet. Eine der wenigen Arbeiten zu diesem Thema von Bianchi und Pascale aus dem Jahr 2013 [45] analysiert die Auswirkungen der Implementierung von elektrischen Speichern verschiedener Größe auf die Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen. Hier wurden als elektrische Energiespeicher sogenannte ZEBRA-Batterien (Zero Emission Battery Research Activity) eingesetzt. Diese Natrium-Nickelchlorid Batterien bestehen aus einem festen Elektrolyten, weshalb sie auf relativ hohen Arbeitstemperaturen (ca. 300°C) gehalten werden müssen und daher im Standby-Modus Energie benötigen. Vorteile dieses Speichertypes sind hohe Effizienz und lange Lebensdauer (vgl.: [48]). Bianchi und Pascale simulierten eine μ KWK-Anlage inklusive thermischem und elektrischem Speicher sowie einem Zusatzheizgerät. Sie analysierten dabei die Auswirkung der Anzahl an elektrischen Speichereinheiten mit einer jeweiligen Speicherkapazität von 3,84 kWh auf den elektrischen Autarkiegrad sowie einige andere wirtschaftliche und technische Kennzahlen. Dabei stellten sie

fest, dass der Einbau von elektrischen Speichern die zugekaufte Strommenge bis auf 0 reduzieren kann (je nach Größe des elektrischen Speichers) und gleichzeitig auch die verkaufte Menge reduziert wird. Die ideale Speichergröße war dabei von der gewählten μ KWK-Anlage und dabei vor allem von der installierten Leistung der Anlage abhängig. Durch diese Maßnahme konnte im Modell der elektrische Autarkiegrad des Systems deutlich erhöht werden. Eine negative Auswirkung des installierten elektrischen Speichers war die Verringerung der möglichen Primärenergieeinsparung, die mit der notwendigen Standby-Energie der Speichereinheiten zu erklären ist. Ihre Schlussfolgerung lässt (bei einem elektrischen Tarifsysteem, wie es in Italien 2013 gegeben war) eine wirtschaftliche Implementierung von elektrischen Speichern ab Investitionskosten von weniger als einigen 100€/kWh installiertem Speicher zu.

2.3.2. Regelungsstrategien von bereits eingesetzten Anlagen

Bei den Regelungsstrategien von μ KWK-Anlagen wird vorrangig zwischen einer rein wärmegeführten und einer stromoptimierten Strategie unterschieden. Dabei ist als typisches μ KWK-System eine Kombination aus μ KWK-Anlage, thermischem Speicher und Zusatzheizgerät vorgesehen.

Bei der rein wärmegeführten Anlage wird die Anlage eingeschaltet, sobald die Temperatur im Speicher unter einen bestimmten Wert fällt und Wärmebedarf vorhanden ist. Die Anlage wird wieder ausgeschaltet, sobald die Temperatur im Speicher über einen bestimmten Wert steigt und keine Wärmeenergie bezogen wird. Hierbei ist erzeugter elektrischer Strom ein reines Nebenprodukt und wird im Falle eines gerade angeschlossenen Verbrauchers innerhalb des Objektes genutzt und ansonsten in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Diese Einsatzstrategie erfordert den geringsten Regelaufwand, erzielt allerdings bei den zurzeit herrschenden Strommarktbedingungen den geringsten ökonomischen Erfolg.

Die zweite im Einsatz befindliche (vgl.: [40]) Einsatzstrategie ist der sogenannte stromoptimierte Betrieb. Dazu wird vorgegeben zu welchen Zeiten mit erhöhtem Stromverbrauch zu rechnen ist und versucht über den thermischen Pufferspeicher die Betriebsstunden der μ KWK-Anlage in diese Zeiten zu verlagern, um eine Erhöhung des Autarkiegrades zu erzielen. Die dafür nötige zeitliche Flexibilität in der Erzeugung der thermischen Energie ist durch die Größe des thermischen Speichers begrenzt.

2.4. Technologien zur Speicherung elektrischer Energie

Zur Analyse der technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen von elektrischen Energiespeichern wurde eine diesbezügliche Literaturstudie durchgeführt. Im folgenden Kapitel ist ein kleiner Auszug an geeigneten und bereits am Markt erhältlichen Technologien dargestellt.

2.4.1. Überblick über Technologien zur elektrischen Energiespeicherung

Die Speicherung von elektrischer Energie spielt in den verschiedensten Teilbereichen der Energietechnik eine immer bedeutendere Rolle. Dazu gehören unter anderem die Speicherung von großen Mengen elektrischer Energie zum Ausgleich von Verbrauchs- und Erzeugungsschwankungen im öffentlichen Netz, Notstromversorgung wichtiger Anlagen im Falle eines Netzausfalles, (kurzfristige) Energiespeicherung für den Antrieb von Kraftfahrzeugen und auch die Speicherung elektrischer Energie bei der dezentralen Versorgung eines Hauses. Diese Liste könnte nahezu beliebig erweitert werden, jedoch macht schon dieser Ausschnitt aus möglichen Anwendungen elektrischer Speicher sehr gut die Verschiedenartigkeit dieser Anwendungsbereiche deutlich. Aufgrund der damit einhergehenden, sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Speicher existieren verschiedenste Speichertechnologien. Dabei reicht die Bandbreite von Kondensatoren für Kurzzeitspeicherung von kleinen Energiemengen bis zu Pumpwasserkraftwerken zur Langzeitspeicherung von riesigen Energiemengen. Abbildung 11 macht deutlich, dass Leistung, Speichermenge und typische Speicherdauer zwischen den einzelnen Technologien um mehrere Größenordnungen variieren. Durch Einordnung der Anforderungen an einen elektrischen Speicher in Abbildung 11 kann eine erste Auswahl der Speichertechnologien getroffen werden. Aufgrund der eingespeicherten Energiemengen und der dabei geforderten Lade- und Entladeleistungen bleibt diese Literaturstudie auf elektrochemische Speicher, Schwungräder und Kondensatoren (Supercaps) beschränkt. Die übrigen Technologien erfüllen die Anforderungen an einen Speicher für μ KWK-Anlagen nicht und werden daher nicht weiter behandelt.

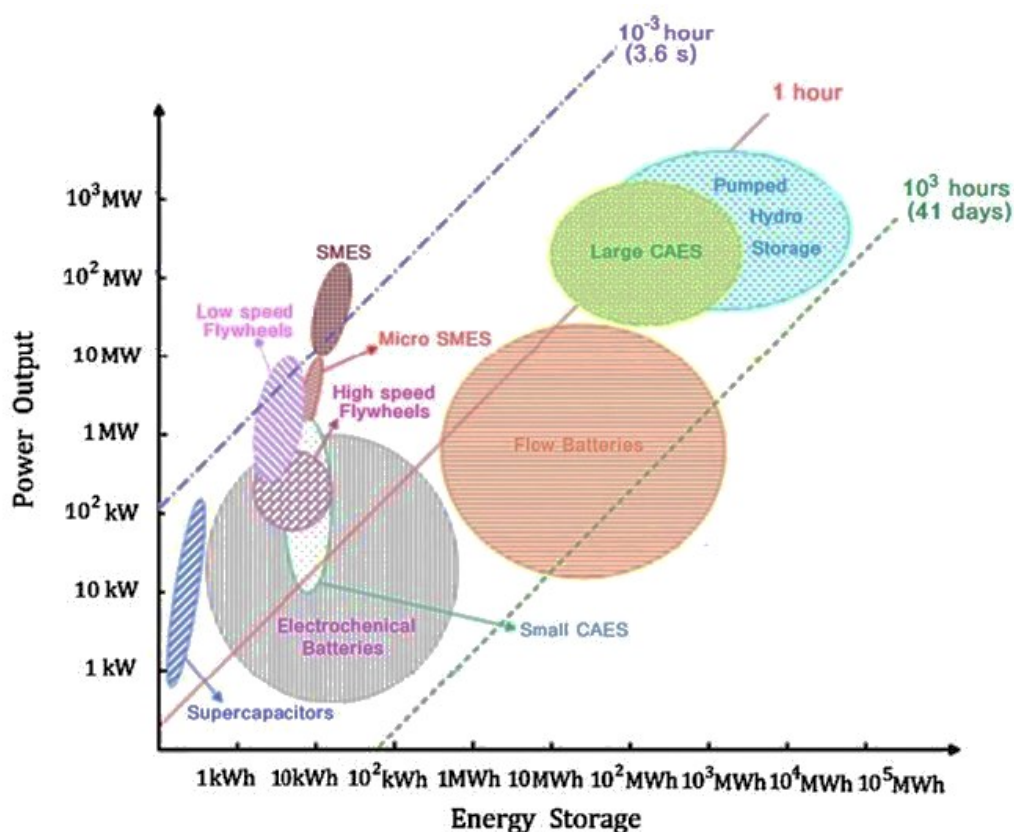


Abbildung 11 - Überblick über Technologien zur elektrischen Energiespeicherung [49]

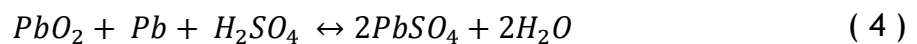
2.4.2. Entwicklungsstand ausgewählter Technologien

Wie einleitend erwähnt sind die Beweggründe zur Forschung und Entwicklung von elektrischen Energiespeichern und damit auch die erreichten Entwicklungsstadien stark verschieden. Während manche Speichertechnologien schon seit Jahrzehnten in einem Massenmarkt bestehen (Bleiakkumulatoren) und daher nur noch kleine Änderungen und Verbesserungen erzielt werden, sind andere Speichertechnologien mitten in einer rasanten Weiterentwicklung (Li-Ionen-Akkumulatoren) und wiederum andere erst in einem Versuchs- und Forschungsstadium (Zink-Luft-Batterien). Die folgende Betrachtung der jeweiligen Technologie ist knapp gehalten und auf die wesentlichen Eigenschaften hinsichtlich einer Anwendung im System mit einer μ KWK-Anlage beschränkt.

2.4.2.1. Bleiakkumulator

Der Bleiakkumulator wurde als einer der ersten Akkumulatoren in der Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt und weist den klassischen Aufbau einer galvanischen Zelle auf - zwei Elektroden, die durch einen Elektrolyten getrennt sind. Die negative

Elektrode (Anode) besteht im geladenen Zustand aus Bleischwamm (poröses Blei), die positive (Kathode) aus Bleioxid (PbO_2). Diese beiden Elektroden werden durch 20-40% verdünnte Schwefelsäure als Elektrolyt getrennt. Bei Entladung reagiert Blei an der Anode mit negativen HSO_4 -Ionen und bildet dabei Blei(II)sulfat ($PbSO_4$). Gleichzeitig reagiert Bleioxid an der Kathode ebenfalls mit negativen HSO_4 -Ionen und nimmt dabei, bei der Anodenreaktion entstandene und durch den Elektrolyten transportierte, positiv geladene Wasserstoffionen sowie negativ geladene Elektronen auf. Als Produkt dieser Reaktion entsteht ebenso Blei(II)sulfat und Wasser. Diese beiden Teilreaktionen in Kombination ergeben die in unten stehender Formel dargestellte Gesamtreaktion, die durch Anlegen von elektrischer Spannung umkehrbar ist, wodurch eine Wiederaufladung ermöglicht wird.



Bedingt durch die lange Geschichte und die weit verbreitete Anwendung als „Starterbatterie“ in Kraftfahrzeugen wurde intensiv an Bleiakkumulatoren geforscht und diese weiterentwickelt. So sind moderne Bleiakkumulatoren nahezu wartungsfrei und (in den aufgrund der Technologie bedingten Grenzen) sehr zuverlässig. Desweiteren existiert ein geschlossener Recycling-Kreislauf für Bleiakkumulatoren.

Die wichtigsten Kenndaten von Bleiakkumulatoren sind im Vergleich mit den übrigen Speichertechnologien in Tabelle 3 aufgelistet.

2.4.2.2. Li-Ionen-Akkumulator

Der grundlegende Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist in Abbildung 12 dargestellt und beruht auf dem Prinzip der Interkalation. Interkalation meint das Einbetten von Gastteilchen (hier Li^+ -Ionen) in ein Wirtsgitter (hier Graphit beziehungsweise Kobalt) zwischen den Gitterteilchen des Wirtes, ohne die Struktur zu zerstören. Bei einem Lithium-Ionen-Akkumulator wird dieser Effekt ausgenutzt, indem kleine Li^+ -Ionen zwischen die Gitterteilchen der beiden Elektroden wandern und dabei entweder eine Oxidation oder eine Reduktion zur Folge haben. Die hohe Beweglichkeit der Li^+ -Ionen innerhalb der Gitterstruktur ermöglicht einen Ladungstransport zwischen den Elektroden. In der Gruppe der Li-Ionen-Akkumulatoren existieren sehr viele verschiedene Typen, wie zum Beispiel Lithium-Polymer-Akkumulator oder Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator, die verschiedenste

Materialien und Strukturen der beiden Elektroden kombinieren und damit unterschiedliche Betriebseigenschaften generieren.

Durch den Verzicht auf metallisches Lithium wird wesentlich Gewicht reduziert, wodurch alle Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Vergleich zu anderen Technologien sehr hohe spezifische Energien aufweisen. Aufgrund von speziellen Materialkombinationen der Elektroden und des Elektrolyts erreichen moderne Lithium-Ionen-Akkumulatoren eine sehr hohe Zyklenzahl bei hohen Entladetiefen. Typische Kenndaten von Li-Ionen-Akkumulatoren sind in Tabelle 3 angeführt.

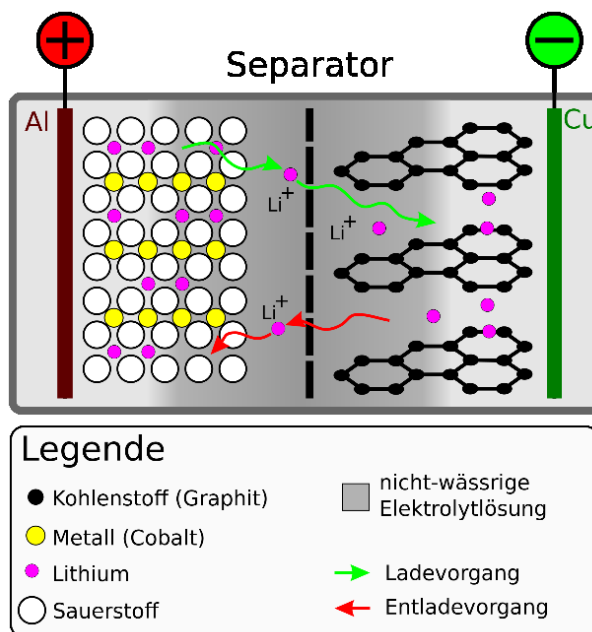


Abbildung 12 - Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie [50]

2.4.2.3. Schwungradspeicher

Das Prinzip einer Schwungradspeicherung ist simpel und beruht auf dem Prinzip der Massenträgheit. Dabei wird eine schwere Scheibe, die möglichst reibungsfrei gelagert ist, mittels Elektromotor in Drehung versetzt und damit elektrische Energie in Rotationsenergie umgewandelt. Dies entspricht einer Einspeicherung von Energie, da die Scheibe in Bewegung bleibt und nur durch (möglichst geringe) Reibungsverluste abgebremst wird. Um die Energie dem Speicher zu entnehmen wird die rotierende Scheibe mittels induktiver Bremsung durch den Generator verzögert und dabei elektrische Energie generiert.

Dieses sehr einfache Prinzip ermöglicht eine hohe Lebensdauer des Speichers (siehe Tabelle 3 und [51]), allerdings sind die Speicherzeiten sehr kurz und damit mögliche Anwendungsgebiete eingeschränkt.

2.4.2.4. Supercaps

„Supercaps“ oder „Superkondensatoren“ sind eine Weiterentwicklung von herkömmlichen Kondensatoren. Während herkömmliche Kondensatoren zwei durch ein Dielektrium getrennte Elektroden besitzen und damit Energie durch

Ladungstrennung (sehr kurzfristig) speichern, ist dieser Speicher eine Kombination aus einer herkömmlichen Kapazität und einer elektrochemischen Pseudokapazität. Diese Pseudokapazität speichert Energie durch reversible Redoxreaktionen, wobei Ionen im Elektrolyten einzelne Elektronen an die leitenden Ionen der Elektrode abgeben beziehungsweise aufnehmen. Der Vorteil dieses Einelektronentransfers ist die vollständige Reversibilität, da keine chemischen Bindungen eingegangen oder aufgebrochen werden, womit die sehr hohen Zyklenlebensdauern im Vergleich zu Akkumulatoren begründet sind. Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist einerseits die erreichbare spezifische Energie (siehe Tabelle 3) deutlich geringer und andererseits die Selbstentladungsrate bedeutend höher. Demgegenüber stehen sehr hohe Maximalleistungen, weshalb andere Anwendungsgebiete von dieser Technologie vorrangig bedient werden, so zum Beispiel Notstromversorgung bei Windkraftwerken [52], Start-Stopp-Systeme in Kraftfahrzeugen oder elektronische Geräte mit hohen kurzfristigen Leistungsspitzen, die von Akkumulatoren nicht gedeckt werden können.

2.4.3. Anforderungen an eine Speichertechnologie

Die Anwendung eines elektrischen Speichers als Pufferspeicher in einem System zur Energieversorgung eines Mehrparteienhauses stellt spezifische Anforderungen an die Eigenschaften des elektrischen Speichers. Im Folgenden werden die wesentlichsten Anforderungen beschrieben:

- **Sicherheit und Wartung:**
Da μ KWK-Anlagen in gewöhnlichen Mehrparteienhäusern üblicherweise über kein Wartungspersonal verfügen, sollen auch die integrierten elektrischen Speicher möglichst wartungsarm über lange Zeiträume funktionieren. Ein elektrischer Speicher darf kein zusätzliches Sicherheitsrisiko darstellen, weshalb ein unzureichend hohes Sicherheitsniveau der Technologie als Ausschlusskriterium zu sehen ist.
- **Energieinhalt:**
Je nach Verbrauchsprofil des zu versorgenden Objektes ist eine andere elektrische Speicherkapazität nötig, um den Autarkiegrad entsprechend erhöhen zu können. Dabei ist wesentlich zwischen der theoretischen Gesamtkapazität (Bruttokapazität) und einer sinnvoll nutzbaren Nettokapazität zu unterscheiden. Mit dieser Nettokapazität wird der Anteil der Gesamtkapazität bezeichnet, der genutzt werden kann ohne eine Lebensdauerverkürzung zu verursachen. Bei elektrochemischen Speichern

wird die Entladetiefe DoD (Depth of Discharge) angegeben. Die Entladetiefe gibt an, welcher Anteil der Bruttokapazität genutzt werden darf um die angegebene maximale Zyklenzahl zu erreichen. Je nach Akkutyp liegt diese Kennzahl zwischen 40% und 100%.

- Leistung:

Unter der Leistung eines elektrischen Speichers versteht man die maximal mögliche Lade- und Entladeleistung. Es hat sich gezeigt, dass für die Anwendung bei μ KWK-Anlagen die allermeisten Speichertechnologien ausreichende Entladeleistungen liefern. So zeigen die durchgeführten Simulationen (siehe Kapitel 4) zum Beispiel für ein Mehrparteienhaus mit 4 Parteien, dass Akkumulatoren mit einer Lade- und Entladeleistung von 4kW ausreichend sind.

- Effektivität:

Die Einspeicherung elektrischer Energie in einen Speicher hat unabhängig der gewählten Technologie immer Verluste an elektrischer Energie zur Folge. Der Wirkungsgrad eines elektrischen Speichers ist definiert als ausgespeicherte Energie dividiert durch die am Beginn des Ladevorganges zur Verfügung stehende Energie. Bei unterschiedlichen Speichertechnologien variieren die entsprechenden Wirkungsgrade mitunter sehr stark (zwischen 30% und 95%). Diese Kennzahl ist wesentlich für eine energetisch und wirtschaftlich sinnvolle Auswahl eines Speichers.

- Selbstentladung:

Die Selbstentladung eines Speichers bedeutet Verluste bei Nichtnutzung der Anlage rein aufgrund der verstrichenen Zeit. Bei Auswahl der Speichertechnologie muss diese Kennzahl beachtet werden um keine zusätzlichen Verluste zu erzeugen.

- Preis:

Um eine Installation eines elektrischen Speichers zu einer besseren Objektversorgung wirtschaftlich rechtfertigen zu können sind vor allem die Investitionskosten von wesentlicher Bedeutung. Die Preise für Akkumulatoren sind in den letzten Jahren deutlich gesunken (siehe Kapitel 2.4.4).

- Lebensdauer:

Ebenso wie die Investitionskosten ist das Abnutzungsverhalten und die damit verbundene Lebensdauer eines elektrischen Speichers ein wesentliches Auswahlkriterium. Dabei wird zwischen Zyklenlebensdauer und

kalendarischer Lebensdauer unterschieden. Während die Zyklenlebensdauer die mögliche Anzahl an Ladungs- und Entladungsvorgängen angibt, berücksichtigt die kalendarische Lebensdauer den reinen Alterungsprozess des Speichers. Die einzelnen Technologien weisen stark verschiedene Lebensdauern auf, siehe hierzu das folgende Kapitel.

2.4.4. Marktstudie

Wie bereits einleitend erläutert ist es Zweck dieser Literaturstudie eine Wissensgrundlage zu schaffen, auf der eine energetisch und wirtschaftlich sinnvolle Wahl der elektrischen Speichertechnologie möglich ist. Die oben beschriebenen Speicherformen sind alle bereits technisch ausreichend entwickelt und erhältlich. Die verschiedenen Kenndaten der einzelnen Technologien lassen der Auswahl der idealen Speichertechnologie für eine μ KWK-Anlage eine große Bedeutung zukommen.

Die Parameter in Tabelle 3 zeigen einen Querschnitt von durchgeführten Studien [53 bis 59] und anderen Veröffentlichungen [60] zum Thema elektrische Energiespeicher der letzten Jahre. Die Schwankungsbreite der angegebenen Parameter ist aufgrund der verschiedensten Studien und getätigten Weiterentwicklungen innerhalb der Technologien sehr hoch. Die zu hohe Selbstentladungsrate von Schwungrädern, die nur eine sehr kurzfristige Speicherung erlauben, und die zu geringen (wirtschaftlich sinnvoll) erwerbbaaren Speichergrößen von Supercaps zeigen Bleiakkumulatoren und Lithium-Ionen-Akkumulatoren als geeignetste Technologien.

Parameter	Einheit	Bleiakku	Li-Ionen	Schwungrad	Supercap
Spez. Energie	Wh/kg	25-50	75-200	5-100	0,05-15
Wirkungsgrad	%	70-95	85-100	90-95	85-98
Selbstentladung	%/Tag	0,1-0,3	0,1-0,3	100	20-40
Investitionskosten	€ _{Brutto} /kWh	50-400	350-2000	400-5000	300-2000
Kosten pro eingespeicherter Energie	ct/kWh	20-100	15-90	3-25	2-20
Zyklenlebensdauer	-	500-3500	1000-30000	20000	50000

Tabelle 3 - Überblick über wichtige Kenndaten elektrischer Speicher

Aufbauend auf dieser Entscheidung erfolgt zur Erfassung aktueller technischer und wirtschaftlicher Daten eine spezifische Marktstudie für diese beiden Typen im deutschsprachigen Raum. Ähnliche Anforderungen an elektrische Speicher, wie sie hier gestellt werden, werden auch bei einer Verwendung als Pufferspeicher für private Photovoltaikanlagen gestellt. Da dieser Markt (vor allem in Deutschland) deutlich größer ist als der Markt für μ KWK-Anlagen, gibt es auch bezüglich elektrischer Speicher bedeutend mehr Angebot. Daher wird dieser Markt für die Recherche genutzt. Zur Wirtschaftlichkeitsberechnung (siehe Kapitel 5) werden mehr als 25 Modelle mit aktuellen Marktpreisen herangezogen, ein kleiner Auszug aus diesen wird nun dargestellt:

- Modell 1: Senec Home G2 Plus [61, 62]
- Modell 2: IBC Solstore 16,2 Pb [61, 63]
- Modell 3: BMZ ESS 3.0 [61, 64]
- Modell 4: Solax Hybrid 7,2 [61, 65]
- Modell 5: Sonnenbatterie Eco 13,5 [61]
- Modell 6: Fenecon PRO Compact [61, 66]

Modell	1	2	3	4	5	6
Technologie	Blei	Blei	Li-Ionen	Blei	Li-Ionen	Li-Ionen
Kosten _{Brutto} [€]	8412	9971	5990	8402	16541	14958
Bruttokap. [kWh]	16	16,2	6,25	7,2	13,5	10
DoD [%]	50	50	80	80	80	85
Zyklenzahl [-]	3200	2700	5000	4000	5000	6000
Wirkungsgrad [%]	86	80,75	92	-	94,1	-
Ladeleistung [kW]	2,5	6	6	5	3,5	4

Tabelle 4 - Überblick über verfügbare Speicher

Die angegebenen Kosten sind Systeminvestitionskosten und beinhalten Akkumulator und Wechselrichter inklusive der notwendigen Regelungstechnik. Wie bereits die Literaturstudie zu Beginn gezeigt hat, sind die Investitionskosten pro Speicherkapazität bei Bleiakkumulatoren deutlich geringer. Ein weiterer Unterschied ist in den typisch erlaubten Entladetiefen (Depth of Discharge - DoD) zu sehen. Während diese bei Bleiakkumulatoren fast ausnahmslos bei 50% liegen, variieren sie bei Li-Ionen-Akkumulatoren zwischen 60% und 100%. Desweiteren erlauben Li-Ionen-Akkumulatoren eine deutlich höhere Nutzungsdauer, da sie die 2 bis 3-fache Zyklenzahl überleben. Die Wirkungsgrade (hier sind

Systemwirkungsgrade - inklusive Wechselrichter - angegeben) von modernen Bleiakkumulatoren sind nur unwesentlich schlechter als bei Li-Ionen-Akkumulatoren. Die Unterschiede in den möglichen Maximalleistungen sind gering und in vielen Fällen nicht durch den Akkumulator, sondern durch den eingebauten Wechselrichter begrenzt.

Die verschiedenen Speichergrößen und -eigenschaften haben zur Folge, dass je nach Objekt ein anderer Speicher die wirtschaftlich sinnvollste Wahl ist. Die Berechnungen zeigen, passend zum gleichmäßig aufgeteilten Markt, keine der beiden Technologien a-priori im Vorteil. Die Stromwirtschaft ist aktuell in einem Wandel, wodurch einige Branchen, die direkt oder indirekt mit der Erzeugung, der Verteilung oder der Speicherung von elektrischer Energie in Verbindung stehen, einen Aufschwung erleben. Der Markt für elektrische Energiespeicher ist bereits seit einigen Jahren in einem stetigen Aufschwung. In den letzten Jahren sind einerseits neue kleine Unternehmen entstanden und andererseits drängen große Unternehmen, die bisher ausschließlich in anderen Branchen tätig waren, in diesen Markt. Prognosen ([67], [68]) sagen für die kommenden Jahre ein weiteres Wachstum des Marktes und gleichzeitig eine Senkung der Investitionskosten für Akkumulatoren voraus.

3. Versuchsaufbau und Modellbeschreibung

Im folgenden Kapitel werden das zu simulierende System mit den einzelnen Komponenten und grundlegenden Zusammenhängen und das daraus abgeleitete Modell zur Simulation beschrieben. Im Anschluss daran sind die simulierten Regelungsstrategien und die Art und Weise der Ergebnisausgabe der Simulation dargestellt.

3.1. Grundlegende Systemgestaltung und Datenherkunft

Das zu simulierende System (siehe auch Abbildung 1) für die Versorgung eines Mehrparteienhauses mit thermischer- und elektrischer Energie besteht aus folgenden Komponenten:

- μ KWK-Anlage
- Spitzenlastbrenner
- Thermischer Speicher
- Elektrischer Speicher (optional)
- Regelung

Zur Simulation des Systems bei der Deckung von thermischem und elektrischem Bedarf eines Objektes wird ein eigens entworfener Matlab-Code verwendet. Die grundlegende Forderung an das System, eine lückenlose Deckung des gesamten thermischen Objektbedarfs (Heizenergie und thermische Energie zur Warmwassererzeugung), muss dabei stets erfüllt werden.

Grundlage der Berechnungen sind elektrische und thermische Verbrauchsdaten aufbauend auf Referenzlastprofilen der VDI-Richtlinie 4655 [1], die für Mehrparteienhäuser in Form von 15-Minuten Daten vorliegen. Der grundlegende Aufbau dieser Richtlinie ist in Abschnitt 2.3.1.1 erläutert. In VDI-Richtlinie 4655 sind 15 Klimazonen innerhalb Deutschlands definiert, weshalb der gewählte Standort Graz in die passende Klimazone eingeordnet werden muss. Zu diesem Zweck wurden die täglichen Temperatur- und Bewölkungswerte von Graz aus den Jahren 2006-2013 auf Basis von Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik [69] ausgewertet. Die daraus folgende Häufigkeitsverteilung der definierten Typtage lt. VDI-Richtlinie wurde mit den Häufigkeitsverteilungen aller 15 Klimazonen verglichen und der Standort Graz aufgrund bester Übereinstimmung in Klimazone 12 eingestuft. Um eine realistische Abfolge der Typtage für die

Simulation zu ermöglichen, wurde das Jahr 2012 als Referenz gewählt, da die Häufigkeitsverteilung der Typtage in diesem Jahr die geringste Abweichung von einem „Standardjahr“ der Klimazone 12 zeigt. Die im Jahr 2012 aufgetretene Aneinanderreihung von Typtagen am Standort Graz stellt daher die Basis der Lastprofile für alle Simulationen dieser Arbeit dar. Die Abfolge der Typtage ist eine wesentliche Einflussgröße für die Berechnung, eine alleinige Simulation der 10 Typtage und anschließende Aufsummierung der errechneten Daten (Autarkiegrad, verbrauchte Brennstoffenergie, gekaufte bzw. bezogene elektrische Energie,...) für den jeweiligen Typtag führt zu einem relevanten Fehler. Bei reiner Aufsummierung von Einzeltagen bleiben die Füllstände von elektrischem und thermischem Speicher am Anfang bzw. Ende jeden Tages unberücksichtigt, wodurch die Ergebnisse verfälscht werden.

3.2. Grundlegender Aufbau der Simulationen

Bevor das Verhalten der Anlagen simuliert werden kann ist die Eingabe folgender Kenngrößen von Anlagen und Objekt nötig:

- Anzahl der Parteien des Wohnhauses
- Beheizte Fläche und spezifischer Heizbedarf
- Standort des Objektes
- Thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage
- Elektrische Nennleistung der μ KWK-Anlage
- Thermische Nennleistung des Zusatzbrenners
- Wirkungsgrade der beiden Anlagen
- Dauer, Abgabeleistung und Verbrauch bei An- und Abfahrvorgang der Anlagen
- Teillastverhalten und Regelbarkeit der Anlagen
- Volumen des thermischen Speichers
- Maximal und minimal erlaubte Temperatur des thermischen Speichers
- Speicherverluste des thermischen Speichers
- Nettokapazität des elektrischen Speichers
- Maximale Lade- und Entladeleistung des elektrischen Speichers
- Effizienz des elektrischen Speichers und Selbstentladerate

In einem ersten Schritt werden aus den Objektdaten mit Hilfe der VDI-Richtlinie 4655 die zeitlich aufgeschlüsselten Lastprofile generiert. Die Lastprofile und die oben aufgezählten Anlageparameter liefern die Grundlage für die folgende Simulation. In Abbildung 13 ist der Ablauf der Simulation dargestellt, wobei die rot

geschriebenen Größen Eingabeparameter und die blau geschriebenen Größen Ergebnisse sind.

