

Diplomarbeit

# Technische und wirtschaftliche Analyse von ausgewählten Technologien zur dezentralen Erzeugung von Strom und Wärme (bis 250 kW<sub>el</sub>)

Andreas Berndorff

Oktober 2012

**Betreuer:** Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Wolfgang A. Marko  
**Begutachter:** Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Vorbach  
**Technische Universität Graz**  
Institut für Unternehmungsführung und Organisation



Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

## Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Projektes der Energie Steiermark AG sowie der TU Graz und der FH Kärnten. Da eine Vielzahl von Personen an der Erarbeitung dieser Diplomarbeit beteiligt waren, möchte ich die Gelegenheit nutzen und mich stellvertretend bei den wichtigsten Personen bedanken.

Zuerst möchte ich mich bei Professor DI Dr.techn. Stefan Vorbach, Leiter des Institutes für Unternehmungsführung und Organisation, für die Ausschreibung dieser interessanten Arbeit sowie zahlreiche Anregungen und Vorschläge bedanken. Zudem gilt mein Dank DI Wolfgang A. Marko, der als Betreuer dieser Diplomarbeit jederzeit als Ansprechpartner zur Verfügung stand und durch sein Fachwissen wichtige Impulse setzte.

Des Weiteren danke ich Herrn DI Egon Dorner sowie Herrn DI(FH) Christian Orthofer seitens der Energie Steiermark, deren umfangreiche Erfahrung und fachliche Kompetenz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Schwester bedanken, die mir das Studium an der TU Graz ermöglicht haben und mich durch das Korrekturlesen dieser Arbeit tatkräftig unterstützten.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Katharina Unger und unserer Tochter Bea, die in der Vergangenheit sehr viele Stunden auf mich verzichten mussten und mir stets mit großer Unterstützung zur Seite standen.

## Kurzfassung

Die derzeitige Energieerzeugungsstruktur ist geprägt von großen zentralen Produktionsstätten mit niedrigen Effizienzen und hohen Treibhausgasemissionen. Der Wandel zu einer effektiven, nachhaltigen und verbrauchernahen Energieerzeugung ist im vollen Gange. Dezentrale Erzeugungstechnologien bieten dabei große Chancen, diesen Anforderungen Rechnung zu tragen.

Die entscheidende Frage ist, welche dezentralen Erzeugungstechnologien in der Lage sind, den Kundenbedürfnissen der Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit, Bequemlichkeit und Wirtschaftlichkeit am ehesten gerecht zu werden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Technologieanalyse und -bewertung von dezentralen Kleinerzeugungstechnologien auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung, Kleinwindkraft und Kleinwasserkraft. Daraus abgeleitet rücken zehn Erzeugungstechnologien in den Fokus dieser Untersuchung.

Dazu wurde eine Literaturstudie und eine Marktanalyse durchgeführt. Es wurden 64 Firmen mit dem Ziel kontaktiert, einen breiten Überblick der verfügbaren Technologien zu erlangen sowie deren technologische und wirtschaftliche Basisdaten zusammenzutragen. Durch die Angebotslegungen der Hersteller konnten technologieübergreifend ca. 65 Anlagenkonzepte miteinander verglichen werden. Im Folgenden dienten die Angebote, neben der Literaturrecherche, als Grundlage für die Bewertung der Technologien. Die erste Aufgabe bestand darin, ein geeignetes Bewertungssystem für die untersuchten Technologien zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurden die Vor- und Nachteile von drei verschiedenen Beurteilungsverfahren der Technologiefrüherkennung verglichen. Als Resultat dieser Auswertung wurde der Technologiesteckbrief als zentrales Bewertungselement ausgewählt. In diesem Steckbrief werden alle relevanten Technologieinformationen festgehalten; neben der Technologiebeschreibung sind die Vor- und Nachteile, Kundengruppen und Einsatzgebiete, aktuelle Forschungsprojekte, bedeutende Gesetze und Investitionsförderungsmöglichkeiten dargestellt. Diese Informationen werden durch eine Liste der möglichen Hersteller, ein Diagramm zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit sowie einer Technologie-Markt-Bewertung ergänzt. In letzterer wurden je drei technologie- und marktorientierte Kriterien beurteilt und im Sinne der Vergleichbarkeit in einem Netzdiagramm abgebildet.

Das Ergebnis der durchgeführten Arbeiten sind die zehn detaillierten Technologiesteckbriefe der untersuchten Technologien. Sie sollen dem Leser ein komprimiertes Abbild der technischen und wirtschaftlichen Charakteristik der einzelnen Technologien liefern. Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen eines Projektes im Auftrag der Energie Steiermark AG durchgeführt und dient als Entscheidungsgrundlage für künftige Investitionsentscheidungen am dezentralen Erzeugungsmarkt.

## Abstract

The today's structure of power generation is characterized by large production plants with low efficiencies and high greenhouse gas emissions. The change to an effective, sustainable and consumer-oriented production system is already in progress. Decentralized power generation technologies provide great opportunities to fulfill the challenges of energy transition.

The central question of this thesis is which decentralized power generation technologies are able to satisfy the customer's requirements of sustainability, security of supply, comfort and economy. The aim of this thesis is to analyze and assess technologies based on combined heat and power units, small wind power and small hydro power plants. Considering these three main topics, ten technologies became the focus of attention.

To gather information a literature research and a market survey was conducted. With the intention of providing an overview of available technologies, 64 companies were contacted, to get technical and economical data of their products. Approximately 65 plant concepts could be compared by the proposal preparations of the producers. In addition to the literature, these offers were the basis of the technical and economic evaluation.

The following task was to generate an appropriate evaluation system for the investigated technologies. For this purpose, the pros and cons of three different assessment methods of early technology detection have been compared. As a result of this analysis, the technology profile has been selected as the key element of the assessment. This profile presents all relevant technology information. Besides the technology description, the pros and cons, customer groups, fields of application, current research projects, significant laws and opportunities of investment grants are represented. This information is complemented by a list of possible producers, a chart to estimate the economical situation and a technology-market-assessment. For the purpose of comparability, three technology- and market-oriented criteria are measured, evaluated and illustrated in an excel spider chart.

The results of this thesis are the technology profiles of the ten technologies studied. These will provide the user a compact image of the technical and economic characteristics of each technology. This work was carried out as a part of a project on behalf of Energie Steiermark AG and serves as a basic document for future investment decisions at the decentralized power generation market.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Projektbeschreibung . . . . .	2
1.2. Dezentrale Erzeugung . . . . .	4
1.3. Technologie- und Systemabgrenzung . . . . .	7
<b>2. Technologiebewertung</b>	<b>9</b>
2.1. Allgemeine Informationen . . . . .	9
2.2. Technische Checkliste . . . . .	13
2.3. Technologielebenszyklusanalyse . . . . .	13
2.4. Steckbrief . . . . .	15
2.5. Auswahl und Beschreibung des Bewertungsverfahrens . . . . .	15
<b>3. Technologien</b>	<b>23</b>
3.1. Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	23
3.1.1. Allgemeine Funktionsweise und Anlagenkomponenten . . . . .	26
3.1.2. Betriebsarten . . . . .	28
3.1.3. Brennstoffarten . . . . .	29
3.1.4. Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	31
3.1.5. BHKW-Verbrennungskraftmaschine . . . . .	35
3.1.5.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	35
3.1.5.2. Stand der Technik . . . . .	37
3.1.5.3. Vor- und Nachteile . . . . .	38
3.1.5.4. Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	39
3.1.5.5. Technologielieferanten . . . . .	40
3.1.5.6. Steckbrief BHKW-VKM . . . . .	41
3.1.6. BHKW-Stirlingmotor . . . . .	42
3.1.6.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	42
3.1.6.2. Stand der Technik . . . . .	44
3.1.6.3. Vor- und Nachteile . . . . .	44
3.1.6.4. Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	45
3.1.6.5. Technologielieferanten . . . . .	45
3.1.6.6. Steckbrief BHKW-Stirlingmotor . . . . .	47
3.1.7. BHKW-Gasturbine . . . . .	48
3.1.7.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	48
3.1.7.2. Stand der Technik . . . . .	49
3.1.7.3. Vor- und Nachteile . . . . .	50
3.1.7.4. Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	50
3.1.7.5. Technologielieferanten . . . . .	51

3.1.7.6.	Steckbrief BHKW-Gasturbine . . . . .	53
3.1.8.	Vergasungsanlagen . . . . .	54
3.1.8.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	55
3.1.8.2.	Stand der Technik . . . . .	58
3.1.8.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	58
3.1.8.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	59
3.1.8.5.	Technologielieferanten . . . . .	60
3.1.8.6.	Steckbrief Vergasungsanlagen . . . . .	61
3.2.	Kleinwindkraft . . . . .	62
3.2.1.	Allgemeine Informationen . . . . .	62
3.2.2.	Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	64
3.2.3.	Horizontale Windkraftanlagen . . . . .	66
3.2.3.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	66
3.2.3.2.	Stand der Technik . . . . .	68
3.2.3.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	69
3.2.3.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	70
3.2.3.5.	Technologielieferanten . . . . .	71
3.2.3.6.	Steckbrief horizontalachsige Windkraftanlagen . . . . .	73
3.2.4.	Vertikale Windkraftanlagen . . . . .	74
3.2.4.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	74
3.2.4.2.	Stand der Technik . . . . .	75
3.2.4.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	76
3.2.4.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	76
3.2.4.5.	Technologielieferanten . . . . .	78
3.2.4.6.	Steckbrief vertikalachsige Windkraftanlagen . . . . .	79
3.3.	Kleinwasserkraft . . . . .	80
3.3.1.	Allgemeine Informationen . . . . .	80
3.3.2.	Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	81
3.3.3.	Pelton-Turbine . . . . .	83
3.3.3.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	83
3.3.3.2.	Stand der Technik . . . . .	84
3.3.3.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	85
3.3.3.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	85
3.3.3.5.	Technologielieferanten . . . . .	86
3.3.3.6.	Steckbrief Pelton-Turbine . . . . .	87
3.3.4.	Kaplan-Turbine . . . . .	88
3.3.4.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	88
3.3.4.2.	Stand der Technik . . . . .	89
3.3.4.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	90
3.3.4.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	90
3.3.4.5.	Technologielieferanten . . . . .	91
3.3.4.6.	Steckbrief Kaplan-Turbine . . . . .	92
3.3.5.	Durchströmturbine . . . . .	93
3.3.5.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	93
3.3.5.2.	Stand der Technik . . . . .	94
3.3.5.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	95

3.3.5.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	95
3.3.5.5.	Technologielieferanten . . . . .	96
3.3.5.6.	Steckbrief Durchströmturbine . . . . .	97
3.3.6.	Wasserkraftschnecke . . . . .	98
3.3.6.1.	Anlagenkomponenten und Funktionsweise . . . . .	98
3.3.6.2.	Stand der Technik . . . . .	99
3.3.6.3.	Vor- und Nachteile . . . . .	99
3.3.6.4.	Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	100
3.3.6.5.	Technologielieferanten . . . . .	100
3.3.6.6.	Steckbrief Wasserkraftschnecke . . . . .	102
3.4.	Technologievergleich . . . . .	103
3.4.1.	KWK-Technologien . . . . .	103
3.4.2.	Kleinwindkraft . . . . .	104
3.4.3.	Kleinwasserkraft . . . . .	105
3.4.4.	Zusammenfassung der Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	106
<b>4.</b>	<b>Reflexion des Vorgehensmodells</b>	<b>108</b>
4.1.	Kritische Analyse der Beschaffungsmarkterhebung . . . . .	108
4.2.	Kritische Analyse der Technologiebewertung . . . . .	110
<b>5.</b>	<b>Zukunftsentwicklungen und Zusammenfassung</b>	<b>112</b>
5.1.	Technologieentwicklungen . . . . .	112
5.1.1.	Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	112
5.1.2.	Kleinwindkraft . . . . .	114
5.1.3.	Kleinwasserkraft . . . . .	115
5.2.	Zusammenfassung . . . . .	116
<b>A.</b>	<b>Anhang</b>	<b>A 1</b>
A.1.	Tabellen . . . . .	A 1

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Einspeisebereich der dezentralen Erzeugung (Pokojski et al., 2007, S. 11)	4
2.1. Abgrenzung Technologie zu Technik (in Anlehnung an Schuh & Klappert, 2011, S. 34)	9
2.2. Technologiebewertungsverfahren (in Anlehnung an Schuh & Klappert, 2011, S. 312)	12
2.3. Beispiel einer technischen Checkliste	13
2.4. Technologielebenszyklusphasen (in Anlehnung an Little, 1985, S. 52f)	14
2.5. Auswahl des Bewertungsverfahrens	16
2.6. Layout Mustersteckbrief	22
3.1. Vergleich KWK und getrennte Erzeugung von Strom und Wärme (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., 2009, S. 10)	24
3.2. Funktionsschema KWK (in Anlehnung an Simader et al., 2004, S. 9)	27
3.3. Funktionsweise am Beispiel des Viertakt-Ottomotors (ASUE, 2011b, S. 11)	36
3.4. Wirkungsgrade BHKW-VKM	38
3.5. Lieferanten BHKW-VKM	40
3.6. Steckbrief BHKW-VKM	41
3.7. Funktionsprinzip Stirlingmotor (Fette, 2008, S. 1)	42
3.8. Lieferanten BHKW-Stirlingmotor	46
3.9. Steckbrief BHKW-Stirlingmotor	47
3.10. Aufbau einer Mikrogasturbine (VTA Technologie GmbH, 2010, S. 2)	48
3.11. Lieferanten BHKW-Gasturbine	52
3.12. Steckbrief BHKW-Gasturbine	53
3.13. Funktionsprinzip Vergasungsanlage und BHKW	54
3.14. Prozesskette einer Biomassevergasungsanlage mit möglichen Systemkomponenten (in Anlehnung an Vos et al., 2009, S. 13)	56
3.15. Festbettreaktor im Gleichstromprinzip (autotherm) (Karl, 2006, S. 191)	57
3.16. Lieferanten BHKW-Vergaser	60
3.17. Steckbrief Vergasungsanlagen	61
3.18. Funktionsprinzip Widerstands- und Auftriebsläufer (in Anlehnung an Quaschnig, 2011, S. 250ff)	64
3.19. Komponenten einer horizontalen KWEA (Steffens, 2004, S. 1)	66
3.20. Lieferanten horizontalachsige Windkraftanlagen	72
3.21. Steckbrief horizontalachsige Windkraftanlagen	73
3.22. Bauformen von vertikalachsigen Windkraftanlagen (Quaschnig, 2011, S. 255)	74
3.23. Lieferanten vertikalachsige Windkraftanlagen	78

3.24. Steckbrief vertikalachsige Windkraftanlagen . . . . .	79
3.25. Pelton-Turbine (Energieinstitut Vorarlberg, 2004, S. 27) . . . . .	83
3.26. Lieferanten Pelton-Turbine . . . . .	86
3.27. Steckbrief Pelton-Turbine . . . . .	87
3.28. Kaplan-Turbine (NHT-Engineering, 2008, S. 1) . . . . .	89
3.29. Lieferanten Kaplan-Turbine . . . . .	91
3.30. Steckbrief Kaplan-Turbine . . . . .	92
3.31. Ossberger-Turbine (Ossberger GmbH + Co, 2003b, S. 1) . . . . .	93
3.32. Lieferanten Durchströmturbine . . . . .	96
3.33. Steckbrief Durchströmturbine . . . . .	97
3.34. Wasserkraftschnecke (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 3) . . . . .	98
3.35. Lieferanten Wasserkraftschnecke . . . . .	101
3.36. Steckbrief Wasserkraftschnecke . . . . .	102

# Tabellenverzeichnis

1.1. Dezentrale Erzeugungsanlagen . . . . .	5
1.2. Vor- und Nachteile dezentraler Erzeugung . . . . .	6
1.3. Untersuchte KWK-Technologien . . . . .	7
2.1. Indikatoren der Lebenszyklusphasen (in Anlehnung an Little, 1985, S. 53)	15
2.2. Strombezugpreise für verschiedene Kundensegmente . . . . .	18
2.3. Umrechnung der sozialen Akzeptanz . . . . .	19
2.4. Indikatoren und Ausprägung der Technologie-Markt-Bewertung . . . . .	21
3.1. Untersuchte Technologien . . . . .	23
3.2. Leistungsbereiche der Technologien (in Anlehnung an Dittmann, 2011, S. 10) . . . . .	25
3.3. Einsetzbare Brennstoffarten für KWK-Technologien (in Anlehnung an Haas et al., 2010, S. 38) . . . . .	31
3.4. Überblick zu relevanten Gesetzen für eine Anlagengenehmigung (BMWA, 2001, S. 3) . . . . .	32
3.5. Unterschiede Ottomotor-Dieselmotor . . . . .	37
3.6. Vergleich der KWK-Technologien . . . . .	103
3.7. Vergleich der Kleinwindkraft-Technologien . . . . .	105
3.8. Vergleich der Kleinwasserkraft-Technologien . . . . .	106
3.9. Technologieranking . . . . .	107
5.1. Identifizierte Hersteller . . . . .	116
A.1. Wirkungsgrade der Vergasungsanlagen + BHKW . . . . .	A 2
A.2. Anlagendaten horizontale Windkraftturbinen . . . . .	A 3
A.3. Anlagendaten vertikale Windkraftturbinen . . . . .	A 4
A.4. Auszug der Technologielieferantenliste am Beispiel BHKW-VKM . . . . .	A 5
A.5. Kriterien für die Lieferantenbewertung und deren Ausprägung . . . . .	A 6