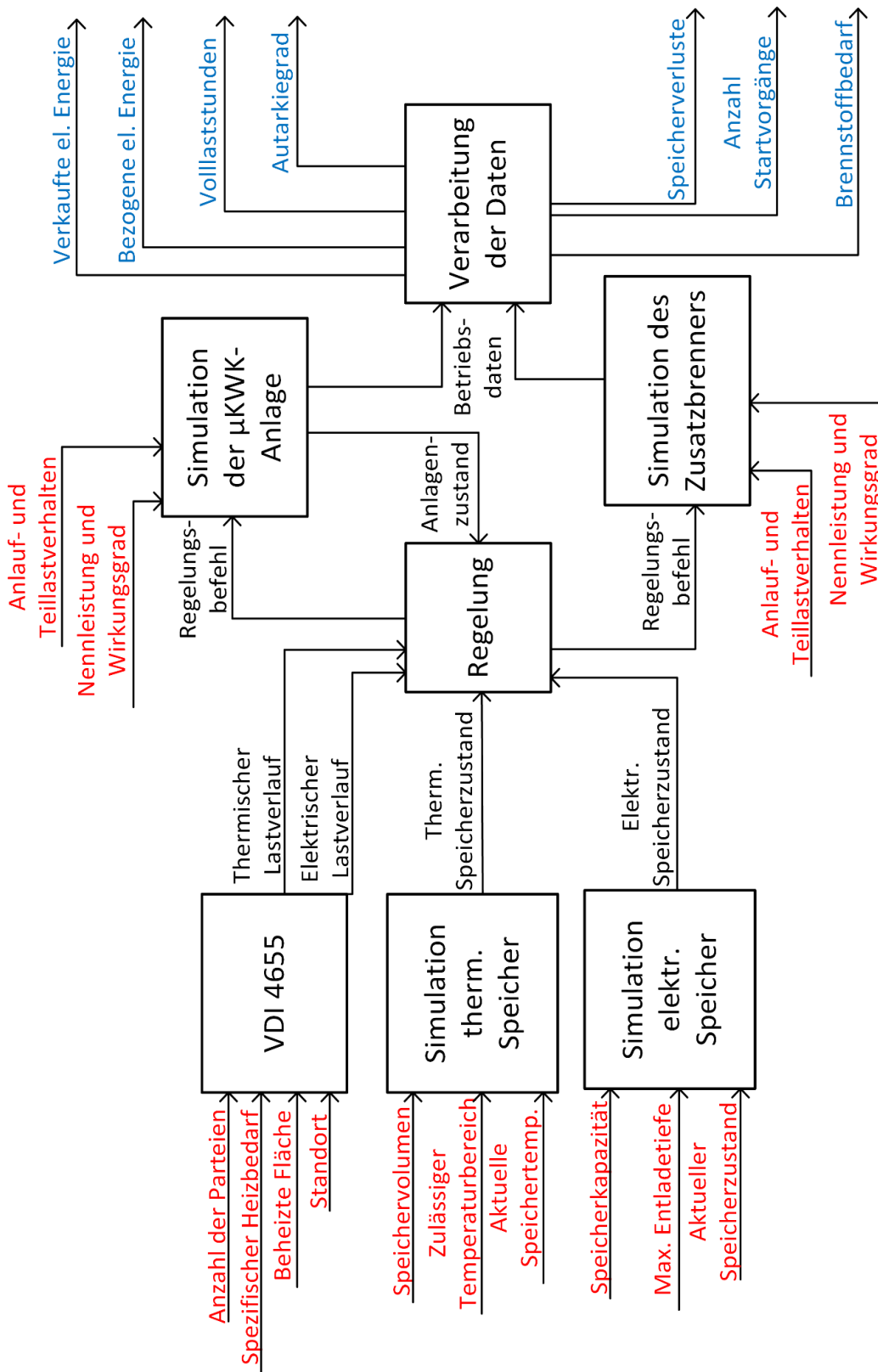


Abbildung 13 - Simulationsablauf

Die Simulation wird durch einen selbst programmierten Matlab-Code durchgeführt, wobei zwischen verschiedenen Betriebsstrategien und Anlagenkonfigurationen unterschieden wird (siehe Kapitel 3.3). Unabhängig der gewählten Objekt- und Anlagenkonfiguration wird die Berechnung der Betriebskennzahlen in Intervallen von einer Minute Länge durchgeführt. Die notwendigen aktuellen Betriebsdaten werden dabei durch die Berechnungen des vorangegangenen Intervalls bestimmt und je nach Regelungsstrategie (wärmegeführt oder stromoptimiert) und Anlagenkonfiguration (mit oder ohne elektrischen Speicher) zu einem Regelbefehl für die μ KWK-Anlage und den Zusatzbrenner verarbeitet (siehe Abbildung 13). Auf die verschiedenen Regelstrategien wird in Kapitel 3.3 eingegangen. Die Einflussparameter zur Entscheidung über den Regelungsbefehl werden einerseits durch die aktuellen Verbrauchsdaten vorgegeben und andererseits innerhalb der Simulation selbst generiert (Anlagenzustand der μ KWK-Anlage, Ladezustand des elektrischen Speichers und Ladezustand des thermischen Speichers).

Bei der Bewertung des Anlagenzustandes der μ KWK-Anlage werden 7 Betriebsfälle unterschieden:

Betriebszustand 1: Die Anlage ist ausgeschaltet und darf eingeschaltet werden.

Betriebszustand 2: Die Anlage ist eingeschaltet und darf ausgeschaltet werden.

Betriebszustand 3: Die Anlage ist ausgeschaltet und darf nicht eingeschaltet werden, wobei die minimale Ausschaltdauer angegeben werden muss und stark von der gewählten Technologie der μ KWK-Anlage abhängt.

Betriebszustand 4: Die Anlage ist eingeschaltet, darf nicht ausgeschaltet aber geregelt werden, wobei die minimale Einschaltdauer angegeben werden muss.

Betriebszustand 5: Die Anlage befindet sich im Ausschaltvorgang, weshalb der Anlagenzustand nicht verändert werden darf.

Betriebszustand 6: Die Anlage befindet sich im warmen Einschaltvorgang, weshalb der Anlagenzustand nicht verändert werden darf.

Betriebszustand 7: Die Anlage befindet sich im kalten Einschaltvorgang, weshalb der Anlagenzustand nicht verändert werden darf.

Die Betriebszustände 3 und 4 berücksichtigen eine minimale Ein- und Ausschaltdauer der Anlage, bevor der entsprechende Anlagenzustand verändert werden darf. Dies verhindert eine zu rasche Folge von Ein- und Ausschaltvorgängen und daraus folgende negative Auswirkungen auf Lebensdauer der Anlage und

erzielbaren Gesamtwirkungsgrad. Die Betriebszustände 6 und 7 unterscheiden zwei Einschaltvorgänge aufgrund der vorangegangenen Ausschaltdauer der Anlage und der damit verbundenen Temperatur der μ KWK-Anlage.

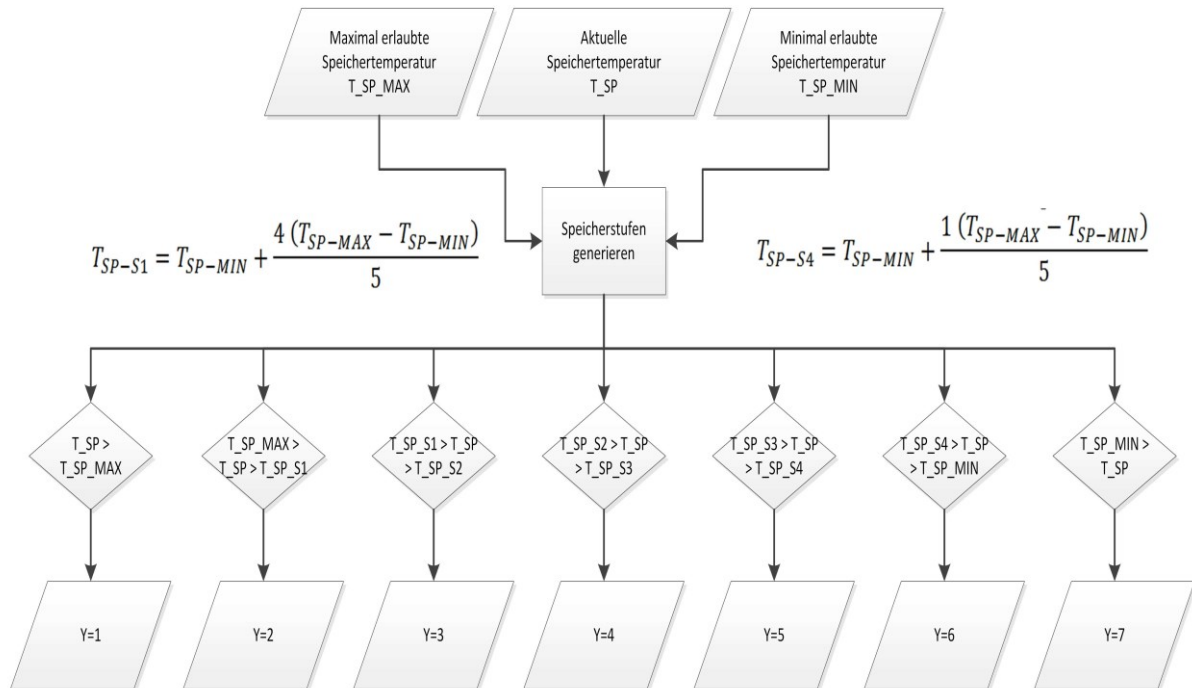


Abbildung 14 - Zustände des thermischen Energiespeichers

Der Ladezustand des thermischen Speichers wird entsprechend der mittleren Speichertemperatur am Ende der letzten Berechnungsperiode bestimmt und anschließend in 7 Stufen unterteilt. Diese 7 Stufen werden aufgrund des abhängig vom Heizungssystem erlaubten Temperaturbereiches des Speichers generiert (siehe Abbildung 14). Eine Einteilung des Temperaturbereiches in fünf gleich große Bereiche ermöglicht die Darstellung des aktuellen Energieinhaltes mit einer Kennzahl und so eine einfache und rasche Weiterverarbeitung im Regelungsprozess. Zusätzlich zu diesen fünf Bereichen sind zwei weitere Zustände definiert (oberhalb der gegebenen Maximaltemperatur bzw. unterhalb der Minimaltemperatur), die allerdings nicht erreicht werden dürfen. In dieser Simulation wird auf eine aufwendigere Modellierung der Temperaturverhältnisse innerhalb des thermischen Speichers verzichtet und ausschließlich mit dem Energieinhalt und der damit gekoppelten Durchschnittstemperatur im Speicher gearbeitet.

Analog zur beschriebenen Einteilung des thermischen Energiespeichers wird auch der elektrische Energiespeicher in Zonen eingeteilt. Wie in Abbildung 15 dargestellt, wird dazu in einem ersten Schritt der erlaubte Bereich, in dem der Energieinhalt des elektrischen Speichers liegen darf, mit der gegebenen

Bruttokapazität des Speichers und der erlaubten Entladetiefe bestimmt. Im Weiteren wird dieser Bereich auch als nutzbare elektrische Speicherkapazität bezeichnet und in 6 Zonen eingeteilt, um auch den Ladezustand des elektrischen Speichers mit einer Kennzahl darstellen zu können. Wie schon beim thermischen Energiespeicher existieren auch beim elektrischen Energiespeicher 2 Zustände ober- bzw. unterhalb des erlaubten Bereiches, die allerdings nicht erreicht werden dürfen, da es sonst zu einer Lebensdauerverkürzung der Batterie kommt.

Aufbauend auf den beschriebenen Anlagezuständen, den aktuellen Energieinhalten der beiden Speicher und dem, durch die VDI-Richtlinie 4655 gegebenen, momentanen Verbrauchsdaten wird von der ausgewählten Regelungsstrategie eine Entscheidung getroffen und der entsprechende Regelbefehl an μ KWK-Anlage und Zusatzbrenner gegeben. Dieses Simulationsschema (Abbildung 13) wird für ein gesamtes Jahr minutenweise abgearbeitet, wobei die Abfolge an Typtagen berücksichtigt wird. Die berechneten Betriebskenndaten werden nach jeder Berechnungsperiode einzeln abgespeichert und für den nächsten Berechnungsschritt bereitgestellt. Die Simulation liefert in jedem Zeitschritt die aktuellen Anlagen- und Speicherzustände sowie erzeugte, verbrauchte und eingespeiste Energien. Daraus werden folgende wesentliche Ergebnisse abgeleitet und ausgegeben:

- Elektrischer Autarkiegrad
- Bezogene elektrische Energie aus dem öffentlichen Stromnetz
- Verkaufte elektrische Energie
- Anzahl der Anfahrvorgänge
- Volllaststunden der μ KWK-Anlage
- Verbrauchter Brennstoff der μ KWK-Anlage
- Verbrauchter Brennstoff des Zusatzbrenners
- Erzeugte thermische Energie von μ KWK-Anlage und Zusatzbrenner
- Erzeugte elektrische Energie der μ KWK-Anlage
- Verluste durch den elektrischen Speicher
- Häufigkeit der verschiedenen Anlagenzuständen der μ KWK-Anlage
- Häufigkeit der verschiedenen Füllstände von elektr.- und therm. Speicher

Diese Daten werden in einer Excel Tabelle ausgegeben und somit für eine anschließende Analyse zur Verfügung gestellt.

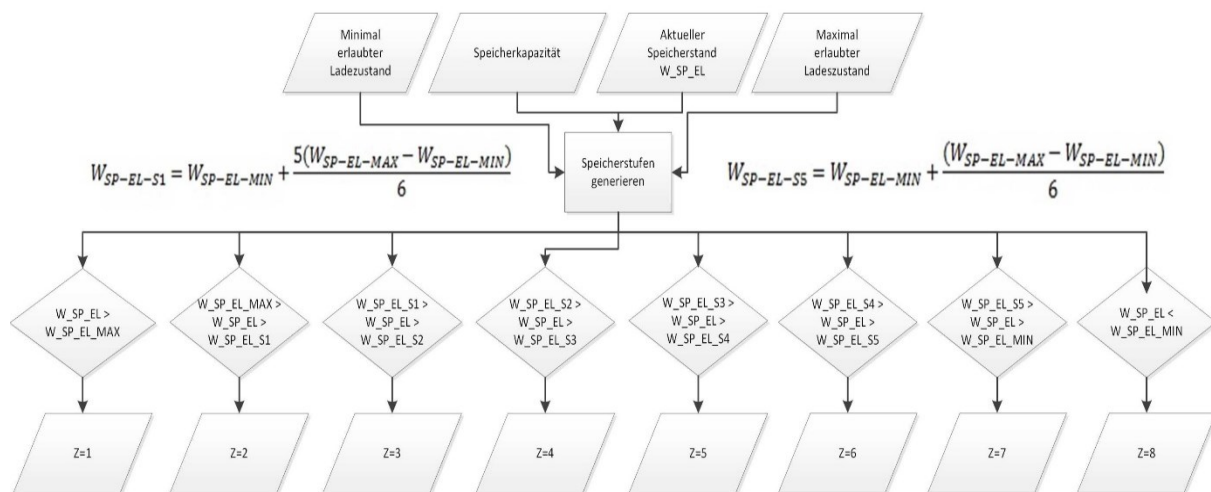


Abbildung 15 - Zustände des elektrischen Energiespeichers

3.3. Unterschiedene Anlagenkonfigurationen und Regelungsstrategien

Wie bereits einleitend erläutert, soll diese Arbeit den Einfluss einer optimierten Betriebsstrategie und Integration eines elektrischen Speichers auf den Autarkiegrad und die Effizienz einer μ KWK-Anlage analysieren. Dazu werden drei verschiedene Szenarien unterschieden:

- Szenario 1: System bestehend aus μ KWK-Anlage, Spitzenlastbrenner und thermischem Speicher mit rein wärmegeführter Regelstrategie
- Szenario 2: System bestehend aus μ KWK-Anlage, Spitzenlastbrenner und thermischem Speicher mit stromoptimierter Regelstrategie
- Szenario 3: System bestehend aus μ KWK-Anlage, Spitzenlastbrenner, thermischem und elektrischem Speicher mit einer angepassten, stromoptimierten Regelstrategie

Zusätzlich zur Variation der Anlagenkonfiguration und Regelstrategie mit diesen Szenarien wird zwischen zwei verschiedenen μ KWK-Technologien unterschieden:

- μ KWK-Anlage mit Erdgasmotor
- μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser

Kapitel 2.2 zeigt die Marktführerschaft von μ KWK-Anlagen auf Basis eines Erdgasmotors, weshalb dieser Typ simuliert und analysiert wird. Die gemeinsame Erzeugung von Strom und Wärme spart im Vergleich zur getrennten Erzeugung

Primärenergie und reduziert damit die bei Nutzung fossiler Brennstoffe erzeugten CO₂-Emissionen. Alternativ kann mit Biomasse eine erneuerbare Primärenergiequelle genutzt werden, wozu eine μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser nötig ist. μ KWK-Anlagen mit Biomassevergaser zeigen eine deutlich geringere Marktdurchdringung im Vergleich zu Erdgasanlagen. Aufgrund des Vorteils der Verwendung erneuerbarer Energiequellen kann die Bedeutung dieser Anlagen in Zukunft allerdings deutlich steigen. Da Teillastverhalten, Anfahrzeiten und Regelbarkeit bei Verbrennungsmotoren mit Erdgas und μ KWK-Anlagen mit Biomassevergasern verschieden sind, wurde das Verhalten dieser beiden μ KWK-Technologien mit angepassten Regelungsstrategien simuliert, die im Folgenden genauer dargestellt werden.

3.3.1. Erdgasbetriebene μ KWK-Anlagen

μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotoren weisen ein gutes Anfahr- und Teillastverhalten auf, so dauert ein typischer Anfahrvorgang nur wenige Minuten. Im Betrieb können Erdgasmotoren beinahe beliebig schnell geregelt werden und erlauben dabei Betriebspunkte zwischen 20% und 100% der Nennleistung. In Bereichen zwischen 50% und 100% der Nennleistung zeigen moderne Erdgasmotoren einen beinahe konstanten Wirkungsgrad. Aufgrund dieser drei Eigenschaften sind stark bedarfsorientierte Regelstrategien der μ KWK-Anlage möglich.

3.3.1.1. Rein wärmegeführter Betrieb mit therm. Speicher

Die einfachste Regelstrategie ist ein rein wärmegeführter Betrieb einer μ KWK-Anlage, der sich ausschließlich am aktuellen Anlagenzustand, dem aktuellen thermischen Bedarf des Objektes und der aktuellen Temperatur im thermischen Energiespeicher orientiert und dabei einzig das Ziel der lückenlosen Versorgung des thermischen Objektbedarfs verfolgt. Der folgende Absatz beschreibt den, in Abbildung 16 dargestellten, Entscheidungsablauf einer solchen Regelung, wie sie im Zuge dieser Arbeit simuliert wird.

Zu Beginn wird der aktuelle Anlagenzustand der μ KWK-Anlage abgefragt und dabei zwischen ein- und ausgeschaltetem Zustand differenziert, wobei Anfahr- und Abfahrvorgänge der eingesetzten μ KWK-Anlage berücksichtigt werden. Falls die μ KWK-Anlage in der vergangenen Berechnungsperiode ausgeschaltet war, so wird diese nur für den Fall einer Unterschreitung der vorgegebenen minimalen Speichertemperatur eingeschaltet. In diesem Fall wird überprüft, ob die μ KWK-Anlage für die aktuelle

Berechnungsperiode den thermischen Bedarf des Objektes decken kann. Liegt eine Unterdeckung des thermischen Bedarfes vor, wird thermische Energie durch Zuschalten eines dafür vorhandenen Spitzenlastbrenners generiert.

Unterdeckung bedeutet, dass die gerade benötigte thermische Energie die aktuell von der μ KWK-Anlage lieferbare thermische Energie übersteigt. Zeigt die Abfrage

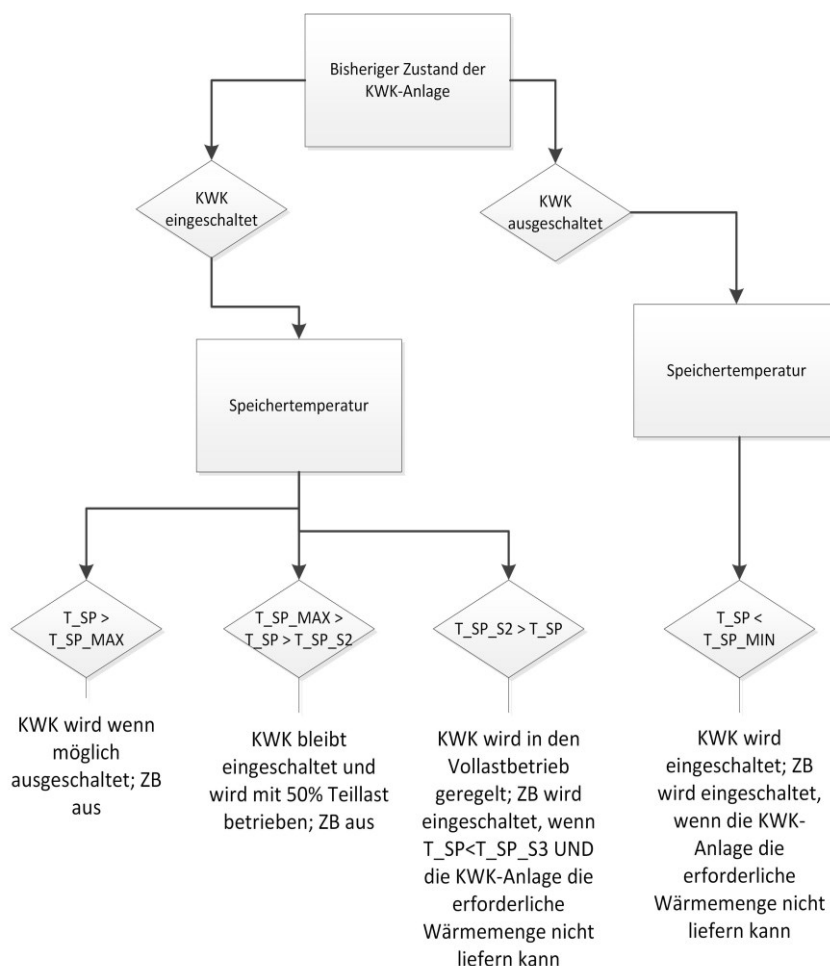


Abbildung 16 - Ablauf der rein wärmegeführten Regelungsstrategie

Anlagenzustandes eine bereits eingeschaltete μ KWK-Anlage wird der linke Weg im Entscheidungsbaum von Abbildung 16 gewählt und aufgrund der aktuellen mittleren Speichertemperatur zwischen 3 Entscheidungsalternativen unterschieden:

- Überschreitet die mittlere Speichertemperatur den vorgegebenen Maximalwert wird die μ KWK-Anlage ausgeschaltet um eine Überhitzung des Speichers zu verhindern.
- Liegt die mittlere Temperatur im Speicher zwischen der Maximaltemperatur und der zweiten Schrankentemperatur T_{SP_S2} (dies entspricht einem - energetisch betrachtet - zu drei Fünftel gefüllten Speicher), so bleibt die

µKWK-Anlage zwar eingeschaltet, wird aber auf 50% der Nennleistung geregelt um den Speicher nur langsam weiter zu erwärmen und damit die Ein- und Ausschaltvorgänge der µKWK-Anlage zu reduzieren. In diesen beiden Fällen wird der Zusatzbrenner jedenfalls nicht benötigt, da jeglicher thermischer Bedarf mittels Energieentnahme aus dem thermischen Speicher gedeckt wird.

- Falls die Speichertemperatur unterhalb dieser zweiten Schrankentemperatur ist, wird die Anlage auf Volllast geregelt. Ist die aktuelle Speichertemperatur kleiner als die dritte Schrankentemperatur T_{SP_S3} wird bei Unterdeckung der Spitzenlastbrenner zugeschaltet.

3.3.1.2. Stromoptimierte Betriebsweise mit therm. Speicher

Bei der gerade beschriebenen rein wärmegeführten Regelstrategie bleibt die, durch den thermischen Energiespeicher ermöglichte, zeitliche Flexibilität in der Erzeugung der thermischen Energie weitgehend ungenutzt. Wie einleitend erwähnt spielt der elektrische Autarkiegrad eine bedeutende Rolle zur wirtschaftlichen Nutzung einer µKWK-Anlage. Daher ist es sinnvoll den thermischen Speicher zu nutzen, um die Erzeugung der elektrischen Energie durch die µKWK-Anlage zeitlich möglichst genau mit dem Stromverbrauch übereinzustimmen. Dies ist soweit möglich, wie der thermische Speicher die Differenz zwischen thermischer Erzeugung und Verbrauch ausgleichen kann. Zu diesem Zweck wird eine so genannte stromoptimierte Regelungsstrategie eingesetzt, die den Autarkiegrad und damit sowohl die Wirtschaftlichkeit der Anlage als auch die Gesamteffizienz in der Erzeugung der elektrischen Energie erhöhen soll. Ein erhöhter Autarkiegrad bedeutet mehr selbst genutzte elektrische Energie, womit die erforderliche Austauschenergie mit dem öffentlichen Stromnetz sinkt.

Der in Abbildung 17 schematisch dargestellte Regelungsablauf für eine stromoptimierte Regelungsstrategie wurde während dieser Arbeit selbst entwickelt, wobei darauf Wert gelegt wurde die Anzahl an An- und Abfahrvorgänge in technisch sinnvollen Grenzen zu halten. Um dieses Ziel zu erreichen wird der Anlagenzustand der letzten Berechnungsperiode (soweit sinnvoll) beibehalten und damit die Anzahl der Anfahrvorgänge deutlich reduziert. Dies führt zu einer besseren Ausnutzung des vorhandenen thermischen Speichers und geringeren Anfahrverlusten. Zusätzlich zur aktuellen Durchschnittstemperatur im thermischen Speicher, dem aktuellen thermischen Verbrauch und dem Anlagenzustand wird hier auch der aktuelle elektrische Verbrauch des Objektes bei der Regelungsentscheidung berücksichtigt.

Wie in Abbildung 17 dargestellt, wird zu Beginn jeder Berechnungsperiode der Zustand des thermischen Speichers abgefragt und entsprechend dem Schema in Abbildung 14 eine Kennzahl zur Zustandsbeschreibung des Speichers ausgegeben. Diese Kennzahl des thermischen Speichers ist das grundlegende Entscheidungskriterium für den Entscheidungsbaum in Abbildung 17 und führt zu einem von sieben möglichen Fällen, die jeweils unterschiedliche Regelungsbefehle zur Folge haben. Anschließend an diese Unterscheidung wird je nach Anlagenzustand und aktuellen elektrischen und thermischen Verbräuchen über den zu gebenden Befehl an μ KWK-Anlage und Zusatzbrenner entschieden. Als Beispiel sei das Verhalten für die thermische Speicherkennzahl $Y=4$ näher erklärt:

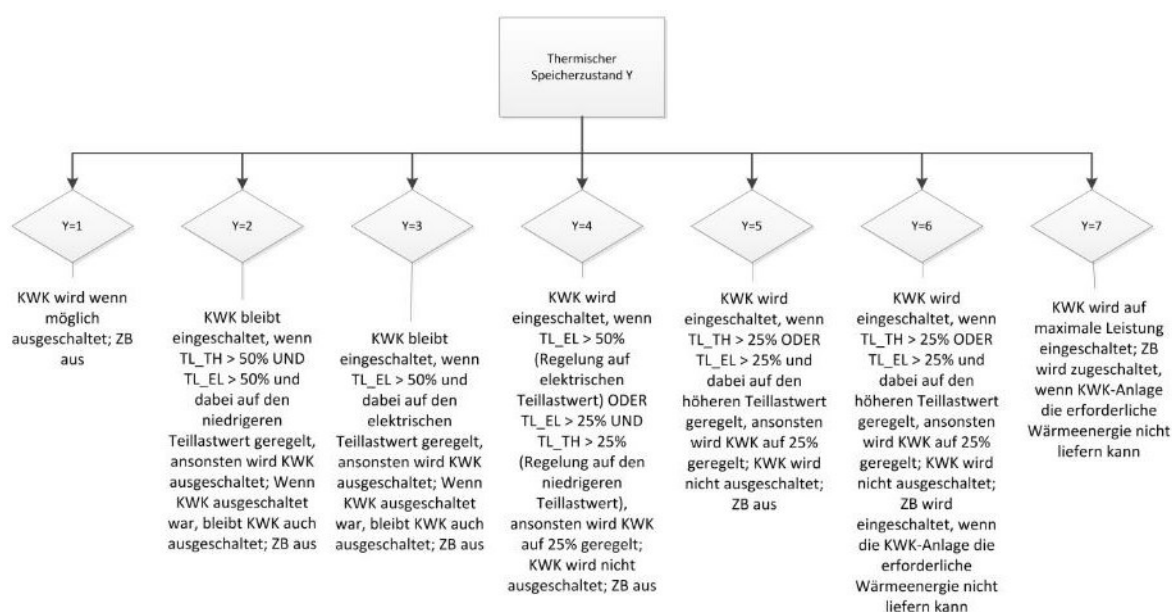


Abbildung 17 - Ablauf einer stromoptimierten Regelungsstrategie ohne elektrischen Speicher

Die thermische Speicherkennzahl $Y=4$ bedeutet einen energetisch zwischen 40% und 60% gefüllten thermischen Energiespeicher, siehe hierzu Abbildung 14. Damit ist der Speicher warm genug, um die vom Objekt benötigte Wärmeenergie zur Verfügung zu stellen ohne dabei gänzlich abzukühlen. Andererseits besteht auch keine Gefahr einer Überhitzung des Speichers, weshalb in einem solchen Fall die μ KWK-Anlage unabhängig von aktuellen Verbrauchswerten nicht ausgeschaltet wird. Es wäre auch möglich im Falle von fehlendem thermischen und elektrischen Verbrauch die Anlage abzuschalten, davon wird aber abgesehen, da ansonsten die An- und Abfahrvorgänge pro Jahr einen sehr hohen Wert erreichen und damit eine Lebensdauerverkürzung der Anlage verursachen würden. Aufgrund des ausreichend warmen Speichers wird der Zusatzbrenner unabhängig von Anlagenzustand und Bedarf des Objektes nicht eingeschaltet, um das Ziel hoher Volllaststunden der

μ KWK-Anlage erreichen zu können. Ist die aktuell benötigte elektrische Leistung der angeschlossenen Verbraucher höher als die halbe elektrische Nennleistung der μ KWK-Anlage, wird diese eingeschaltet oder bleibt eingeschaltet und wird auf die aktuelle elektrische Verbrauchsleistung geregelt. Ist der elektrische Bedarf geringer, aber sowohl die benötigte elektrische als auch die benötigte thermische Leistung größer als 25% der jeweiligen Nennleistung, wird die μ KWK-Anlage eingeschaltet bzw. bleibt eingeschaltet und wird auf den niedrigeren der beiden Teillastwerte (TL_TH, TL_EL) geregelt. Unter elektrischem bzw. thermischem Teillastwert wird hier das Verhältnis aus aktueller elektrischer bzw. thermischer Leistung und der jeweiligen Nennleistung der μ KWK-Anlage verstanden. Sofern die benötigten Leistungen geringer als 25% der Nennleistung sind, bleibt die μ KWK-Anlage ausgeschaltet oder wird im Falle einer eingeschalteten Anlage auf 25% der Nennleistung geregelt. Hier wurden 25% als sinnvoller Teillastwert gewählt, da dieser Wert bei vielen marktüblichen μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotoren typisch für den kleinstmöglichen Teillastbetrieb ist.

Analog zu diesem Beispiel ist die Vorgehensweise bei allen sieben möglichen Werten für die Kennzahl des thermischen Speichers, wobei die Speichertemperatur im Idealfall möglichst häufig im mittleren Bereich liegt. Bei einer solchen Speichertemperatur bleibt ein Spielraum in beide „Richtungen“ (Wärme einspeichern oder entnehmen) und die Möglichkeit die Produktion an den elektrischen Verbrauch zu koppeln und damit den Autarkiegrad zu erhöhen.

3.3.1.3. Stromoptimierte Betriebsweise mit therm.- und el. Speicher

Durch die Integration eines elektrischen Energiespeichers in das Gesamtsystem entsteht mit dem aktuellen elektrischen Speicherzustand ein zusätzlicher Parameter, der in die Regelungsstrategie der Anlage einfließt. Durch diese zusätzliche Einflussgröße wird der Aufbau der Regelstrategie um eine Dimension erweitert. Die Kennzahl des elektrischen (siehe Abbildung 15) und des thermischen Speichers nehmen in gleichem Ausmaß Einfluss auf die Regelung, weshalb eine „Entscheidungsmatrix“ entsteht, die in Abbildung 18 dargestellt ist. Zu Beginn jeder Berechnungsperiode werden die aktuellen Energieinhalte von thermischem (Kennzahl Y) und elektrischem (Kennzahl Z) Speicher abgefragt und dienen als Grundlage für die Entstehung des Regelbefehls. Je nach Kombination dieser beiden Kennzahlen sind 56 unterschiedliche Gesamtzustände der beiden Speicher möglich. Für jeden dieser 56 Zustände wird abhängig von Anlagenzustand und Verbrauchsdaten eine Regelungsentscheidung getroffen. Auch bei der Entwicklung dieser Regelungsstrategie wurde auf eine technisch sinnvolle Anzahl an Anfahr- und

Abfahrvorgängen geachtet. Der Aufbau der Regelungsstrategie soll Speicherzustände mit mittleren Energieinhalten sowohl im thermischen als auch im elektrischen Speicher (rote Rechtecke in Abbildung 18) in gehäufter Anzahl zur Folge haben. Bei diesen Speicherzuständen besteht eine große zeitliche Flexibilität der Produktion, wodurch eine Anpassung der Erzeugung an den elektrischen Bedarf möglich ist. Zum besseren Verständnis dieser Entscheidungsmatrix wird der Entscheidungsablauf für den Fall des thermischen Speicherzustandes $Y=4$ und des elektrischen Speicherzustandes $Z=3$ ausführlich beschrieben:

Bei dieser Kombination der beiden Speicherkennzahlen bleibt die μ KWK-Anlage eingeschaltet und wird auf die aktuelle thermische Verbrauchsleistung geregelt, sofern diese nicht unterhalb des minimal möglichen Teillastwertes der μ KWK-Anlage liegt. Bei zu kleiner Verbrauchsleistung wird die Anlage auf den kleinstmöglichen zulässigen Teillastwert geregelt. Ist die μ KWK-Anlage zu Beginn der aktuellen Berechnungsperiode ausgeschaltet, wird sie nur eingeschaltet, wenn benötigte thermische und elektrische Leistung mindestens der halben Nennleistung der μ KWK-Anlage entsprechen. Dabei wird die μ KWK-Anlage wiederum auf die thermische Verbrauchsleistung geregelt. Aufgrund des ausreichend warmen thermischen Speichers bleibt der Spitzenlastbrenner unter diesen Bedingungen immer ausgeschaltet.

Versuchsaufbau und Modellbeschreibung

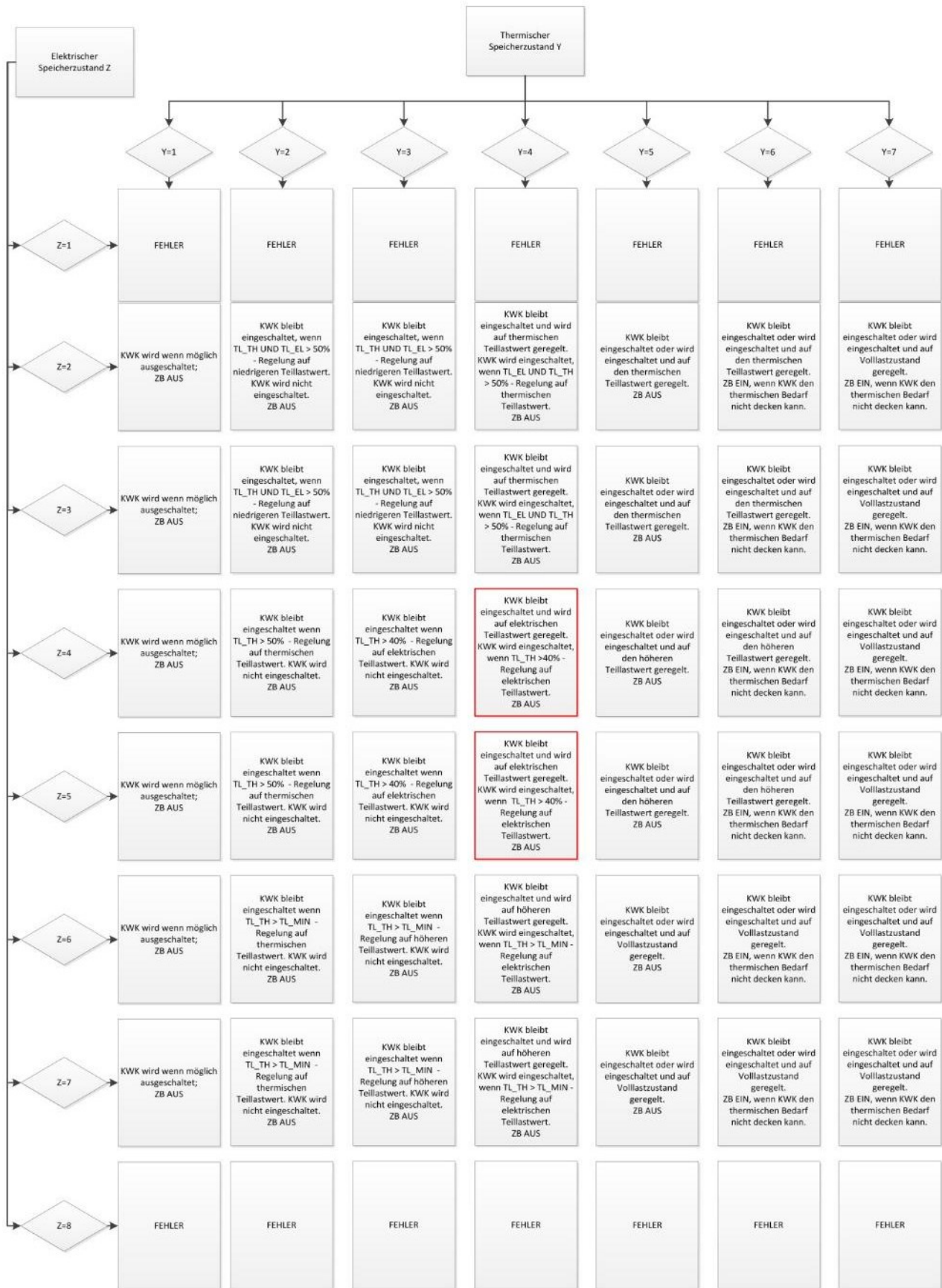


Abbildung 18 - Ablauf einer stromoptimierten Regelungsstrategie mit elektrischem Speicher

3.3.2. μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, sind KWK-Anlagen mit Biomasse als Brennstoff im kleinsten Leistungssegment (μ KWK) kaum im Einsatz, während solche Anlagen in größeren Leistungsbereichen eine deutlich höhere Marktdurchdringung ([70]) aufweisen. Der große Vorteil dieses Anlagentyps ist die Erzeugung von thermischer und elektrischer Energie aus erneuerbaren Rohstoffen, weshalb eine weitere Steigerung der Zahl an installierten Anlagen (auch im μ KWK-Bereich) aus ökologischer Sicht sinnvoll wäre.

Aufgrund der notwendigen vorangesetzten Vergasung der Biomasse (siehe Kapitel 2.2.1) zu Biogas sind die Anfahrzeiten solcher Anlagen deutlich länger (je nach Anlagentemperatur zwischen 20 und 90 Minuten) als bei μ KWK-Anlagen mit Erdgasverbrennung und des Weiteren besteht keine Möglichkeit der Abgabeleistungsregelung. In Abbildung 19 ist der Anfahrvorgang der simulierten Anlage E3 der Firma ENTRADE Energiesysteme AG dargestellt, wobei die blaue Linie den gleichbleibenden Eigenstromverbrauch von 1,5kW während des Anfahrvorganges, die

schwarze Linie die von der Anlage abgegebene thermische Leistung und die rote Linie den Verlauf der zugeführten Brennstoffleistung darstellt. Die ersten 45 Minuten werden benötigt um einzelne Anlagenteile mit einem elektrischen Gebläse aufzuheizen, weshalb weder

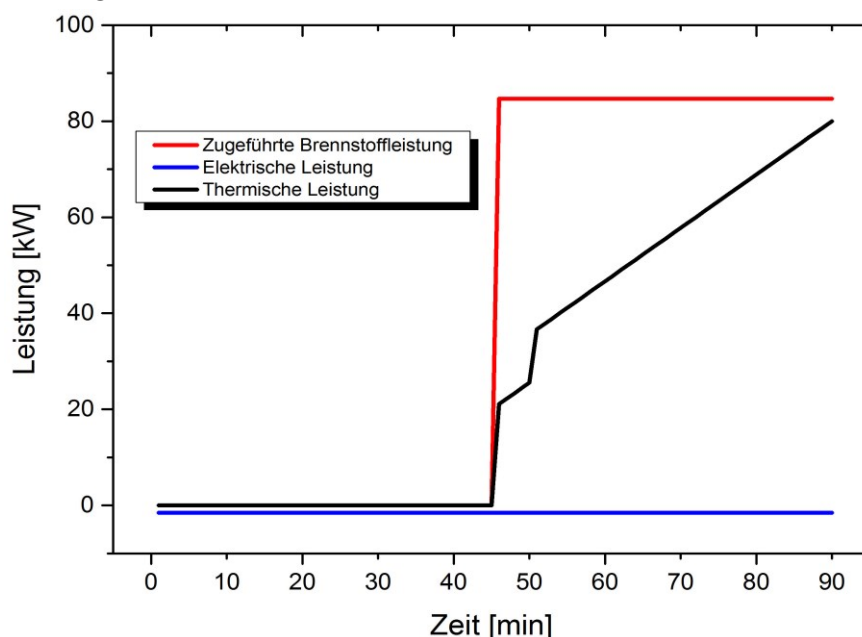


Abbildung 19 - Anfahrvorgang der Anlage E3 der Firma ENTRADE aus einem abgekühlten Zustand

Brennstoff benötigt, noch thermische Leistung abgegeben wird. Daran anschließend beginnt die Anlage zu arbeiten, wobei die abgegebene thermische Leistung (rein durch den Holzpelletsvergaser) langsam steigt. Erst nach 90 Minuten hat der Vergasungsvorgang einen stationären Zustand erreicht und der Motor wird zugeschaltet. Ab diesem Zeitpunkt liefert die Anlage die angegebenen Nennleistungen. Bei einem Einschaltvorgang aus noch aufgeheiztem Zustand sind

keine Aufheizvorgänge nötig bzw. werden verkürzt, wodurch der gesamte Vorgang nach 20 Minuten beendet ist. Der Abfahrvorgang des E3 dauert ebenfalls 20 Minuten und ist eine Spiegelung des warmen Einschaltvorganges. Die Anlage weist keine Möglichkeit der Leistungsregelung auf, lässt daher nur einen Betrieb bei Nennbedingungen zu. Durch diese technologiebedingte Einschränkung im Vergleich zu erdgasbetriebenen μ KWK-Anlagen ist eine stark bedarfsorientierte Regelungsstrategie, wie sie oben beschrieben wurde, nicht möglich und gravierende Änderungen in den Regelungsstrategien sind erforderlich. Schon bei der Analyse der Simulationen von μ KWK-Anlagen mit Erdgasverbrennung zeigte sich der rein wärmegeführter Betrieb als energetisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll. Daher ist die Simulation von μ KWK-Anlagen mit Biomassevergasung auf einen Vergleich der stromoptimierten Betriebsweise mit und ohne elektrischen Energiespeicher beschränkt.

3.3.2.1. Stromoptimierte Betriebsweise mit therm. Speicher

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit die Leistungsabgabe der μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser zu regeln, ist eine stark differenzierte Regelungsstrategie im Gegensatz zum Betrieb erdgasgefeuerter Anlagen nicht möglich. Die Regelungsstrategie (siehe Abbildung 20) ist deshalb im Wesentlichen darauf beschränkt die Anfahr- und Abfahrvorgänge möglichst gering zu halten und die Möglichkeit der Energiespeicherung für eine Autarkiegradsteigerung zu nutzen. Der im Hinblick auf die Regelung interessanteste Fall ist Speicherzustand $Y=5$, welcher einem energetisch betrachtet zu 20% bis 40% gefüllten thermischen Speicher entspricht. Bei einer bereits eingeschalteten Anlage wird keine Änderung des Betriebszustandes vorgenommen und die Anlage weiter im Nennzustand betrieben. War die Anlage zum Ende der vergangenen Berechnungsperiode allerdings ausgeschaltet, wird die μ KWK-Anlage nur eingeschaltet, wenn Anlage bzw. Vergaser bereits vollständig ausgekühlt sind (typischer Wert sind 5 Stunden). Aufgrund der kalten Anlage und des damit verbundenen langen Zeitraumes, bis elektrische und thermische Energie an das Objekt geliefert werden können, ist eine solche Strategie notwendig. Früheres Reagieren soll hier eine komplette Abkühlung des thermischen Speichers und damit ein notwendiges Zuschalten des Zusatzbrenners möglichst verhindern. Der Zusatzbrenner wird, wie bereits bei der erdgasbefeuerten μ KWK-Anlage beschrieben, nur bei weiter abgekühltem thermischen Speicher und gleichzeitig zu hohem thermischen Bedarf des Objektes zugeschaltet (Fälle $Y=6$ und $Y=7$).

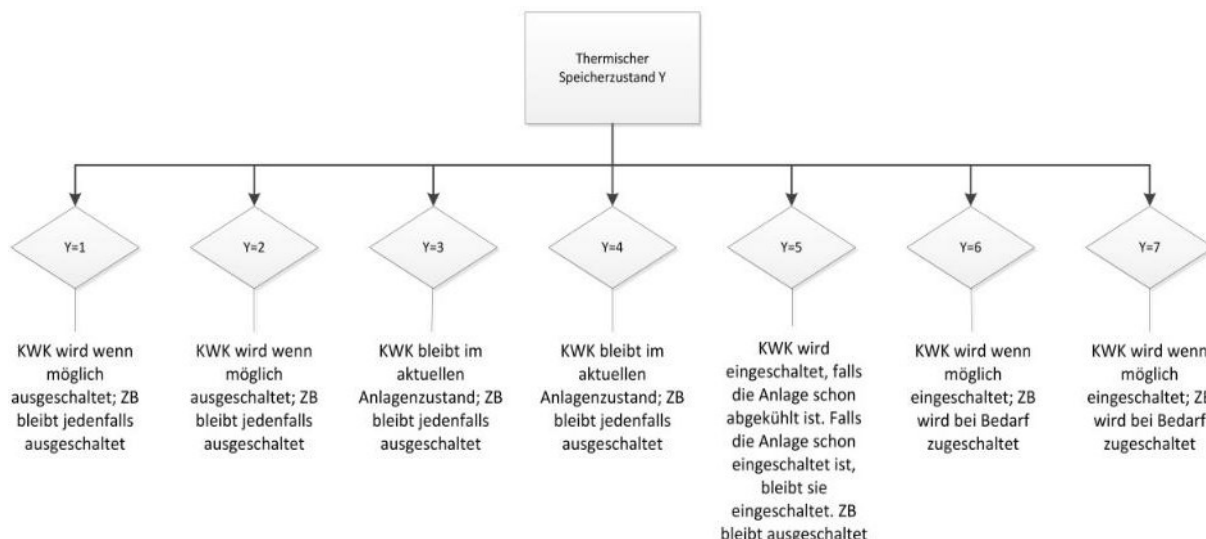


Abbildung 20 - Ablauf der Regelungsstrategie für eine μ KWK-Anlage mit Biomassevergasung

3.3.2.2. Stromoptimierte Betriebsweise mit therm.- und el. Speicher

Die Regelungsstrategie für eine μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser bei zusätzlicher Integration eines elektrischen Speichers in die Gesamtanlage entspricht der im Kapitel 3.3.1.2 beschriebenen und in Abbildung 20 dargestellten Regelungsstrategie für eine Anlage ohne elektrischen Speicher. Eine komplexere Entscheidungsmatrix, wie sie bei der erdgasbetriebenen μ KWK-Anlage mit elektrischem Speicher (siehe 3.3.1.3) gewählt wurde, ist aufgrund der fehlenden Leistungsregelung nicht möglich.

3.4. Ergebnisausgabe der Simulation

Die Ergebnisausgabe ist bei allen Simulationsmodellen ident aufgebaut und erfolgt in zwei Stufen. Die erste Stufe ist die Speicherung aller relevanten Werte für jede Berechnungsperiode in einer Tabelle, um einzelne Berechnungsperioden nachzuvollziehen und einen typischen Tagesablauf minutenweise aufzuschlüsseln zu können. Die zweite Stufe ist die Ausgabe aller relevanten Gesamtergebnisse der Simulation. Dies liefert die Grundlage zur weiteren Verarbeitung und anschließenden energetischen und wirtschaftlichen Analyse und Bewertung der unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen und Regelungsstrategien.

4. Auswertung der Simulationen

Die Ergebnisse der oben erläuterten Simulationen dienen als Grundlage für eine weitere Analyse, die fundierte Aussagen über energetische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der einzelnen Anlagenkonfigurationen und Betriebsstrategien ermöglicht. Das Vorgehen bei der Auswertung der Simulationsergebnisse ist gemeinsam mit den daraus folgenden Ergebnissen und abgeleiteten Erkenntnissen im folgenden Kapitel beschrieben.

4.1. Grundlagen und Vorgehensweise

Ziel der Simulationen ist die Abhängigkeit wesentlicher Betriebsparameter (Autarkiegrad, Austauschenergie mit dem öffentlichen Stromnetz, Volllaststunden,...) von verschiedenen Betriebsstrategien und Anlagendimensionierungen zu analysieren. Zu diesem Zweck werden bei verschiedenen Anlagenkonfigurationen und Betriebsstrategien (siehe Kapitel 3.3) folgende Parameter systematisch variiert:

- Thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage
- Stromkennzahl der μ KWK-Anlage
- Thermische Nennleistung des Zusatzbrenners
- Volumen des thermischen Speichers
- Kapazität des elektrischen Speichers
- Maximale Lade- und Entladeleistung des elektrischen Speichers

Die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage kann einerseits durch Erhöhung des Autarkiegrades mit daraus folgender Senkung der Bedarfskosten und andererseits durch geringere Investitionskosten verbessert werden. Durch geeignete Dimensionierung der Anlagekomponenten und passende Wahl der Betriebsstrategie sinken die Investitionskosten bei gleichzeitiger Steigerung der Volllaststunden der μ KWK-Anlage. Zusätzlich zu diesen grundlegenden Abhängigkeiten sind bei der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung der verschiedenen Anlagenkonfigurationen weitere Einflussparameter zu berücksichtigen. Zur genauen Analyse werden daher die Abhängigkeiten folgender Kenngrößen von den variierten Eingangsparameter untersucht:

- Autarkiegrad (elektrisch)
- Bezogene elektrische Energie aus dem öffentlichen Stromnetz
- Verkaufte elektrische Energie an das öffentliche Stromnetz

- Volllaststunden der μ KWK-Anlage
- Gesamteffizienz des Systems (Brennstoffverbrauch)
- Einschalthäufigkeit der μ KWK-Anlage
- Anzahl der jährlichen Ladezyklen des elektrischen Speichers
- Benötigte Leistung des Zusatzbrenners

Ziel der auf die Analyse folgenden Optimierung ist einerseits den Autarkiegrad, die Volllaststunden, die Gesamteffizienz und die Ladezyklen des elektrischen Speichers zu maximieren und andererseits die Einschalthäufigkeit der μ KWK-Anlage, die bezogene und verkaufte elektrische Energie, und den Verbrauch des Zusatzbrenners zu minimieren.

Im folgenden Abschnitt wird die Relevanz der einzelnen Kenngrößen in Bezug auf eine wirtschaftliche und energetische Gesamtbewertung dargestellt. Ein hoher Autarkiegrad und geringe Austauschenergien mit dem öffentlichen Stromnetz senken die laufenden Kosten, da es unter den derzeitigen Strommarktbedingungen unabhängig vom Zeitpunkt unwirtschaftlich ist Strom zu verkaufen und im Gegenzug Strom einkaufen zu müssen. Aufgrund der im Vergleich zu den Brennstoffpreisen für Endkunden sehr geringen Stromerlöse bei einem Verkauf ist ein hoher Eigenverbrauchsanteil des erzeugten Stromes für einen wirtschaftlichen Betrieb unerlässlich. Dies gilt vor allem für Stromerlöse bei Erdgasanlagen, da dafür keine geförderten Einspeisetarife existieren. Die Optimierung dieser Kennzahlen steht daher im Mittelpunkt der Betrachtung, ohne allerdings die Auswirkung der restlichen Betriebsparameter außer Acht zu lassen. Bei der Dimensionierung der μ KWK-Anlage wird die Nennleistung möglichst klein gewählt, wodurch geringere Investitionskosten bei gleichzeitig höherer Auslastung der Anlage möglich sind. Die Gesamteffizienz des Systems soll möglichst hoch sein, wozu unter anderem eine geringe Einschalthäufigkeit der μ KWK-Anlage notwendig ist, die mit der Verlängerung der zu erwartenden Lebensdauer der μ KWK-Anlage einen weiteren positiven Effekt hat. Zur Auslegung des elektrischen Speichers gilt ein ähnlicher Zusammenhang wie bei der μ KWK-Anlage. Bei möglichst kleiner Kapazität des Speichers sinken die Investitionskosten und die Auslastung des Speichers wird erhöht. Die dazugehörige Kenngröße ist die Anzahl der Ladezyklen des elektrischen Speichers während eines Betriebsjahres. Zu guter Letzt sollen benötigte Leistung und Nutzungsdauer des Zusatzbrenners möglichst gering sein, um die μ KWK-Anlage besser ausnutzen zu können.

Unter diesen Zielvorgaben und Rahmenbedingungen erfolgt die Auswertung und Analyse der Simulationen, wobei die Ergebnisse in den folgenden Kapiteln ausgeführt sind.

4.2. Ergebnisse für erdgasbetriebene μ KWK-Anlagen

Die unterschiedenen Anlagekonfigurationen und Betriebsstrategien haben bei Nutzung einer μ KWK-Anlage mit Erdgasmotor sehr verschiedene Ergebnisse zur Folge. In diesem Kapitel werden vorgenommene Annahmen zu Objekt- und Anlagendaten sowie die daraus folgenden Simulationsergebnisse beschrieben und analysiert.

4.2.1. Objekt- und Anlagendaten

Bei der durchgeführten Simulation von μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotoren zur Versorgung von Mehrparteienhäusern wurde zu Beginn ein Haus mit 3 Parteien gewählt. Als Standort wurde Graz gewählt, wodurch die klimabezogenen Kenndaten festgelegt sind (siehe Kapitel 3.1). Eine weitere Annahme ist die Wohnfläche von 110m² pro Partei bei einem spezifischen Heizwärmebedarf von 53,9kWh/(m²a). Diese Annahmen in Verbindung mit den Referenzlastprofilen der VDI 4655 ergeben die benötigten Verbrauchsverläufe von Strom und Wärme für das Objekt. Dabei weist ein solches Objekt einen Jahreswärmebedarf von 20787kWh und einen Jahresstromverbrauch von 9017kWh auf.

Die Anlagendaten wurden wie in Kapitel 4.1 beschrieben variiert, wobei bereits erste Simulationen eine hohe Stromkennzahl als günstig zur Erreichung eines hohen Autarkiegrades und einer guten Auslastung der Anlage zeigten. Daher wird ausgehend von der bereits beschriebenen Marktstudie (siehe Kapitel 2.2.6) eine möglichst hohe und trotzdem realistische Stromkennzahl von 0,47 für alle simulierten μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotor gewählt. Als Stromkennzahl ist das Verhältnis aus elektrischer und thermischer Nennleistung der μ KWK-Anlage definiert:

$$S = \frac{P_{KWK,EL}}{P_{KWK,TH}} \quad (5)$$

4.2.2. Rein wärmegeführte Betriebsstrategie mit therm. Speicher

Bei einer rein wärmegeführten Betriebsstrategie der μ KWK-Anlage (siehe Kapitel 3.3.1.1) zeigt sich für die thermische Nennleistung bei festgelegter Stromkennzahl und einem thermischen Speicher von 600l ein Optimum bei 3kW, wie in Abbildung

21 dargestellt ist. Im Vergleich zu den beiden anderen Betriebsstrategien wird bei der rein wärmeorientierten Anlage ein deutlich geringerer Autarkiegrad erreicht. Die richtig gewählte Anlagennennleistung hat bei dieser Strategie einen großen Einfluss auf den erreichten Autarkiegrad. Bereits bei einer μ KWK-Anlage mit einer um 1kW kleineren thermischen Nennleistung ist der Autarkiegrad statt 65% nur 60%, ähnliches gilt für zu groß ($> 4,5\text{kW}$) dimensionierte Anlagen. Zu groß dimensionierte Anlagen, die mit der beschriebenen rein wärmegeführten Strategie betrieben werden, zeigen eine deutliche Erhöhung von bezogener (siehe Abbildung 27) und verkaufter (siehe Abbildung 24) elektrischer Energie. Damit einhergehend ist eine Verringerung der Volllaststunden von 5604 Stunden bei einer Anlage mit thermischer Nennleistung $P_{\text{th}}=3\text{kW}$ auf 3665 Stunden bei einer thermischen Nennleistung von $P_{\text{th}}=6\text{kW}$.

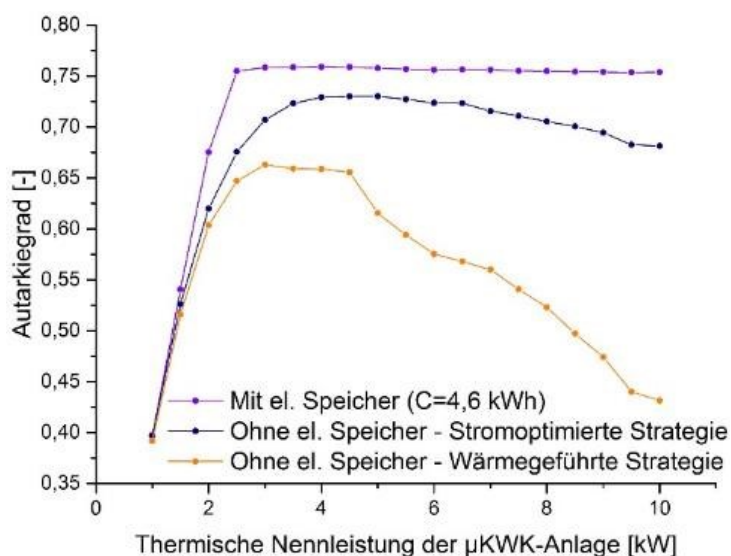


Abbildung 21 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von thermischer Nennleistung bei verschiedenen Szenarien

Bei Variation der thermischen Speichergröße zeigen die Simulationen ein Optimum bei einem Volumen des Heißwasserspeichers von 300l. Abbildung 22 zeigt die Abhängigkeit des Autarkiegrades von der gewählten Speichergröße bei ansonsten gleichbleibenden Anlagekenndaten ($P_{\text{th}}=3\text{kW}$). Die Grafik zeigt ein absolutes Maximum bei 300l und eine „Mindestgröße“ des Speichers von etwa 250l, unterhalb dieses Volumens ist der Autarkiegrad eindeutig

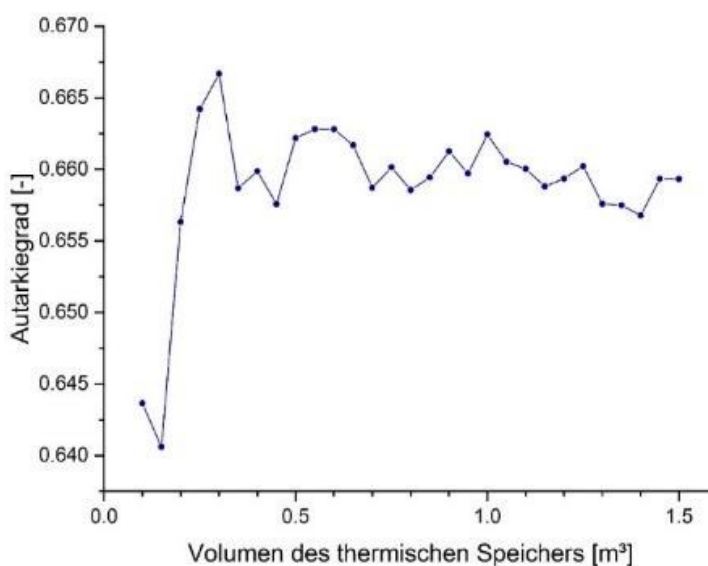


Abbildung 22 - Abhängigkeit des Autarkiegrades vom Volumen des thermischen Speichers

geringer. Oberhalb davon sind nur kleine Schwankungen zwischen den einzelnen Konfigurationen zu sehen, aber keine Verbesserung des Autarkiegrades bei Vergrößerung des thermischen Speichervolumens, weshalb aufgrund der geringeren Investitionskosten die ideale Größe von 300l zu wählen ist.

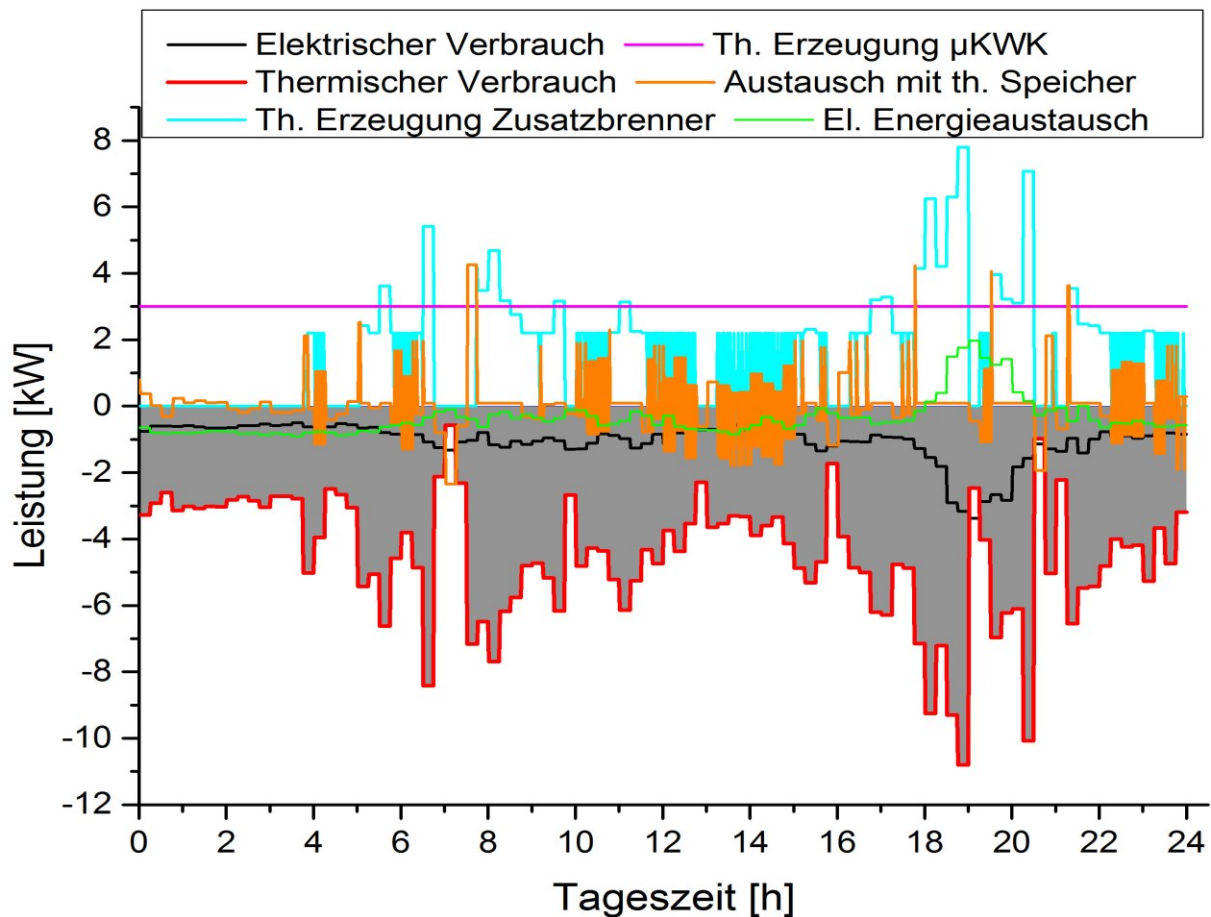


Abbildung 23 - Verlauf von Erzeugung und Verbrauch an einem bewölkten Winterarbeitstag bei rein wärmegeführter Strategie

Die rein wärmegeführte Strategie wurde bereits in Kapitel 3.3.1.1 erklärt, die Folgen dieser Strategie an einem bewölkten Werktag im Winter sind in Abbildung 23 dargestellt, wobei negative Leistungen als Verbrauch bzw. Verkauf und positive Leistungen als Erzeugung bzw. Einkauf definiert sind. Aufgrund des ständigen Bedarfs von thermischer Energie (rote Linie mit grauer Füllung) bleibt die µKWK-Anlage den gesamten Tag im Nennbetrieb und stellt 3kW thermische (pinke Linie) und 1,41kW elektrische Leistung zur Verfügung. Zur besseren Übersicht ist die elektrische Leistung der µKWK-Anlage nicht eingezeichnet. Diese konstant gelieferte elektrische Leistung in Verbindung mit schwankendem elektrischem Verbrauch (schwarze Linie) erfordert einen Austausch mit dem elektrischen Netz (hellgrüne Linie). An diesem beispielhaft gewählten Tag liegt die Temperatur des

thermischen Speichers in einem Bereich zwischen 57°C und 61°C. Die in Kapitel 3.3.1.1 erklärte, für die Regelung bedeutende dritte Temperaturschranke ist in diesem Fall mit 59°C definiert, weshalb erst bei Unterschreitung von 59°C Speichertemperatur und entsprechendem Bedarf der Zusatzbrenner zugeschaltet wird. Der Energieaustausch mit dem thermischen Speicher ist als orange Linie dargestellt, wobei ein positiver Wert eine Energieentnahme aus dem Speicher bedeutet, während ein negativer Leistungswert einer Aufheizung des Speichers entspricht. Für den erreichbaren Autarkiegrad und die Volllaststunden der μ KWK-Anlage ungünstige Fälle sind jene mit einer geforderten thermischen Leistung geringfügig größer als die μ KWK-Nennleistung bei gleichzeitiger Speichertemperatur unterhalb von 59°C. Dann wird gemäß der gewählten Strategie der Zusatzbrenner eingeschaltet um den ungedeckten thermischen Bedarf zu decken. Die Regelbarkeit der Zusatzbrenner ist allerdings eingeschränkt und ermöglicht keine Produktion von beliebig kleinen Wärmemengen. Dies führt in manchen Fällen zu einer Überversorgung mit thermischer Energie, die eine unplanmäßige Aufheizung des thermischen Speichers mittels Zusatzbrenner nötig macht. Dies kann in gewissen Situationen zu einer erhöhten Einspeisung von elektrischer Energie in das öffentliche Stromnetz führen. Um diesen unerwünschten Effekt zu verhindern müsste die Regelung leicht adaptiert werden:

Nach der Entscheidung den Zusatzbrenner einzuschalten müsste in einem weiteren Schritt überprüft werden, ob die gelieferte thermische Leistung höher als die benötigte ist. In diesem Fall könnte die μ KWK-Anlage entsprechend geregelt werden um keine überschüssige thermische bzw. elektrische Energie in diesem Intervall zur Verfügung zu stellen. Auf diese weitere Komplexitätssteigerung der Regelstrategie wird verzichtet, da der Aufwand im Vergleich zum Nutzen zu hoch ist.