## Abkürzungsverzeichnis

<b>a</b>	Jahr
<b>AEE</b>	Arbeitsgemeinschaft erneuerbare Energie
<b>Art</b>	Artikel
<b>ASUE</b>	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.
<b>BauG</b>	Baugesetz
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
<b>BMWA</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
<b>BMWFJ</b>	Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend
<b>B-VG</b>	Bundesverfassungsgesetz
<b>C</b>	Celsius
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>CHP</b>	Combined Heat and Power
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>el</b>	elektrisch
<b>EIWOG</b>	Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz
<b>ESHA</b>	European Small Hydropower Association
<b>EVN</b>	Energie vernünftig nutzen AG
<b>EVU</b>	Energieversorgungsunternehmen
<b>FAnIG</b>	Feuerungsanlagengesetz
<b>GWh</b>	Gigawattstunde
<b>H</b>	Fallhöhe
<b>ICVT</b>	Institut für chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Graz

<b>IG-L</b>	Immissionsschutzgesetz-Luft
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel of Climate Change
<b>IRENA</b>	International Renewable Energy Agency
<b>ISE</b>	Institut für solare Energiesysteme
<b>ISI</b>	Institut für System- und Innovationsforschung
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>KMU</b>	kleine und mittlere Unternehmen
<b>KPC</b>	Kommunalkredit Public Consulting GmbH
<b>kV</b>	Kilovolt
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>KWEA</b>	Kleinwindenergieanlage
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>m</b>	Meter
<b>m<sup>2</sup></b>	Quadratmeter
<b>m<sup>3</sup></b>	Kubikmeter
<b>max</b>	maximal
<b>MW</b>	Megawatt
<b>NschG</b>	Naturschutzgesetz
<b>OeMAG</b>	Ökostrom AG (Abwicklungsstelle für Ökostrom)
<b>ORC</b>	Organic Rankine Cycle
<b>ÖSET-VO</b>	Ökostrom-Einspeisetarifverordnung
<b>P</b>	Leistung
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>Q</b>	Durchfluss
<b>RAV</b>	Regelarbeitsvermögen
<b>s</b>	Sekunde
<b>spez</b>	spezifisch

<b>Stmk</b>	steiermärkisch
<b>T</b>	Temperatur
<b>th</b>	thermisch
<b>TCO</b>	Total Cost of Ownership
<b>TWh</b>	Terawattstunde
<b>UFO</b>	Institut für Unternehmungsführung und Organisation der TU Graz
<b>umweltrel</b>	umweltrelevante
<b>V</b>	Volt
<b>VDE</b>	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
<b>VKM</b>	Verbrennungskraftmaschine
<b>W</b>	Watt

# 1. Einleitung

Der Hunger nach Energie wird immer größer! Einerseits wächst die Weltbevölkerung, wodurch mehr und mehr Menschen mit Energie versorgt werden müssen, andererseits steigt der Entwicklungsstand bzw. der Wohlstand der Menschheit. Demgegenüber steht eine hauptsächlich auf fossile Energieträger gestützte Erzeugung mit Kraftwerken aus dem letzten Jahrhundert, als fossile Energieträger schier unerschöpflich schienen und ökologische Aspekte völlig unbeachtet blieben. Konventionelle Kraftwerke nutzen die Primärenergieträger meist ausschließlich zur Produktion von elektrischer Energie, die parallel entstehende Wärme wird oftmals ungenutzt der Umgebung zugeführt. Niedrige Brennstoffausnutzungsgrade, die Verschwendung von Rohstoffen und der zusätzliche Ausstoß von Treibhausgasen sind die Folge.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Erdatmosphäre war noch nie so hoch wie heute. Durch den Treibhauseffekt steigt die Erdtemperatur von Jahr zu Jahr. Erste klimatische Veränderungen sind deutlich spürbar. Das Eis der Gletscherregionen und Polkappen schmilzt zunehmend und bringt weitere, bisher nicht abzuschätzende Veränderungen mit sich. Außerdem werden fossile Energieträger zunehmend knapper. Starke Abhängigkeiten zu Ländern mit fragwürdigen politischen Systemen entstehen bzw. wachsen. Ab dem Jahr 2020 wird Russland der Haupterdgaslieferant Europas sein. Als 2009 die russischen Erdgaslieferungen für mehrere Wochen ausblieben, konnte ein erster Vorgeschmack gewonnen werden, auf was man sich in Zukunft einlässt. Kann das das Ziel eines hochentwickelten (West)Europas sein? Trotz der vergleichsweise starken Nutzung der Wasserkraft, zählt Österreich zu den Energieimporteuren und muss sich den Herausforderungen des Energiemarktes stellen.

Die europäische Union (EU) versucht mit gezielten Maßnahmen entgegenzusteuern und durch die Forcierung der regenerativen Energieträger eine saubere Stromerzeugung, verbunden mit niedrigen Schadstoffemissionen, zu realisieren. Bis 2020 soll europaweit die Energieeffizienz um 20 % steigen, Treibhausgasemissionen um 20 % gesenkt werden und der Anteil der erneuerbaren Energien auf 20 % der Gesamterzeugung anwachsen (Das Europäische Parlament, 2009, S. 1ff). Abgeleitet aus den Vorgaben der EU und aufgrund unterschiedlicher geographischer Gegebenheiten hat sich Österreich dazu verpflichtet, bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 16 % (Bezugsjahr 2005) zu senken, den Anteil erneuerbarer Energien auf 34 % zu erhöhen sowie die Energieeffizienz um 20 % zu steigern (BMWFJ, 2010).

Zur Erreichung der 2020-Ziele werden auch kleine, dezentrale Erzeugungseinheiten einen Beitrag leisten. Die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist eine Möglichkeit, die Effizienz der Primärenergienutzung zu steigern und zugleich den Ausstoß

an Treibhausgasen zu senken. Eine verbrauchernahe Erzeugung minimiert außerdem Netz- und Übertragungsverluste. Kleinwindkraft, Kleinwasserkraft sowie die Nutzung von Geothermie und Solarenergie verfügen ebenfalls über große Potentiale. Im Hinblick auf die steigenden Preise fossiler Energieträger werden kleine, erneuerbare Erzeugungsmöglichkeiten zunehmend wirtschaftlich interessant. In aktuellen Prognosen wird der Ausbau dezentraler Erzeugungseinheiten bereits vorausgesagt (RWE, 2012). Nachdem die Photovoltaik (PV) mittlerweile den Massenmarkt erreicht hat, stellt sich die Frage, welche Technologie bzw. Technologien zu welchem Zeitpunkt ähnlich wirtschaftlich und interessant für die großflächige Anwendung werden. Fakt ist, dass Technologien einen wesentlichen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit und den Erfolg eines Unternehmens haben. Neue Technologien bieten einerseits große Entwicklungschancen, bedrohen aber andererseits auch die Marktposition von Unternehmen, die auf veraltete Technologien setzen. Außerdem können neue Technologien auch neue Anwendungsfelder und somit neue Absatzmärkte eröffnen. Gerade aus diesem Grund ist es zweckmäßig, frühzeitig einen Überblick der sich bietenden Marktoptionen zu haben, um für zukünftige strategische Technologieentscheidungen gerüstet zu sein.

### **1.1. Projektbeschreibung**

Die dezentrale Energieerzeugung wird laut aktuellen Prognosen zukünftig an Bedeutung gewinnen. Großkonzerne wie die Deutsche Telekom, RWE und Volkswagen arbeiten bereits an Konzepten und neuen Geschäftsmodellen, um in den dezentralen Energiemarkt einzusteigen. Auch die Energie Steiermark AG sieht diesbezüglich Handlungsbedarf.

Die Energie Steiermark ist Österreichs viertgrößtes Energieversorgungsunternehmen (EVU) und hauptsächlich mit dem Vertrieb von Strom, Erdgas und Fernwärme beschäftigt. Haupteigentümer ist das Land Steiermark mit einem Anteil von 75 % minus einer Aktie. Seit 1998 ist der französische Energiekonzern Electricité de France mit 25 % plus einer Aktie am Unternehmen beteiligt. Die Energie Steiermark verkauft im In- und Ausland mehr als 29.000 GWh Strom, 16.200 GWh Erdgas und 2.200 GWh Fernwärme und hat damit 2011 einen Konzernumsatz von 1.371 Milliarden Euro erwirtschaftet. Derzeit sind knapp 1.750 Mitarbeiter bei der Energie Steiermark beschäftigt. (Energie Steiermark AG, 2012)

Als Grundlage für zukünftige Investitionsentscheidungen führt die Energie Steiermark eine Technologiestudie zur dezentralen Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme durch. Projektpartner sind in diesem Zusammenhang die Technische Universität Graz, die Fachhochschule Kärnten sowie die Unternehmensberatung Integrated Consulting Group (ICG). Ziel der Untersuchung ist es, dezentrale Erzeugungs- und Speichertechnologien zu identifizieren, technisch und wirtschaftlich zu bewerten und aus den gewonnenen Informationen Ansätze für nachhaltige Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Unternehmensführung und Organisation (UFO) der TU Graz verfasst und bearbeitet das erste von drei großen Arbeitspaketen,

wobei die Hauptuntersuchungsgegenstände die Technologierecherche und -bewertung sind. Dazu werden dezentrale Erzeugungstechnologien auf der Ebene der Endverbraucher hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und technologischen Leistungsfähigkeit beurteilt. Auf einer fünfstufigen Skala wurden die Kriterien Wirkungsgrad, Nachhaltigkeit, Reifegrad, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und soziale Akzeptanz je Technologie bewertet. Außerdem wurden gewichtige Informationen zum Stand der Technik und den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen aus der Literaturrecherche gewonnen.

Zusätzlich wurden entsprechende Technologielieferanten ausfindig gemacht und bezüglich ihrer Markt- und Technologieposition im Sinne einer ABC-Analyse klassifiziert. Zur Untersuchung und Bewertung der Technologie wurden die mit A-bewerteten Lieferanten kontaktiert und zur Angebotslegung für eine oder mehrere konkrete Anlagen eingeladen.

Als Ergebnis werden je Technologie die entscheidendsten Eigenschaften, Lieferanten und gesetzlichen Rahmenbedingungen in Technologiesteckbriefen zusammengefasst. Die Entwicklung dieses Steckbriefes mit geeigneten Bewertungsschemata für die Technologieeigenschaften ist ein Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten. Der Leistungsbereich für die untersuchten Technologien und Anlagen liegt unterhalb von  $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ . Als Primärenergieträger kommen die nachfolgend aufgelisteten Rohstoffe bzw. Energiequellen in Frage:

- Feste Biomasse
- Pflanzenöl / Heizöl / Diesel
- Biogas / Erdgas
- Windkraft
- Wasserkraft
- Solar-Energie.

Abschließend erfolgen ein Resümee der gewonnenen Erkenntnisse sowie ein Zukunftsausblick, in denen derzeitige Forschungsaktivitäten und technologische Neuerungen dargestellt werden.

In den Diplomarbeiten von Daniel Ortner und Juan Antonio Granda werden die weiteren Arbeitspakete behandelt. Das betrifft die wirtschaftliche Bewertung einzelner Anlagen und Anlagenkombinationen (Ortner, 2012) sowie die Generierung von Geschäftsmodellen (Granda, 2012). Außerdem ist das Institut für chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik (ICVT) der TU Graz an dem Gesamtprojekt beteiligt. Deren Untersuchungsgegenstände sind in erster Linie die Technologien zur Speicherung von elektrischer Energie, aber auch Brennstoffzellensysteme und die Wasserstoffherzeugung durch Reformierung.

## 1.2. Dezentrale Erzeugung

Das bestehende Stromnetz hat historisch bedingt eine zentrale Versorgungsstruktur. Der Strom wurde und wird in großen Kraftwerken produziert und durch Übertragungs- und Verteilungsnetze an möglichst viele und räumlich weit verteilte Verbraucher geliefert. Begünstigt durch die Liberalisierung des europäischen Strommarktes Ende der neunziger Jahre und die Auflösung der Monopolstellung der staatlichen EVUs wird langsam auch die Charakteristik des Stromnetzes verändert. Die Energiewende und der damit verbundene Ausbau erneuerbarer nachhaltiger Energiequellen forcieren die Entwicklung zu einer vermehrt dezentralen Stromnetzstruktur ebenfalls. Heute kann jeder Bürger als Erzeuger, zum Beispiel mit einer PV-Anlage, Strom in das öffentliche Netz einspeisen bzw. sich selbst versorgen. Abbildung 1.1 zeigt den Einspeisebereich dezentraler Erzeugungstechnologien.

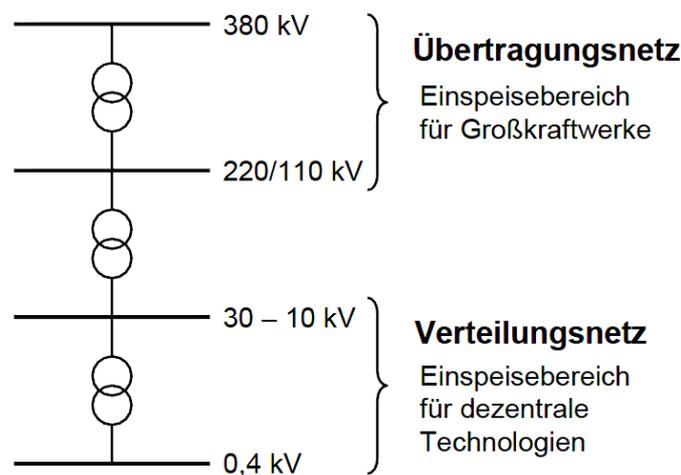


Abbildung 1.1.: Einspeisebereich der dezentralen Erzeugung (Pokojski et al., 2007, S. 11)

Die Erzeugung findet nicht mehr ausschließlich in zentralen Kraftwerken auf der Höchstspannungsebene (380 kV; 220 kV) statt, sondern wird zunehmend durch kleine dezentrale Anlagen ergänzt, die den Strom direkt in das Verteilungsnetz (Nieder- und Mittelspannungsebene von 400 V - 30 kV) einspeisen.

Entsprechend dem steiermärkischen Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz (ElWOG) bedeutet

„'dezentrale Erzeugungsanlage' eine Erzeugungsanlage, die an ein öffentliches Mittel- oder Niederspannungsverteilernetz (Bezugspunkt Übergabestelle) angeschlossen ist und

somit Verbrauchernähe aufweist, oder eine Erzeugungsanlage, die der Eigenversorgung dient.“ (Bundesland Steiermark, 2005, S. 5).

Analog dieser Definition wird eine dezentrale Erzeugungsanlage in der folgenden Studie als lokale, verbrauchernahe Versorgungseinheit gesehen, welche die Versorgung durch zentrale Kraftwerke ergänzt bzw. ersetzt. Einzelne Kleinkraftwerke sind genauso wie z.B. große Windkraftanlagen nicht Bestandteil dieser Studie. In Tabelle 1.1 sollen beispielhaft dezentrale Erzeugungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der jeweiligen Primärenergiequelle dargestellt werden. Diese Übersicht stellt nur eine kleine Teilmenge der

Primärenergiequelle	dezentrale Erzeugungsanlage	Endenergie
Sonnenenergie	Photovoltaikanlage	Strom
Windkraft	Horizontalachsen-Windturbine	Strom
Wasserkraft	Wasserkraftschnecke	Strom
Biomasse	Kraft-Wärme-Kopplungsanlage	Strom + Wärme

Tabelle 1.1.: Dezentrale Erzeugungsanlagen

Alternativen für eine dezentrale Energieerzeugung dar. Welche Technologien in dieser Studie intensiver betrachtet werden, folgt in Kapitel 1.3.

### Vorteile

Dezentrale Erzeugungssysteme können speziell für die Realisierung der 2020-Ziele einen großen Mehrwert schaffen. Durch die Verwendung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) lassen sich im Vergleich zu großen Kraftwerken deutlich höhere Brennstoffausnutzungsgrade erreichen. Die Begründung liegt in der Nutzung der bei der Stromproduktion entstehenden Wärme, welche in Großanlagen oftmals ungenutzt der Umgebung zugeführt wird. Außerdem ist die Akzeptanz der Bevölkerung, vor allem in den hochentwickelten Industriestaaten, für kleine Anlagen deutlich höher. Diese Zustimmung, in Verbindung mit weitaus weniger intensiven Genehmigungsverfahren, führt zu erheblich kürzeren Zeiten zwischen Projektbeginn und Anlagenrealisierung. Dieser Sachverhalt senkt das Investitionsrisiko für neu geplante Anlagen. Neben den großen Windparks, Wasserkraftwerken und solaren Kraftwerken (thermisch und PV) lassen sich durch kleine, dezentrale Technologien die Potentiale der erneuerbaren Energieträger auch auf der Ebene der Endverbraucher ausnutzen. Das führt zur Senkung der treibhausrelevanten Emissionen und verbessert außerdem das Image der erneuerbaren Energiequellen. (Karl, 2006, S. 13f)

### Nachteile

Dezentrale Versorgungssysteme sind großen Produktionsstätten in vielen Belangen unterlegen. Der Aufwand, der für Großanlagen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, Effizienz und das Emissionsverhalten betrieben wird, wäre für kleine Anlagen nicht zu rechtfertigen. Selbst minimale Wirkungsgradoptimierungen bedeuten bei zentralen Anlagen

eine deutliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Weiterentwicklungen von dezentralen Anlagen verkörpern ebenso einen Fortschritt, in der Regel können diese Investitionen aufgrund der deutlich geringeren elektrischen Leistung bzw. der für gewöhnlich kleineren Anzahl an Betriebsstunden nicht wieder erwirtschaftet werden. Des Weiteren können anfallende Emissionen in Großanlagen deutlich effektiver und wirkungsvoller nachbehandelt werden. Aufwendige Nachbehandlungsanlagen würden dezentrale Systeme an den Rand der Wirtschaftlichkeit bringen. Aus diesem Grund muss bei solchen Anlagen schon in der Entwicklung darauf geachtet werden, dass Schadstoffausstöße im Rahmen der gesetzlichen Forderungen gehalten werden. Zusätzliche Nachteile der kleinen Aggregate sind die spezifisch höhere Wartungsintensität und die damit verbundenen Kosten. (Karl, 2006, S. 13f)

In der folgenden Tabelle 1.2 sind die Vor- und Nachteile dezentraler Erzeugungseinheiten zusammengefasst.