4.2.3. Stromoptimierte Betriebsstrategie mit therm. Speicher

Zur besseren Anpassung von Betriebszeiten und Betriebspunkten der μ KWK-Anlage an den tatsächlichen thermischen und elektrischen Verbräuchen ist eine differenziertere Strategie nötig. In einer ersten Variante wurde dazu eine an den Stromverbrauch angepasste Strategie entwickelt, die je nach aktuellen elektrischen und thermischen Verbräuchen die μ KWK-Anlage ein- und ausschaltet. Dabei wurde keine besondere Aufmerksamkeit auf die Minimierung von Ein- und Ausschaltvorgängen der Anlage gelegt, wodurch die Anzahl der Einschaltvorgänge auf bis zu 12000 pro Jahr gestiegen ist. Da dies die Lebensdauer der Anlage stark verkürzen würde, wird in der überarbeiteten und hier analysierten

stromoptimierten Betriebsstrategie (genauere Erklärung siehe Kapitel 3.3.1.2) der aktuelle Zustand der μ KWK-Anlage berücksichtigt. Dadurch konnten die Einschaltvorgänge auf unter 1000 pro Jahr reduziert werden. Bei optimaler Anlagendimensionierung wird mit dieser Regelstrategie ein im Gegensatz zur nicht überarbeiteten Version nur unwesentlich geringerer Autarkiegrad von 73% erreicht.

Bei Analyse der Abhängigkeit des Autarkiegrades von der gewählten Nennleistung der μ KWK-Anlage (bei konstanter Stromkennzahl von 0,47) wird ein breites Optimum zwischen 3,5kW und 6kW sichtbar (siehe Abbildung 21). Bei Anlagen in diesem Leistungsbereich liegt der erzielte Autarkiegrad jeweils bei etwa 73%. Der Autarkiegrad als Alleinkriterium zur Auswahl der thermischen Nennleistung der μ KWK-Anlage ist somit nicht ausreichend. Bei etwas genauerer Betrachtung führen mehrere Gründe zur Wahl der kleinsten Anlage (3,5kW):

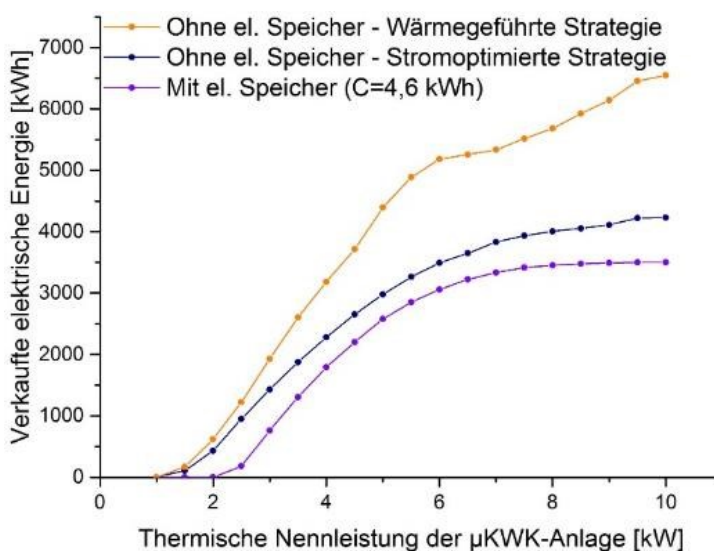


Abbildung 24 - Abhängigkeit der verkauften elektrischen Energie von der thermischen Nennleistung

1. Die geringeren Investitionskosten der kleineren Anlage
2. Bei Verwendung der kleineren Anlage muss weniger elektrische Energie verkauft (Abbildung 24) beziehungsweise eingekauft (Abbildung 27) werden, wodurch bei den heute üblichen Marktbedingungen eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht wird (siehe hierzu Kapitel 5).
3. Anlagen mit höherer Nennleistung sind häufigeren Schaltzyklen (656 bei 6 kW gegenüber 541 bei 3kW) unterworfen und müssen häufiger in Teillastzuständen betrieben werden. Dadurch sinkt der Gesamtwirkungsgrad der hier gewählten μ KWK-Anlage von 95% auf unter 93%.
4. Die Anlage mit 3,5kW thermischer Nennleistung weist über 5100 Volllaststunden auf, während die Anlage mit 6kW nur 3500 Volllaststunden erreicht.

Die Analyse macht deutlich, weshalb eine in diesem Sinne überdimensionierte Anlage einen ebenso guten Autarkiegrad erreicht. Die Anlage läuft häufiger im

Teillastzustand um den aktuellen Bedarf an thermischer und elektrischer Leistung nicht zu überschreiten. Die etwas größere Anlage benötigt geringere Einschaltzeiten des Zusatzbrenners und erzeugt damit eine höhere Gesamtmenge an Wärmeenergie und Strom. Dem Vorteil der geringeren Nutzung des Zusatzbrenners stehen allerdings eine größere Menge an verkauftem Strom und gleichzeitig ein höherer Gesamtbrennstoffbedarf gegenüber. Diese Kombination führt bei den derzeitigen Strommarktbedingungen zu einer Erhöhung der Gesamtkosten.

Zur Bestimmung einer optimalen Größe des thermischen Speichers wurden Simulationen mit variierenden Speichergrößen bei ansonsten konstanten Parametern durchgeführt. Dabei zeigt sich eine etwas andere Abhängigkeit des Autarkiegrades vom Speichervolumen (Abbildung 25) als bei rein wärmegeführter Betriebsstrategie. Der Autarkiegrad steigt stetig bei Erhöhung des Speichervolumens, allerdings flacht die Kurve bei der beispielhaft

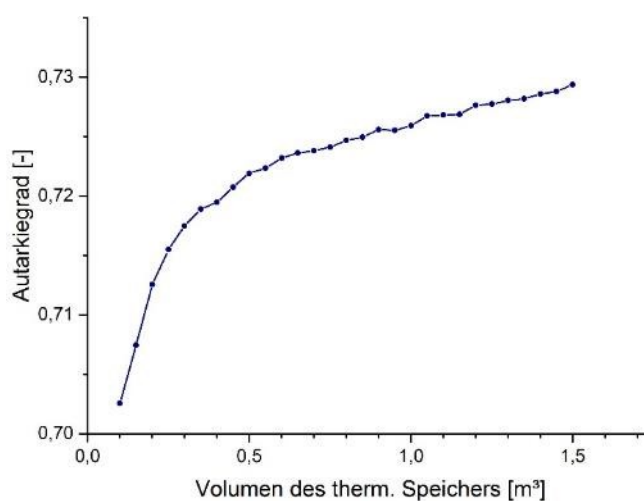


Abbildung 25 - Abhängigkeit des Autarkiegrades vom thermischen Speichervolumen bei stromoptimierter Strategie

dargestellten Anlage und dem gewählten Objekt oberhalb von etwa 500l ab. Bei Verdopplung des Speichervolumens von 500l auf 1000l steigt der Autarkiegrad von 72,19% auf 72,59% an. Diese minimale Verbesserung rechtfertigt in diesem Fall keinen Speicher größer als 500l Fassungsvermögen.

Bei Betrachtung des Erzeugungs- und Verbrauchsverlaufes (Abbildung 26) an einem bewölkten Übergangstag wird der positive Effekt der stromoptimierten Regelungsstrategie gut sichtbar. Die pinke Kurve in Abbildung 26 stellt die aktuelle thermische Leistung der μ KWK-Anlage dar, während die schwarze Kurve die elektrische Verbrauchsleistung (negativ eingetragen) im Tagesverlauf wiedergibt. Die thermische und damit auch die, wegen besserer Lesbarkeit nicht eingezeichnete, elektrische Leistung der μ KWK-Anlage folgen in weiten Bereichen des Tages dem elektrischen Verbrauch, womit die Austauschenergie mit dem elektrischen Netz (hellgrüne Kurve) minimiert wird. Diese Ausrichtung am elektrischen Bedarf des Objektes benötigt eine erhöhte Nutzung des thermischen

Speichers, wie die orange Linie zeigt. Der erlaubte Temperaturbereich des Speichers wird hier zwischen 45°C und 85°C definiert, wodurch gemäß der stromoptimierten Strategie (siehe 3.3.1.2) der Zusatzbrenner nur bei Bedarf und unter 53°C Speichertemperatur eingeschaltet wird. Die durchschnittliche Temperatur im Speicher fällt während dieses Tages einige Male unter diese Marke und führt damit bei thermischen Bedarf zu einem Einschalten des Zusatzbrenners (hellblaue Linie). Das bereits bei der rein wärmegeführten Strategie beschriebene Problem von Übererzeugung thermischer Energie in gewissen Betriebsfällen aufgrund der begrenzten Regelung des Zusatzbrenners ist auch hier sichtbar. Aufgrund der differenzierteren Regelung tritt dieser Fall deutlich seltener ein.

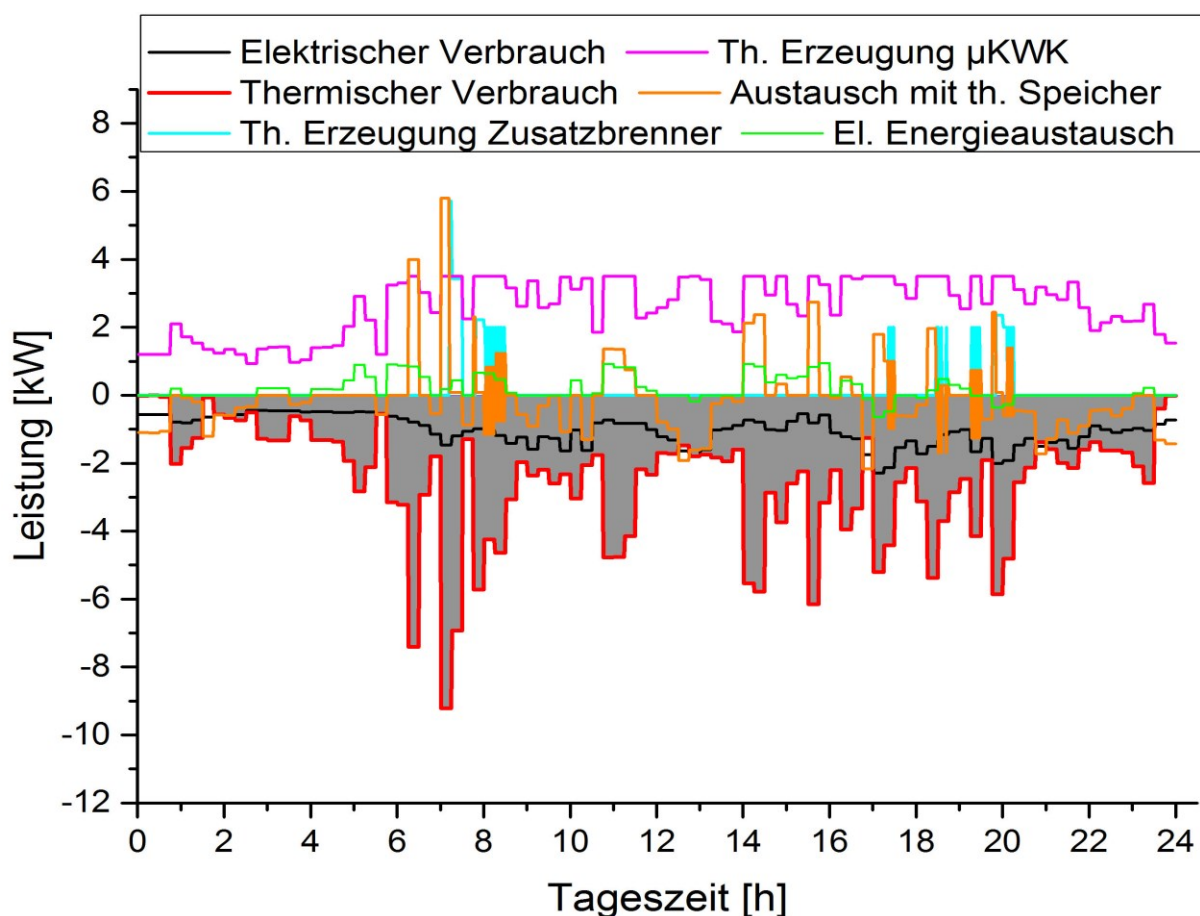


Abbildung 26 - Verlauf von Erzeugung (stromoptimierte Strategie) und Verbrauch an einem bewölkten Arbeitstag während der Übergangszeit

4.2.4. Stromoptimierte Betriebsstrategie mit therm.- und el. Speicher

Um den Autarkiegrad weiter zu erhöhen wird in die simulierte Gesamtanlage ein elektrischer Speicher integriert. Dies macht eine komplexere Regelstrategie notwendig (siehe 3.3.1.3), die als zusätzlichen Entscheidungsparameter den

aktuellen Ladezustand des elektrischen Speichers berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen bei optimaler Auslegung der Anlage eine Erhöhung des erreichbaren Autarkiegrades (Abbildung 21) von 72,3% bei einer stromoptimierten Regelung ohne elektrischen Speicher auf 75,5% mit elektrischem Speicher. Zusätzlich zu dieser Verbesserung des Autarkiegrades ermöglicht die Integration eines elektrischen Speichers eine Verkleinerung der μ KWK-Anlage. Während die optimale Anlage ohne elektrischen Speicher eine thermische Nennleistung von 3,5kW hat, reicht bei einer Anlage mit elektrischem Speicher eine thermische Nennleistung von 2,5kW.

Die Installation eines elektrischen Speichers in ein Energieversorgungssystem mit μ KWK-Anlage auf Basis eines Erdgasverbrennungsmotors ermöglicht eine andere Betriebsstrategie, bei der die Pufferwirkung des elektrischen Speichers genutzt wird. Abgesehen vom bereits erwähnten höheren Autarkiegrad führt diese Strategiewahl auch zu einer höheren Anzahl an Einschaltvorgängen der μ KWK-Anlage. So treten bei einer μ KWK-Anlage mit 3,5kW thermischer Nennleistung ohne elektrischen Speicher 541 Einschaltvorgänge auf, während bei gleicher Anlage mit elektrischem Speicher 888 Einschaltvorgänge nötig sind. Bei Wahl der im vorigen Absatz empfohlenen Anlage mit 2,5kW steigt die Anzahl der Einschaltvorgänge weiter auf 1174. Dies entspricht etwas mehr als drei Starts pro Tag,

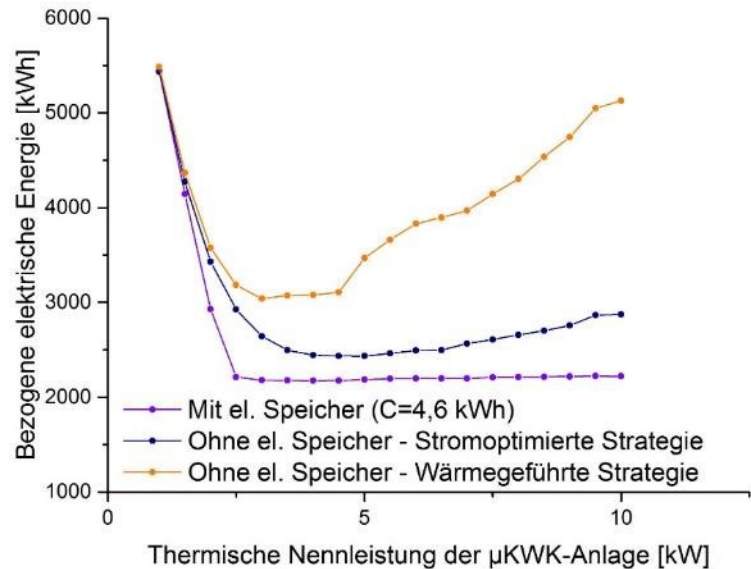


Abbildung 27 - Abhängigkeit der Bezugsenergie von der thermischen Nennleistung der Anlage

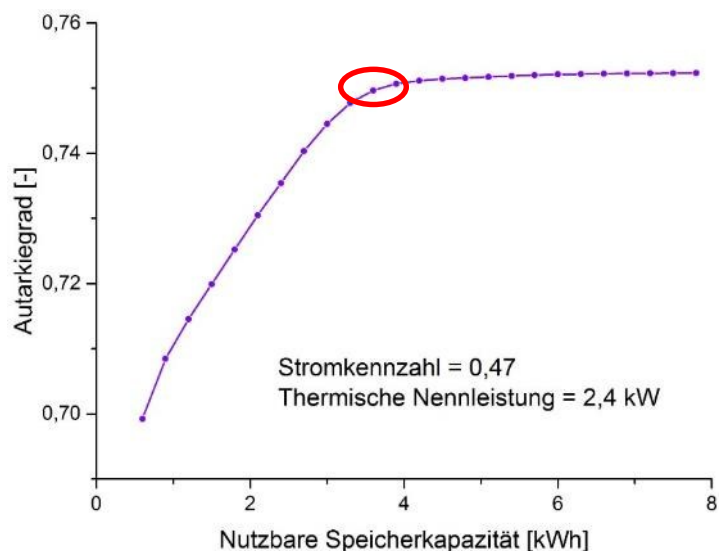


Abbildung 28 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von der nutzbaren elektrischen Speicherkapazität

eine für Erdgasmotoren unproblematische Anzahl.

Die Variation des thermischen Speichervolumens zeigt ähnliche Effekte wie bereits bei den beiden vorherigen Szenarien. Wie in Abbildung 29 gut ersichtlich, steigt der Autarkiegrad bei Vergrößerung des Speichers zwar stetig, aber nur sehr gering an. So wird der Autarkiegrad bei dem gewählten Objekt und der gewählten Anlage durch Verdoppelung des Volumens von 600l auf 1200l um 0,4% von 75,5% auf 75,9% erhöht.

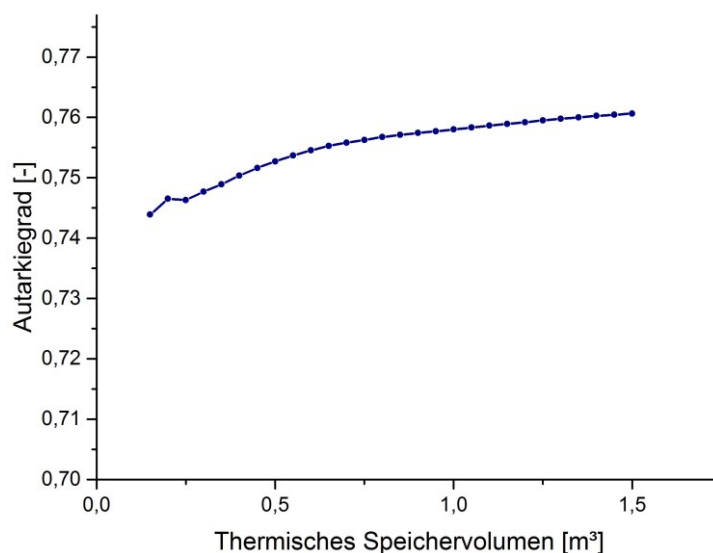


Abbildung 29 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von der therm. Speichergröße bei Anlagen mit el. Speicher

Die Analyse der Ergebnisse bei Variation der elektrischen Speicherkapazität zeigt ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 28) wie bei Variation des thermischen Speichers, allerdings sind die Auswirkungen der Optimierung der elektrischen Speichergröße gravierender. Von kleinen

Kapazitäten weg steigt der erreichte Autarkiegrad mit steigender Speicherkapazität rasant, diese Steigerung flacht aber sehr deutlich ab, wodurch ein Optimum am Beginn dieses Plateaus mit nahezu konstantem Autarkiegrad zu finden ist (Markierung in Abbildung 28). Bei dem gewählten Objekt ist demnach ein elektrischer Speicher mit einer nutzbaren Speicherkapazität von etwa 4 kWh aus

energetischer Sicht ideal. Bei der Auswahl der elektrischen Speicherkapazität ist die Ausnutzung ein wesentliches (wirtschaftliches) Kriterium - durch eine hohe Nutzung sinken die Kosten pro eingespeicherter Energie. Die Nutzung des Speichers wird in Vollladezyklen pro Jahr angegeben, wobei unter einem Vollladezyklus die Entnahme der kompletten

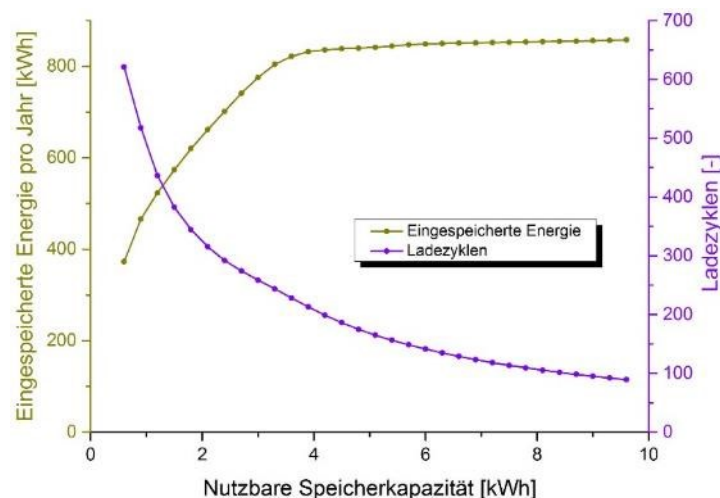


Abbildung 30 - Abhängigkeit der Ladezyklenzahl von der Speichergröße

nutzbaren Speicherkapazität verstanden wird. Dies bedeutet nicht zwangsläufig einen vollständig entladenen Speicher, denn in den meisten Fällen wird der Speicher zwischendurch wieder geladen um eine vollständige Entladung zu verhindern. Die Anzahl der Ladezyklen nimmt mit zunehmender Speicherkapazität des Speichers ab, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Speichers verschlechtert wird. In Abbildung 30 ist zusätzlich zur Anzahl der Vollladezyklen pro Jahr auch die eingespeicherte elektrische Energie in Abhängigkeit der nutzbaren Speicherkapazität dargestellt. Die eingespeicherte Energie zeigt eine sehr ähnliche Abhängigkeit wie der oben beschriebene Autarkiegrad. Die zusätzliche zeitliche Flexibilität durch Nutzung eines elektrischen Speichers wirkt sich positiv auf den erzielten Autarkiegrad aus. Bei zu kleinen Speicherkapazitäten begrenzt dieser die Flexibilität, weshalb der Autarkiegrad geringer ist. Ab einer gewissen Speicherkapazität steigt die eingespeicherte Energie nicht weiter an, wodurch klar ist, dass kein zusätzlicher positiver Effekt erzielt werden kann und demnach auch der Autarkiegrad nicht weiter erhöht wird. Der Vergleich von Abbildung 29 und Abbildung 28 zeigt deutlich die höhere Bedeutung der korrekten Auslegung des elektrischen Speichers. Bei Halbierung der nutzbaren elektrischen Speicherkapazität von 4,2 kWh auf 2,1 kWh wird der Autarkiegrad um über 2 Prozentpunkte verringert, während die Halbierung des thermischen Speichers von 600l auf 300l den Autarkiegrad um weniger als 0,7 Prozentpunkte verschlechtert.

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Regelstrategie mit integriertem elektrischen Speicher zeigt Abbildung 31 den gleichen Tag im Jahr (bewölkter Arbeitstag in der Übergangszeit), wie er schon für die Anlage ohne elektrischen Speicher in Abbildung 26 dargestellt ist. Dabei wird bei Vergleich der Austauschenergie mit dem elektrischen Netz (hellgrüne Linie) der positive Effekt des elektrischen Speichers deutlich. Während ohne elektrischen Speicher an diesem Tag in mehr als 53% der Berechnungsperioden ein Austausch mit dem elektrischen Netz notwendig ist, ist bei Nutzung eines elektrischen Speichers zu keiner Zeit ein Austausch mit dem elektrischen Netz notwendig. Dies bedeutet einen Autarkiegrad von 100% für diesen Tag, der durch Laden (negativ eingezeichnet) bzw. Entladen des elektrischen Speichers möglich wird. Die Erzeugung (pinke Kurve) folgt, soweit die Nennleistung ausreichend ist, dem aktuellen Verbrauch. Der thermische Speicher dient wie schon bei den vorherigen Szenarien als Puffer, um eine lückenlose thermische Versorgung zu ermöglichen. Wie schon bei Szenario 2 beschrieben ist, fällt auch hier die Speichertemperatur zeitweise unter 53°C weshalb der Zusatzbrenner bei Bedarf eingeschaltet wird und ein weiteres Absinken der Speichertemperatur verhindert.

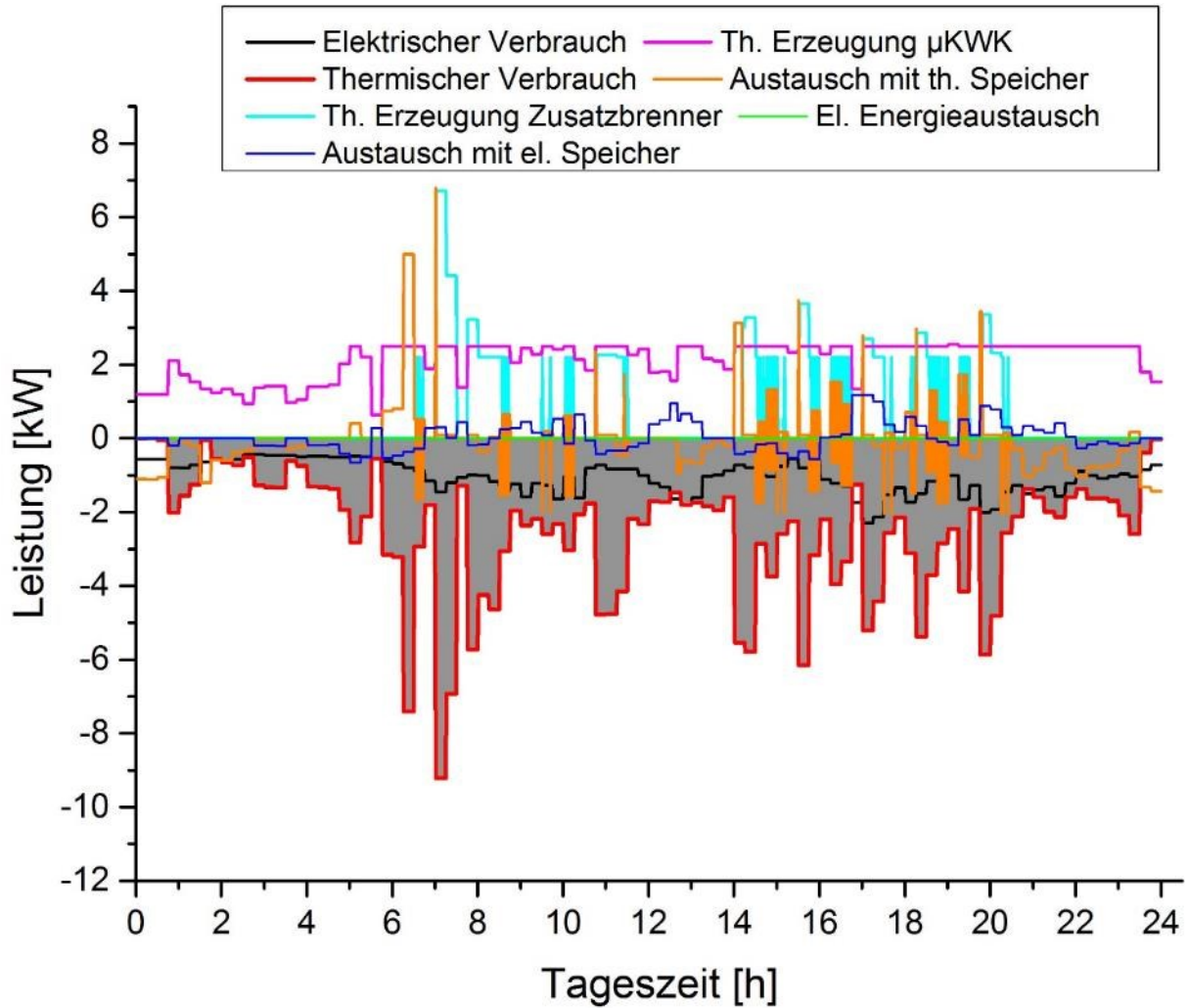


Abbildung 31 - Verlauf von Erzeugung und Verbrauch an einem bewölkten Übergangstag (Werktag) für Szenario 3

Bei der gewählten Anlagendimensionierung ($P_{th}=2,5kW$, Stromkennzahl=0,47, $V_{Speicher}=600l$, $W_{Speicher,el}=4,5kWh$) wird ein Autarkiegrad von 75,45% erreicht. Diese Zahl alleine betrachtet deutet auf erhebliches Verbesserungspotential hinsichtlich Dimensionierung und Strategiewahl hin. Bei genauerer Analyse des Betriebsverhaltens und der Kenngrößen wird ein anderes Bild deutlich. Die grundlegende Prämisse des Betriebes einer μ KWK-Anlage ist die Versorgung des Objektes mit thermischer Energie, weshalb die Anlage nur bei thermischem Energiebedarf betrieben wird.

Der Erzeugungszeitraum wird zwar durch Strategiewahl und Pufferwirkung der Energiespeicher an den

	Sommer	Rest	Gesamt
Anzahl Tage	131	234	365
Stromverbrauch	3110,23 kWh	5906,62 kWh	9016,85 kWh
Bezogene Energie	2182,86 kWh	30,57 kWh	2213,43 kWh
Autarkiegrad	29,82%	99,48%	75,45%

Tabelle 5 - Getrennte Betrachtung des Sommers für Szenario 3

elektrischen Bedarf angepasst, aber bei Fehlen des thermischen Bedarfs ist kein Betrieb der Anlage möglich. Aufgrund des definitionsgemäß (lt. VDI 4655) nicht vorhandenen Heizbedarfes an Sommertagen ist während dieses Zeitraumes nur die Bereitstellung der Wärmeenergie zur Brauchwassererwärmung nötig, wodurch die Einsatzzeiten der μ KWK-Anlage während des Sommers stark verkürzt sind. Die getrennte Betrachtung von Sommertagen und Nicht-Sommertagen in Tabelle 5 macht deutlich, dass außerhalb des Sommers nahezu kein Optimierungspotential mehr gegeben ist. Innerhalb der Heizungsperiode erreicht die optimierte Gesamtanlage mit Szenario 3 einen Autarkiegrad von über 99%. Für eine weitere Verbesserung des Gesamtautarkiegrades bleiben die Möglichkeiten entweder einen Wärmeverbraucher für den Sommer anzuschließen (zum Beispiel Absorptionskältemaschinen), einen zusätzlichen Stromerzeuger (zum Beispiel eine Photovoltaikanlage) in das Gesamtsystem zu integrieren oder die Stromkennzahl der μ KWK-Anlage zu erhöhen.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Anlagenparameter und die daraus folgenden Simulationsergebnisse für jeweils eine ausgewählte Anlage pro Szenario bei Versorgung eines Objektes mit 3 Parteien. Die Auswahl erfolgte mit dem Ziel Autarkiegrad und Jahresvolllaststunden zu maximieren und dabei die Investitionskosten möglichst gering zu halten. Wie in Kapitel 5.3.1 dargestellt, ist dieses Ziel gleichbedeutend mit einer Maximierung der Wirtschaftlichkeit.