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
hohe Brennstoffausnutzungsgrade durch KWK	hohe spez. Investitionskosten
gesetzliche/politische Rahmenbedingungen	thermodynamische Effizienz
gesellschaftliche Akzeptanz	niedrigere el. Wirkungsgrade
Unabhängigkeit von zentralen Versorgungsstrukturen	hohe spez. Emissionen
Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Ressourcen	hohe Wartungsintensität
Minimierung der Netzverluste	

Tabelle 1.2.: Vor- und Nachteile dezentraler Erzeugung

Laut Karl (2006, S. 12f) wird die dezentrale Erzeugung vor allem durch drei wesentliche Faktoren begünstigt. Diese sind die mangelnde Investitionsbereitschaft der Großkonzerne aufgrund langer Abschreibungszeiten. Außerdem geht die Akzeptanz für große Kraftwerksstandorte in der Bevölkerung hochentwickelter Industriestaaten fast gegen Null. Großprojekte wie Stuttgart 21 oder das geplante Murkraftwerk in Graz-Puntigam haben mit gehörigem Gegenwind der Bevölkerung zu kämpfen. Aufwendige Genehmigungsverfahren sowie das zähe Ringen mit Bürgerinitiativen erschweren die Errichtung einer zentralen Anlage zunehmend und erhöhen außerdem die Planungskosten und das Investitionsrisiko. Darüber hinaus ist der Ausbau von dezentralen Anlagen in netzfernen Gebieten oder zur Installation von Nahwärmenetzen möglich. Zusätzliche Potentiale können sich außerdem in Regionen ergeben, in denen bisher keine flächendeckende Energieversorgung vorhanden ist (Schwellenländer, Afrika). Durch Mikrostromnetze oder Nahwärmenetze könnte auch hier die Versorgung einzelner Gebiete realisiert werden.

Das Marktpotential für dezentrale Erzeugungsanlagen ist gegeben. Jetzt sind die innovativen Industrienationen gefordert, den bestehenden Markt mit nachhaltigen, serienreifen und nicht zuletzt auch wirtschaftlichen Technologien zu bedienen.

### 1.3. Technologie- und Systemabgrenzung

Nachdem in Kapitel 1.1 die relevanten Primärenergieträger bereits aufgelistet wurden, soll im folgenden Abschnitt auf die sich daraus ergebenden Technologien und die zugehörigen Systemanforderungen eingegangen werden. Die Energie Steiermark als Auftraggeber hat für alle Technologien den Leistungsbereich auf maximal 250 kW<sub>el</sub> begrenzt.

Zur Veranschaulichung dieser Zahl, sei ein kleines theoretisches Rechenbeispiel eingefügt. Laut Statistik Austria betrug der durchschnittliche Jahresstromverbrauch 2011 pro Haushalt in Österreich 4.685 kWh (Bittermann & Gollner, 2011, S. 19). Eine Anlage mit der elektrischen Leistung von 250 kW müsste im Jahr ca. 19 Stunden unter Vollast in Betrieb sein, um den kompletten Strombedarf eines Haushalts zu decken! Im Umkehrschluss könnte diese Maschine bei 8.760 Betriebsstunden im Jahr ca. 1.170.000 kWh produzieren, was dem Strombedarf von 250 Haushalten entspricht. Im Zusammenhang mit einem einzelnen Haushalt ist eine Anlage dieser Leistungsklasse als viel zu groß und absolut ungeeignet einzustufen. Für Kundengruppen mit einem hohen Energiebedarf, wie zum Beispiel große Hotelanlagen, Industriebetriebe oder Nahwärmenetze, sind Anlagen dieser Größe sinnvoll. Der Fokus dieser Studie liegt jedoch auf Anlagen im elektrischen Leistungsbereich von wenigen kW bis hin zu 100 kW, welche das Kundensegment der Einfamilienhaushalte bzw. Wohn- und Gewerbeobjekte bedienen.

Wie eingangs beschrieben, leiten sich die untersuchten Technologien aus der Vorgabe der Primärenergieträger ab. Zentraler Gegenstand der Untersuchung ist die Nutzung von Biomasse. Als nachwachsender, erneuerbarer Rohstoff sind Pflanzen ein riesiger Speicher der Sonnenenergie und gelten als CO<sub>2</sub> neutral, da während des Lebenszyklus einer Pflanze genauso viel CO<sub>2</sub> aufgenommen, wie bei der Umsetzung (z.B. Verbrennung) freigesetzt wird. Die Biomasse ist neben den fossilen Energieträgern<sup>1</sup> die häufigste Primärenergiequelle für KWK-Technologien. Im ausgewählten Leistungsbereich werden KWK-Anlagen als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet, welche durch verschiedene Antriebstechnologien betrieben werden können. Der Fokus liegt dabei auf internen Verbrennungskraftmaschinen (VKM), wie Otto- und Dieselmotoren, aber auch auf Systemen mit externer Verbrennung (Stirlingmotoren und Gasturbinen), die Darstellung der untersuchten Technologien folgt in Tabelle 1.3.

<b>Biomasse fest</b>	<b>Biomasse flüssig/Heizöl</b>	<b>Biomasse gasförmig/Erdgas</b>
Vergaser + BHKW	Ottomotor	Ottomotor
Stirlingmotor	Dieselmotor	Dieselmotor
	Stirlingmotor	Gasturbine
	Gasturbine	

Tabelle 1.3.: Untersuchte KWK-Technologien

KWK-Anlagen auf Basis der Brennstoffzelle sind ebenfalls von großem Interesse für die Energie Steiermark, werden aber in den Arbeiten des ICVT behandelt. Weitere An-

<sup>1</sup>hauptsächlich Erdgas und Heizöl

triebstechnologien wie Dampfturbinen und Dampfmotoren sowie die Einbindung von ORC<sup>2</sup>-Anlagen sind im angegebenen Leistungsbereich unüblich bzw. sollen nicht Bestandteil dieser Studie sein.

Knapp zwei Drittel des österreichischen Strombedarfs werden durch Wasserkraft gedeckt. Zur Nutzung weiterer Potentiale, besonders im kleinen Leistungsbereich, werden in dieser Analyse vor allem Technologien zur Ausschöpfung kleiner Fallhöhen und Wassermengen betrachtet. Das Angebot an marktreifen Lösungen ist sehr vielseitig, die Realisierung von Anlagen hängt aber stark von den hydro- und geologischen Bedingungen am jeweiligen Standort ab. Untersuchungsgegenstand der Kleinwasserkraft sind Wasserkraftschnecken, Pelton-, Kaplan- und Durchströmturbinen.

Die Analyse der Kleinwindkraft ist ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit. Es werden Konzepte mit horizontal- und vertikalachsigen Windturbinen untersucht und bewertet. Die Leistungsgrenze von 250 kW wird bei dieser Technologie nicht komplett ausgeschöpft, da die Anzahl der Technologielieferanten ab einer Anlagenleistung von 10 kW stark abnimmt. Die Konzentration liegt auf dem Leistungsbereich zwischen 1 - 10 kW. Anlagen mit Leistungen bis zu einigen hundert Watt fungieren hauptsächlich als Batterieladesysteme (z.B. in der Schifffahrt) und bleiben in dieser Studie, entsprechend den Anlagensystemen mit Leistungen größer als 10 kW, unbeachtet. Der Fokus liegt auf Anlagen, welche der elektrischen Versorgung von Haushalten dienen. Das sind Systeme die im Netzparallelbetrieb gefahren werden können und Wechselstrom erzeugen.

Systeme zur Verwendung der Sonneneinstrahlung, mit dem Fokus auf der PV, werden in einer weiteren Diplomarbeit am UFO bearbeitet. Besonders großes Interesse des Auftraggebers besteht in der Speicherung elektrischer Energie. Marktreife Technologien werden in weiterer Folge vom ICVT ermittelt und analysiert.

---

<sup>2</sup>Organic Rankine Cycle

## 2. Technologiebewertung

Als Teil des Technologiemanagements soll die Bedeutung der Technologiebewertung in einem Unternehmen dargestellt werden, um daraus die Relevanz dieser Prozesse in Bezug auf die Energie Steiermark abzuleiten. Anschließend folgt ein Überblick zu möglichen Technologiebewertungsmethoden, wobei verschiedene Alternativen detailliert beschrieben werden. Schlussendlich wird aus den beschriebenen Möglichkeiten der Technologiesteckbrief als zentrales Bewertungsmodell ausgewählt.

### 2.1. Allgemeine Informationen

Im Volksmund werden die Begriffe „Technik“ und „Technologie“ oft im gleichen Kontext verwendet, obwohl sie eine unterschiedliche Bedeutung haben. Um ein gemeinsames Verständnis zu entwickeln, soll das Thema im folgenden Absatz kurz beschrieben werden.

Eine feste Trennung von Technologie und Technik ist schwierig, da Technik im Wesentlichen auf Technologie basiert. In dieser Studie wird in Anlehnung an Schuh & Klappert (2011, S. 33) Technologie als Wissen, Kenntnisse und Fertigkeiten zur Lösung technischer Probleme gesehen. Im Gegensatz dazu ist Technik die Materialisierung der Technologie in Form von Maschinen, Anlagen und Produkten. Technik wird durch die Anwendung von Technologien erschaffen. Abbildung 2.1 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Technologien mit Kosten zu beziffern ist schwierig, sie werden größtenteils durch den

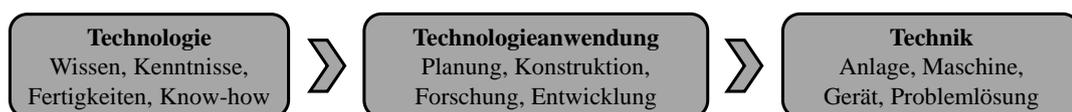


Abbildung 2.1.: Abgrenzung Technologie zu Technik (in Anlehnung an Schuh & Klappert, 2011, S. 34)

Verkauf von Produkten finanziert. Maschinen und Anlagen können demgegenüber Preise, als Wert für den Kunden, zugeordnet werden. Eine wirtschaftliche Bewertung reiner Technologien ist daher schwierig, und wird nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit sein.

Die Technologiebewertung ist in der Prozesskette eines Unternehmens im Technologiemanagement angesiedelt. Das Gabler Wirtschaftslexikon (2012) definiert Technologiemanagement folgendermaßen:

*„Ziel des Technologiemanagements ist es, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen*

*durch den Aufbau und die Weiterentwicklung technologiebasierter Erfolgspotentiale langfristig zu sichern. Technologiemanagement umfasst die Planung, Organisation, Führung und Kontrolle der Unternehmensprozesse, welche die Beschaffung, die Speicherung und die Verwertung von Technologien zum Inhalt haben. Das Technologiemanagement weist erhebliche Überschneidungen mit dem Innovationsmanagement und dem F&E-Management auf.“<sup>3</sup>*

Demzufolge ist das Technologiemanagement ein Fachgebiet, indem Aufgaben unterschiedlicher Disziplinen vereint werden, um nachhaltige, effiziente sowie ökonomisch und ökologisch wertvolle Entscheidungen treffen zu können. Schuh & Klappert (2011, S. 15) definieren:

1. Technologiefrüherkennung,
2. Technologieplanung,
3. Technologieentwicklung,
4. Technologieverwertung,
5. Technologieschutz,
6. Technologiebewertung

als Hauptaufgabengebiete, durch deren Umsetzung wichtige Entscheidungsgrundlagen für die Unternehmensführung geliefert werden. Aufgabe der Früherkennung ist es, relevante Informationen im Umfeld eines Unternehmens zusammenzutragen und potentielle Chancen und Risiken zu lokalisieren. Durch die Beschaffung von Informationen sollen die Unternehmensstrategie und Technologieplanung aufeinander abgestimmt werden. Prognosen über zukünftige Entwicklungen, technologische Leistungsgrenzen sowie die Entwicklungen von neuen Technologiefeldern runden die Ziele der Früherkennung ab.

Einen Entwurf für das künftige Handeln soll die Technologieplanung erbringen. Es gilt vor allem zu klären, welche Technologien wann, wo, mit welchen Partnern und Ressourcen und zu welchem Zweck verwirklicht werden.

Die Technologieentwicklung fokussiert die Umsetzung der Technologieplanung, mit dem Ziel, die Realisierung von Weiterentwicklungen und Neuerungen in einer vorgegebenen Zeitspanne und den zur Verfügung stehenden Ressourcen zu bewerkstelligen.

Für die Technologieverwertung können sich interne wie externe Nutzungsgebiete ergeben. Aus der internen Nutzung der technologischen Fähigkeiten werden Produkte erstellt, die im optimalen Fall Wettbewerbsvorteile generieren. Die externe Nutzung, z.B. durch Technologieverkauf, erhöht die Rentabilität der Technologieinvestition bzw. maximiert den wirtschaftlichen Nutzen.

Zu den phasenübergreifenden Aufgaben des Technologiemanagements zählen Schutz der Technologie und Technologiebewertung. Die Schutzfunktion besteht überwiegend darin, das Know-how der eigenen Unternehmung vor einem Übergang an einen Konkurrenten zu schützen (Patente und Protektionismus) bzw. durch Lizenzen zu verwerten. (Schuh & Klappert, 2011, S. 15ff)

Die Technologiebewertung soll primär den Erfüllungsgrad von Zielvorstellungen eines

---

<sup>3</sup>F&E: Forschung und Entwicklung

technologischen Objektes bestimmen, um Entscheidungen über Einführung, Nutzen und Entwicklung einer Technologie treffen zu können. Außerdem werden Entwicklungsziele bestehender und neuer Technologien ermittelt. Nach Zahn (1995, S. 668) gibt es drei Typen wissenschaftlicher Bewertungsansätze:

- Klassifikatorische Bewertung: Durch die Erstellung von Technologielisten wird ein Überblick über vorhandene und zukünftige Technologien gegeben.
- Komparative Bewertung: Technologien werden zueinander ins Verhältnis gesetzt und im Vergleich zu Anderen bewertet.
- Metrisierende Bewertung: Technologien werden auf ihre physikalischen Parameter zurückgeführt, d.h. es werden (wenn möglich) exakte Werte zugeordnet.

Das reine Auflisten von Technologien bedarf weniger Fachwissen als der Vergleich oder die metrisierende Auswertung. Demnach nehmen die Schwierigkeit der Bewertung und die Genauigkeit der Ergebnisse von der rein klassifikatorischen zur metrisierenden Bewertung zu. Da in jedem Aufgabengebiet des Technologiemanagements Entscheidungen zu fällen sind, ist es essentiell, diese mit einer leistungsstarken Technologiebewertung vorzubereiten. Das Spektrum reicht von einfachen Ja-/Nein-Entscheidungen, der Bildung von Rangfolgen bis hin zu Investitions- oder Desinvestitions- und „Make or Buy“-Entscheidungen. In Anbetracht dessen ist es notwendig, aus den technologischen Gegebenheiten die richtigen Methoden der Bewertung auszuwählen, um die benötigten Informationen zu bekommen.