Parameter	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Thermische Leistung μ KWK-Anlage	3kW	3,5kW	2,4kW
Elektrische Leistung μ KWK-Anlage	1,41kW	1,645kW	1,128kW
Thermische Leistung Zusatzbrenner	10kW	9kW	10kW
Thermische Speichergröße	600l	600l	600l
Elektrische Speicherkapazität	-	-	5,1kWh
Gesamtstromverbrauch	9017kWh	9017kWh	9017kWh
Autarkiegrad	66,28%	72,31%	75,17%
Bezogene elektrische Energie	3041kWh	2497kWh	2239kWh
Verkaufte elektrische Energie	1930kWh	1877kWh	60kWh
Volllaststunden μ KWK	5604h	5102h	6138h
Einschaltvorgänge μ KWK	62	541	1264

Tabelle 6 - Überblick über Anlagenparameter und Ergebnisse bei einem Objekt mit 3 Parteien

4.3. Ergebnisse für μ KWK-Anlagen mit Biomassevergaser

4.3.1. Objekt- und Anlagendaten

Die Daten der hier simulierten Anlage stammen von der Firma ENTRADE [15], die eine μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser entwickelt hat und sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Im Gegensatz zum Vorgehen bei erdgasbetriebenen μ KWK-Anlagen wird für diesen Anlagentyp die Nennleistung nicht variiert. Stattdessen wird die Anzahl der Parteien des zu versorgenden Mehrparteienhauses variiert, um festzustellen für welche Objekte diese Anlage idealerweise eingesetzt werden sollte. Dabei wird eine Wohnfläche von 110m² pro Partei und ein Heizwärmebedarf von 54,4kWh/(m²a) angenommen.

Anlagenname	ENTRADE E3
Thermische Nennleistung	50 kW
Elektrische Nennleistung	17 kW
Stromkennzahl	0,34
Gesamtwirkungsgrad	81%

Tabelle 7 - Daten der ENTRADE E3

4.3.2. Stromoptimierte Betriebsweise ohne elektrischen Speicher

Zur Variation der Objektgröße wird die Anzahl der Parteien des Mehrparteienhauses und damit Jahreswärmebedarf und Jahresstrombedarf variiert. Dabei wird aufgrund vorher durchgeführter Analysen pro Partei ein thermischer Speicher von 400l angenommen, wodurch die Anlage ohne elektrischen Speicher einen maximalen Autarkiegrad von 55,5% (siehe Abbildung 32) bei Versorgung eines Objektes mit 35 Parteien erreicht. Bei Vergrößerung des Objektes auf über 40 Parteien wird der Autarkiegrad zunächst geringfügig schlechter und steigt bei weiterer Erhöhung wieder an, so erreicht die Anlage bei der Versorgung von 45 Parteien einen Autarkiegrad von 54,8%. Die Versorgung eines größeren

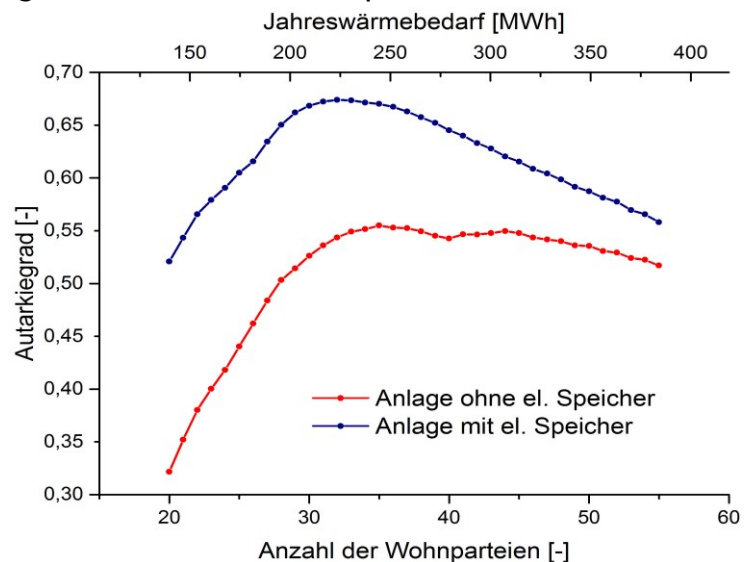


Abbildung 32 - Autarkiegrad in Abhängigkeit der Parteienzahl bzw. dem Jahreswärmebedarf

Objektes bedeutet einen höheren Jahreswärmebedarf und damit eine höhere Zahl an Jahresvolllaststunden der μ KWK-Anlage. Diese in Abbildung 35 dargestellte Abhängigkeit der Jahresvolllaststunden muss bei der Objektauswahl berücksichtigt werden, wodurch die Versorgung eines größeren Objektes bei ansonsten ähnlichen Betriebsdaten immer vorzuziehen ist. Die damit erreichte höhere Nutzung der Anlage und die größere Menge an erzeugter Energie lassen die Stromgestehungskosten sinken (siehe Kapitel 5).

Die Variation des thermischen Speichers für zwei gewählte Objekte - 36 Parteien und 45 Parteien - zeigt ab einer Größe von 100 Liter pro Partei eine relativ lineare Abhängigkeit des Autarkiegrades vom gewählten thermischen Speichervolumen.

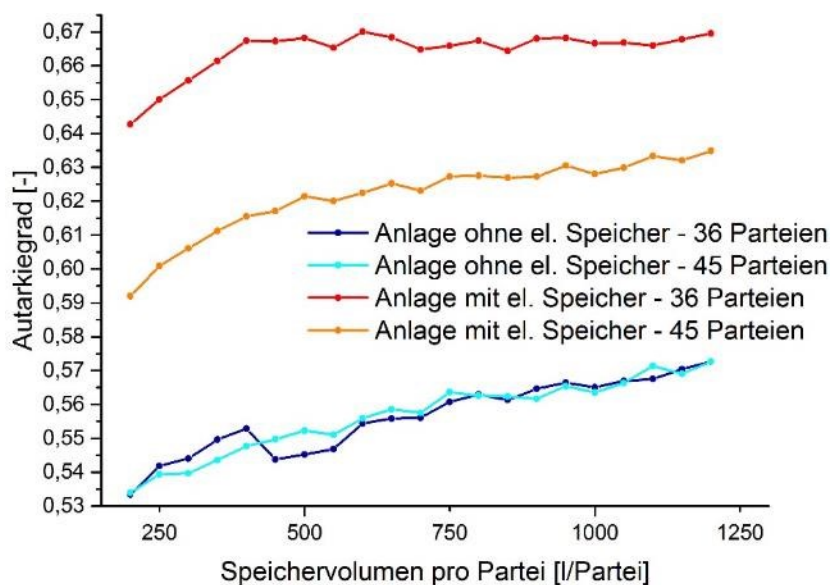


Abbildung 33 - Abhängigkeit des Autarkiegrades vom therm. Speichervolumen bei verschiedenen Szenarien und Objekten

Kleinere thermische Speicher führen bei gewählter Strategie zu

einer Nichtdeckung des thermischen Bedarfs. Einen interessanten Aspekt zeigt die Analyse der Ergebnisse bei einem Mehrparteienhaus mit 36 Parteien in Abbildung 33. Hier sinkt der Autarkiegrad bei Erhöhung des Speichervolumens von 400l/Partei auf 450l/Partei um etwa 1% und steigt bei weiterer Erhöhung wieder an. Es gibt demnach gewisse Kombinationen aus thermischer Speichergröße und zu versorgendem Objekt, die bei der gewählten Regelungsstrategie (siehe Kapitel 3.3.2.1) trotz Vergrößerung des thermischen Speichers zur Verschlechterung des Autarkiegrades führen. Ein bei diesem Anlagentyp wesentlicher Vorteil eines höheren thermischen Speichervolumens ist die Verringerung der notwendigen Einschaltzyklen (162 bei 400l/Partei, 89 bei 800l/Partei), wodurch die Verluste gesenkt werden. Eine weitere Erkenntnis des Vergleiches der beiden blauen Kurven in Abbildung 33 ist die Unabhängigkeit des notwendigen relativen Speichervolumens von der Objektgröße. Die Abhängigkeit des Autarkiegrades vom thermischen Speichervolumen pro Partei ist bei beiden betrachteten Objekten beinahe ident. Bei diesem Ergebnis muss allerdings die Wahl der Lastkurven

erwähnt werden, denn die Referenzlastprofile der VDI 4655 sind für alle Mehrparteienhäuser gleich zusammengesetzt. Es findet lediglich eine Aufskalierung der Verbrauchswerte statt, die relativen Spitzen bleiben unverändert, wodurch der Effekt des Ausmitteln von Verbrauchsspitzen bei größeren Objekten nicht weiter berücksichtigt wird.

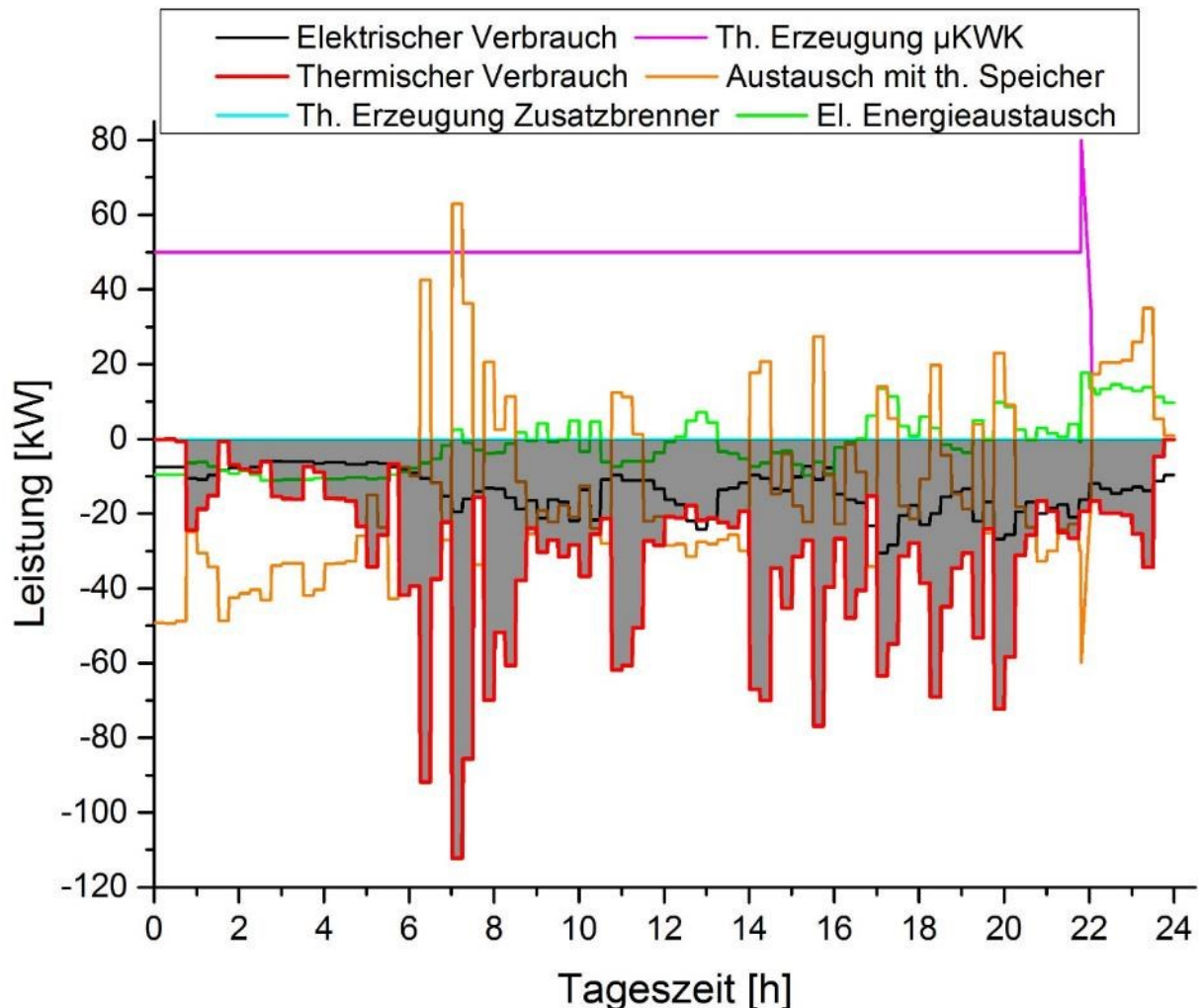


Abbildung 34 - Tagesverlauf bei Biomasseanlage ohne elektrischen Speicher

Die Betrachtung der Leistungsverläufe eines bewölkten Werktages in der Übergangszeit (Abbildung 34) zeigt im Vergleich zu den Verläufen bei einer Erdgasanlage deutlich die Auswirkungen der verschiedenen Anlagencharakteristika wie Regelbarkeit, Anfahrdauer und Anfahrverluste. Während des gesamten Tages findet nur ein Abfahrvorgang statt, während der restlichen Zeit läuft die Anlage im Nennbetrieb (konstante thermische Erzeugung - pinke Linie). Der Abschaltvorgang um etwa 21:30 zeigt eine kurzfristige thermische Leistung der μ KWK-Anlage, die höher als die Nennleistung ist. Im Abschaltvorgang wird der Biogasmotor der Anlage abgeschaltet und die weiterhin produzierten Biogasmengen des Vergasers verbrannt

und damit zur Gänze in thermische Energie umgewandelt. Damit steigt die thermische Leistung über die Nennleistung, während keine elektrische Energie erzeugt wird. Die Speichertemperatur während dieses Tages unterschreitet 55°C nie, weshalb der Zusatzbrenner nicht benötigt und die thermischen Verbrauchsspitzen durch den thermischen Speicher gedeckt werden. Die Betrachtung des nahezu dauerhaft notwendigen elektrischen Energieaustausches mit dem öffentlichen Netz (hellgrüne Kurve) zeigt bereits das vorhandene Potential der Integration eines elektrischen Speichers im Hinblick auf eine weitere Autarkiegradsteigerung.

Tabelle 8 zeigt eine getrennte Auswertung der Betriebsdaten für die Sommertage bei Versorgung eines Mehrparteienhauses mit 36 Parteien. Durch fehlenden Heizbedarf während der Sommertage ist der thermische Energieverbrauch an diesen Tagen auf die Warmwasserbereitung beschränkt. Der geringe Bedarf führt zu stark verkürzten Einschaltzeiten der μKWK -Anlage und damit zu einem sehr geringen Autarkiegrad von 6,45%. Der Autarkiegrad während der Sommertage kann aufgrund des geringen Wärmebedarfs durch die Wahl der Betriebsstrategie nur gering beeinflusst werden.

	Sommer	Rest	Gesamt
Anzahl Tage	131	234	365
Stromverbrauch [kWh]	21495	88931	110426
Bezogene Energie [kWh]	20109	29264	49373
Autarkiegrad [%]	6,45	67,1	55,3

Tabelle 8 - Getrennte Betrachtung des Sommers für ENTRADE E3 ohne el. Speicher

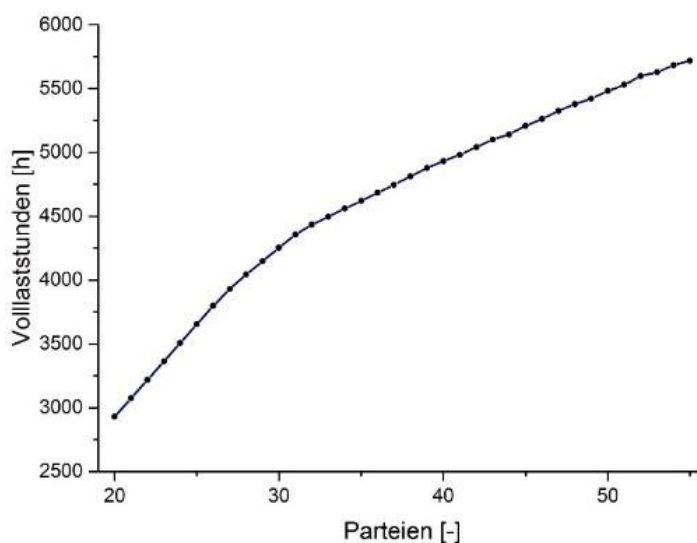


Abbildung 35 - Abhängigkeit der Jahresvolllaststunden von der Parteienzahl

4.3.3. Stromoptimierte Betriebsweise mit elektrischem Speicher

Analog zum Vorgehen für eine Anlage ohne elektrischen Speicher, wird auch für die Anlage mit elektrischem Speicher die Objektgröße variiert um eine (vorerst energetisch) ideale Kombination aus Anlage und Objekt zu ermitteln. Bei diesen Analysen wurde aufgrund von vorhergehenden Simulationsergebnissen für den

thermischen Speicher ein Volumen von 400l pro Partei und für den elektrischen Speicher eine Kapazität von 1,62 kWh pro Partei gewählt. Abbildung 32 zeigt bei der Versorgung eines Mehrparteienhauses mit 32 Parteien den maximalen Autarkiegrad von 67,4%. Im Gegensatz zum vorher betrachteten Szenario ohne elektrischen Speicher ist dieses Maximum recht deutlich ausgeprägt und der erreichte Autarkiegrad sinkt bei einer größeren Anzahl von Parteien deutlicher ab (siehe Abbildung 32). Da thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage und thermischer Jahresenergiebedarf unabhängig vom gewählten Szenario sind liegt eine idente Abhängigkeit der Jahresvolllaststunden von der Objektgröße vor (siehe Abbildung 32). Bei 36 zu versorgenden Parteien sinkt der Autarkiegrad im Vergleich zu einem Objekt mit 32 Parteien von 67,4% auf 66,7%, gleichzeitig steigt die Anzahl der Jahresvolllaststunden von 4433 auf 4683 (+4,2%), weshalb ein Objekt mit 36 Parteien aus energetischer Sicht besser erscheint.

Der Vergleich der Zahl an Einschaltvorgängen bei μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotoren hat eine Erhöhung durch Integration eines elektrischen Speichers gezeigt. Dieser Effekt ist bei μ KWK-Anlagen mit vorgeschaltetem Biomassevergaser nicht gegeben, da hier unabhängig der Integration eines elektrischen Speichers eine idente Betriebsstrategie gewählt wird.

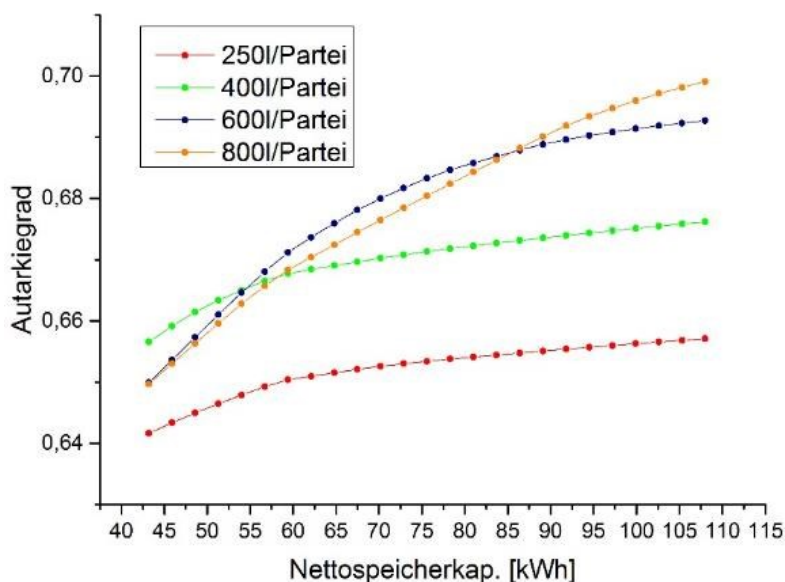


Abbildung 36 - Abhängigkeit des Autarkiegrades von elektrischer Speicherkapazität bei Versorgung von 36 Parteien

Die im Kapitel 4.3.2 beschriebenen Erkenntnisse bei Variation des thermischen Speichers für eine Anlage ohne elektrischen Speicher gelten im Wesentlichen auch für eine Anlage mit elektrischem Speicher. Die Graphen in Abbildung 33 zeigen für beide Szenarien eine nahezu idente Abhängigkeit des Autarkiegrades vom thermischen Speicher, allerdings liegen die Kurven für eine Anlage mit

zusätzlichem elektrischen Speicher um etwa 7 Prozentpunkte bei 45 Parteien bzw. 12 Prozentpunkte bei 36 Parteien höher.

Die Abhängigkeit des Autarkiegrades von der elektrischen Speicherkapazität bei diesem Anlagentyp unterscheidet sich von jener bei einer Erdgasanlage. Wie aufgrund der bisherigen Analysen zu erwarten steigt der Autarkiegrad mit steigender Kapazität stetig an. Im Gegensatz zur Betrachtung der Erdgasanlage existiert keine charakteristische Größe, wo dieser Anstieg plötzlich stark abschwächt. Daher ist die optimale Speichergröße nicht eindeutig durch Abbildung 36 auszuwählen. Einen interessanten Aspekt zeigt die zusätzliche Variation des thermischen Speichers, wie es für einige ausgewählte Größen in Abbildung 36 dargestellt ist. Es wäre aufgrund der vorhergehenden Untersuchungen zu erwarten, dass eine Vergrößerung des thermischen Speichervolumens zu einem Anstieg des Autarkiegrades führt. Dieser Effekt tritt allerdings nur bei größeren elektrischen Speicherkapazitäten auf. So führt eine Verdopplung des thermischen Speichervolumens von 400l/Partei auf 800l/Partei bei einer nutzbaren elektrischen Speicherkapazität von weniger als 59 kWh (bei 36 Parteien) zu einer Verringerung des Autarkiegrades. Ein, in Bezug auf die ausgewählte elektrische Speicherkapazität, überdimensionierter thermischer Speicher in Verbindung mit der gewählten Strategie (siehe Kapitel 3.3.2.2) verringert den Autarkiegrad. Die Dimensionierung der einzelnen Anlagekomponenten muss daher aufeinander abgestimmt sein, um einen optimalen Autarkiegrad erreichen zu können.

In Abbildung 37 sind die Leistungsverläufe der Erzeugung einer μ KWK-Anlage mit Biomassevergaser und die dazugehörigen Verbräuche eines Mehrfamilienhauses mit 36 Parteien an einem bewölkten Übergangstag dargestellt. Ein Vergleich mit den Verläufen für eine idente Anlage ohne elektrischen Speicher in Abbildung 34 zeigt deutlich die Auswirkung des elektrischen Speichers. Die hellgrüne Kurve stellt den Verlauf des Energieaustausches mit dem elektrischen Netz dar, der durch die Pufferwirkung des elektrischen Speichers deutlich verringert werden kann. Die Differenz zwischen aktueller Erzeugung und aktuellem Verbrauch wird soweit möglich durch Ladung und Entladung des elektrischen Speichers ausgeglichen.

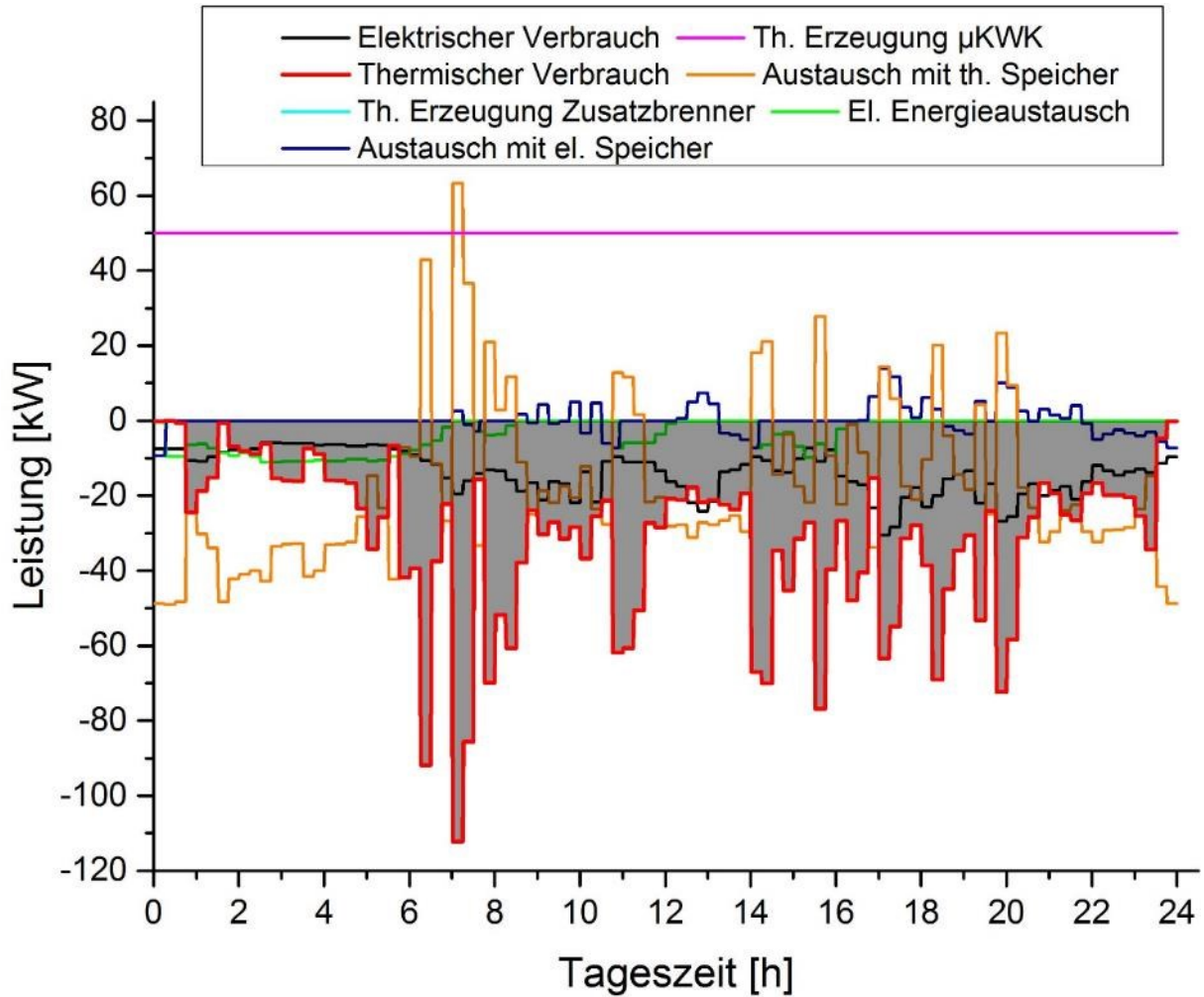


Abbildung 37 - Tagesverlauf der Leistungen bei ENTRADE E3 mit elektrischem Speicher an einem bewölkten Übergangstag

Die Aufschlüsselung der Ergebnisse in Sommertage ohne Heizbedarf und Übergangs- bzw. Wintertage mit Heizbedarf zeigt auch bei diesem Szenario einen eklatanten Unterschied zwischen den Jahreszeiten. Der Vergleich der Autarkiegrade in Tabelle 9 mit den Daten ohne elektrischen Speicher (Tabelle 8) zeigt deutlich den positiven Effekt des elektrischen Speichers sowohl an Sommertagen, als auch an den Tagen mit Heizbedarf. Die Steigerung des Gesamtautarkiegrades um mehr als 13% durch die Pufferwirkung eines elektrischen Speichers fällt deutlich höher aus als bei Anlagen mit Erdgasmotoren. Während bei Erdgasmotoren eine Regelung der Leistung möglich ist, ist bei dieser Anlage aufgrund des

	Sommer	Rest	Gesamt
Anzahl Tage	131	234	365
Stromverbrauch [kWh]	21495	88931	110426
Bezogene Energie [kWh]	16965	17332	34297
Autarkiegrad [%]	21,1	80,5	68,9

Tabelle 9 - Getrennte Betrachtung des Sommers für ENTRADE E3 mit elektrischem Speicher

Biomassevergasers nur der Nennbetrieb möglich, weshalb ein Speicher die einzige Möglichkeit zur Bedienung wechselnder Verbräuche ist und damit eine größere Auswirkung auf den Autarkiegrad hat.

Anlagenparameter und Simulationsergebnisse bei Versorgung eines Objektes mit 36 Parteien mittels ENTRADE E3 sind in Tabelle 10 angegeben. Dabei bedeutet Szenario 1 eine Anlage ohne elektrischen Speicher, während Szenario 2 eine Anlage mit elektrischem Speicher meint. Bei Auswahl der jeweiligen Komponenten wurde wie bereits beschrieben vorgegangen, die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Anlagenkonfigurationen werden in Kapitel 5.3.2 erläutert.

Parameter	Szenario 1	Szenario 2
Thermische Leistung μ KWK-Anlage	50kW	50kW
Elektrische Leistung μ KWK-Anlage	17kW	17kW
Thermische Leistung Zusatzbrenner	98kW	98kW
Thermische Speichergröße	14400l	18000l
Elektrische Speicherkapazität	-	58kWh
Gesamtstromverbrauch	110426kWh	110426kWh
Autarkiegrad	55,28%	66,34%
Bezogene elektrische Energie	49373kWh	37166kWh
Verkaufte elektrische Energie	15094kWh	3420kWh
Volllaststunden μ KWK	4683h	4726h
Einschaltvorgänge μ KWK	162	139

Tabelle 10 - Anlagenparameter und Simulationsergebnisse bei Versorgung eines Objektes mit 36 Parteien mittels ENTRADE E3

5. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Nach den bereits beschriebenen Betrachtungen und Analysen der Betriebsdaten ist eine energetisch optimierte Betriebsweise und Auslegung von μ KWK-Anlage und weiteren Anlagekomponenten möglich. Diese vor allem auf eine Autarkiegraderhöhung fokussierte Vorgehensweise soll ein Hilfsmittel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen sein. Um die Auswirkungen von Strategiewahl, Dimensionierung der Komponenten und Integration eines elektrischen Speichers auf die entstehenden Energieversorgungskosten eines Mehrparteienhauses beurteilen zu können, werden im folgenden Kapitel die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse und deren Ergebnisse beschrieben.

5.1. Annuitätskostenrechnung nach VDI 2067

Die verschiedenen Anlagenkonfigurationen erfordern stark unterschiedliche Investitionskosten zu Beginn des Anlagenlebenszyklus und verursachen verschieden hohe Betriebs-, Wartungs- und Brennstoffkosten während des Betriebs. Um diese über die gesamte Nutzungsdauer der Anlage entstehenden Kosten entsprechend zu berücksichtigen, ist eine dynamische Investitionsrechnung erforderlich. Für Hausinstallationen wird üblicherweise eine Annuitätskostenrechnung durchgeführt, um verschiedene Anlagen über den gesamten Anlagenlebenszyklus zu vergleichen. Mit der in Richtlinie VDI 2067 [2] beschriebenen Investitionsrechnungsmethode kann eine Gesamtannuität berechnet werden. Der Verein Deutscher Ingenieure hat diese Richtlinie herausgegeben, in der die Methode beschrieben und Werte für Anlagenlebensdauer, Zusatzinvestitionen und Instandhaltungskosten angegeben sind. Die berechneten Annuitäten sind jährlich gleichbleibende Zahlungen bzw. Erlöse aus dem Betrieb einer Anlage. Dabei wird der Zeitpunkt des Kapitalflusses ebenso berücksichtigt wie eventuell notwendige Erneuerungsinvestitionen und Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraumes. Zur Berechnung der laufenden Kosten in zukünftigen Betriebsperioden wird ausgehend von den Kosten, die im ersten Jahr angefallen sind, und entsprechenden Preisentwicklungsfaktoren eine Annuität errechnet. Die Gesamtannuität wird aus folgenden Kosten und Erlösen zusammengesetzt:

- Kapitalgebundene Kosten

Die kapitalgebundenen Kosten bestehen aus den Kosten der Anfangsinvestitionen, den Erneuerungsinvestitionen und dem verbliebenen Restwert, wobei für die Berechnung des Restwertes von einer linearen

Abschreibung ausgegangen wird. Damit ergibt sich folgende Formel für die Annuität der kapitalgebundenen Kosten:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - R_W) \cdot a \quad (6)$$

A_0	Anfangsinvestition [€]
$A_1 \dots A_n$	Barwerte der Ersatzinvestitionen [€]
R_W	Restwert der Anlage [€]
a	Annuitätsfaktor [-]

Der Annuitätsfaktor ist abhängig von Zinsfaktor und Betrachtungszeitraum und verteilt die angefallenen kapitalgebundenen Kosten gleichmäßig auf den gesamten Betrachtungszeitraum. Bei der Berechnung der Barwerte der Ersatzinvestitionen und des Restwertes wird mit einem preisdynamischen Barwertfaktor ein vorzugebender Preisänderungsfaktor berücksichtigt.

- Bedarfsgebundene Kosten

Die aufgrund des Betriebes der Anlagen anfallenden Kosten für Verbrauchsgüter werden ausgehend von den Kosten im ersten Betriebsjahr folgendermaßen zu den bedarfsgebundenen Annuitätskosten aufgerechnet:

$$A_{N,V} = A_{V1} \cdot a \cdot b \quad (7)$$

A_{V1}	Bedarfsgebundene Kosten im ersten Betriebsjahr [€/a]
b	Preisdynamischer Barwertfaktor [a]

- Betriebsgebundene Kosten

Kosten für Instandhaltung und Bedienung der Anlage werden nach selbigem Schema zu betriebsgebundenen Kosten zusammengefasst:

$$A_{N,B} = A_{B1} \cdot a \cdot b_B + A_{IN} \cdot a \cdot b_{IN} \quad (8)$$

A_{B1}	Kosten für Bedienung im ersten Jahr [€/a]
A_{IN}	Kosten für Instandhaltung im ersten Jahr [€/a]
b_B	Preisdynamischer Faktor für Bedienung [a]
b_{IN}	Preisdynamischer Faktor für Instandhaltung [a]

- Sonstige Kosten

Zusätzlich zu den betriebsgebundenen Kosten werden nach identem Schema sonstige Kosten während des Betriebes als Annuität der sonstigen Kosten $A_{N,S}$ berücksichtigt.

- Erlöse

Wie schon bei den Kosten während des Betriebes wird auch für die Erlöse eine Annuität $A_{N,E}$ auf Basis der Erlöse des ersten Betriebsjahres berechnet.

Diese fünf Annuitäten werden anschließend zur Gesamtannuität zusammengerechnet:

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S}) \quad (9)$$

Die berechneten Gesamtannuitäten der verschiedenen Anlagekonfigurationen dienen daraufhin als Kennzahlen zum wirtschaftlichen Vergleich. Bei Vergleich von zwei oder mehr Varianten ist jene mit der betragsmäßig geringsten Annuität zu bevorzugen.

Ausgehend von dieser Annuität können als weitere Vergleichskriterien entweder die Stromgestehungskosten oder die Wärmegestehungskosten berechnet werden. Bei Berechnung der Stromgestehungskosten muss die zur Verfügung gestellte Wärmeenergie mit einem entsprechenden Preis als Erlös miteinbezogen werden und anschließend die übrig bleibenden Annuitätskosten durch den Stromverbrauch eines Jahres dividiert werden. Die Stromgestehungskosten müssen mit einem entsprechenden Marktpreis für Endkunden am Strommarkt konkurrieren, um die Anschaffung einer μ KWK-Anlage wirtschaftlich rechtfertigen zu können. Die Berechnung der Wärmegestehungskosten basiert auf demselben Prinzip, allerdings muss der erzeugte Strom als Erlös berücksichtigt und die berechneten Wärmegestehungskosten mit Wärmegestehungskosten bei Versorgung des Objektes mit herkömmlichen Heizungsanlagen verglichen werden.

5.2. Datengrundlage

Da eine μ KWK-Anlage in einem Mehrparteienhaus als Alternative zu einer herkömmlichen Heizungsanlage zu sehen ist, wird zur Annuitätsberechnung ein für Heizungsanlagen typischer Betrachtungszeitraum von 20 Jahren gewählt. Diese Empfehlung stammt ebenso wie eine Abschätzung der Instandhaltungskosten von

Zusatzbrenner und thermischem Speicher aus erwähnter Richtlinie VDI 2067 des Vereins deutscher Ingenieure. Die Quellen der weiteren erforderlichen Daten zur Annuitätskostenberechnung sind in Tabelle 11 aufgelistet. Die verwendeten Preise (siehe Kapitel 5.3) sind Endkundenpreise und inkludieren alle Abgaben, Gebühren und Steuern.

Größe	Quelle
Kosten für μ KWK-Anlagen (Erdgas)	ASUE Marktstudie [70]
Kosten für elektr. Speicheranlagen	Selbstrecherche [61, 71 bis 73]
Kosten für therm. Speicher	Selbstrecherche [74, 75]
Kosten für Zusatzbrenner	Selbstrecherche
Kosten ENTRADE E3	Herstellerinformationen [15]
Gas- und Strompreise	E-Control [76]
Pelletspreise	ProPellets [77], Internetrecherche [78, 79]

Tabelle 11 - Quellen der Daten zur Wirtschaftlichkeitsanalyse

Zusätzlich zu den in Tabelle 11 aufgeführten Kosten für Investition, Wartung und Verbrauchsstoffe ist die Veränderung der Preise für Ersatzinvestitionen, Brennstoffe, Strom und Wartungsdienstleistung entscheidend für die Höhe der Annuitätskosten. Der Preisänderungsfaktor für die nächsten 20 Jahre stellt einen großen Unsicherheitsfaktor dar, da jede Annahme diesbezüglich spekulativ ist. Um trotz dieser Ungenauigkeit aussagekräftige Ergebnisse mittels Wirtschaftlichkeitsbewertung möglich zu machen, wurden zuerst zwei verschiedene Szenarien gerechnet und anschließend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse soll die Parameter mit relevantem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage aufzeigen. Im Referenzszenario wird angenommen, dass alle Kosten mit dem angenommenen Kalkulationszinssatz von 3% jährlich steigen. Die relevanten Kosten sind Energiepreise und Dienstleistungen in diesem Sektor. Da Energiepreise über lange Zeit gesehen in einer gewissen Relation zueinander stehen müssen und keine der betrachteten Energiequellen in mittlerer Zukunft ausgeschöpft sein wird, scheint diese Annahme realistisch zu sein. Dies garantiert wegen der erforderlichen Annahmen dennoch kein Eintreten dieses Szenarios. Die Annahme der gleichen Preisentwicklung der einzelnen Energieträger dient als Referenzszenario. Dem Referenzszenario liegen demnach folgende Parameter zu Grunde:

- Kalkulationszinssatz: 3%
- Jährliche Preisänderung Strom: +3%

- Jährliche Preisänderung Erdgas: +3%
- Jährliche Preisänderung Dienstleistungen: +3%
- Jährliche Preisänderung Pellets: +3%

Im zweiten analysierten Szenario wird die Annahme getroffen, dass die Energieträgerkosten in selbem Ausmaß wie in den letzten 15 Jahren steigen. Zur Beurteilung von Kostenentwicklungen dient im Allgemeinen der Verbraucherpreisindex des jeweiligen Staates, der auch hier als Grundlage verwendet wird. Die Preisveränderungen für Strom, Gas und Dienstleistungen [80, 81] der letzten 15 Jahre werden zu einem gewichteten Mittelwert zusammengefasst, wobei die letzten 5 Jahre mit doppelter Gewichtung in den Mittelwert eingehen. Die Festlegung der Preissteigerungsrate von Pellets erfolgt nach demselben Muster, allerdings geht hier die Datengrundlage [82] nur bis zum Jahr 2006 zurück. Bei der Berechnung wird von einer Selbstfinanzierung ausgegangen, der dabei angesetzte Zinssatz ist aus der Entwicklung der Zinssätze für Staatsanleihen [83] der letzten 15 Jahre abgeleitet. Die so erhaltenen wirtschaftlichen Parameter sind hier aufgelistet, dienen als Alternativszenario zum oben beschriebenen Referenzszenario und werden in Kapitel 5.3 für eine Sensitivitätsanalyse variiert:

- Kalkulationszinssatz: 2,92%
- Jährliche Preisänderung Strom: +1,88%
- Jährliche Preisänderung Erdgas: +4,43%
- Jährliche Preisänderung Dienstleistungen: +2,85%
- Jährliche Preisänderung Pellets: +4,51%

5.3. Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis der Simulationen

Auf Basis der im Kapitel 5.2 angeführten wirtschaftlichen Kenndaten und der Simulationsergebnisse aus Kapitel 4 wird eine Annuitätsrechnung nach VDI 2067 durchgeführt und die Ergebnisse analysiert. Die angeführten wirtschaftlichen Parameter werden im Weiteren variiert, um die Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage analysieren zu können.

5.3.1. Ergebnisse für μ KWK-Anlage mit Erdgasmotor

In diesem Abschnitt wird die Versorgung von zwei verschiedenen Objekten (3 Parteien, 10 Parteien) mit μ KWK-Anlagen wirtschaftlich bewertet. Dabei erfolgt jeweils ein Vergleich von drei Versorgungssystemen:

- Anlagenkonfiguration 1:
Versorgung ohne μ KWK-Anlage: Deckung des Wärmebedarfs mit Erdgas-Brennwertkessel und thermischem Speicher und des Strombedarfs durch das öffentliche Stromnetz.
- Anlagenkonfiguration 2:
Versorgung mit μ KWK-Anlage mit thermischem Speicher und ohne elektrischen Speicher
- Anlagenkonfiguration 3:
Versorgung mit μ KWK-Anlage mit thermischem und elektrischem Speicher.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Therm. Nennleistung der μ KWK-Anlage	-	3,5kW	2,4kW
Therm. Nennleistung des Brennwertkessels/Zusatzbrenners	13kW	10kW	10kW
Therm. Speichergröße	650l	600l	600l
Elektr. Speicherkapazität	-	-	5,1kWh

Tabelle 12 - Anlagenkenndaten für ein Objekt mit 3 Parteien

In Tabelle 12 sind die wichtigsten Anlageparameter für einen wirtschaftlichen Vergleich der drei unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen aufgelistet, die aus den Ergebnissen der Simulationen in Kapitel 4 stammen. Für diese Anlagen werden unter anderem Gesamtannuitätskosten, Stromgestehungskosten und Wärmegestehungskosten berechnet. Für die Berechnung der Stromgestehungskosten bei den Anlagenkonfigurationen 2 und 3 wird die gleichzeitig erzeugte Wärmemenge als Erlös gegengerechnet und dabei mit den Wärmegestehungskosten von Anlagenkonfiguration 1 bewertet. Zur Berechnung der Wärmegestehungskosten ist die Vorgehensweise analog.

Unter Annahme der wirtschaftlichen Parameter für das Referenzszenario, wie sie am Ende von Kapitel 5.2 aufgelistet sind, ergibt die Berechnung die in Tabelle 13 angeführten Annuitätskosten für die drei Anlagenkonfigurationen. Diese Kosten sind für einen Standort in Österreich gültig. In der letzten Zeile der Tabelle werden

jeweils die Kosten für die Anlagenkonfigurationen 2 und 3 mit den Kosten bei Anlagenkonfiguration 1 verglichen.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Gesamtannuitätskosten [€/a]	4436	5473	5431
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	20,40	31,90	31,44
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	12,49	17,48	17,28
Vergleich zu Anlagenkonfiguration 1 [-]	1	1,23	1,22

Tabelle 13 - Ergebnisse der Annuitätskostenrechnung für 3 Parteien bei Referenzszenario

Die Berechnung ergibt die Wärmeversorgung des Objektes mit Brennwertkessel und Stromversorgung durch Bezug aus dem öffentlichen Netz als günstigste Variante. Bei diesem Szenario sind die beiden Varianten mit μ KWK-Anlage um 23% bzw. 22% teurer. Die Analyse der Kostenverteilung auf die einzelnen Teilanlagen und Verbrauchsstoffe zeigt die hohen Anschaffungskosten der μ KWK-Anlage (siehe Abbildung 40) als großen wirtschaftlichen Nachteil im Vergleich zur Versorgung ohne μ KWK-Anlage (siehe Abbildung 38). Die Ersparnisse aufgrund des geringeren Stromeinkaufes und die Erlöse aus dem Stromverkauf sind unter diesen Rahmenbedingungen zu gering, um eine Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage zu ermöglichen.

Der Vergleich von μ KWK-Anlage mit bzw. ohne elektrischen Speicher zeigt, dass eine μ KWK-Anlage mit elektrischem Speicher wirtschaftlicher

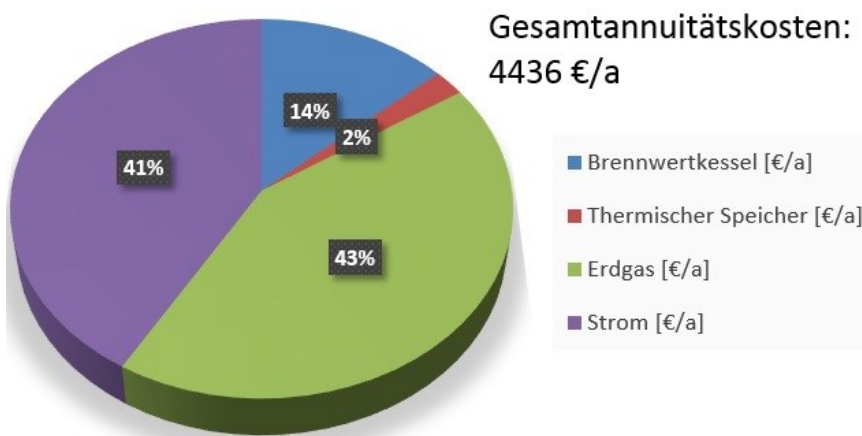


Abbildung 38 - Aufteilung der Annuitätskosten bei Anlagenkonfiguration 1

ist, wobei die Differenz der Annuitätskosten der beiden Varianten beinahe vernachlässigbar ist. Die Investitionskosten der Batterie werden einerseits durch die geringeren Investitionskosten bei einer kleineren μ KWK-Anlage und andererseits durch die geringeren Kosten während des Betriebs ausgeglichen (siehe Kostenverteilung in Abbildung 39 und Abbildung 40).

Für das Alternativszenario mit den angenommenen Preissteigerungsraten der letzten Jahre, wie sie am Ende des vorigen Kapitels angeführt sind, ergeben sich die in

Tabelle 14 angeführten Kosten für die unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen. Dabei zeigt der Vergleich der Kosten für getrennte Versorgung mit Strom und Wärme, dass bei diesem Szenario höhere Gesamtkosten für die Versorgung anfallen. Dies liegt vor allem an der hier angenommenen, höheren Preissteigerungsrate für Erdgas. Aufgrund der geringeren Strompreissteigerung von 1,88% sinkt in diesem Szenario die Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen weiter und eine Anlage mit Batterie ist um 26% teurer als eine getrennte Versorgung. Die veränderten Annahmen verändern das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbewertung einer Batterie kaum. Wie auch im Referenzszenario mit gleichen Preisentwicklungen aller Kosten ist die Anlage mit Batterie geringfügig günstiger als eine Anlage ohne elektrischen Speicher.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Gesamtannuitätskosten [€/a]	4528	5773	5711
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	18,43	35,02	34,34
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	13,78	18,81	18,51
Vergleich zu Anlagenkonfiguration 1 [-]	1	1,27	1,26

Tabelle 14 - Annuitätskosten für ein Objekt mit 3 Parteien bei Alternativszenario

Die Variation der Preisänderungsraten zeigt, dass stärker steigende Erdgaspreise im Vergleich zu den Strompreisen einen negativen Einfluss auf die Wirtschaftlich-

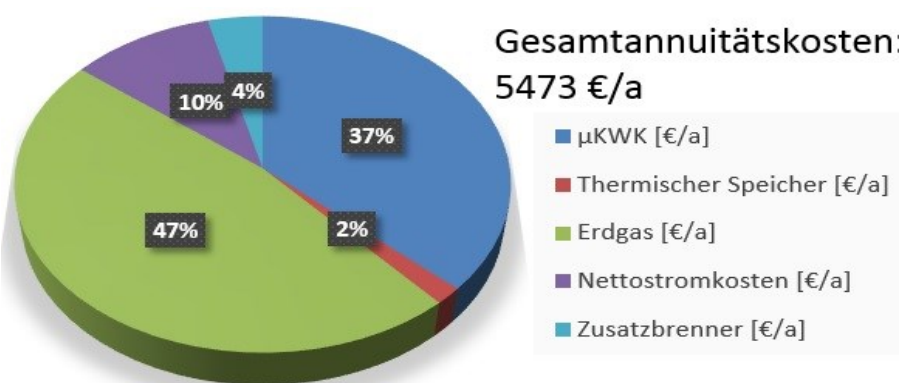


Abbildung 39 - Aufteilung der Annuitätskosten bei Anlagenkonfiguration 2

keit der μ KWK-Anlage haben. So ist Anlagenkonfiguration 3 mit elektrischem Speicher bei einer Steigerung der Erdgaspreise von 1% jährlich und der Strompreise von 5% jährlich nur um 14% teurer als Anlagenkonfiguration 1 ohne μ KWK-Anlage.

Bei Untersuchung der Anlagenkonfigurationen für ein Objekt mit zehn Parteien auf Basis identer Annahmen und Rahmenbedingungen wird deutlich, dass die μ KWK-Anlage wesentlich wirtschaftlicher ist. So ist bei dem Referenzszenario mit wirtschaftlichen Parametern aus Kapitel 5.2 Anlagenkonfiguration 3 nur 14% teurer

als Anlagenkonfiguration 1. Bei Variation der Preisänderungsraten, wie im oberen Absatz beschrieben wird, ist eine μ KWK-Anlage mit

elektrischem Speicher um

lediglich 5% teurer als eine Versorgung ohne μ KWK-Anlage.

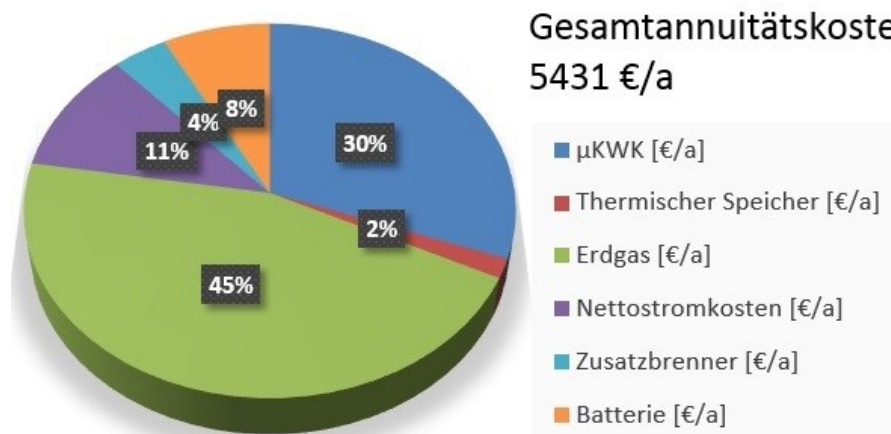


Abbildung 40 - Aufteilung der Annuitätskosten bei Anlagenkonfiguration 3

5.3.2. Ergebnisse für μ KWK-Anlage mit Pelletsvergaser

Auf Basis der gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Österreich und den am Ende von Kapitel 5.2 angenommenen Preisänderungsraten für Referenzszenario und Alternativszenario wird ein Vergleich der drei beschriebenen Anlagenkonfigurationen für eine μ KWK-Anlage mit Biomassevergaser durchgeführt. Dieser Vergleich wird bei Versorgung eines Mehrparteienhauses mit 36 Parteien bzw. 45 Parteien durchgeführt, da aus den Ergebnissen der Simulationen in Kapitel 4.3 eine gute Eignung dieser Objektgrößen hervorgeht. Für eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird Anlagenkonfiguration 1 ohne μ KWK-Anlage mit einem Pelletskessel gerechnet. Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Pelletskessel verfeuert die μ KWK-Anlage der Firma ENTRADE Industriepellets, die im Vergleich zu den sonst üblichen Pellets der Klasse A1 deutlich günstiger sind. Die wichtigsten Anlagekenndaten der drei Anlagenkonfigurationen sind in Tabelle 15 angegeben. Für diese Berechnungen werden Kosten für Anschluss der Anlage und notwendige Zusatzanlagen, wie zum Beispiel Pelletslager geschätzt. Diese Kosten sind stark von den jeweiligen Umgebungsbedingungen des Objektes abhängig. Dieser Umstand bleibt bei dieser Berechnung unberücksichtigt, da ausschließlich Anlagen auf Basis von Holzpellets verglichen werden und somit die Ungenauigkeit an Bedeutung verliert. Bei einem Vergleich mit anderen Energieträgern bzw. zur Betrachtung der absoluten Versorgungskosten muss dieser Umstand berücksichtigt werden.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Therm. Nennleistung der μ KWK-Anlage	-	50kW	50kW
Therm. Nennleistung des Brennwertkessels/Zusatzbrenners	160kW	98kW	98kW
Therm. Speichergröße	12600l	14400l	18000l
Elektr. Speicherkapazität	-	-	58kWh

Tabelle 15 - Anlagenkenndaten für Objekt mit 36 Parteien

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Gesamtannuitätskosten [€/a]	44186	48134	54896
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	18,59	22,16	28,29
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	9,41	10,98	13,70
Annuitätskosten im Vergleich zu Anlagenkonfiguration 1 [-]	1	1,09	1,24

Tabelle 16 - Ergebnisse der Annuitätskostenrechnung für 36 Parteien bei Referenzszenario

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Annuitätskostenrechnung dargestellt, wobei Gesamtannuitätskosten, Stromgestehungskosten und Wärmegestehungskosten verglichen werden. Dabei wird deutlich, dass eine getrennte Strom- und Wärmeversorgung ohne μ KWK-Anlage in Österreich die günstigste Variante darstellt.

Die Verteilung der Annuitätskosten ohne μ KWK-Anlage in Abbildung 41 zeigt deutlich, dass der Großteil der Kosten im laufenden Betrieb anfällt. Die gesamten, durch

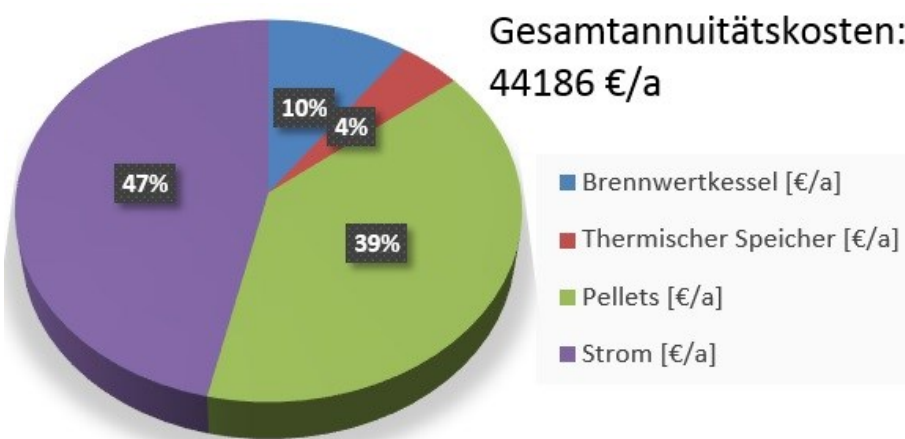


Abbildung 41 - Aufteilung der Annuitätskosten für Anlagenkonfiguration 1

Investitionen verursachten Kosten betragen lediglich 14% der Gesamtkosten.

Diese Verteilung wird bei Anschaffung einer μ KWK-Anlage deutlich verändert, wie Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen. Bei einer μ KWK-Anlage mit thermischem Speicher verursachen die Investitionen 42% der gesamten Annuitätskosten, wobei vor allem die μ KWK-Anlage selbst den Großteil dieser Kosten darstellt. Diese Mehrkosten können durch die verringerten Kosten aufgrund des geringeren Stromzukaufes und die Erlöse aus dem Stromverkauf nicht ausgeglichen werden, weshalb diese Anlagenkonfiguration bei rein wirtschaftlicher Betrachtung ungünstiger ist als eine

Wärmeversorgung mit Pelletskessel und Stromzukauf. Der benötigte Zusatzbrenner ist mit knapp 100kW nur um etwa ein Drittel kleiner dimensioniert als der Kessel bei Versorgung ohne

μ KWK-Anlage. Die Leistung des Zusatzbrenners müsste durch eine Anpassung der Strategiewahl, eventuell in Kombination mit einem Vorhersagemodell des Verbrauchs, verringert werden, um die Investitionskosten der Gesamtanlage weiter zu verringern.

Bei Betrachtung der Kostenverteilung einer μ KWK-Anlage mit elektrischem Speicher zeigt sich ein ähnliches Bild, allerdings sind die Gesamtkosten bei Integration eines elektrischen Speichers höher.

Im Gegensatz zu den Analysen von Erdgas- μ KWK-Anlagen ergibt die Analyse der Annuitätskosten für μ KWK-Anlagen mit Pelletsvergasung die Integration eines elektrischen Speichers als unwirtschaftlich. Diese Abweichung ist mit den verschiedenen Stromeinspeisetarifen zu begründen. Während der Stromverkauf bei

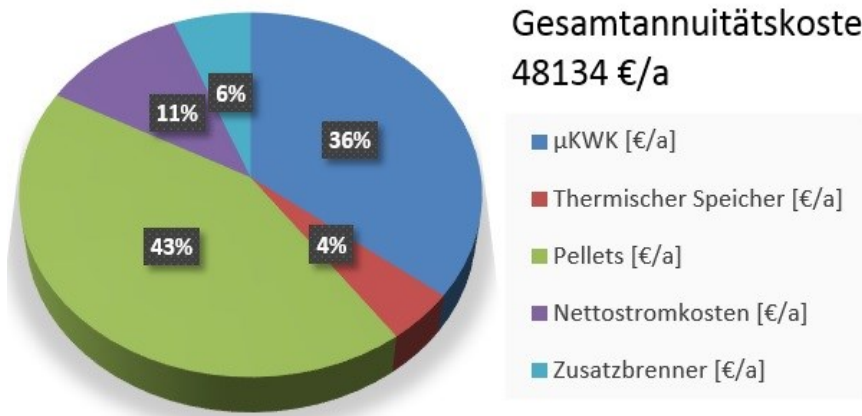


Abbildung 42 - Aufteilung der Annuitätskosten für Anlagenkonfiguration 2

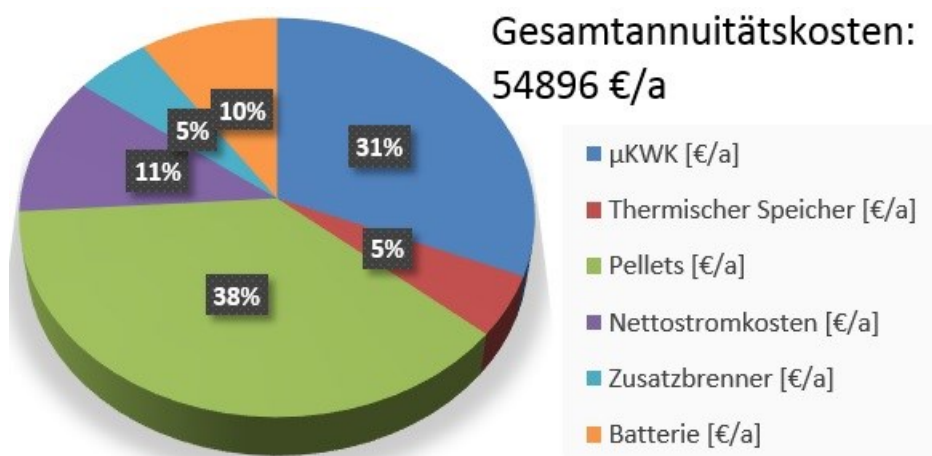


Abbildung 43 - Aufteilung der Annuitätskosten für Anlagenkonfiguration 3

einer Erdgasanlage mit den Großhandelspreisen konkurrieren muss, ist aufgrund der gültigen Ökostrom-Einspeisetarifverordnung [84] für eine Anlage auf Basis von Biomasse in Österreich ein Einspeisetarif von 20 ct/kWh festgesetzt. Dadurch ist der erzielte Vorteil der Autarkiegraderhöhung durch den elektrischen Speicher aus wirtschaftlicher Sicht weniger relevant. Ein weiterer Grund für die Nichtrentabilität des elektrischen Speichers ist der kleinere Markt für Batterien der Größenordnung, wie sie hier benötigt wird und die damit einhergehenden, höheren Investitionskosten. Als letzter Punkt muss erwähnt werden, dass hier die Anlage aufgrund des fehlenden Marktes nicht variiert wurde und daher keine Verkleinerung der μ KWK-Anlage durch Integration eines elektrischen Speichers möglich wird. Damit fällt ein weiterer Vorteil durch den elektrischen Speicher weg und diese Anlagenkonfiguration ist damit die klar unwirtschaftlichste.

Die Ergebnisse der Annuitätsrechnung mit den Annahmen des Alternativszenarios sind in Tabelle 17 angegeben. Dabei zeigt sich, wie bereits bei einer Erdgasanlage, dass in diesem Szenario die wirtschaftliche Attraktivität der μ KWK-Anlage sinkt. Um die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Gesamtkosten zu analysieren, wird anschließend an die Ergebnisse für ein Objekt mit 45 Parteien die durchgeführte Sensitivitätsanalyse beschrieben.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Gesamtannuitätskosten [€/a]	44814	50561	57222
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	16,80	21,99	28,03
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	10,45	12,73	15,38
Annuitätskosten im Vergleich zu Anlagenkonfiguration 1 [-]	1	1,13	1,28

Tabelle 17 - Annuitätskosten für ein Objekt mit 36 Parteien bei Alternativszenario

Bei Simulation der Versorgung eines Objektes mit 45 Parteien ist der erzielte Autarkiegrad vor allem für eine Anlage mit elektrischem Speicher geringer als für 36 Parteien, wie Abbildung 32 darstellt. Demgegenüber steht der Vorteil deutlich höherer Volllaststunden der μ KWK-Anlage. Die Annuitätskosten der drei Anlagenkonfigurationen bei den Annahmen des Referenzszenarios sind in Tabelle 18 angegeben. Wie alle vorhergehenden Berechnungen sind auch diese Ergebnisse für Österreich gültig. Wie bereits bei der Versorgung von 36 Parteien ist die Integration eines elektrischen Speichers wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen. Aufgrund der höheren Volllaststunden bei gleichbleibenden Investitionskosten für die μ KWK-Anlage ist eine μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser bei den gewählten wirtschaftlichen Parametern konkurrenzfähiger, allerdings dennoch um 10% teurer als eine getrennte Versorgung mittels Pelletskessel und öffentlichem Stromnetz. Aufgrund des größeren Objektes ist ein deutlich größerer Zusatzbrenner erforderlich, wodurch höhere Investitionskosten anfallen.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Gesamtannuitätskosten [€/a]	54696	60160	65939
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	18,56	22,49	26,65
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	9,21	10,95	12,78
Annuitätskosten im Vergleich zu Anlagenkonfiguration 1 [-]	1	1,10	1,21

Tabelle 18 - Annuitätskosten für ein Objekt mit 45 Parteien bei Referenzszenario

Der deutsche Energiemarkt unterscheidet sich in vielen Punkten vom Österreichischen sehr stark, die Auswirkungen dieser Unterschiede auf die Wirtschaftlichkeit der analysierten μ KWK-Anlage der Firma ENTRADE werden aufbauend auf entsprechenden Daten zu Strompreisen [85] und Förderungsgegebenheiten [86] im folgenden Abschnitt analysiert. Bei Betrachtung der Annuitätskosten der drei Anlagenkonfigurationen in Tabelle 19 wird im Gegensatz zu den bisher betrachteten Fällen ein Kostenvorteil der μ KWK-Anlage sichtbar. Eine Versorgung mittels μ KWK-Anlage ohne elektrischen Speicher ist um 5% günstiger als eine getrennte Versorgung durch Pelletskessel und Stromnetz. Bei detaillierterer Analyse fallen sofort die deutlich höheren Stromgestehungskosten bei Anlagenkonfiguration 1 in Deutschland auf. Diese hohen Kosten der elektrischen Versorgung eines Hauses sind für die Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen ein wesentlicher Aspekt und führen trotz einer geringeren Einspeisevergütung von knapp über 13ct/kWh zu dieser positiven wirtschaftlichen Bewertung der μ KWK-Anlage.