Die Bewertungsverfahren können in qualitative und quantitative Methoden unterteilt werden. Während die qualitativen Verfahren meist in der Früherkennung Anwendung finden, liegt der Fokus in späteren Phasen des Technologiemanagements auf den quantitativen Methoden. Die Auflistung möglicher Bewertungsverfahren ist in Abbildung 2.2 dargestellt. (Schuh & Klappert, 2011, S. 309f)

Die Schwerpunkte der Studie liegen in der Technologiefrüherkennung und der damit verbundenen Technologiebewertung. Wie oben bereits erwähnt, soll die Technologiefrüherkennung Informationen zu wichtigen Veränderungen im Umfeld eines Unternehmens liefern, um daraus mögliche Chancen aber auch Risiken abzuleiten. Technologieorientierte Unternehmen müssen sich permanent den Umgebungsveränderungen anpassen. Veränderte Kundenwünsche, technologische Weiterentwicklungen sowie Differenzierungen der Wettbewerber sind einige Optionen, die eine erhebliche Gefahr für das Überleben der eigenen Unternehmung darstellen. (Schuh & Klappert, 2011, S. 89f)

Der Wandel zu einer vermehrt dezentralen Erzeugungsstruktur birgt Chancen und Risiken, auf die sich die Energie Steiermark, als Energieversorger mit diversen Erzeugungsanlagen, einstellen muss. Es gilt die vorwiegend zentralen Erzeugungsanlagen um dezentrale Anlagen zu erweitern, um den Veränderungen der Kundenforderungen, aber auch der Stromnetzstrukturen und den politischen Rahmenbedingungen gerecht zu werden. Die Hauptmotivation dieser Arbeit ist die Ermittlung der am Markt verfügbaren dezentralen Erzeugungstechnologien mit den zugehörigen Leistungsgrenzen und Ent-

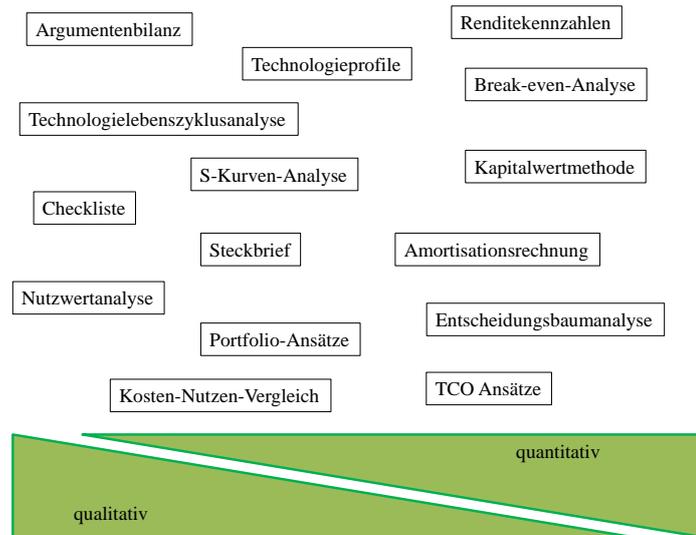


Abbildung 2.2.: Technologiebewertungsverfahren (in Anlehnung an Schuh & Klappert, 2011, S. 312)

wicklungspotentialen. In weiterer Folge sollen diese Informationen die Umsetzung der Strategie der Energie Steiermark unterstützen. Die große Herausforderung wird es sein, marktreife Produkte mit innovativen Neuentwicklungen zu vergleichen bzw. zu bewerten. Technologien im Frühstadium sind geprägt durch „Kinderkrankheiten“ und unvollständige Informationen, da für solche Produkte in der Regel keine Langzeitanalysen vorliegen. Im Gegensatz dazu gibt es Technologien, die seit langer Zeit am Stand der Technik sind und eine breite Auswahl an Informationen bieten. Die Bewertung neuer Anlagen wird in großem Maße auf Prognosen und Abschätzungen der Hersteller basieren, was eine große Unsicherheit der Ergebnisse mit sich bringt. Aus der Früherkennung leitet sich außerdem die Anwendung von qualitativen Bewertungsverfahren ab. Das wird durch die Definition von Technologie und Technik noch verstärkt. Wirtschaftliche Bewertungsmethoden, wie TCO<sup>4</sup>, Kapitalwertmethode oder Amortisationsrechnung, lassen sich für die reine Bewertung von Technologien nur schwer anwenden und werden somit ausgeschlossen. Vielmehr wird im Folgenden auf Bewertungsansätze wie Checklisten, Technologielebenszyklusanalysen und -steckbriefen eingegangen.

<sup>4</sup>Total Cost of Ownership: Gesamtbetriebskostenrechnung mit direkten und indirekten Kosten

## 2.2. Technische Checkliste

Checklisten sind ein pragmatisches und überwiegend klassifikatorisches Instrument, um mit geringem Aufwand einen qualitativen Überblick wichtiger technologiespezifischer Kriterien zu liefern. Die Auswahl der Kriterien kann dabei variabel gestaltet werden und lässt sich jederzeit modifizieren. Auf diese Weise können erste Grobanalysen, aber mit zunehmender Präzisierung auch detaillierte Probleme, beschrieben werden. Die große Anschaulichkeit, der geringe Bedarf an Methodenkompetenz und die einfache Modifikation stellen die Vorteile der Analysen mit Checklisten dar. Etwaige Probleme resultieren aus der Unvollständigkeit der Informationen und der Kriterienwahl, da bedeutsame Sachverhalte unbeachtet bleiben könnten. Zudem können keine Querverbindungen oder gar Zusammenhänge einzelner Kriterien dargestellt werden. In folgender Abbildung 2.3 befindet sich beispielhaft eine Checkliste, welche für die Übersichtsdarstellung einer Technologie Anwendung finden könnte. (Schuh & Klappert, 2011, S. 326f)

Kriterien	Trifft zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu
Technologieverfügbarkeit	✓			
Technologiereife	✓			
Weiterentwicklungspotential				✓
Wachstumspotential			✓	
Erfüllung von Ziel und Zweck	✓			
Bedarf an Know-how		✓		
Bedarf an Lizenz- und Patenterwerb			✓	

Abbildung 2.3.: Beispiel einer technischen Checkliste

## 2.3. Technologielebenszyklusanalyse

Technologielebenszyklusanalysen stellen den Reifegrad einer Technologie in Abhängigkeit der Zeit dar. Der Lebenszyklus folgt im Allgemeinen einer S-Kurve, wobei das Potential weiterer technologischer Entwicklungen mit steigender Reife und zunehmender Zeit abnimmt. Eine Grundannahme ist, dass Technologien im Zeitablauf eine Leistungsgrenze erreichen, an der sie von leistungsfähigeren Technologien ersetzt werden. In Abbildung 2.4 sind die Lebenszyklusphasen in Anlehnung an Little dargestellt.

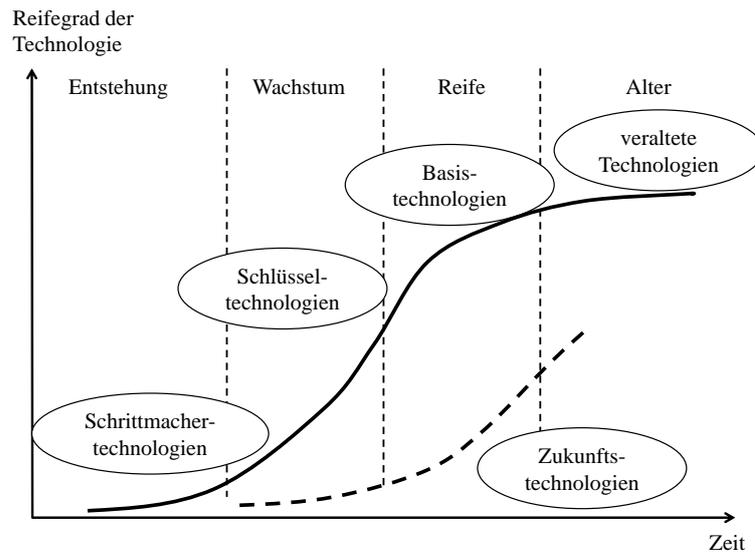


Abbildung 2.4.: Technologielebenszyklusphasen (in Anlehnung an Little, 1985, S. 52f)

Little (1985, S. 52f) unterscheidet primär die Phasen Entstehung, Wachstum, Reife und Alter. Welche Indikatoren und deren Ausprägung für die Zuordnung der jeweiligen Phasen ausschlaggebend sind, zeigt Tabelle 2.1.

Zukunftstechnologien sind die Schrittmachertechnologien von morgen. Die Potentiale und Leistungsgrenzen sind durch eine große Unsicherheit gekennzeichnet, da sie lediglich das Stadium der Grundlagenforschung erreicht haben.

Schrittmachertechnologien befinden sich in der Entwicklungsphase. Diese sind noch nicht ausgereift und dementsprechend für die Nutzung als Massenprodukt ungeeignet. Außerdem bestehen große Unsicherheiten bezüglich der Ausbaupotentiale, Leistungsfähigkeit und technischer Realisierbarkeit. Allerdings bieten sie große Chancen. Unternehmen, die als Pioniere an den Markt gehen, können große Wettbewerbsvorteile wahrnehmen.

In der Phase des Wachstums befinden sich Schlüsseltechnologien. Diese Technologien bieten großes Potential für Wettbewerbsvorteile, weil die Marktteilnehmer die Technologien unterschiedlich gut beherrschen.

Basistechnologien gelten im Allgemeinen als Standard der Branche. Sie werden von den Unternehmen beherrscht und sind für deren Fortbestand von Bedeutung. Allerdings stellen diese Technologien keinen wesentlichen Wettbewerbsvorteil dar, da sie von allen Marktteilnehmern beherrscht werden.

Veraltete Technologien werden zunehmend durch Substitutionstechnologien verdrängt und haben keinen großen Einfluss auf den Wettbewerb. (Strebel, 2007, S. 49f)

Indikator	Entstehung	Wachstum	Reife	Alter
Unsicherheit über technische Leistungsfähigkeit	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
Investitionen in Technologieentwicklung	niedrig	groß	niedrig	vernachlässigbar
Breite der potentiellen Einsatzgebiete	unbekannt	groß	etabliert	abnehmend
Typ der Entwicklungsanforderungen	wissenschaftlich	anwendungsorientiert	anwendungsorientiert	kostenorientiert
Auswirkung auf Kosten-Leistungs-Verhältnis der Produkte	sekundär	maximal	niedrig	niedrig
Zahl der Patentanmeldungen	zunehmend	hoch	abnehmend	keine
Zugangsbarrieren	wiss. Fähigkeiten	Personal	Lizenzen	Know-how
Verfügbarkeit	sehr beschränkt	beschränkt	marktorientiert	hoch

Tabelle 2.1.: Indikatoren der Lebenszyklusphasen (in Anlehnung an Little, 1985, S. 53)

## 2.4. Steckbrief

Ein Technologiesteckbrief ist ähnlich wie die Checkliste ein sehr variables Bewertungsinstrument. Mit dem Ziel die wichtigsten Aspekte und Daten einer Technologie simpel und übersichtlich darzustellen, eignen sich Steckbriefe zum Transport vieler Informationen. Die flexible Gestaltungsmöglichkeit erlaubt die Darstellung von zahlreichen, zum Teil auch sehr detaillierten Fakten. Je nach Auswahl der Bestandteile können klassifikatorische, komparative als auch metrisierende Bewertungen zum Einsatz kommen. Um die Komplexität so gering wie möglich zu halten, werden hauptsächlich klassifikatorische und komparative Ansätze verwendet. Normalerweise sind Kurzbeschreibung, Vor- und Nachteile, Anwendungsfälle und Quellen die Standardbestandteile eines Steckbriefes, die oftmals stichpunktartig zusammengefasst werden. Steckbriefe sind zudem eine hervorragende Möglichkeit, besonders in der Technologiefrüherkennung, einzelne Technologien gegenüberzustellen und zu vergleichen. Sie fungieren demnach als Diskussions- und Entscheidungsgrundlage. Stark detaillierte Informationen sind für Steckbriefe ungeeignet, diese stören die Übersichtlichkeit und sollten in gesonderten Datenblättern gesammelt werden. (Schuh & Klappert, 2011, S. 138)

## 2.5. Auswahl und Beschreibung des Bewertungsverfahrens

Nach der Diskussion von möglichen Technologiebewertungsmethoden (Abbildung 2.2) und der engeren Auswahl von drei, für die Früherkennung relevanten Verfahren, erfolgte in enger Abstimmung mit den Verantwortlichen der Energie Steiermark und UFO

die Entscheidung, einen Technosteckbrief als zentrales Bewertungsmodell in dieser Studie anzuwenden. In Abbildung 2.5 ist eine Auswahl an verschiedenen Bewertungsverfahren dargestellt.

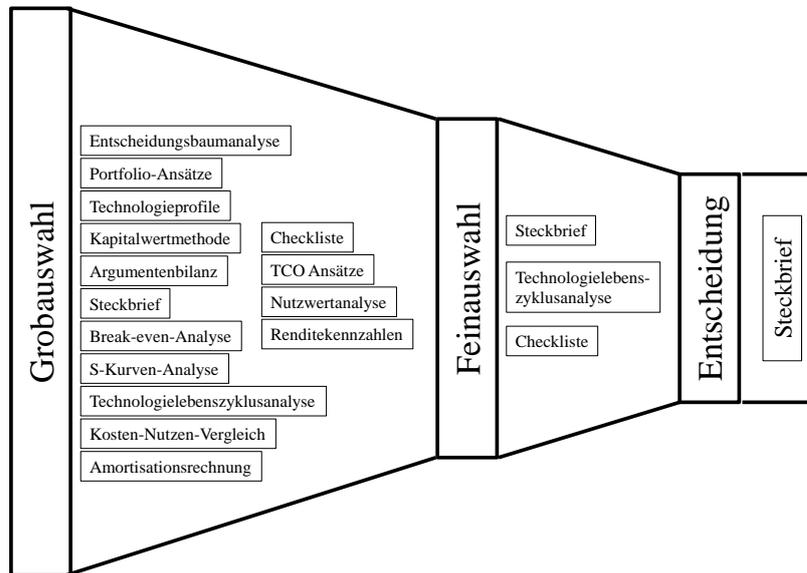


Abbildung 2.5.: Auswahl des Bewertungsverfahrens

Aus der Grobrecherche erfolgte die Zusammenfassung möglicher Bewertungsoptionen. Im Sinne einer Feinauswahl wurden drei qualitative Verfahren, welche für die Technologiefrüherkennung besonders geeignet sind, präziser beschrieben. Im letzten Schritt schloss sich nun die Entscheidung für den Steckbrief an, wobei die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten und der große Informationsgehalt ausschlaggebend waren. Anhand von Steckbriefen können einzelne Technologien schnell und anschaulich miteinander verglichen werden. Ein Muster des für diese Untersuchung entwickelten Steckbriefes ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Checklisten eignen sich zwar hervorragend zur Darstellung wichtiger Eigenschaften, jedoch lassen sich weder komplexe Sachverhalte aufzeigen, noch können Querverbindungen und Vergleiche der einzelnen Technologien stattfinden. Für die Beschreibung detaillierter Informationen, z.B. zu möglichen externen Ressourcen, sind Checklisten ungeeignet. In Steckbriefen kann ein hoher Detaillierungsgrad in Verbindung mit einer individuellen Darstellungsweise angewendet werden. Technologielebenszyklusanalysen sind zur Abbildung des technologischen Reifegrades und der daraus folgenden Entwicklungspotentiale bestens geeignet. Da der Informationsgehalt auf diese Aussagen beschränkt ist, werden solche Analysen nicht als zentrales Bewertungstool eingesetzt, finden aber in Form der Reifegradbewertung der einzelnen Technologien Anwendung.

Im ersten Abschnitt des Steckbriefes sind wichtige Informationen in einer Kurzbeschreibung, zu den Vor- und Nachteilen als auch zu möglichen Kundengruppen zusammengefasst. Unterstützend sollen zwei Grafiken das Verständnis der Funktionsweise bzw. der Vorstellung einer etwaigen Anlage verdeutlichen. Im Anschluss wird eine Einschätzung der Zukunftsentwicklung gegeben. Dabei liegt der Fokus auf den Veränderungen der Investitionskosten, sowie den daraus abgeleiteten mittleren Stromgestehungskosten. Als Vergleichswert für die Netzparität ist die Entwicklung des Strombezugspreises für den Endkunden im gleichen Diagramm dargestellt. Außerdem ist eine S-Kurve in das Diagramm integriert, die einen ersten Eindruck des Technologiereifegrades vermitteln soll. Im nebenstehenden Netzdiagramm erfolgt die Technologie-Markt-Bewertung der untersuchten Technologien. Dafür wurden technologie- (Wirkungsgrad, Nachhaltigkeit und Reifegrad) und marktorientierte (Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit und soziale Akzeptanz) Eigenschaften analysiert. Die fünfstufige Bewertung der Kriterien erfolgte zwischen null und vier, wobei null einer ungenügenden und vier einer sehr guten Bewertung entspricht.

**Wirkungsgrad:** Die Bewertung des Wirkungsgrades wird durch das Verhältnis vom derzeitigen zum theoretisch erreichbaren Gesamtwirkungsgrad gemessen. Dieses Vorgehen ist für die Vergleichbarkeit der einzelnen Technologien nötig, da nicht jede Primärenergiequelle (z.B. Windkraft) vollständig in Nutzenergie umgewandelt werden kann.

**Nachhaltigkeit:** Die Nachhaltigkeit der Technologieanwendung wird entsprechend den verwendeten Energieträgern sowie den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Betriebsphase bewertet. Eine quantitative Bewertung wird nicht angewendet, da diese von der Anlagengröße abhängig ist und durch eine Rauchgasverdünnung oder durch Nachbehandlungssysteme beeinflusst werden kann.

**Reifegrad:** Der technologische Reifegrad wird mit Hilfe der in Tabelle 2.1 sowie der von Strebel (2007, S. 49f) beschriebenen Merkmale gemessen. Die wichtigsten Kriterien sind die derzeitige Marktverfügbarkeit sowie das Wettbewerbs- und Weiterentwicklungspotential. Infolge der jeweiligen Merkmalsausprägung werden die Anwendungen in Zukunfts-, Schrittmacher-, Schlüssel-, Basis- und veraltete Technologie unterteilt.

**Wirtschaftlichkeit:** Die Wirtschaftlichkeit wird anhand des Verhältnisses des mittleren Strombezugspreises zu den mittleren<sup>5</sup> Stromgestehungskosten gemessen. Die durchschnittlichen Stromgestehungskosten resultieren aus der wirtschaftlichen Bewertung der einzelnen Anlagen (Ortner, 2012). Diese Kosten werden mit dem mittleren Strombezugspreis des jeweiligen Kundensegmentes verglichen. Dabei wird der Anwendungsfall in erster Linie durch die Leistung der entsprechenden Anlage bestimmt. Als Beispiel sei ein Stirling-BHKW angeführt, welches eine elektrische Leistung von 1 kW erzeugt und vorwiegend im Privatkundensegment angewendet wird. In diesem Fall ist als Vergleichswert der mittlere Strombezugspreis für Privatkunden anzusetzen. In Tabelle 2.2 sind die Vergleichspreise der betreffenden Kundensegmente dargestellt. Dafür wurden die

<sup>5</sup>Bezieht sich auf die über die Nutzungsdauer der Anlagen gemittelten Stromgestehungskosten. Diese beträgt für jede der untersuchten Technologien 20 Jahre.

minimalen und maximalen österreichischen Strombezugspreise (Stand 10/2012) zusammengetragen und der Mittelwert gebildet. Des Weiteren wird eine Strompreisentwicklung (Haas et al., 2008, S. 218) verwendet, um schließlich die mittleren Preise für den Zeitraum von 2012 bis 2032 zu erhalten.

Kunden-segment	Verbrauch [kWh]	Strombezugspreis 2012 laut E-Control [ct/kWh]		Strombezugspreis 2032 laut Haas et al. (2008) [ct/kWh]	mittlerer Strombezugspreis [ct/kWh]
		Minimum	Maximum		
Privat	3.500	Minimum	16,96	23	21,02
		Maximum	21,12		
		<b>Durchschnitt</b>	<b>19,04</b>		
Gewerbe	15.000-2.000.000	Minimum	k.A.	21,66	19,71
		Maximum	k.A.		
		<b>Durchschnitt</b>	<b>17,75</b>		
Großkunde	10.000.000	Minimum	14,37	19,41	17,74
		Maximum	17,78		
		<b>Durchschnitt</b>	<b>16,07</b>		

Tabelle 2.2.: Strombezugspreise für verschiedene Kundensegmente

**Verfügbarkeit:** Als ein Resultat der durchgeführten Beschaffungsmarkterhebung soll hier die Marktverfügbarkeit dargestellt werden. Bewertet wird die Anzahl der möglichen Lieferanten sowie die Lieferdauer der Anlagen.

**Soziale Akzeptanz:** Die Messung der sozialen Akzeptanz ist im Allgemeinen schwierig. In der Literatur (Kornmeier, 2009, S. 120ff) sind verschiedene Modelle beschrieben, die die Akzeptanz im Wesentlichen durch die wahrgenommene Nützlichkeit eines Systems bewerten. Der Bewertung wird die Studie von Oberschmidt (2010, S. 172f) zugrunde gelegt, in welcher Experten der Energiewirtschaft die soziale Akzeptanz von dezentralen Energieerzeugungstechnologien einschätzten. Dabei wurden neben Biogas-, Erdgas- und Brennstoffzellen-BHKWs auch die Windkraft und die Photovoltaik bewertet. Aus der Tabelle 2.3 folgt einerseits die Akzeptanzbewertung nach Oberschmidt (2010, S. 172f) und andererseits die Umrechnung auf die in dieser Arbeit verwendete Bewertungsskala.

Da die Kleinwasserkraft in der verwendeten Studie nicht bewertet wurde, wird an dieser Stelle die mittlere Bewertung der erneuerbaren Erzeugungstechnologien (3) angenommen. Diese Bewertungen wurden durch eine Einschätzung des Projektteams ergänzt, wobei infolge des Genehmigungsaufwandes, der Standortfaktoren in der Steiermark und der Benutzerfreundlichkeit/Bequemlichkeit die Beurteilungen aus Tabelle 2.3 gegebenenfalls um eine Stufe nach oben oder unten korrigiert werden. Die endgültige Bewertung der sozialen Akzeptanz folgt in den technologiespezifischen Kapiteln. Abschließend sind die Indikatoren und Bewertungsstufen in Tabelle 2.4 dargestellt.

Bewertung der sozialen Akzeptanz	BioG-BHKW	ErdG-BHKW	BZ-BHKW	Kleinwindkraft	PV	Kleinwasserkraft
soziale Akzeptanz (Oberschmidt, 2010) [1 (sehr gut) - 6 (ungenügend)]	2,1	2,73	2,55	3,09	2	k.A.
Umrechnung auf verwendete Skala [4 (sehr gut) - 0 (ungenügend)]	3,25	2,73	2,88	2,43	3,3	3

Tabelle 2.3.: Umrechnung der sozialen Akzeptanz

Entsprechend der einführenden Projektbeschreibung (Kapitel 1.1), ging der Technologierecherche eine Marktstudie bezüglich der relevanten Hersteller und Lieferanten voraus. Dafür wurden je Subtechnologie alle gefundenen Lieferanten in einer Technologielieferantenliste zusammengetragen und mit den wichtigsten Herstellerinformationen (Anschrift, E-Mail, Homepage, Leistungsbereich etc.) gespeichert. Auf eine Auflistung aller gefundenen Lieferanten wird an dieser Stelle verzichtet. Vielmehr sollen die wichtigsten Technologielieferanten je Subtechnologie mit dem jeweils abgedeckten Leistungsbereich im Steckbrief dargestellt werden. Ein Auszug dieser Lieferantenliste, am Beispiel der KWK-Hersteller, befindet sich im Anhang A.4.

In weiterer Folge wurden die wichtigsten Lieferanten durch eine geeignete Methode herausgefiltert. In enger Abstimmung mit den Verantwortlichen der Energie Steiermark wurde die Logik der ABC-Analyse als Bewertungsverfahren ausgewählt. ABC-Analysen eignen sich sehr gut um Klassifizierungen bzw. Ordnungen aus großen Datenmengen vorzunehmen. Durch die einfache Logik und die Unabhängigkeit von spezifischen Einflussfaktoren sind diese Analysen sehr vielseitig, etwa zur Reihung von Materialien, Kunden oder Produkten, einsetzbar. In diesem Fall sind die Elemente die Lieferanten, welche den drei Klassen A, B und C zugeordnet werden. (Schawel & Billing, 2012, S. 13f)

Ausgehend von den folgenden Kriterien: Marktposition des Unternehmens, Anzahl der Mitarbeiter, Unternehmensumsatz und -alter, Eigentumsverhältnisse, wirtschaftliche Leistungsfähigkeit, Technologieposition und Referenzprojekte wurden die Unternehmen in A-, B-, und C-Lieferanten eingeteilt.

- A-Lieferanten: beste Bewertung im Vergleich zu anderen Lieferanten, z.B. Markt- und Technologieführer
- B-Lieferanten: durchschnittliche Bewertung im Vergleich zu anderen Lieferanten
- C-Lieferanten: schlechte Bewertung im Vergleich zu anderen Lieferanten; insolvente Hersteller

Der Bewertungsmaßstab sowie die dazugehörige Dokumentation der Klassifizierung

befindet sich im Anhang (A.5). Als Ergebnis der Lieferantenbewertung wurden die A-Lieferanten als vielversprechende Partner für zukünftige Technologieinvestitionen identifiziert. Um das in der Projektbeschreibung (Kapitel 1.1) definierte Ziel der wirtschaftlichen Bewertung einzelner Anlagen zu erreichen, sind diese A-Lieferanten in weiterer Folge kontaktiert und entsprechend ihres Produktportfolios zu einer Angebotslegung eingeladen worden. Die beschriebene Vorgehensweise der Lieferantenbewertungen wurde für alle beschriebenen Technologien durchgeführt und wird aus diesem Grund in den kommenden Kapiteln nicht mehr erläutert.

Im Steckbrief sind außerdem Fakten zu den mittleren Stromgestehungskosten (Ortner, 2012), aktuellen Forschungsaktivitäten und den verwendeten Quellen angeführt. Der untere Abschnitt des Steckbriefes liefert Informationen bzgl. relevanter Gesetze für eine Anlagengenehmigung bzw. Bewilligung sowie Möglichkeiten der Investitionsförderung und aktuellen Einspeisetarifen.

Indikator	Beschreibung	0	1	2	3	4
Wirkungsgrad	Verhältnis von derzeitigem Gesamtwirkungsgrad zu theoretisch erreichbarem Gesamtwirkungsgrad	< 0,2	0,2 - 0,4	0,41 - 0,6	0,61 - 0,8	> 0,8
Nachhaltigkeit	verwendeter Energieträger geordnet nach CO <sub>2</sub> -Emissionen während der Betriebsphase	Kohleprodukte	Erdölprodukte	Erdgas	Biomasse CO <sub>2</sub> -neutral	keine CO <sub>2</sub> -Emissionen
Reifegrad	Verhältnis von derzeitigem Entwicklungsstand zu technologischer Leistungsgrenze	veraltete Technologie	Zukunfts-technologie	Schrittmacher-technologie	Schlüssel-technologie	Basis-technologie
Wirtschaftlichkeit	Verhältnis von aktuellem mittleren Strompreis* zu den mittleren Stromgestehungskosten (Ortner, 2012)	< 0,2	0,21 - 0,4	0,41 - 0,6	0,61 - 0,8	> 0,8
Verfügbarkeit	Lieferdauer, Anzahl der Lieferanten	> 1 Jahr, keine Lieferanten	9-12 Monate, 1 Lieferant	6-9 Monate, 2-3 Lieferanten	3-6 Monate, 4-5 Lieferanten	< 8 Wochen, > 5 Lieferanten
soziale Akzeptanz	Bewertung nach Oberschmidt 2010; ergänzt durch eine Einschätzung des Projektteams	< 0,5	0,51 - 1,5	1,51 - 2,5	2,51 - 3,5	> 3,5

\*laut E-Control (www.e-control.at) für verschiedene Marktsegmente: Privat, Gewerbe, Großkunde

Tabelle 2.4.: Indikatoren und Ausprägung der Technologie-Markt-Bewertung

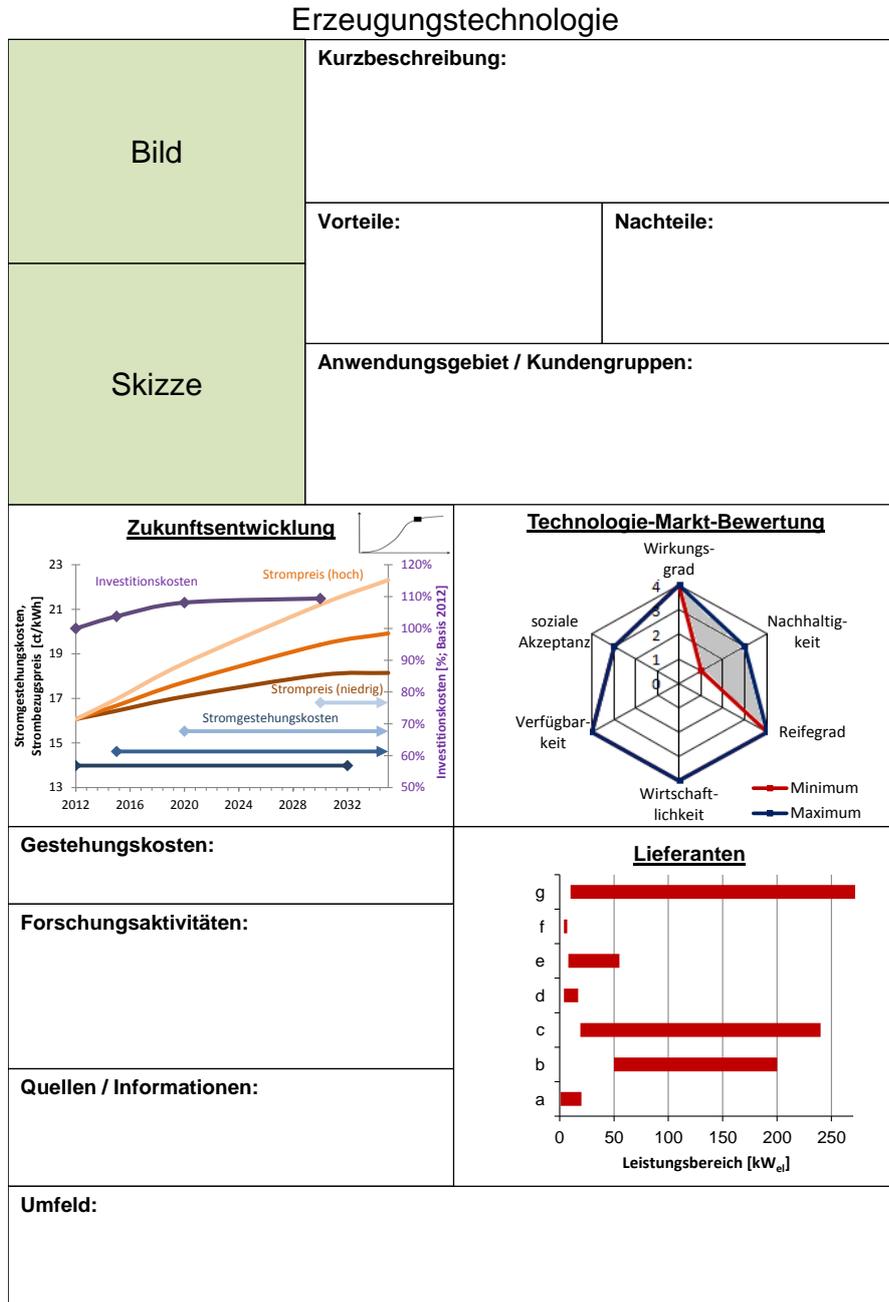


Abbildung 2.6.: Layout Mustersteckbrief

## 3. Technologien

In Anlehnung an die Technologie- und Systemabgrenzung (Kapitel 1.3) liegt der Schwerpunkt dieser Recherche auf den Technologien der Kraft-Wärme-Kopplung, Kleinwasserkraft und Kleinwindkraft sowie daraus abgeleiteten Subtechnologien (Tabelle 3.1).

<b>KWK</b>	<b>Kleinwasserkraft</b>	<b>Kleinwindkraft</b>
BHKW-VKM	Pelton-Turbine	horizontale-KWEA
BHKW-Stirlingmotor	Kaplan-Turbine	vertikale-KWEA
BHKW-Gasturbine	Durchströmturbine	
Vergaser + BHKW	Wasserkraftschnecke	

Tabelle 3.1.: Untersuchte Technologien

Im ersten Schritt sollen generelle Informationen zu den einzelnen Technologien erläutert werden. Das betrifft vor allem die Definition von Kennzahlen und Wirkungsgraden, die in weiterer Folge für sämtliche Subtechnologien von Bedeutung sind. Im Anschluss daran erfolgen die detaillierte Beschreibung und Bewertung der jeweiligen Technologieoptionen, mit dem Ziel, die technologische Reife, aber auch die Grenzen der Leistungsfähigkeit zu verdeutlichen. Dabei sind in erster Linie die Funktionsweise sowie die daraus abgeleiteten Vor- und Nachteile relevant. Außerdem wurde eine Übersicht möglicher externer Systemlieferanten erarbeitet. Nach einer eingehenden Marktrecherche wurden die möglichen Lieferanten anhand einer ABC-Analyse klassifiziert, wobei die aufgelisteten Hersteller als die erfolgversprechendsten Partner identifiziert wurden. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengetragen und übersichtlich in Technologiesteckbriefen dargestellt. Im Folgenden werden die Steckbriefe als Entscheidungsgrundlage für die Technologieplanung und -entwicklung der Energie Steiermark von Bedeutung sein. Ein weiteres Augenmerk dieser Untersuchung liegt auf aktuellen Forschungsthemen und zukünftigen technologischen Entwicklungen. Die Ergebnisse dieser Recherche werden in Kapitel 5.1 dargestellt.

In den anschließenden Kapiteln erfolgen die detaillierten Beschreibungen der einzelnen Subtechnologien.