Anlagenkonfiguration	1	2	3
Gesamtannuitätskosten [€/a]	71455	67540	71391
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	30,63	22,60	25,37
Wärmegestehungskosten [ct/kWh]	11,51	7,96	9,19
Annuitätskosten im Vergleich zu Anlagenkonfiguration 1 [-]	1	0,95	1,00

Tabelle 19 - Ergebnisse der Annuitätsrechnung für ein Objekt mit 45 Parteien in Deutschland

Die verschiedenen Szenarien (Referenzszenario, Alternativszenario) und Strommärkte (Österreich, Deutschland) zeigen teilweise eklatante Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage mit Biomassevergaser. Um die wesentlichsten Parameter zu finden, die diese Unterschiede verursachen, ist eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse erforderlich. In einem ersten Schritt werden dazu die in den beiden Szenarien angenommenen Preisentwicklungsfaktoren

variiert und die Ergebnisse bei Versorgung eines Objektes mit 45 Parteien analysiert. Als Ausgangsgrößen dienen die Annahmen des Referenzszenarios für Österreich, in dem alle Preise um 3% pro Jahr steigen. Eine Erhöhung des angesetzten Kalkulationszinssatzes führt aufgrund der höheren Investitionskosten bei Anschaffung der μ KWK-Anlage zu einer deutlichen Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage. Wird der Preisentwicklungsfaktor für Dienstleistungen bei ansonsten gleichbleibenden Annahmen erhöht, verschlechtert sich ebenso die Wirtschaftlichkeit aufgrund der vergleichsweise höheren Wartungs- und Instandhaltungsaufwände der μ KWK-Anlage. Aufgrund der großen Unsicherheit der Preisentwicklungen von Strom und Pellets wird auf die Analyse der Auswirkungen dieser auf die Wirtschaftlichkeit viel Wert gelegt. Die Ergebnisse der Variation von jeweils einem der beiden bei Fixierung des anderen für die beiden verschiedenen Anlagenkonfigurationen mit μ KWK-Anlage sind in Abbildung 44 dargestellt. Es wird die Veränderung des Vergleichsfaktors

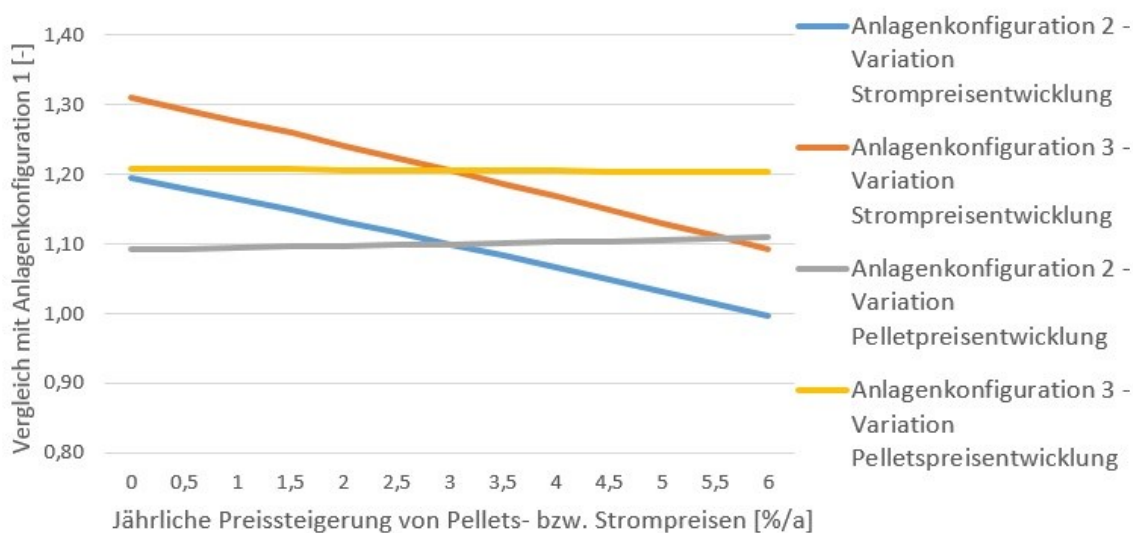


Abbildung 44 - Sensitivitätsanalyse für die Entwicklung von Brennstoff- und Strompreis

mit einer Versorgung ohne μ KWK-Anlage, wie er in den obigen Tabellen jeweils angegeben ist, aufgrund der Variationen analysiert. Die blaue und rote Linie stellen die Abhängigkeit von der Strompreisentwicklung für die beiden Anlagenkonfigurationen dar. Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer getrennten Versorgung wird demnach umso besser, je stärker der Strompreis in Zukunft steigt. Gemäß dieser Berechnungen ist die Installation einer μ KWK-Anlage ab einer jährlichen Strompreissteigerung von knapp 6% wirtschaftlich. Die graue und gelbe Linie zeigen die Abhängigkeiten von der Preisentwicklung der Pellets, wobei angenommen wird, dass die Preise der beiden unterschiedlichen Pelletssorten eine idente Entwicklung nehmen. Dabei wird überraschenderweise deutlich, dass die Preisentwicklung von Pellets eine sehr geringe Auswirkung auf

die Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage hat. Da sowohl bei getrennter Versorgung mit Kessel, als auch bei Versorgung mit μ KWK-Anlage Pellets als Brennstoff eingesetzt werden und

hier der Vergleich zwischen den beiden Versorgungsvarianten dargestellt ist, ist die Veränderung der Pelletspreise kaum relevant. Die μ KWK-Anlage benötigt absolut gesehen klarerweise eine größere Menge an Pellets. Aufgrund der günstigeren Preise der hier verwendeten Industriepellets

Parameter	Wirkung
Höhere Preissteigerung Strom	+++
Höhere Preissteigerung Pellets	-
Höherer Kalkulationszinssatz	--
Höhere Preissteigerung Dienstleistung	--
Verhältnis Stromkosten/Pelletskosten	+++
Einspeisetarif für Strom aus Biomasse	++

Tabelle 20 - Einfluss von wirtschaftlichen Parametern auf die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage

ergibt sich für die absoluten Kosten für Pellets pro Jahr ein nahezu identer Wert. Daher ist eine Preisveränderung der Pellets zwar für die absoluten Kosten der Versorgung relevant, allerdings nicht für den Vergleich zwischen getrennter Versorgung durch Pelletskessel und μ KWK-Anlage mit Pelletsvergaser. In Tabelle 20 sind die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage im Vergleich zu einer Versorgung mit Pelletskessel qualitativ zusammengefasst.

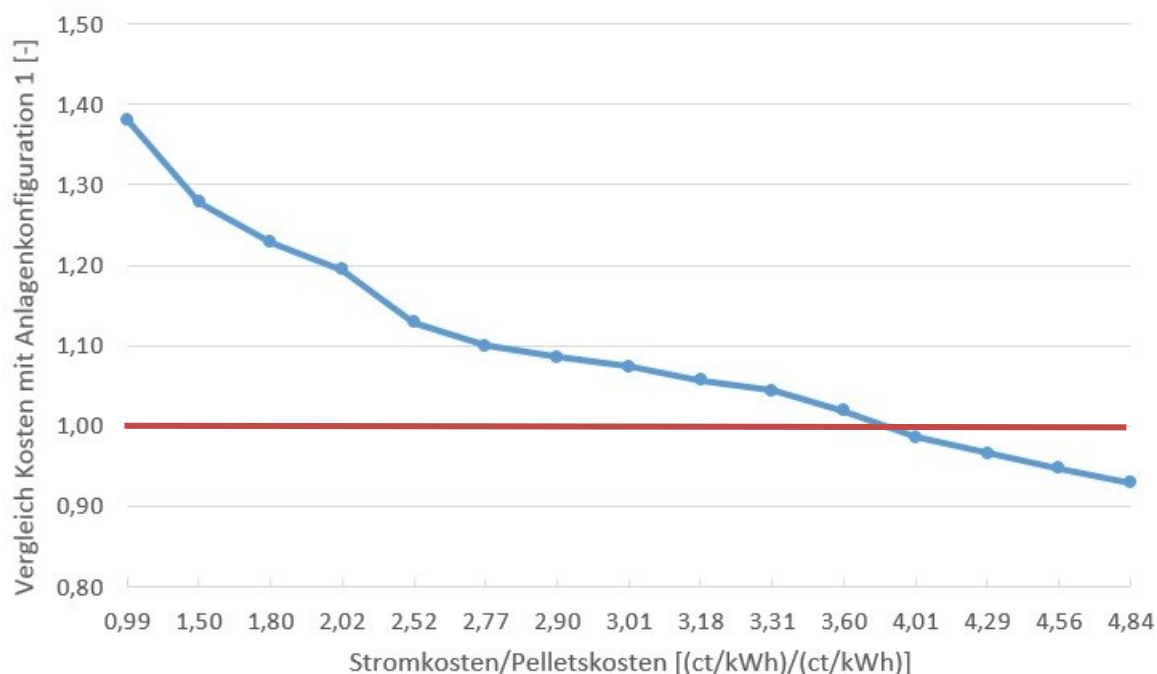


Abbildung 45 - Abhängigkeit vom Verhältnis der spezifischen Energiekosten bei 45 Parteien

Der Vergleich zwischen einem Einsatz in Deutschland in Tabelle 19 und Österreich in Tabelle 18 zeigt einen deutlichen Unterschied und den deutschen Markt als

wesentlich attraktiver. Die Unterschiede zwischen diesen beiden Märkten sind einerseits die höheren Strompreise in Deutschland und andererseits die unterschiedlichen, gesetzlich zugesicherten Einspeisetarife für Biomasse. Der Einspeisetarif liegt in Österreich mit 20 ct/kWh höher als in Deutschland (13,66 ct/kWh). Diese Tatsache hilft den Einsatz einer μ KWK-Anlage in Österreich wirtschaftlicher zu machen, reicht aber wie oben gezeigt nicht aus, um im Vergleich mit einer getrennten Energieversorgung günstiger zu sein. Der deutlich höhere Strompreis für den privaten Endkunden in Deutschland (Netzebene 7) macht eine μ KWK-Anlage mit vorgeschaltetem Biomassevergaser wirtschaftlich. Da bei den Pelletspreisen kaum Unterschiede bestehen ist das Verhältnis zwischen den spezifischen Energiekosten (jeweils in ct/kWh angegeben) von Strom und Pellets in Deutschland höher. Die Analyse zeigt dieses Verhältnis als wesentlich für die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage in einem Markt. Während dieses Verhältnis in Deutschland aktuell bei 4,56 liegt, beträgt dieselbe Kennzahl in Österreich lediglich 2,76. Abbildung 45 zeigt aufbauend auf den Simulationen und Berechnungen für den österreichischen Markt die Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage vom Verhältnis der spezifischen Energiepreise. Die Anlage ist ab einem Verhältnis von 3,8 im Vergleich mit getrennter Versorgung auf Basis eines Pelletskessels wirtschaftlich.

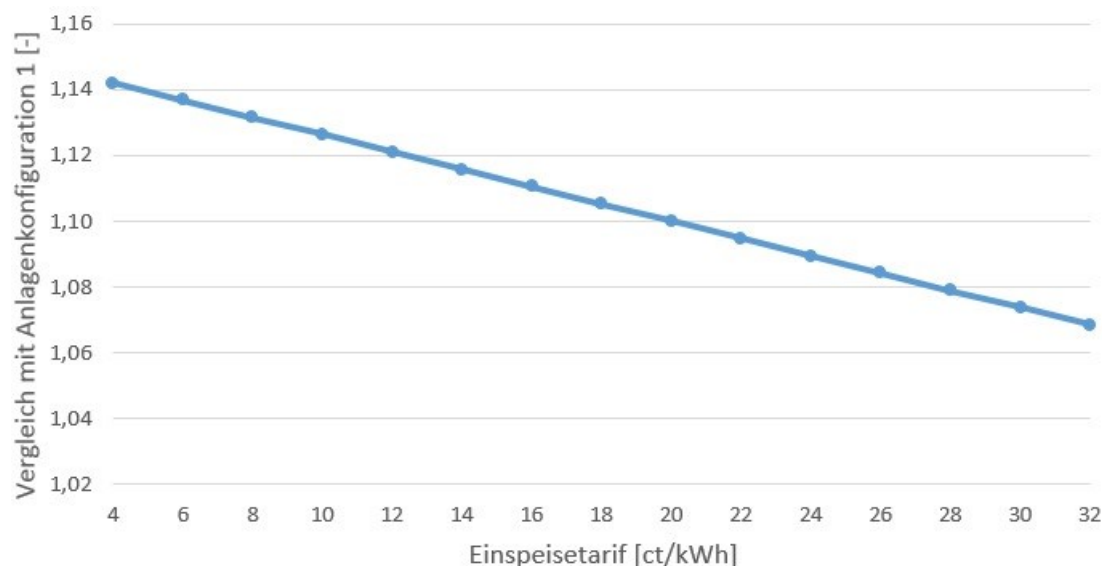


Abbildung 46 - Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit vom garantierten Stromeinspeisetarif für die Versorgung eines Objektes mit 45 Parteien in Österreich

Ein weiterer Einflussparameter sind die erzielten Erlöse aus dem Verkauf von elektrischer Energie. Wie bereits erwähnt sind sowohl in Deutschland, als auch in Österreich die Einspeisetarife für Strom aus Biomassekleinanlagen gesetzlich fixiert und garantiert. Um den Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen zu

analysieren wird der Einspeisetarif auf Basis der Rahmenbedingungen in Österreich variiert. In Abbildung 46 ist jedoch auch bei Einspeisetarifen jenseits von 30 ct/kWh eine getrennte Versorgung günstiger. Dabei wird bei allen Einspeisetarifen die, auf Erhöhung des Autarkiegrades ausgelegte und in Kapitel 3.3.2 beschriebene, Strategie angewendet. Ab einem Einspeisetarif von größer 23 ct/kWh sind die Stromgestehungskosten von einer μ KWK-Anlage ohne elektrischen Speicher überschritten, weshalb eine Autarkiegraderhöhung aus wirtschaftlicher Sicht nur in gewissen Grenzen sinnvoll ist.

Um einen wirtschaftlichen Betrieb einer μ KWK-Anlage gewährleisten zu können, müssen entweder Stromendkundenpreis oder Einspeisetarif oberhalb der Stromgestehungskosten der μ KWK-Anlage liegen. Wenn zumindest eine dieser beiden Voraussetzungen erfüllt ist, ist ein wirtschaftlicher Betrieb bei optimalem Anlagenbetrieb möglich. Liegt der Strompreis für den Endkunden auf Netzebene 7 oberhalb des geförderten Einspeisetarifs für Strom aus Biomasse, so ist eine Optimierung des Autarkiegrades wirtschaftlich sinnvoll. In diesem Fall ist die Ersparnis durch Selbstverbrauch höher als der Erlös durch Verkauf des Stromes. Ist hingegen der Einspeisetarif höher als der Stromendkundenpreis, so ist der Verkauf des gesamten erzeugten Stromes die wirtschaftlichste Variante. In so einem Fall ist der Erlös bei Verkauf höher als die Ersparnis bei Eigenverbrauch, weshalb ein Eigenverbrauch des Stromes wirtschaftlich gesehen ungünstig ist. In Abbildung 47 sind diese 3 Bereiche eingezeichnet, wobei Stromgestehungskosten von 22,6 ct/kWh, wie sie bei der Versorgung eines Objektes mit 45 Parteien auftreten, als Grundlage eingezeichnet sind. Bereich I kann demnach unabhängig der Betriebsstrategie keine positive wirtschaftliche Bewertung erzielen, da die Stromgestehungskosten der μ KWK-Anlage sowohl den Endkundenpreis, als auch den Einspeisetarif übersteigen. Bereich II kennzeichnet jenen Bereich, in dem durch Optimierung des Autarkiegrades ein wirtschaftlicher Betrieb der μ KWK-Anlage möglich ist. In Bereich III hingegen ist der vollständige Verkauf des erzeugten Stromes die wirtschaftlichste Strategie. Die beiden eingezeichneten Punkte zeigen die Marktbedingungen in Deutschland (blau) und Österreich (rot). Damit wird auf einen Blick sichtbar, dass in Österreich aufgrund der Marktbedingungen kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Demgegenüber ist in Deutschland durch Verbesserung des Autarkiegrades, wie es in den Simulationen dieser Arbeit gezeigt wird, ein wirtschaftlicher Betrieb der μ KWK-Anlage möglich. Bei Untersuchung anderer Märkte und Einzeichnen der jeweiligen Bedingungen in die Grafik muss berücksichtigt werden, dass in anderen Märkten üblicherweise die Stromgestehungskosten der μ KWK-Anlagen ebenso verschieden sind. Dies führt zu einer Verschiebung der Grenzen zwischen den drei Bereichen in Abbildung 47.

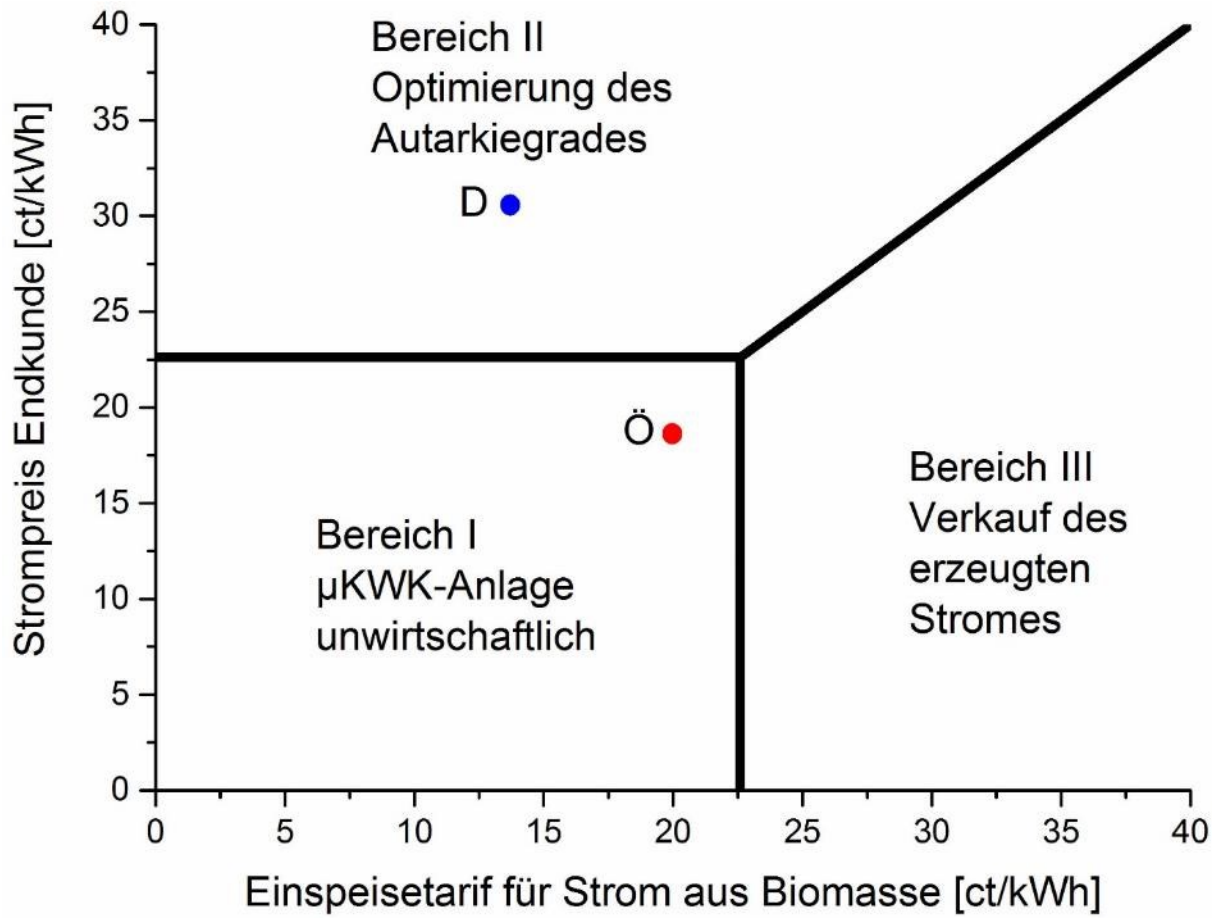


Abbildung 47 - Wirtschaftlichste Strategie je nach Strommarkt

6. Allgemeine Anlagendimensionierung

Aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Simulationsergebnisse kann abhängig von Objektgröße, Regelstrategie und Anlagenkonfiguration (mit bzw. ohne elektrischen Speicher) eine energetisch optimale Anlagengröße für μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotor ausgewählt werden. Üblicherweise stehen während der Planung einer solchen Anlage keine detaillierten Verbrauchscharakteristiken des Objektes zur Verfügung, weshalb keine ausgeprägten Simulationen durchgeführt werden können. Unter anderem deshalb ist es ein Ziel dieser Arbeit einfache Zusammenhänge zu finden, die es erlauben eine energetisch sinnvolle Dimensionierung der Anlage auf Basis weniger Daten vorzunehmen. Mit den, aus den durchgeführten Simulationen und Analysen abgeleiteten, Formeln soll kein absolutes Auslegungsoptimum bestimmt werden, vielmehr dienen sie dazu mit wenigen, üblicherweise gegebenen Informationen auf einfache Art und Weise eine gute Dimensionierung der Gesamtanlage zu ermöglichen. Grundlage zur Findung dieser Zusammenhänge sind Simulationen der Versorgung von Objekten verschiedener Größe. Dabei handelt es sich um Mehrparteienhäuser von 3 bis 15 Parteien. Die Wohnungen weisen jeweils eine Fläche von 110m^2 und einen Heizwärmebedarf von $54,4\text{kWh}/\text{m}^2$ auf, dies entspricht dem erlaubten Maximum für Neubauten [87]. Für jedes dieser Objekte werden sowohl Nennleistung der μ KWK-Anlage und des Zusatzbrenners, als auch Größe von thermischem und elektrischem Speicher variiert. Anschließend werden auf Basis dieser Simulationen jeweils energetisch günstige (hoher Autarkiegrad, wenig Austauschenergie mit dem öffentlichen Stromnetz) Anlagendimensionierungen verglichen. Dabei werden bezogene Größen generiert, um einen Vergleich der Betriebsdaten zwischen den verschiedenen Objekten zu ermöglichen. So wird beispielsweise die Größe des thermischen Speichers durch die Anzahl der Parteien dividiert. Im letzten Schritt werden generell gültige Zusammenhänge gesucht, die mittels weniger Parameter die Auslegung der Gesamtanlage auf Basis der Objektdaten ermöglichen.

Bei diesen Simulationen ist das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Nennleistung der μ KWK-Anlage (Stromkennzahl) mit 0,47 fixiert. Dies ist ein realistischer und gleichzeitig guter Wert für moderne μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotoren. Generell gilt, dass eine höhere Stromkennzahl einen besseren Autarkiegrad ermöglicht. Dieser Zusammenhang gilt insbesondere für moderne Wohnhäuser mit geringem Wärmebedarf und hohem Strombedarf.

6.1. Formeln für die Auslegung eines Gesamtsystems

Im folgenden Kapitel sind die nach der einleitend beschriebenen Vorgehensweise generierten Formeln für ein System mit und ohne elektrischen Speicher getrennt angeführt. Anschließend wird, ausgehend von den Simulationsergebnissen, die Herleitung dieser Formeln erläutert.

6.1.1. System ohne elektrischen Speicher

Ausgangspunkt der Auslegung ist die Anzahl der Parteien des Objekts und der mittels VDI 4655 daraus ermittelte Jahreswärmebedarf. Davon ausgehend wird in einem ersten Schritt (Gesamtablauf der Auslegung siehe Abbildung 48) die thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage nach Formel (10) bestimmt. Im nächsten Schritt wird die nötige thermische Nennleistung des Zusatzbrenners mit Formel (11) festgelegt. Abschließend wird ein energetisch sinnvolles Volumen für den thermischen Speicher aus der thermischen Nennleistung des μ KWK-Anlage mittels Formel (12) bestimmt.



Abbildung 48 - Vorgehensweise bei der Auslegung eines Systems ohne elektrischen Speicher

$$P_{Th,KWK} = \frac{Q_{Ges}}{(4500 \dots 5300)} \quad (10)$$

$$P_{Th,ZB} = (1,5 \dots 2) \cdot P_{Th,KWK} \quad (11)$$

$$V_{Speicher} = (150 \dots 250) \cdot P_{Th,KWK} \quad (12)$$

Q_{Ges} ... Gesamtjahreswärmeverbrauch [kWh]

$P_{Th,KWK}$... Thermische Nennleistung der μ KWK – Anlage [kW]

$P_{Th,ZB}$... Thermische Nennleistung des Zusatzbrenners [kW]

$V_{Speicher}$... Volumen des therm. Speichers [L]

In Abbildung 49 ist der Autarkiegrad in Abhängigkeit des Quotienten aus Gesamtjahresverbrauch dividiert durch μ KWK-Nennleistung für verschiedene Parteienanzahlen dargestellt. Für diese Darstellung wurde exemplarisch eine Speichergröße von 160l pro Partei gewählt. Wie bereits in Kapitel 4.2 gezeigt, ist der Einfluss der Speichergröße relativ gering und diese Grafik ist für andere Speichergrößen nahezu ident. Bei allen

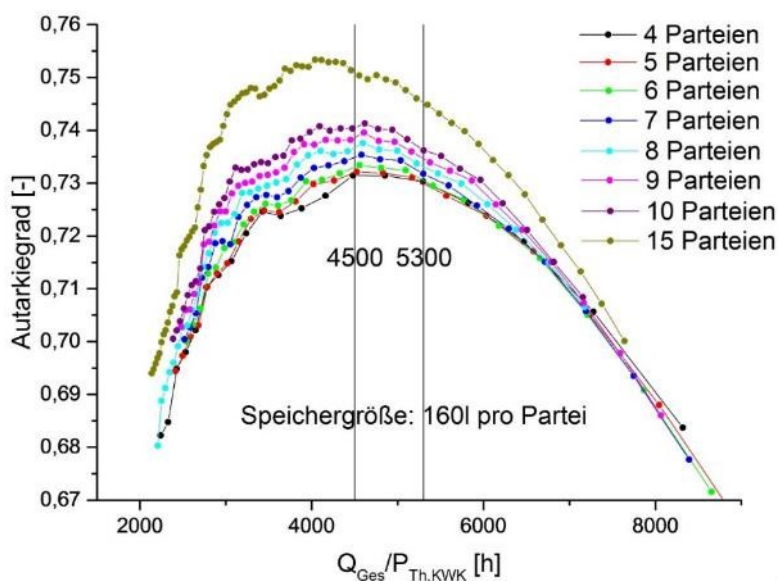


Abbildung 49 - Auslegungsgrundlage für die μ KWK-Nennleistung bei Szenario 2

simulierten Objekten zeigt die Abhängigkeit des Autarkiegrades von der gewählten μ KWK-Nennleistung (siehe Abbildung 49) ein mehr oder weniger ausgeprägtes Plateau mit nahezu konstantem Autarkiegrad. Idealer Auslegungspunkt ist dabei das rechte Ende des jeweiligen Plateaus, da dies eine möglichst kleine Anlage bei hohem Autarkiegrad zur Folge hat. Dies bedeutet sowohl geringe Investitionskosten aufgrund der kleineren Anlage, als auch geringe Betriebskosten aufgrund des hohen Autarkiegrades. Auf Grundlage dieser Auswertung wird Formel (10) abgeleitet, wobei der dort angegebene Bereich für den Quotienten mittels zweier vertikaler Linien in Abbildung 49 markiert ist. Dabei gilt zu beachten, dass dieser Quotient möglichst groß gewählt werden sollte, da dies einer kleinen Anlage entspricht.

Der Weg zur Formel (11) für die Auslegung der thermischen Nennleistung des Zusatzbrenners ist in Abbildung 50 exemplarisch für ein Objekt mit 7 Parteien dargestellt. Hier ist einerseits der Autarkiegrad in Abhängigkeit des Quotienten aus Gesamtjahresverbrauch und thermischer Nennleistung der μ KWK-Anlage (schwarz) und andererseits die jeweils maximal benötigte thermische Leistung des Zusatzbrenners bezogen auf die thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage (rot) dargestellt. Die Maximalleistung ist die höchste, kurzfristig auftretende Differenz zwischen aktuellem Bedarf und thermischer Nennleistung der μ KWK-Anlage. In dem gewählten Beispiel in Abbildung 50 wird die thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage aufgrund von Abbildung 49 durch den Quotienten $Q_{Ges}/P_{Th,KWK}=5035$ bestimmt. Nun wird an den Schnittpunkt zwischen rotem Graph und der

ingezeichneten vertikalen Linie eine horizontale Linie gelegt. Am Schnittpunkt dieser Linie mit der rechten Ordinate kann der Faktor für die Auslegung des Zusatzbrenners abgelesen werden. Das bedeutet die Nennleistung des Zusatzbrenners muss für gewähltes Beispiel das 1,8-fache der thermischen Nennleistung der μ KWK-Anlage betragen. Eine analoge Durchführung für andere Objektgrößen zeigt einen bei den gewählten Objekten generell gültigen Wert von 1,5-2, wie Formel (11) darstellt.

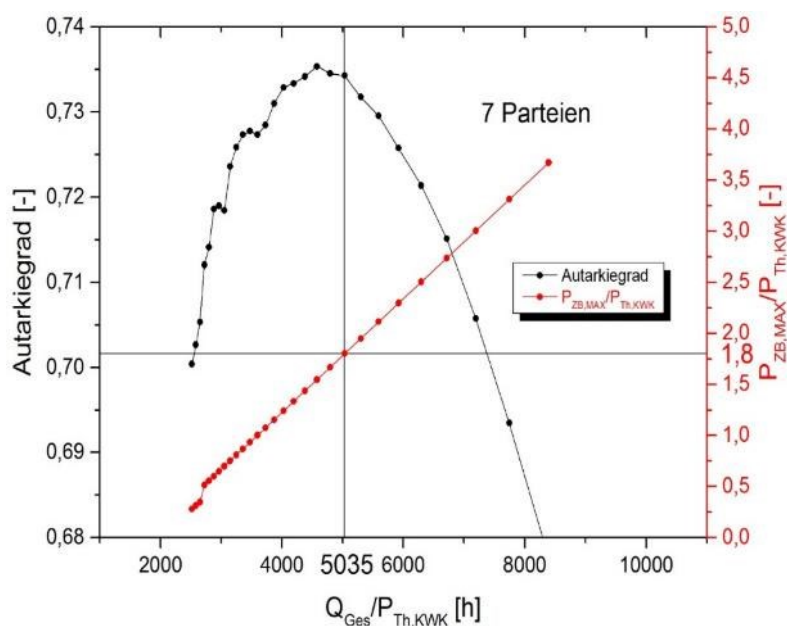


Abbildung 50 - Auslegungsgrundlage für die Zusatzbrennerleistung bei Szenario 2

Durch Variation des thermischen Speichervolumens bei ansonsten konstanten Anlageparametern für verschiedene Objekte kann, wie in Abbildung 51 dargestellt, die Abhängigkeit des Autarkiegrades von der thermischen Speichergröße analysiert werden. Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Objekten zu ermöglichen, wird das Speichervolumen auf die thermische Nennleistung der μ KWK-Anlage bezogen, die bereits im ersten Schritt der Auslegung dimensioniert wird. Die Ergebnisse in Abbildung 51 können exemplarisch für ein Objekt mit 5 Parteien folgendermaßen interpretiert werden:

Bei Erhöhung des thermischen Speichers von 150l auf 200l pro kW thermischer Nennleistung (+33%) steigt der Autarkiegrad um 0,27 Prozentpunkte, während die Autarkiegraderhöhung bei einer weiteren Vergrößerung des Speichers um 50l/kW nur noch 0,13 Prozentpunkte beträgt. Dies zeigt, dass eine weitere Vergrößerung des thermischen Speichers nur noch unwesentliche Verbesserungen des Autarkiegrades mit sich bringt. Zusätzlich ist auch der Einfluss der thermischen Speichergröße auf den Bezug und Verkauf von elektrischer Energie nur noch sehr gering. Die Vergrößerung des thermischen Speichers von 150 auf 250l/kW verringert allerdings die benötigten Anfahrvorgänge der μ KWK-Anlage um 20%, mit günstigen Auswirkungen auf Anlagenlebensdauer und Anfahrverluste. Aus diesen Gründen scheint ein Volumen des thermischen Speichers von 150-250l/kW sinnvoll. Generell

zeigen die erhaltenen Simulationsergebnisse nur einen sehr geringen Einfluss der thermischen Speichergröße (ab einer Größe von etwa 80l/kW) auf den Autarkiegrad und die Austauschenergie mit dem elektrischen Netz.