### 3.1. Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK), im Englischen auch „combined heat and power“ (CHP) genannt, sind Anlagen, mit denen parallel elektrische und thermische Energie erzeugt werden kann. Durch die Verbrennung von Primärenergieträgern wird chemisch

gebundene Energie freigesetzt. In geeigneten Brennkammern bzw. Brennräumen erfolgt die Umsetzung in Wärme, welche durch Kraftmaschinen (Motoren, Turbinen) in mechanische Energie umgewandelt wird. Im Allgemeinen erzeugen diese Maschinen eine Rotationsbewegung, wodurch ein Generator elektrische Energie herstellt. Zugleich wird die bei der Verbrennung freigesetzte Abwärme als Prozesswärme, Raumwärme und für die Bereitstellung von Warmwasser verwendet. Außerdem bieten Brennstoffzellen die Möglichkeit, chemisch gebundene Energie direkt in elektrische Energie umzuwandeln, wobei auch bei dieser Technologie Abwärme anfällt und verwendet wird. Im Hinblick auf die knapper werdenden fossilen Brennstoffe, sowie die mit denen verbundene Problematik der CO<sub>2</sub>-Emissionen, stellt die KWK eine geeignete Lösung zur Schonung der Ressourcen und der Umwelt dar. In konventionellen Großkraftwerken bleibt die bei der Erzeugung von elektrischer Energie entstehende Wärme meistens ungenutzt und wird über Kühltürme oder Flüsse an die Umgebung abgegeben. Demzufolge sind die Verluste der zentralen Erzeugung entsprechend hoch. Durch die Nutzung der Wärme bei gleichzeitiger Stromproduktion in KWK-Anlagen lassen sich die Verluste auf ein Minimum begrenzen und höchste Brennstoffausnutzungsgrade realisieren. In Abbildung 3.1 wird dieser Sachverhalt verdeutlicht. Zur Bereitstellung der gleichen Menge an Nutzenergie ist im Fall der gekoppelten Erzeugung 66 % weniger Primärenergie nötig.

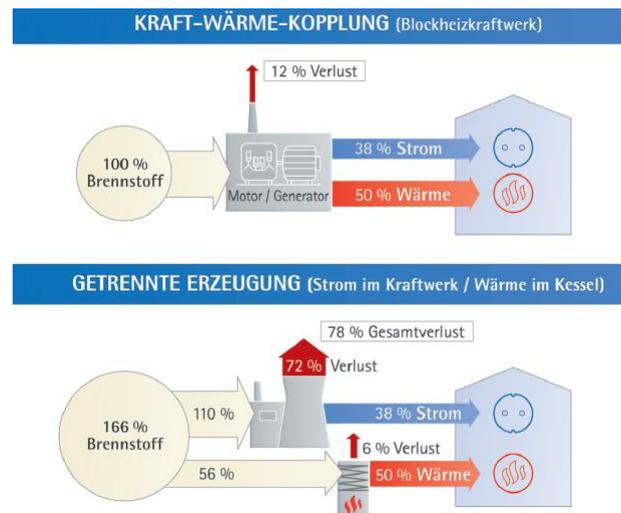


Abbildung 3.1.: Vergleich KWK und getrennte Erzeugung von Strom und Wärme (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., 2009, S. 10)

Als BHKWs werden KWK-Anlagen im kleinen Leistungsbereich bezeichnet, die als kompakte Geräte fertig montiert geliefert werden (Paula, 2002, S. 6). Das Europäische Parlament (2004, S. 4) definiert Kleinstanlagen bis zu einer Anlagenleistung von 500 kW<sub>el</sub> und Kleinanlagen bis zu einer Leistung von 1 MW<sub>el</sub>. In der Literatur können

noch weitere Unterteilungen identifiziert werden, die hier im Sinne der Einfachheit keine Anwendung finden sollen. Entsprechend der festgelegten Leistungsgrenze werden in dieser Untersuchung nur die Kleinstanlagen analysiert. BHKWs auf Basis der Verbrennungskraftmaschinen (VKM) sind im untersuchten Leistungsbereich bis 250 kW<sub>el</sub> Stand der Technik und in großen Stückzahlen am Markt verfügbar. Andere Technologien wie der Antrieb mittels Stirlingmotor oder Brennstoffzelle gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung. In Bezug auf Kapitel 1.3 werden in diesem Abschnitt BHKWs auf Basis von VKM, Stirlingmotoren und Gasturbinen analysiert. Da für diese Technologien ausschließlich flüssige und gasförmige Brennstoffe in Frage kommen, werden außerdem Vergasungskonzepte zur Nutzung fester Biomasse untersucht.

Nachfolgend werden generelle Informationen zu KWK-Technologien erläutert. Im Speziellen wird auf wichtige Gleichungen, die allgemeine Funktionsweise und mögliche Betriebsarten eingegangen.

Ein wichtiges Maß für die Auswahl der Technologie ist der thermische und elektrische Leistungsbereich. Da sich die Auslegung von kleinen dezentralen Anlagen vorwiegend am thermischen Energiebedarf des Nutzers orientiert, kann durch die Klassifizierung (Tabelle 3.2) ein erster Überblick zu dem jeweils abgedeckten Kundensegment gegeben werden. Die folgende Tabelle 3.2 stellt die Leistungsbereiche der einzelnen Antriebsarten dar.

<b>KWK-Technologie</b>	<b>P<sub>el</sub> in kW</b>	<b>P<sub>th</sub> in kW</b>
VKM	1 - 20.000	7 - 25.000
Stirling	1 - 40	2,5 - 100
Gasturbine	25 - 350.000	50 - 700.000
Vergaser	13 - 1.000	31 - 2.000

Tabelle 3.2.: Leistungsbereiche der Technologien (in Anlehnung an Dittmann, 2011, S. 10)

Für den Vergleich der Technologien wird oftmals der Wirkungsgrad herangezogen. Im Allgemeinen beschreibt ein Wirkungsgrad das Verhältnis vom Nutzen zum Aufwand. Für KWK-Technologien lassen sich mehrere Wirkungsgrade definieren. Der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$  (bzw. der Brennstoffausnutzungsgrad) beschreibt die Gesamteffizienz einer Anlage bzw. den Ausnutzungsgrad des zur Verfügung gestellten Brennstoffes. (Hell, 1985, S. 194)

$$\eta_{ges} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_N}{\dot{m}_b \cdot H_u} \quad (3.1)$$

- $\eta_{ges}$ : Gesamtwirkungsgrad
- $P_{el}$ : elektrische Leistung [kW]
- $\dot{Q}_N$ : Nutzwärmeleistung [kW]
- $\dot{m}_b$ : Brennstoffmassenstrom [kg/s]
- $H_u$ : unterer Heizwert des Brennstoffes [MJ/kg]

Als Nutzen zählen die bereitgestellte elektrische Leistung sowie die Nutzwärmeleistung. Der Aufwand zur Energieerzeugung errechnet sich aus dem Brennstoffmassenstrom multipliziert mit dem zugehörigen unteren Heizwert. Aus Gleichung 3.1 lassen sich der elektrische sowie der thermische Wirkungsgrad direkt ableiten. Dabei werden einerseits der elektrische und andererseits der thermische Nutzen separat bewertet. Die Summe aus beiden Wirkungsgraden ergibt wiederum  $\eta_{ges}$ .

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_b \cdot H_u} \quad (3.2)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{m}_b \cdot H_u} \quad (3.3)$$

- $\eta_{el}$ : elektrischer Wirkungsgrad
- $\eta_{th}$ : thermischer Wirkungsgrad
- $P_{el}$ : elektrische Leistung [kW]
- $\dot{m}_b$ : Brennstoffmassenstrom [kg/s]
- $H_u$ : unterer Heizwert des Brennstoffes [MJ/kg]
- $\dot{Q}_N$ : Nutzwärmeleistung [kW]

Eine weitere wichtige Kennziffer von KWK-Anlagen ist die Stromkennzahl  $\sigma$ , die das Verhältnis der erzeugten elektrischen Leistung zur Nutzwärmeleistung definiert. (Hell, 1985, S. 202)

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_N} \quad (3.4)$$

- $\sigma$ : Stromkennzahl
- $P_{el}$ : elektrische Leistung [kW]
- $\dot{Q}_N$ : Nutzwärmeleistung [kW]

Für  $\sigma = 0$  wird lediglich (Verlust-)Wärme produziert, für  $\sigma = 1$  wird genauso viel elektrische wie thermische Energie erzeugt und für den Fall  $\sigma \rightarrow \infty$  wird fast ausschließlich Strom (sowie ein geringer Anteil an Verlustwärme) erzeugt. Im Vergleich zur Wärme ist elektrische Energie reine Exergie, d.h. sie kann vollständig in eine andere Energieform umgewandelt werden und ist dementsprechend hochwertiger. Aus diesem Grund ist eine möglichst hohe Stromkennzahl äußerst vorteilhaft, da sich der Strom im Vergleich zur Wärme um ein Vielfaches besser verwenden lässt. Hohe Stromkennzahlen weisen außerdem auf hohe elektrische Umwandlungsgrade hin und wirken sich aufgrund des höheren Strompreises (im Vergleich zum Wärmepreis) positiv auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage aus.

### 3.1.1. Allgemeine Funktionsweise und Anlagenkomponenten

Nachdem die Schlagworte KWK und BHKW schon definiert wurden, soll im folgenden Abschnitt die prinzipielle Funktionsweise beschrieben werden. Unabhängig von der

jeweiligen Antriebstechnologie funktionieren die Anlagen im Wesentlichen nach dem Schema in Abbildung 3.2. In einer geeigneten Antriebsmaschine wird ein Brennstoff-

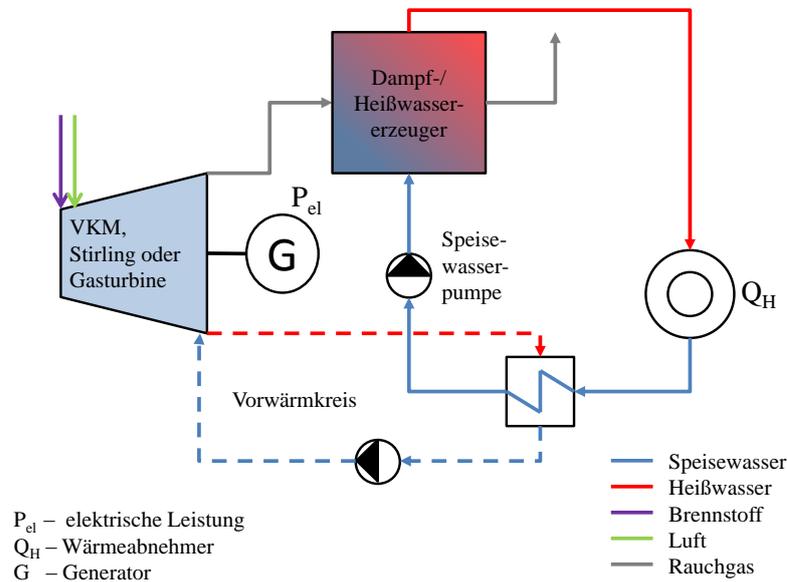


Abbildung 3.2.: Funktionsschema KWK (in Anlehnung an Simader et al., 2004, S. 9)

Luft-Gemisch verbrannt. Dadurch wird eine Welle in Rotation versetzt und mittels Generator in eine elektrische Leistung umgewandelt. Die gleichzeitig produzierte Wärme kann durch (mehrere) Wärmetauscher genutzt werden. Der Hauptanteil der Wärme wird durch den Heißwasserwärmetauscher aus dem Rauchgas gewonnen. Je nach Technologie stehen weitere Wärmequellen zur Verfügung, die in Abbildung 3.2 durch den Vorwärmkreis abgebildet sind. Welche Wärmequellen das sind bzw. auf welchen Temperaturniveaus die Wärmebereitstellung stattfindet, wird in den Kapiteln der jeweiligen Subtechnologien erläutert. Im Heißwasserwärmetauscher wird im Allgemeinen Heißwasser oder Dampf erzeugt, welches in weiterer Folge durch einen Wärmeverbraucher genutzt wird. Neben der Nutzung für Raumwärme und Warmwasser stellt die Bereitstellung von Prozesswärme, z.B. zur Dampferzeugung, eine weitere Verwendungsmöglichkeit dar. Die wichtigsten Anlagenkomponenten einer KWK-Anlage sind:

**Antriebsmaschine:** Die Antriebsarten VKM, Stirlingmotor und Gasturbine werden in den Kapiteln der einzelnen Subtechnologien erläutert.

**Generator:** Ein Generator wandelt durch das Prinzip der elektromagnetischen Induktion mechanische in elektrische Energie um. Bewegt sich ein Leiter in einem Magnetfeld, bzw. befindet sich ein Leiter in einem sich ändernden Magnetfeld, so bewirkt die Änderung des Magnetfeldes eine Bewegung der Ladungsträger, wodurch eine elektrische Spannung im Leiter erzeugt wird. Prinzipiell bestehen Generatoren aus einem

Rotor und einem Stator, die je nach Ausführung das Magnetfeld erzeugen bzw. die Leiterwicklungen tragen. (Spring, 2009, S. 6ff)

In KWK-Anlagen erzeugt die Antriebsmaschine eine Rotationsbewegung, welche in weiterer Folge an den Rotor des Generators übertragen wird. Durch diese Drehbewegung wird in den Leiterwicklungen eine Spannung induziert und somit elektrische Energie bereitgestellt. Entsprechend den Herstellerangaben werden im untersuchten Leistungsbereich hauptsächlich Synchron- und Asynchronmaschinen eingesetzt. Die verwendeten Generatoren erreichen Wirkungsgrade von 95 % und mehr. (2G Energy AG, 2012, S. 20)

**Wärmetauscher:** In Abhängigkeit der Antriebsart ergeben sich verschiedene Wärmequellen und Temperaturbereiche. Infolge der Nutzung von VKMs kann Wärme aus dem Ölkreislauf, dem Motorkühlwasserkreislauf sowie dem Abgas gewonnen werden, während bei der Stirling- und Gasturbinentechnologie lediglich die Nutzung der Wärme aus dem Abgas von Bedeutung ist. Diese Möglichkeiten sowie die nutzbaren Temperaturbereiche werden in den Kapiteln der jeweiligen Subtechnologien erläutert. (ASUE, 2010, S. 11)

**Speicher:** Ist in diesem Kontext die Rede von einem Speicher, so wird ein Wärmespeicher, z.B. in Form von einem Wassertank, gemeint. Durch die Verwendung eines Speichers kann die Erzeugung und Nutzung der Wärme zeitlich entkoppelt voneinander stattfinden. Für die Anlagenauslegung und Betriebsführung ergeben sich dadurch große Vorteile. Anlagen für die Nutzung im privaten Bereich der Ein- und Mehrfamilienhäuser, mit elektrischen Leistungen von 1 - 3 kW, werden nur in Verbindung mit einem Speicher angeboten. Für größere Maschinen können Speicher optional zugekauft werden.

**Zusatzbrenner/Spitzenlastkessel:** Da KWK-Anlagen in der Regel nicht auf die Spitzenlast eines Verbrauchers ausgelegt sind, sondern in den meisten Fällen 10 - 50 % des Wärmebedarfes decken (Schaumann & Schmitz, 2009, S. 57), ist für die Wärmespitzen ein Zusatzaggregat nötig. Entsprechend der Situation bei den Speichern, sind die Geräte zur Spitzenlastabdeckung in den Anlagen für das private Kundensegment integriert.

Für einen Anlagenbetrieb werden außerdem Schalt- und Steuerungssysteme, Schalldämmung und Schwingungsdämpfung sowie eine Einbindung in das hydraulische Wärmeverteilsystem benötigt.

#### 3.1.2. Betriebsarten

Nach Schaumann & Schmitz (2009, S. 32) lassen sich grundsätzlich drei Betriebsarten für KWK-Anlagen unterscheiden.

##### 1. Stromorientierter Anlagenbetrieb

Der Betrieb der Anlage orientiert sich am elektrischen Energiebedarf des jeweiligen Nutzerprofils. Dementsprechend resultieren die Anlagenauswahl und -auslegung aus dem Strombedarf. Die Auslegung sollte so erfolgen, dass ein Wärmeüberschuss

vermieden wird. Zu viel produzierte Wärme müsste ungenutzt an die Umgebung abgeführt werden und ist mit großen Wirkungsgradverlusten behaftet. Eventueller Wärmebedarf muss mit zusätzlichen Kesselanlagen (Spitzenlastkessel) bereitgestellt werden.

#### 2. Wärmeorientierter Anlagenbetrieb

Hier richtet sich der Betrieb der Anlage nach dem Wärmebedarf des Nutzers. Die Auswahl und Auslegung der Maschine orientiert sich jedoch nicht an der Wärmehöchstlast, da diese nur an wenigen Tagen bzw. Stunden im Jahr benötigt wird. Das BHKW sollte so konzipiert werden, dass aufgrund des Wärmebedarfs eine möglichst hohe Anzahl an Volllaststunden erreicht werden kann, da hier im Allgemeinen der Anlagenwirkungsgrad am größten ist. Die Abdeckung der Wärmespitzen erfolgt wiederum durch einen Zusatzkessel. Im optimalen Fall wird der produzierte Strom an Ort und Stelle verbraucht. Bei Über- bzw. Unterproduktion von elektrischer Energie wird diese in das öffentliche Netz eingespeist bzw. aus dem Netz bezogen.

#### 3. Wechsel zwischen strom- und wärmeorientiertem Betrieb

In Sonderfällen gibt es die Möglichkeit zwischen strom- und wärmeorientiertem Betrieb zu wechseln. Solche Anlagen besitzen den Freiheitsgrad, die Stromkennzahl flexibel einstellen zu können. Das ist speziell dann sinnvoll, wenn große Bedarfsschwankungen vorliegen. Eine Möglichkeit für diese Betriebsweise wäre eine Entnahme-Dampfturbine, welche im Sommer vorrangig Strom produziert, und im Winter Strom und Wärme bereitstellen kann. Für den festgelegten Leistungsbe- reich sind diese Anlagen aber deutlich zu groß.

Im Zuge dieser Untersuchung erfolgte die Anlagenauslegung und -auswahl hauptsächlich am Wärmebedarf. Ursache für die vorwiegend wärmeorientierte Betriebsweise ist die vollständige Nutzung der erzeugten Wärme, um möglichst hohe Brennstoffnutzungsgrade zu realisieren. Im Gegensatz zu überschüssig produzierter Wärme, die im Prinzip keine Verwendung findet, lässt sich der zu viel produzierte Strom vergleichsweise einfach in das Stromnetz einspeisen. Daraus abgeleitet kommen für den Betrieb eines BHKWs vorwiegend Gebäude bzw. Kundengruppen mit großem Wärmebedarf in Frage.

#### **3.1.3. Brennstoffarten**

Je nach Technologie und Entwicklungsstand ist der Einsatz verschiedener Brennstoffe mehr oder weniger geeignet. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick gegeben werden, welche Energieträger in den verschiedenen KWK-Anlagen eingesetzt werden können. Anzumerken ist, dass die Entwicklungen der meisten KWK-Technologien auf fossilen Brennstoffen basieren. Für den Einsatz dieser Brennstoffe, insbesondere Erdgas, bestehen die meisten Betriebserfahrungen. Trotzdem wird das Ziel sein, in absehbarer Zukunft auf fossile Energieträger zu verzichten und im großen Stil Biobrennstoffe anzuwenden.

### Fossile Energieträger

**Erdgas:** Erdgas ist ein Energieträger, der für alle hier untersuchten Subtechnologien Anwendung finden kann. Das sehr gut ausgebaute Erdgasnetz ist für die Anwendung und Verbreitung von KWK-Technologien durchaus von Vorteil. Ein großes Marktpotential stellt der Ersatz bzw. Austausch der vielfach verwendeten Gasthermen und Gasheizungen dar. Der Betrieb mit Erdgas ist im Vergleich zu anderen fossilen Brennstoffen (z.B. Heizöl) deutlich einfacher, da der logistische Aufwand für Lieferung und Lagerung entfällt. Außerdem weist Erdgas aufgrund des geringen Anteils an Kohlenstoff und dem hohen Wasserstoffanteil die günstigste CO<sub>2</sub>-Bilanz der fossilen Energieträger auf. Zudem sind die Abgase weitestgehend frei von Schwefeldioxid und Staub. (Paula, 2002, S. 75)

**Flüssiggas:** Flüssiggas ist analog dem Erdgas eine der saubereren fossilen Energiequellen und zeichnet sich durch sehr gute Emissionseigenschaften aus. Der hauptsächlich aus Propan und Butan bestehende Brennstoff ist für den Betrieb in motorischen BHKWs geeignet (Deutscher Verband Flüssiggas e.V., 2011, S. 2). Sollte kein Erdgasanschluss vorhanden sein, könnten die KWK-Anlagen gegebenenfalls mit Flüssiggas betrieben werden. Flüssiggas wird in Überdruckbehältern geliefert und gelagert und ist somit etwas aufwendiger als der Erdgasbetrieb.

**Erdölprodukte:** Erdölprodukte in Form von Heizöl und Diesel finden hauptsächlich in Dieselmotoren und Gasturbinenprozessen Anwendung (Paula, 2002, S. 76). Aufgrund der Brennstoffzusammensetzung sind die Emissionen jedoch deutlich schlechter als die von Erdgas und Flüssiggas zu bewerten.

### Erneuerbare Energieträger

Zur Nutzung in KWK-Anlagen kommen in erster Linie feste, flüssige und gasförmige Biomasserohstoffe in Frage. Die Ausprägungsformen von Biomasse sind höchst unterschiedlich. Das Spektrum reicht von forst- und landwirtschaftlichen Stoffen (Feststoffe) wie Holzhackschnitzel und Landschaftspflegematerial bis hin zu Biomasse aus ölhaltigen sowie zucker- und stärkehaltigen Pflanzen (Kaltschmitt et al., 2009, S. 38). Im Folgenden wird ein Überblick zu den möglichen Biobrennstoffen gegeben.

**Feste Biomasse:** Zur Stromproduktion, die in dieser Untersuchung im Vordergrund steht, wird hauptsächlich holzartige Biomasse (Hackschnitzel, Pellets, Scheitholz usw.) aus forst- und landwirtschaftlichen Anbau eingesetzt. Ausschlaggebend ist der hohe Energiegehalt sowie das damit verbundene Volumen der benötigten Brennstoffe. Die direkte Bereitstellung von Elektrizität ist durch Stirling- und Dampfmaschinen möglich, da hier der Antrieb über eine extern zugeführte Wärme realisiert werden kann.

**Flüssige Biomasse:** Flüssige Biobrennstoffe wie Pflanzenöl und Biodiesel werden vorrangig aus den ölhaltigen Pflanzen wie Raps, Sonnenblumen etc. hergestellt. Diese Brennstoffe werden hauptsächlich in den motorischen BHKWs verwendet, wobei je nach Hersteller und Technologie die tatsächliche Eignung abzuklären ist. In jedem Fall unterliegen diese Brennstoffe höchsten Qualitätsanforderungen, damit ein störungsfreier

und umweltfreundlicher Betrieb der Anlagen gewährleistet werden kann (Thuneke & Remmele, 2002, S. 4ff).

**Gasförmige Biomasse:** Brennbare Gase sind beispielsweise Klärgas, Deponiegas, Biogas und Holzgas. Durch die Vergasung/Vergärung von Biomasseprodukten entstehen Gase mit unterschiedlichen Anteilen an Methan, Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Je nach Art der Herstellung werden diese brennbaren Gase durch nichtbrennbare Stoffe verdünnt und sind im Allgemeinen als Schwachgase<sup>6</sup> zu bezeichnen. (Kaltschmitt et al., 2009, S. 619)

Gasförmige Biobrennstoffe werden vorwiegend in BHKWs mit Gasturbinen und Gasmotoren eingesetzt, wobei deren Qualität und Reinheit strengstens zu überwachen sind. Abschließend soll Tabelle 3.3 die einsetzbaren Brennstoffe der untersuchten Subtechnologien im Überblick aufzeigen.

Sub-technologie	fossile Energieträger			regenerative Energieträger		
	Erdgas	Flüssiggas	Erdölprodukte (Diesel, Heizöl)	gasförmige Biomasse	flüssige Biomasse	feste Biomasse
VKM	X	X	X	X	X	
Gasturbine	X	X		X *		
Vergaser						X
Stirlingmotor	alle Brennstoffe möglich					
*) bei ausreichendem Heizwert						

Tabelle 3.3.: Einsetzbare Brennstoffarten für KWK-Technologien (in Anlehnung an Haas et al., 2010, S. 38)

#### 3.1.4. Rechtliche Rahmenbedingungen

Im folgenden Kapitel sollen die wichtigsten gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie die relevanten Bestimmungen der Förderungsfähigkeit von KWK-Anlagen beschrieben werden. Aufgrund der großen Komplexität sowie der ständigen Änderung und Anpassung der Richtlinien, wird an dieser Stelle weder aus einzelnen Paragraphen und Gesetzestexten zitiert, noch kann die hundertprozentige Vollständigkeit garantiert werden. Es soll vielmehr ein Überblick gegeben werden, welche Gesetze und Richtlinien relevant sein könnten. Je nach Anwendungsfall gelten andere Gesetze und Vorschriften, die im Falle einer Projektumsetzung genauestens zu überprüfen sind. Einen ersten Überblick der relevanten Gesetze soll die folgende Tabelle 3.4 geben. Demnach werden Genehmigungen je nach Kundensegment auf Basis der verschiedenen Gesetze und Richtlinien erteilt.

<sup>6</sup>Heizwert unter 8,5 MJ/m<sup>3</sup>

	Genehmigung nach:	Berücksichtigung von Emissionen aus Motoren:
gewerbliche Betriebsanlagen	GewO 1994	§ 77 Abs. 1 und 3
	Bauordnung	nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn
	LRG-K (in GewO-Verf. mitangew.)	nur mit Abhitzekeessel
	EI(W)G der Länder <sup>1)</sup>	teilweise subsidiär zu GewO, teilweise über Nachbarschutz
Öffentliche Gebäude, Wohnhäuser	Bauordnung	nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn
Energieversorgungsunternehmen	GewO 1994, wenn gewerblich (siehe § 74 Abs. 5)	§ 77 Abs. 1 und 3
	EI(W)G <sup>1)</sup>	teilweise subsidiär zu GewO, teilweise über Nachbarschutz
	LRG-K	nur mit Abhitzekeessel
	Bauordnung	nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn
Krankenhäuser, Altenheime	KAG	keine Emissionsvorschriften
	Bauordnung	nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn
Deponien <sup>2)</sup>	GewO 1994 AWG DeponieVO  WRG	§77 Abs. 1 und 3 Anwendung GewO, DeponieVO ... regelt Stand der Technik für Ablagerungen subsidiär zur DeponieVO, regelt Anpassung bestehender Anlagen an DeponieVO
Klärgasanlagen	WRG	WRG regelt nur Abwasseremissionen
Landwirtschaftl. Betriebe	Bauordnung	nur indirekt über Immissionsschutz für Nachbarn

Tabelle 3.4.: Überblick zu relevanten Gesetzen für eine Anlagengenehmigung (BMWA, 2001, S. 3)

### Steiermärkisches Baugesetz (Stmk. BauG) (Stand 21.08.2008)

Im Stmk. BauG ist festgehalten, dass das Inverkehrbringen bzw. die Bewilligung von KWK-Anlagen entsprechend dem steiermärkischen Feuerungsanlagengesetz stattzufinden hat. Für die Errichtung einer Heizungsanlage ist in jedem Fall zu beachten, dass die Wände in unmittelbarer Umgebung der Anlage feuerbeständig aufgebaut sind. Außerdem wird für Anlagen mit einer Nennheizleistung größer als 18 kW ein feuerbeständiger Heizraum, brandhemmende Zugangstüren sowie die Kennzeichnung der Fluchtrichtung vorgeschrieben. Mit steigender Heizleistung steigen auch die bauseitigen Vorschriften. Im Fall einer nötigen Brennstofflagerung sind ebenfalls die entsprechenden Vorschriften einzuhalten (Abstand zur Feuerungsanlage, Vorschriften für Lagerräume, Belüftung etc.). (Bundesland Steiermark, 2012a)

Von den Lieferanten wird der entsprechende Mindestraumbedarf sowie die einzuhaltende Luftwechselrate vorgeschrieben. Eine ausreichende Lüftung der Heizräume ist für die Betriebssicherheit der Anlage besonders wichtig, da die Aggregate im Betrieb Luft für die Verbrennung benötigen und Wärme abstrahlen, welche den Heizraum zu-

nehmend aufwärmt. Für größere Anlagen (Gasturbinen, Vergaser), die innerhalb von Gebäuden verbaut werden, sind in der Regel Belüftungssysteme vorgeschrieben.

#### **Steiermärkisches Feuerungsanlagengesetz (FAnlG) (Stand 12.06.2001)**

Das FAnlG regelt neben der Inverkehrbringung und Errichtung auch den Betrieb von Feuerungsanlagen im Bereich der thermischen Nennleistung von 4 - 400 kW, und hat damit für alle KWK-Anlagen im untersuchten Leistungsbereich Gültigkeit. Für die Genehmigung bzw. das Inverkehrbringen müssen die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden, Mindestwirkungsgrade erreicht werden und die Anlagen müssen über ein Typenschild sowie eine technische Dokumentation verfügen. (Bundesland Steiermark, 2001)

Die Emissionsgrenzen und Wirkungsgrade richten sich nach dem jeweiligen Stand der Technik und unterliegen einer stetigen Änderung. Aktuelle Werte sind in den folgenden Richtlinien festgehalten:

- Vereinbarung gemäß Art.15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken (2011)
- Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren (2001)
- Ergänzungspapier zur Technischen Grundlage für die Beurteilung von Stationärmotoren - 2012

Des Weiteren sind im FAnlG die Regelungen bezüglich der Erstinbetriebnahme, Betriebsführung und wiederkehrender Prüfungen (z.B. Emissionsmessung durch Rauchfangkehrer) festgehalten.

#### **Steiermärkisches Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2005 (Stmk. EIWOG)**

Laut Bundesland Steiermark (2005) wird die Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie durch das Stmk. EIWOG geregelt. Im Zuge der Öffnung des Strommarktes in den neunziger Jahren wurde das Gesetz erlassen, um auch unabhängigen Marktteilnehmern, z.B. mit dezentralen Erzeugungseinheiten, den Zugang zum Stromnetz zu ermöglichen. Für alle Erzeugungsanlagen bis 500 kW<sub>el</sub> gilt das „vereinfachte Verfahren“. Der Betreiber hat die entsprechenden Unterlagen bei der Behörde einzureichen, wonach diese die entsprechenden Dokumente für einen bestimmten Zeitraum (höchstens vier Wochen) bei der Standortgemeinde aufzulegen hat. Während dieser Zeit können Anrainer und andere Parteien eventuelle Einsprüche erheben, welche die Behörde im Sinne des Allgemeinwohls zu beurteilen hat. Sofern eine Anlage dem jeweiligen Stand der Technik entspricht und die geltenden Emissionsvorschriften eingehalten werden, hat die Behörde den Genehmigungsbescheid binnen drei Monaten zu erlassen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass der Netzbetreiber verpflichtet ist, erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen den Netzzugang unter den allgemeinen Netzbe-

dingungen zu gewähren. Für die Kundenversorgung gilt zudem, dass Strom aus erneuerbaren Energiequellen und KWK-Anlagen Vorrang hat. Damit verbunden sind die Ziele der Förderung der erneuerbaren Energiequellen sowie die Nutzung der KWK als nachhaltiges Mittel zur Energieeinsparung. Auf diese Weise wurde die Möglichkeit der Stromeinspeisung auf Verbraucherebene geschaffen und der Ausbau dezentraler Anlagen unterstützt. (Bundesland Steiermark, 2005)

#### **Förderungsmöglichkeiten**

Förderstelle für KWK-Anlagen ist die Kommunalkredit Public Consulting GmbH (KPC). Durch einen Investitionszuschuss von bis zu 30 % werden Erdgas KWK-Anlagen für die gewerbliche Nutzung gefördert. Für die private Anwendung von KWK-Anlagen gibt es derzeit keine Investitionszuschüsse. Förderungsfähig sind alle Kosten, die primär mit einer Effizienzsteigerung verbunden sind. Das betrifft z.B. das BHKW, die Planung sowie die Montage. Nicht förderungsfähig sind die Kosten für den Gasanschluss, Heizkörper und Fußbodenheizung. Für einen Förderungszuschlag sind die entsprechenden Rahmenbedingungen der KPC zu erfüllen. Diese orientieren sich am derzeitigen Stand der Technik und betreffen in erster Linie die Emission, den Eigennutzungsgrad der erzeugten elektrischen Energie sowie den Jahresnutzungsgrad. (KPC, 2012b, S. 1ff)

Außerdem besteht die Möglichkeit, durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger eine Einspeisevergütung im Sinne des Ökostromgesetzes zu erhalten. Erfüllt eine Maschine die gesetzlichen Voraussetzungen einer Ökostromanlage, so wird die eingespeiste Energiemenge von der Abwicklungsstelle für Ökostrom (OeMAG) vergütet. Die Vergütung richtet sich nach der Anlagengröße und dem verwendeten Brennstoff.

Laut BMWFJ (2012, S. 2ff) ist für die Stromerzeugung aus fester Biomasse ein Tarif von 18 - 20 ct/kWh festgesetzt. Die Stromproduktion aus flüssiger Biomasse (5,8 - 7,8 ct/kWh) bzw. Biogas (19,6 - 21,6 ct/kWh) wird ebenfalls durch festgeschriebene Einspeisetarife gefördert.

Eine Förderung im Sinne des österreichischen KWK-Gesetzes entfällt, weil dadurch lediglich KWK-Anlagen gefördert werden, „deren Betrieb der öffentlichen Fernwärmeversorgung dient“ (Bundeskanzleramt Österreich, 2012a).

### 3.1.5. BHKW-Verbrennungskraftmaschine

BHKWs auf Basis von Verbrennungskraftmaschinen (Otto- und Dieselmotor) sind die am weitesten verbreitete Technologie auf dem KWK-Markt. Grund dafür ist die millionenfache Nutzung der Motoren in der Fahrzeugindustrie. Solche Motoren sind ein Massenprodukt und können mit wenigen Modifikationen für KWK-Technologien angewendet werden, mit dem großen Vorteil, dass aufgrund der geringen Anzahl an Lastwechseln, lange Betriebsphasen mit konstanter Leistung und wenigen Startvorgängen eine deutlich höhere Lebensdauer als im Kraftfahrzeug erreicht werden kann. (ASUE, 2012, S. 12)

#### 3.1.5.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

In Bezug auf Kapitel 3.1.1 wird an dieser Stelle lediglich auf die Antriebsart und die nutzbaren Wärmequellen eingegangen.