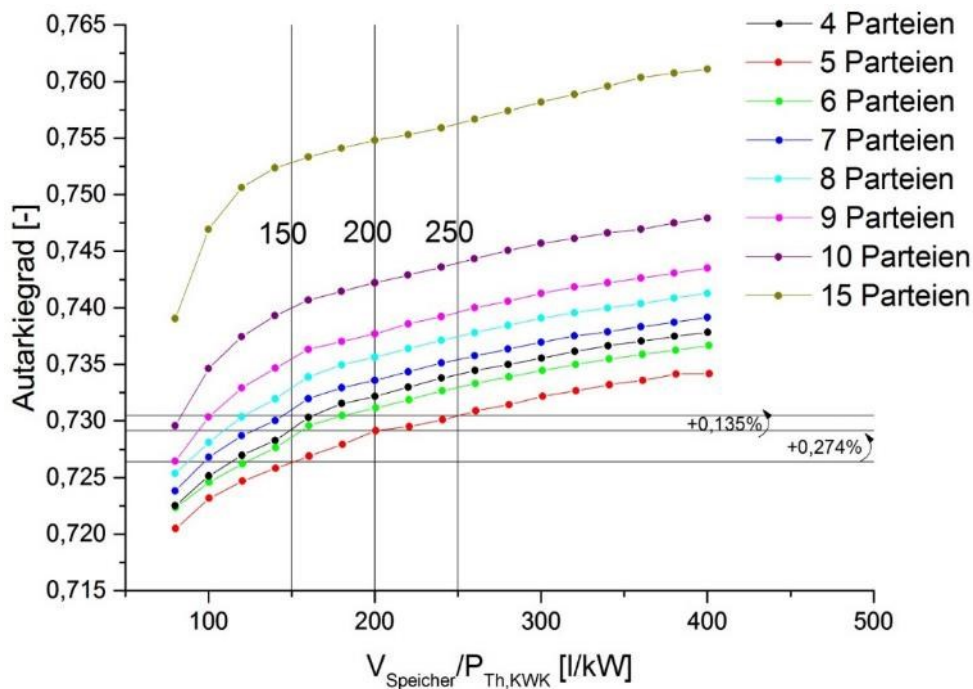


Abbildung 51 - Grundlage zur Auslegung des thermischen Speichers

6.1.2. System mit elektrischem Speicher

Bei einem Gesamtsystem mit elektrischem Speicher wird eine ähnliche Vorgehensweise (siehe Abbildung 52) gewählt um Auslegungsformeln abzuleiten. Als zusätzlicher Schritt wird aufbauend auf der davor bestimmten elektrischen Nennleistung der μ KWK-Anlage, die mit einer Stromkennzahl von 0,47 mit der

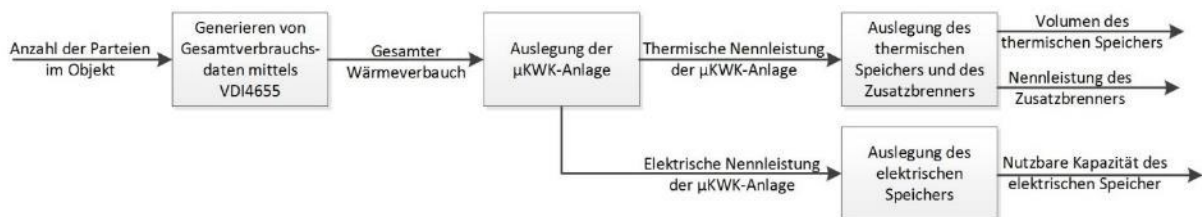


Abbildung 52 - Auslegungsschma für eine Anlagenkonfiguration mit elektrischem Speicher

thermischen Nennleistung gekoppelt ist, die Speicherkapazität des elektrischen Speichers festgelegt. Dabei wird direkt mit der tatsächlich nutzbaren Kapazität (unter Berücksichtigung der zulässigen Entladetiefe) des elektrischen Speichers gearbeitet, um diesen Wert technologieunabhängig verwenden zu können. Damit ergeben sich folgende vier Formeln zur Auslegung des gesamten Systems:

$$P_{Th,KWK} = \frac{Q_{Ges}}{(7500 \dots 9000)} \quad (13)$$

$$P_{Th,ZB} = (3,5 \dots 4) \cdot P_{Th,KWK} \quad (14)$$

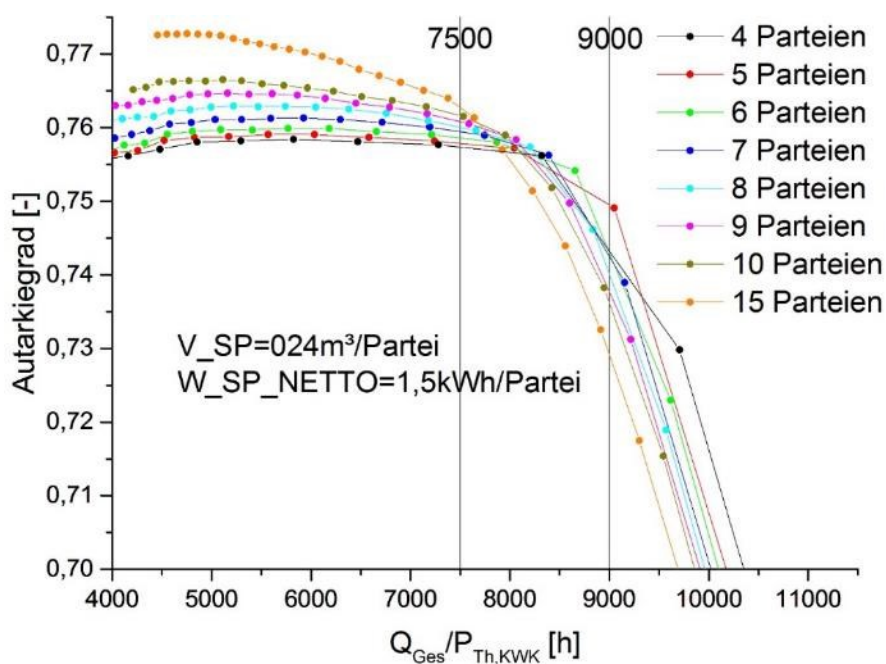
$$V_{Speicher} = (150 \dots 250) \cdot P_{Th,KWK} \quad (15)$$

$$W_{Speicher,nutzbar} = (2,1 \dots 2,8) \cdot P_{El,KWK} \quad (16)$$

$W_{Speicher,nutzbar}$... Tatsächlich nutzbare Speicherkapazität des elektrischen Speichers [kWh]

$P_{El,KWK}$... Elektrische Nennleistung der μ KWK – Anlage [kW]

Die Herleitung von Formel (13) zur Berechnung der thermischen Nennleistung der μ KWK-Anlage erfolgt nach selber Methode wie bei Formel (10) für Szenario 2. Abbildung 53 zeigt, ähnlich wie schon bei der Auslegung für eine Anlage ohne elektrischen Speicher ein Plateau mit einem recht scharfen Abriss an der rechten Kante, die auch hier das



Auslegungsoptimum **Abbildung 53 - Grundlage zur Auslegung der thermischen μ KWK-Nennleistung für Szenario 3** darstellt. Aus dieser

Abbildung kann damit direkt die oben beschriebene Formel (13) zur Auslegung der μ KWK-Anlage auf Basis des gesamten Jahresverbrauches an Wärme (Heizwärme und Wärmebedarf zur Warmwasserbereitung) abgeleitet werden. Die Formeln zur Auslegung von thermischem Speicher und Spitzenlastbrenner ergeben sich analog zum Vorgehen für Szenario 2, wobei der bezogene Wert für den Spitzenlastbrenner für Szenario 3 (3,5 bis 4) größer ist als für Szenario 2 (1,5 bis 2). Aufgrund der

geringeren Nennleistung der μ KWK-Anlage bei Szenario 3 ist dieser Wert höher, die absolute Leistung des Spitzenlastbrenners ist für Szenario 2 und Szenario 3 nahezu ident.

Um den elektrischen Speicher optimal auslegen zu können, wurde nach Auslegung der anderen Teilanlagen nach Formel (13) bis (15) die nutzbare elektrische Speicherkapazität variiert. Zum Vergleich der verschiedenen Objekte mit Parteienzahl von vier bis fünfzehn wird die nutzbare Speicherkapazität auf die elektrische

Nennleistung der μ KWK-Anlage bezogen. Dieser Quotient hat demnach die Einheit Stunden und gibt an wie lange die μ KWK-Anlage mit Nennleistung betrieben werden muss, um den elektrischen Speicher vollständig zu füllen. In Abbildung 54 ist der Autarkiegrad über dem erwähnten Quotienten aufgetragen, wobei

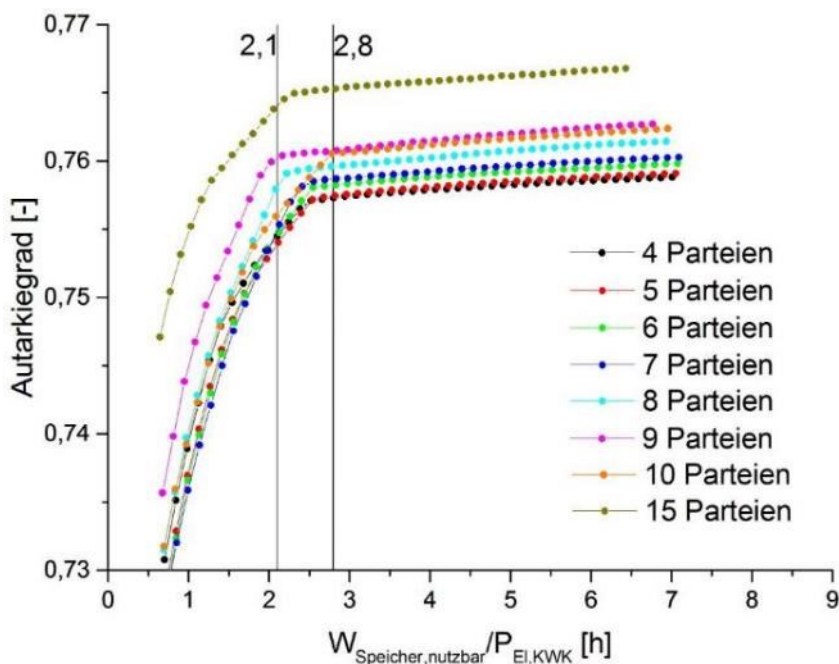


Abbildung 54 - Grundlage zur Auslegung des elektrischen Speichers

deutlich sichtbar wird, dass es ab einer gewissen Speichergröße eine weitere Erhöhung der Kapazität kaum noch Verbesserungen des Autarkiegrades bringt und damit nicht wirtschaftlich ist. Diese Kante liegt je nach Objektgröße zwischen 2,1 und 2,8 Stunden, wodurch die Herkunft von Formel (16) begründet ist.

6.2. Kritik

Wie bereits einleitend erwähnt, sollen die oben angegebenen Formeln zur Auslegung der jeweiligen Anlagenkomponenten nicht den Anspruch der perfekten Auslegung einer Anlage stellen. Die abgeleiteten Formeln dienen zur Auslegung einer Gesamtanlage auf Basis weniger, üblicherweise verfügbarer Informationen, ohne genaue Verbrauchsdaten kennen zu müssen und eine aufwendige Simulation durchzuführen. Um eine wirklich optimale Anlage auswählen zu können sind zusätzlich zu zeitlich genau aufgeschlüsselten elektrischen und thermischen Verbrauchsdaten des Objektes auch noch Wetterdaten nötig um abschätzen zu

können, inwiefern die zugrunde liegenden Verbrauchsdaten nach VDI-Richtlinie 4655 einem durchschnittlichen Jahr nahe kommen. Selbst bei Kenntnis all dieser Daten für einige vergangene Jahre, kann eine Auslegung immer nur auf den vergangenen Daten beruhen und ist daher immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Deshalb erscheinen grobe Richtlinien und Empfehlungen zur Auslegung der Teilanlagen, wie sie mit diesen Formeln angegeben sind, ausreichend und hilfreich.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen und Analysen dieser Arbeit werden in diesem Kapitel dargestellt und anschließend folgt ein Ausblick auf mögliche weitere Analysen und Verbesserungen des Betriebes von μ KWK-Anlagen.

7.1. Überblick der Ergebnisse

Der Überblick der wesentlichsten Erkenntnisse dieser Arbeit erfolgt zwecks besserer Übersichtlichkeit in einer kurz gehaltenen Aufzählung, detailliertere Erklärungen der einzelnen Punkte sind in den entsprechenden Kapiteln ausgeführt.

Ergebnisse und Erkenntnisse in Bezug auf μ KWK-Anlagen mit Erdgasmotoren:

- Erdgasmotoren sind bei μ KWK-Anlagen für kleine Mehr- und Einfamilienhäuser die marktbeherrschende Technologie.
- Eine stromoptimierte Betriebsweise mit Erzeugungsanpassung an die Verbraucher erhöht den Autarkiegrad um ca. 10 Prozentpunkte.
- Ein erhöhter Autarkiegrad führt bei Erdgasanlagen zu stark verbesserter Wirtschaftlichkeit.
- Ein elektrischer Speicher in Verbindung mit einer entsprechenden Regelstrategie erhöht den Autarkiegrad und führt zu einer kleinen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.
- Eine hohe Stromkennzahl der μ KWK-Anlage führt zu einem guten Autarkiegrad.
- Die richtige Dimensionierung von μ KWK-Anlage und elektrischem Speicher hat großen Einfluss auf Autarkiegrad und Wirtschaftlichkeit.
- Es ist möglich aufgrund weniger objektbezogener Kenndaten ein komplettes Anlagensystem aus μ KWK-Anlage, Zusatzbrenner, thermischem und elektrischem Speicher zu dimensionieren.
- Durch optimierte Betriebsführung und Anlagendimensionierung wird während der Heizperiode ein Autarkiegrad größer 99% erreicht. Diesbezüglich sind demnach kaum Verbesserungen möglich. Um den Autarkiegrad über das gesamte Jahr gesehen zu verbessern ist entweder ein zusätzlicher Wärmeabnehmer außerhalb der Heizperiode erforderlich, oder eine zusätzliche stromerzeugende Anlage (z.B.: Photovoltaikanlage) wird installiert.

- Für ein Mehrparteienhaus mit 3 Parteien ist die Versorgung mittels μ KWK-Anlage bei aktuellen Rahmenbedingungen um mehr als 25% teurer als eine herkömmliche, getrennte Versorgung.
- Je größer das zu versorgende Objekt ist, desto besser ist die Wirtschaftlichkeit - für ein Objekt mit 10 Parteien ist eine μ KWK-Anlage um 19% teurer.
- Höhere bzw. stärker steigende Strompreise führen zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von μ KWK-Anlagen.

Ergebnisse und Erkenntnisse in Bezug auf μ KWK-Anlagen mit vorgeschaltetem Pelletsvergaser:

- Aufgrund der Nichtregelbarkeit des Pelletsvergasers ist eine verbrauchsorientierte Betriebsweise kaum möglich, woraus ein deutlich geringerer Autarkiegrad als bei Erdgasmotoren folgt.
- Die Auswirkung eines elektrischen Speichers auf den Autarkiegrad ist deutlich höher als bei Erdgasmotoren. Aufgrund der Nichtregelbarkeit der Anlage ist ein zusätzlicher Puffer die einzige Möglichkeit die verschiedenen hohen Stromverbräuche zu bedienen.
- Die Dimensionierung von thermischem und elektrischem Speicher muss aufeinander abgestimmt sein um einen hohen Autarkiegrad zu erreichen.
- Ähnlich wie bei Erdgasmotoren liegt auch hier das deutlich größere Verbesserungspotential bezüglich des Autarkiegrades außerhalb der Heizungsperiode. Dieses Potential kann aber weder durch optimierte Anlagendimensionierung noch durch Regelungsstrategie erreicht werden, sondern erfordert zusätzliche Anlagenkomponenten (siehe entsprechenden Punkt bezüglich Erdgasanlagen).
- Aufgrund der höheren Einspeisetarife für Strom aus Biomasse führt bei der analysierten Biomasseanlage ein elektrischer Speicher zu keiner Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.
- Stärker steigende Strompreise bei gleichzeitig weniger stark steigenden Pelletspreisen haben einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der μ KWK-Anlage.
- Der Einspeisetarif für den zu verkaufenden Strom hat den größten Einfluss auf den Vergleich der Gesamtkosten zwischen einer Versorgung mit und ohne μ KWK-Anlage. Als Kennzahl dient dabei das Verhältnis aus spezifischen Stromkosten und spezifischen Pelletskosten, jeweils in ct/kWh angegeben.

7.2. Ausblick

Um die Wirtschaftlichkeit einer μ KWK-Anlage zu verbessern kann, aufbauend auf der in dieser Arbeit beschriebenen Optimierung durch eine richtige Dimensionierung, eine angepasste Strategie entwickelt werden, die eine kleinere Auslegung des Zusatzbrenners ermöglicht. Ein in diesem Kontext interessanter Ansatz ist die Entwicklung eines Vorhersagemodells für den Verbrauch auf Basis von Wetterdaten.

Die Analyse der Simulationen zeigt vor allem für Erdgasmotoren kaum noch Verbesserungsmöglichkeiten des Autarkiegrades in Zeiten mit Heizbedarf. Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen könnte die bestehende Flexibilität der Erzeugungszeitpunkte im Sommer über virtuelle Kraftwerke genutzt werden. Hierzu müssen einerseits technische Arbeiten folgen, wie ein solches virtuelles Kraftwerk aufgebaut sein kann und andererseits entsprechende Geschäftsmodelle entwickelt werden.

Eine für alle μ KWK-Anlagen interessante Möglichkeit ist die Kombination mit einer Photovoltaikanlage. Diese würde vorrangig im Sommer Strom produzieren und damit in Zeiten, in denen die μ KWK-Anlage kaum in Betrieb ist. Dadurch könnte der elektrische Speicher für beide Anlagen kombiniert verwendet werden, wodurch dessen Auslastung gesteigert werden würde und eine kürzere Amortisationszeit möglich wäre. In Verbindung mit einer darauf angepassten Regelung der μ KWK-Anlage ist hier Potential zur Verbesserung vorhanden.

8. Literaturangaben

- [1] Verein Deutscher Ingenieure: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. VDI-Richtlinien, Bd. 4655. Berlin: Beuth 2008
- [2] Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie VDI 2067 Blatt 1. <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technische-gebaeudeausrustung/richtlinienarbeit/richtlinienreihe-vdi-2067-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen/richtlinie-vdi-2067-blatt-1/>, abgerufen am: 09.06.2015
- [3] Verein Deutscher Ingenieure: Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen. Design and dimensioning of micro combined heat and power plants. VDI-Richtlinien, Bd. 4656. Berlin: Beuth 2013
- [4] González, A., Riba, J.-R., Puig, R. u. Navarro, P.: Review of micro- and small-scale technologies to produce electricity and heat from Mediterranean forests' wood chips. Renewable and Sustainable Energy Reviews 43 (2015), S. 143-155
- [5] Klinkhammer gmbH: Kraft-Wärme-Kopplung. <http://klinkhammergmbh.de/kwk/>, abgerufen am: 09.06.2015
- [6] Maathias Kuschiinski: BHKW: Funktionsweise und Aufbau eines Blockheizkraftwerks. <http://www.blockheizkraftwerk-bhkw.net/funktionsweise>, abgerufen am: 08.07.2015
- [7] Zahoransky, R. A.: Energietechnik. Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
- [8] Wolf GmbH: BHKW GTK-4. <http://www.wolf-heiztechnik.de/produkte/ein-mehrfamilienhaus/heizsysteme/mikro-bhkw-gtk-4/>, abgerufen am: 29.01.2015
- [9] Vaillant Deutschland: Vaillant » mikro-BHKW ecoPOWER 1.0. http://www.vaillant.de/Produkte/Kraft-Waerme-Kopplung/Blockheizkraftwerke/produkt_vaillant/mikro-KWK-System_ecoPOWER_1.0.html, abgerufen am: 28.01.2015
- [10] SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH: Dachs - Technische Daten. <http://www.senertec.de/de/derdachs/grundsolide-technik.html>, abgerufen am: 28.01.2015
- [11] EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld: BHKW - Technische Daten. <http://www.eaw-energieanlagenbau.de/blockheizkraftwerk-bhkw.html>, abgerufen am: 29.01.2015

- [12] Merker, G. P. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik ; mit 43 Tabellen. ATZ-MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2012
- [13] HR Energiemanagement GmbH: Holzvergaserwerkstatt.de.
<http://www.holzvergaserwerkstatt.de/>, abgerufen am: 29.01.2015
- [14] User, S.: Die Spanner Holz-Kraft-Anlage. <http://www.holz-kraft.de/de/produkte/61-die-spanner-holz-kraft-anlage>, abgerufen am: 29.01.2015
- [15] ENTRADE Energiesysteme AG: E3, 2015. <http://www.entrade.de/e3.html>, abgerufen am: 20.06.2015
- [16] Capstone Turbine Corporation: Products.
<http://www.capstoneturbine.com/prodsol/products/>, abgerufen am: 29.01.2015
- [17] Micro Turbine Technology BV: Low cost high efficient micro turbine applications. <http://www.mtt-eu.com/de/business>, abgerufen am: 29.01.2015
- [18] Pilavachi, P. A.: Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. Applied Thermal Engineering 22 (2002) 18, S. 2003-2014
- [19] Rick, H.: Gasturbinen und Flugantriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten und Simulation. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg 2013
- [20] lion energy: lion-Powerblock, BHKW Animation.
<http://www.powerblock.eu/de/lion-powerblock/Funktion-Animation.php>, abgerufen am: 29.01.2015
- [21] lion energy: Kraft-Wärme-Kopplung - das Prinzip.
<http://www.powerblock.eu/de/lion-powerblock/prinzip.php>, abgerufen am: 29.01.2015
- [22] Maghanki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G. u. Galogah, R. J.: Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28 (2013), S. 510-524
- [23] Kalide, W. u. Sigloch, H.: Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen. Kolbenmaschinen - Strömungsmaschinen - Kraftwerke. München: Hanser 2010
- [24] Fette, D. I. P.: Wie arbeitet der Stirlingmotor? Eine Beschreibung mit vielen Bildern. How do Stirling engines work?, 2013. <http://www.stirling-fette.de/howdo.htm>, abgerufen am: 27.06.2015
- [25] Wikipedia: Solid oxide fuel cell de - Festoxidbrennstoffzelle, 2015.
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=142530548>, abgerufen am: 27.06.2015

- [26] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
- [27] Kirsch GmbH: Kirsch HomeEnergy: Kirsch micro. <http://www.kirsch-homeenergy.de/produkte/kirsch-micro.html>, abgerufen am: 29.01.2015
- [28] Buderus: Loganova BHKW-Modul.
http://www.buderus.de/Produkte/Produktprogramm/Blockheizkraftwerke/Loganova_BHKW_Modul-2230930.html?table=techdata, abgerufen am: 29.01.2015
- [29] KW Energie: smartblock 7,5.
<http://www.kwenergie.de/blog/2012/06/smartblock-75/>, abgerufen am: 29.01.2015
- [30] ATN Hölzel GmbH: Details | Clever-BHKW von ATN. <http://www.clever-bhkw.de/details-zu-den-bhkw-von-atn>, abgerufen am: 29.01.2015
- [31] EC Power: XRGI® 6. <http://www.ecpower.eu/deutsch/xrgi/technische-daten/xrgir-6.html>, abgerufen am: 29.01.2015
- [32] energiewerkstatt Gesellschaft für rationelle Energie mbH & Co. KG: ASV 21/46, 2015. <http://www.energiwerkstatt.de/ew-5-01-technische-daten-asv2146.html>, abgerufen am: 29.01.2015
- [33] Steinecke: Elcon - Technische Daten, 2010. <http://www.bhkw-steinecke.de/neuigkeiten.html>, abgerufen am: 29.01.2015
- [34] SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH: Dachs Stirling.
<http://www.senertec.de/de/derdachs/dachs-stirling.html>, abgerufen am: 29.01.2015
- [35] Whispergen: Whispergen saving energy. http://www.whispergen-europe.com/productspec_de.php?fm=whispergen&fp=Product%20Specs, abgerufen am: 29.01.2015
- [36] ÖkoFEN: Strom erzeugende Pelletsheizung | ÖkoFEN Pelletsheizungen.
http://www.pelletsheizung.at/de/pellematic_smart_e/#tab1, abgerufen am: 29.01.2015
- [37] August Brötje GmbH: EcoGen Systempakete.
<https://www.broetje.de/de/1265.htm>, abgerufen am: 30.01.2015
- [38] Ceramic Fuel Cells GmbH: Blue Gen - Produkteigenschaften, 2014.
<http://www.ceramicfuelcells.de/de/produkte/bluegen/bluegen-technologie/technische-daten/>, abgerufen am: 30.01.2015
- [39] HEXIS AG: Galileo 1000N - Systemdaten.
<http://www.hexis.com/de/systemdaten>, abgerufen am: 30.01.2015
- [40] lion energy: lion-Powerblock, intelligente Stromproduktion.
<http://www.powerblock.eu/de/lion-powerblock/angepasste-regelung.php>, abgerufen am: 27.01.2015

- [41] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4656. Berechnungsprogramm, Beispielrechnungen und Parameterdateien. [Heizungstechnik, Klimatechnik] : [Beil.]. Düsseldorf: VDI 2014
- [42] Barbieri, E. S., Spina, P. R. u. Venturini, M.: Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands. Applied Energy 97 (2012), S. 723-733
- [43] Shaneb, O. A., Coates, G. u. Taylor, P. C.: Sizing of residential μ CHP systems. Energy and Buildings 43 (2011) 8, S. 1991-2001
- [44] Bianchi, M., Pascale, A. de u. Spina, P. R.: Guidelines for residential micro-CHP systems design. Applied Energy 97 (2012), S. 673-685
- [45] Bianchi, M., Pascale, A. de u. Melino, F.: Performance analysis of an integrated CHP system with thermal and Electric Energy Storage for residential application. Applied Energy 112 (2013), S. 928-938
- [46] Barbieri, E. S., Melino, F. u. Morini, M.: Influence of the thermal energy storage on the profitability of micro-CHP systems for residential building applications. Applied Energy 97 (2012), S. 714-722
- [47] Ren, H., Gao, W. u. Ruan, Y.: Optimal sizing for residential CHP system. Applied Thermal Engineering 28 (2008) 5-6, S. 514-523
- [48] Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe: Hochtemperatur-Batterien. http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_technology_high_temperature_batterie_s/, abgerufen am: 27.01.2015
- [49] Zhou, Z., Benbouzid, M., Frédéric Charpentier, J., Scuiller, F. u. Tang, T.: A review of energy storage technologies for marine current energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 18 (2013), S. 390-400
- [50] Wikipedia: Grafik Aufbau Li-Ion-Zelle (CoO₂-Carbon, Schema), 2015. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_\(CoO₂-Carbon,_Schema\).svg?uselang=de](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_(CoO2-Carbon,_Schema).svg?uselang=de), abgerufen am: 27.05.2015
- [51] BINE Informationsdienst: BINE Informationsdienst: Projektinfo: Kinetische Speicherung von Elektrizität - Technologie DYNASTORE, 2015. <http://www.bine.info/publikationen/projektinfos/publikation/kinetische-speicherung-von-elektrizitaet/technologie-dynastore/>, abgerufen am: 08.07.2015
- [52] Gallay Roland: Supercapacitor
- [53] Mahlia, T., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H. u. Matseelar, H.: A review of available methods and development on energy storage; technology update. Renewable and Sustainable Energy Reviews 33 (2014), S. 532-545

- [54] Battke, B., Schmidt, T. S., Grosspietsch, D. u. Hoffmann, V. H.: A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25 (2013), S. 240-250
- [55] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. u. Ding, Y.: Progress in electrical energy storage system. A critical review. *Progress in Natural Science* 19 (2009) 3, S. 291-312
- [56] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. u. Efthimiou, V.: Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 6-7, S. 1513-1522
- [57] Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T. u. Zeraouli, Y.: Energy storage. Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 120 (2014), S. 59-80
- [58] Poullikkas, A.: A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27 (2013), S. 778-788
- [59] Lorenz, C. u. Schröder, G.: Wirtschaftlichkeit-Batteriespeicher. Berechnung der Speicherkosten und Darstellung der Wirtschaftlichkeit ausgewählter BatterieSpeichersysteme, TU Hamburg-Harburg. Leipzig 2014
- [60] BINE Informationsdienst: News: Batterie erreicht mehr als 10.000 Ladezyklen, 2013.
<http://www.bine.info/themen/energiesysteme/stromspeicherung/news/batterie-erreicht-mehr-als-10000-ladezyklen/>, abgerufen am: 28.05.2015
- [61] T.S.T Solarstrom: Batteriespeichersysteme Preisvergleich Endkunden - Stand 27.5.2015, 2015. <http://www.solarladen.de/tst-pv-produkte/preisvergleich/speichersysteme>, abgerufen am: 28.05.2015
- [62] Deutsche Energieversorgung GmbH: Datenblatt_Senec Home G2 Plus
- [63] IBC SOLAR AG: Datenblatt IBC SolStore-L1
- [64] BMZ Batterien-Montage-Zentrum GmbH: Produktdatenblatt BMZ ESS 3.0
- [65] TST Arge Solarstrom: SOLAX X Hybrid 5.0 kW mit einer Speicherkapazität von 7,2 kWh. <http://www.photovoltaiik-shop.com/solax-x-hybrid-5-0-kw-mit-einer-speicherkapazitat-von-7-2-kwh.html?destination=node/255>, abgerufen am: 28.05.2015
- [66] MdEk Mitteldeutsche Energiekonzepte GmbH: Fenecon PRO Compact 3-10 Lithium-Eisenphosphat. <https://www.pv-shop24.eu/komponenten/stromspeicher/fenecon/fenecon-pro-compact-3-10-lithium-eisenphosphat-batterie-2885.html>, abgerufen am: 29.05.2015
- [67] Team, I. S.: Entwicklungen im globalen und deutschen Batteriemarkt Interview mit Shmuel De Leon - IceSeminars.

- <http://www.iceseminars.eu/news/latest-news/entwicklungen-im-globalen-und-deutschen-batteriemarkt-interview-mit-shmuel-de-leon.html>, abgerufen am: 29.06.2015
- [68] Kiefermedia GmbH - Batteriezukunft: Wachstum des Massenmarktes führt zu geringeren Batteriepreisen.
<http://www.batteriezukunft.de/kosten/marktentwicklung>, abgerufen am: 29.06.2015
- [69] ZAMG: Jahrbuch – Wetterstationen.
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>, abgerufen am: 30.05.2015
- [70] ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: BHKW-Kenndaten 2014 Marktübersicht, 2014.
<http://asue.de/aktuelles---presse/bhkw-kenndaten-2014-ankuendigung.html>, abgerufen am: 20.06.2015
- [71] TST Arge Solarstrom: Speichersysteme & Batteriewechselrichter Online Shop, 2015. <http://www.photovoltaik-shop.com/speichersysteme.html>, abgerufen am: 20.06.2015
- [72] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.: Marktübersicht für Batteriespeichersysteme (2015)
- [73] ENMI Energie GmbH & Co. KG: Solar Shop | pv-shop24.eu, 2015.
<https://www.pv-shop24.eu/>, abgerufen am: 20.06.2015
- [74] Heizungsdiscount 24 GmbH: Heizung und Solar zu Discountpreisen, 2015.
<http://www.heizungsdiscount24.de/>, abgerufen am: 20.06.2015
- [75] G2 Energy Systems UG: Händler für Warmwasserspeicher, Festbrennstoffkessel, Produkte zur Gewinnung regenerativer Energien sowie Heizungs- und Sanitärprodukten, 2015. <http://www.g2-energy-systems.de/>, abgerufen am: 20.06.2015
- [76] E-Control: E-Control für Konsumenten von Strom und Gas, 2015.
<http://www.e-control.at/konsumenten>, abgerufen am: 20.06.2015
- [77] ProPellets Austria: Aktuelle Pelletpreise und Vergleich mit anderen Energieträgern, 2015. <http://www.propellets.at/de/pelletpreise/>, abgerufen am: 05.07.2015
- [78] Brennstoffe24.com: Industriepellets, 2015.
<http://www.brennstoffe24.com/industriepellets-24t>, abgerufen am: 05.07.2015
- [79] sunpellet.com: Onlineshop sunpellet.com, 2015.
<http://www.sunpellet.com/Onlineshop.html>, abgerufen am: 05.07.2015

- [80] Statistik Austria: Sonderauswertungen VPI, 2015.
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/verbraucherpreisindex_vpi_hvpi/sonderauswertungen/index.html, abgerufen am: 05.07.2015
- [81] Statistik Austria: VPI10 - Statistische Datenbank, 2015.
<http://statcube.at/superwebguest/autoLoad.do?db=devpi10>, abgerufen am: 05.07.2015
- [82] Schlagitweit: Auswertung Pelletspreisindex PPI06 (2015)
- [83] TrimmelM: Wirtschaftslage und Prognose Juni 2015 (2015)
- [84] RIS - Gesamte Rechtsvorschrift für Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 06.07.2015.
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007993>, abgerufen am: 06.07.2015
- [85] Verivox: Stromtarife vergleichen mit Verivox.
<http://www.verivox.de/power/>, abgerufen am: 16.07.2015
- [86] Juris GmbH: EEG 2014 - Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien - Aktuelle Gesamtausgabe. https://www.juris.de/purl/gesetze/_ges/EEG, abgerufen am: 28.07.2015
- [87] OIB: OIB-Richtlinie 6