##### Antrieb

Die Funktionsweise dieser Technologie soll stellvertretend am Beispiel eines Viertakt-Ottomotors erläutert werden. In Ergänzung zu der folgenden Beschreibung soll die Funktionsweise durch Abbildung 3.3 verdeutlicht werden. Im ersten Takt (Ansaugen) wird durch die Kolbenbewegung nach unten ein Kraftstoff-Luft-Gemisch angesaugt. Danach verschließt sich das Einlaßventil, der Kolben bewegt sich nach oben und verdichtet das Gemisch im zweiten Takt (Verdichten), wodurch Druck und Temperatur in dem Verbrennungsraum steigen. Im dritten Takt (Arbeiten) wird das Gemisch durch einen Funken fremdgezündet, explodiert und drückt den Kolben nach unten. Das Kraftstoffgemisch verrichtet seine Arbeit am Kolben, sodass die Antriebswelle in Rotation versetzt wird. Im vierten Takt (Ausstoßen) öffnet sich das Auslassventil, das Abgas wird ausgestoßen und der Vorgang beginnt mit dem ersten Takt von vorn.

Wie in Abbildung 3.3 dargestellt, wird durch die Auf- und Abwärtsbewegung des Kolbens eine Welle in Rotation versetzt, wodurch der Generator elektrischen Strom erzeugt. Die Abwärmenutzung wird symbolisch durch das Heizungssymbol in der Abgasleitung dargestellt.

In motorischen BHKWs werden stationäre Motoren aus dem Schiffbau und Industriebau eingesetzt (Schaumann & Schmitz, 2009, S. 55). Die am häufigsten verwendeten Prinzipien sind Ottogas- und Dieselmotoren. In Tabelle 3.5 sollen die größten Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotoren schematisch zusammengefasst werden. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich dabei um die hauptsächlichen Unterschiede der Motoren aus der Kraftfahrzeugindustrie handelt.

Dieselmotoren sind Selbstzünder und haben den Vorteil des höheren elektrischen Wirkungsgrades. Demgegenüber stehen die höhere Belastung der Anlagenkomponenten (hoher Druck und hohe Temperatur) und dem daraus resultierenden höheren spezifischen Gewicht. Ein weiterer Nachteil ist das schlechtere Emissionsverhalten. Die Unterschiede

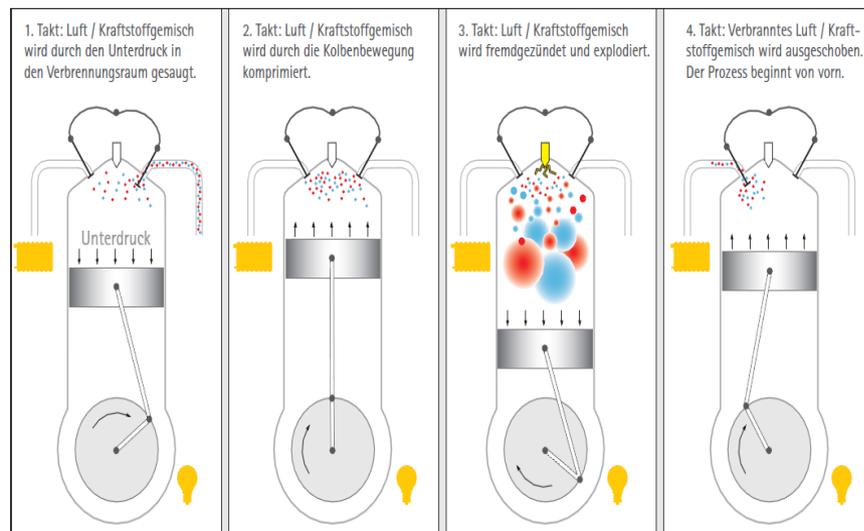


Abbildung 3.3.: Funktionsweise am Beispiel des Viertakt-Ottomotors (ASUE, 2011b, S. 11)

de des elektrischen Wirkungsgrades konnten in der Marktrecherche betätigt werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Differenzen im kleinen Leistungsbereich (1 - 20 kW<sub>el</sub>) durchaus geringer ausfallen. Außerdem liegen die mittleren elektrischen Wirkungsgrade der verwendeten Stationärmotoren entsprechend Abbildung 3.4 etwas höher.

Der Vollständigkeit halber ist das Konzept der Zündstrahlmotoren zu erwähnen. Dieses stellt eine Weiterentwicklung der Dieseltechnologie dar und wird in erster Linie zur Verstromung von Schwachgasen eingesetzt. Der von der Firma Schnell Zündstrahlmotoren AG entwickelte Motor verdichtet ein Biogas-Luft-Gemisch und spritzt im Moment des höchsten Verdichtungsverhältnisses einen Strahl Zündöl zum Zünden ein. Vorteilhaft ist die Nutzung von Biokraftstoffen sowie der hohe elektrische Wirkungsgrad im Vergleich zu einem Ottomotor, als Nachteil sei der Verbrauch an Zündöl zu nennen.

Abschließend soll festgehalten werden, dass die dargestellten Unterschiede der jeweiligen Motorenkonzepte (Otto/Diesel/Zündstrahl) keinen wesentlichen Einfluss auf die Funktionsweise und das Betriebsverhalten der Technologie haben. Aus diesem Grund werden die beschriebenen Antriebskonzepte in weiterer Folge einheitlich als VKM bezeichnet.

### Wärmetauschersysteme

Die Wärmeauskopplung in motorisch betriebenen KWK-Anlagen findet zunächst im Öl- und Zylinderkühlwasserkreislauf statt. Hier wird das Heizwasser vorgewärmt und

	<b>Ottomotor</b>	<b>Dieselmotor</b>
Brennstoff	Leichtkraftstoff (Benzin)	Schwerkraftstoff (Diesel)
Zündung	Fremdzündung	Selbstzündung
Verdichtungsdruck	8 - 15 bar	25 - 65 bar
Wirkungsgrad elektrisch	24 % (max. 33 %)	33 % (max. 50 %)
Emissionsverhalten	+	-
Teillastverhalten	-	+
Nutzung der Abgaswärme	+	-

Tabelle 3.5.: Unterschiede Ottomotor-Dieselmotor  
(in Anlehnung an Kalide & Sigloch, 2010, S. 149)

danach durch den Abgaswärmetauscher auf die Vorlauftemperatur angehoben. Entsprechend den üblichen Heizwasserrücklauftemperaturen von 50 - 70 °C erfolgt die Aufheizung auf Vorlauftemperaturen von 90 - 110 °C. In Einzelfällen bzw. in Sonderanwendungen können auch Vorlauftemperaturen bis 130 °C erreicht werden. (Schaumann & Schmitz, 2009, S. 57f)

In kleinen Aggregaten, z.B. Ecopower 1.0 von Vaillant, erfolgt die Wärmeauskopplung über einen separaten Kühlmittelkreislauf. Das Kühlmittel durchströmt Ölwanne, Abgaswärmetauscher sowie den Motor und wird auf über 70 °C erhitzt. Anschließend wird die Wärme im Wärmeauskopplungsmodul an den Heizwasserkreislauf übertragen. Die Anlagen im Bereich von 1 kW<sub>el</sub> erzeugen Heizwasservorlauftemperaturen von 70 - 80 °C. (Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, 2012, S. 7ff)

### 3.1.5.2. Stand der Technik

KWK-Anlagen auf Basis der VKM sind seit den neunziger Jahren Stand der Technik und genießen eine weite Verbreitung am Markt. Das resultiert vorwiegend aus dem breiten Leistungsspektrum der Technologie. Die Anlagen können sowohl im Einfamilienhaus als auch in großen Gewerbebetrieben sowie in Fern- und Nahwärmenetzen zum Einsatz kommen. Die Befragung der Hersteller ergab, dass die Anlagen bei regelmäßiger Wartung eine Lebensdauer von Minimum zehn bis hin zu 20 Jahren erreichen können (in Abhängigkeit der jährlichen Betriebsstunden). Die Schwankungsbreite der Herstellergarantie ist ähnlich groß, zwei etablierte Hersteller nannten einen Garantzeitraum von zwei Jahren, wobei andere Hersteller wiederum fünf bis zehn Jahre angaben. Laut ASUE (2012, S. 11) erreichen die Motoren Laufzeiten zwischen 30.000 - 100.000 Stunden, wobei die Laufzeiten wesentlich von der Motorengröße und der Betriebsweise abhängen. Für die Erreichung der hohen Anzahl an Betriebsstunden sind Wartungs- und Servicearbeiten essentiell. Bei motorischen BHKWs kann mit Wartungsintervallen von 2.000 - 4.000 Nutzungsstunden gerechnet werden. Dabei sei angemerkt, dass es auch Anlagen bzw. Hersteller mit deutlich größeren Wartungsintervallen gibt. Allgemein kann festge-

halten werden, dass in dem untersuchten Leistungsbereich mit Wartungskosten von 2 - 4 ct/kWh<sub>el</sub> gerechnet werden kann. Zu den wichtigsten Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen zählen der Öl- und Ölfilterwechsel, die Überprüfung der Zündkerzen sowie eine Sichtkontrolle der Abgasanlage und Gasstrecke (Viessmann; ESS Energie Systeme und Service GmbH, 2010, S. 18f). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle großen Hersteller (Vaillant, Viessmann, etc.) Vollwartungsverträge für ihre Anlagen anbieten.

Wie bereits erwähnt, zeichnen sich KWK-Anlagen durch einen hohen Wirkungsgrad aus. Entsprechend der durchgeführten Markterhebung, wurden in der folgenden Darstellung 3.4 die Wirkungsgrade der angebotenen BHKWs zusammengefasst. Während

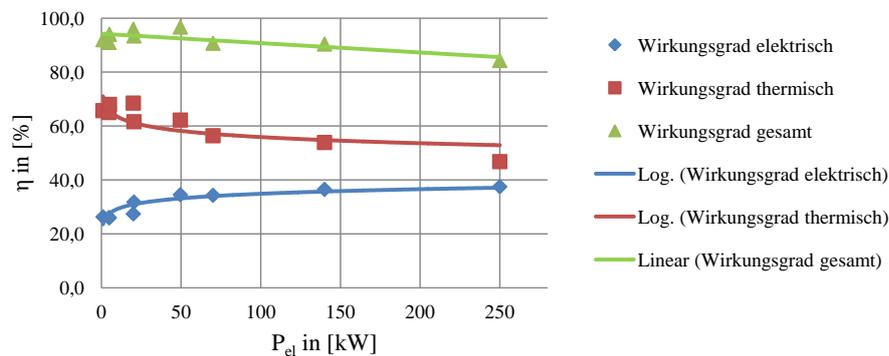


Abbildung 3.4.: Wirkungsgrade BHKW-VKM

die Gesamtwirkungsgrade im untersuchten Leistungsbereich einen konstanten Verlauf (über 90 %) aufweisen, steigen die elektrischen Wirkungsgrade mit zunehmender elektrischer Leistung an. Als Faustregel gilt, dass zirka ein Drittel der Primärenergie in elektrische Energie umgewandelt werden kann. In der Branche haben sich außerdem Touch Screen Systeme zur Modulsteuerung etabliert. Die Anlagen lassen sich dadurch einfach bedienen sowie regeln und geben Auskunft über derzeitige Istwerte und mögliche Betriebsstörungen. Für die Anlagenüberwachung und -fernsteuerung ist lediglich eine ISDN-Verbindung oder analoge Telefonleitung nötig. Eventuelle Störungen können automatisiert per E-Mail an die Gebäudetechnik bzw. den Nutzer gesendet werden und bieten die Chance der schnellstmöglichen Behebung. Andererseits können die Anlagen bequem über eine App vom Handy bedient werden. (2G Energy AG, 2012, S. 21f)

### 3.1.5.3. Vor- und Nachteile

Ein großer Vorteil der Technologie ist der elektrische Wirkungsgrad. Im Vergleich zum Stirlingmotoren- und Gasturbinenantrieb weisen die VKMn die besten Resultate auf und produzieren demnach einen hohen Anteil an elektrischer Energie. Derzeit scheint nur die Brennstoffzellentechnologie in der Lage zu sein, einen höheren Wirkungsgrad zu

liefern, wobei diese Technologie derzeit erst das Stadium der Pilotanwendungen erreicht hat (Dittmann, 2011, S. 10). BHKWs auf Basis der VKM sind seit mehr als zehn Jahren am Markt etabliert und stellen eine ausgereifte Technologie dar, Kinderkrankheiten sind beseitigt und der Endkunde kann je nach Bedarf mit einer jährlichen Verfügbarkeit von 8.000 Stunden rechnen. Ein weiterer Vorteil ist die Brennstoffvariabilität. Sowohl Erdgas, Flüssiggas, Heizöl als auch Biogas/Klärgas, Biodiesel oder Pflanzenöl können zum Einsatz kommen (Haas et al., 2010, S. 38).

Als nachteilig erweist sich vor allem die Wartungsintensität und die damit verbundenen Kosten. Die Intervalle von 2.000 - 4.000 Stunden sind deutlich kleiner als die der anderen Antriebe. Aufgrund der internen explosionsartigen Verbrennung ist während den Betriebsphasen mit Schwingungen und Lärmemissionen zu rechnen. Außerdem fallen infolge des Verbrennungskonzeptes höhere Schadstoffemissionen als bei den anderen Antriebsmöglichkeiten an.

#### 3.1.5.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Die BHKWs erreichen im gesamten Leistungsbereich hohe Anlagenwirkungsgrade von ca. 90 % (Abbildung 3.4). Diese Erkenntnis der durchgeführten Marktrecherche wird durch ASUE (2011b, S. 11) bestätigt. Der theoretisch mögliche Wirkungsgrad liegt bei 100 %. Demnach ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,9. *Bewertungsstufe 4*

**Nachhaltigkeit:** Zur Stromproduktion wird vorrangig Erdgas oder Heizöl (Diesel) eingesetzt. Außerdem stellt die Verwendung von Biogas eine mögliche Option dar. *Bewertungsstufe 1-3*

**Reifegrad:** Die Anlagen sind seit den neunziger Jahren am Markt erhältlich und stellen eine anerkannte Technologie dar. Der hohe Anlagenwirkungsgrad von 90 % sowie die hohe Lebensdauer bieten geringes Potential für Verbesserungen. Eine große Auswahl an möglichen Herstellern beweist, dass die Technologie von den Wettbewerbern bzw. Konkurrenten beherrscht wird und den Wettbewerb in geringem Maße beeinflusst. Demzufolge sind motorische BHKWs eine Basistechnologie. *Bewertungsstufe 4*

**Wirtschaftlichkeit:** Infolge der wirtschaftlichen Bewertung erreichen die BHKWs auf Basis der VKM mittlere Stromgestehungskosten von 12 - 20 ct/kWh. Aufgrund der Anlagenleistung wird als Vergleichswert der durchschnittliche Strombezugspreis für (Klein) Gewerbekunden von 19,71 ct/kWh herangezogen. Aus diesem Grund ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,98 bis 1,64. *Bewertungsstufe 4*

**Verfügbarkeit:** Mit über 40 Herstellern sowie Lieferzeiten von einem bis zwei Monaten können die motorischen BHKWs eine sehr gute Marktverfügbarkeit vorweisen. *Bewertungsstufe 4*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz nach Oberschmidt (2010,

S. 172f) für gasbetriebene BHKWs von umgerechnet 2,73 (Stufe 3) bleibt unverändert. Das Projektteam ist der Auffassung, dass weder der Genehmigungsaufwand, noch die Standortfaktoren und die Bequemlichkeit einen großen Einfluss auf die Akzeptanzbewertung haben. *Bewertungsstufe 3*

### 3.1.5.5. Technologielieferanten

Im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse konnten 45 Hersteller bzw. Lieferanten identifiziert werden. Die am besten eingestuften Lieferanten wurden im weiteren Verlauf kontaktiert und um eine Angebotslegung gebeten. Für die Ausarbeitung der Angebote wurden reale Wärmeverbrauchsprofile von vier verschiedenen Kundengruppen zur Verfügung gestellt. Die in Abbildung 3.5 aufgelisteten Lieferanten gelten infolge der durchgeführten Bewertung als vielversprechend. Jede der aufgelisteten Firmen hat ein Angebot entsprechend der gestellten Anfrage eingereicht. Der elektrische Leistungsbereich soll einen ersten Hinweis auf das mögliche Kundensegment geben.

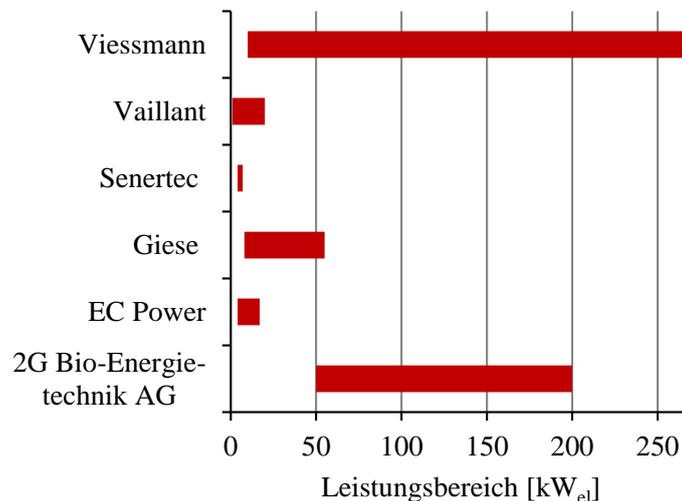


Abbildung 3.5.: Lieferanten BHKW-VKM

Das derzeit kleinste BHKW bietet die Firma Vaillant an. Der verwendete Honda-Motor liefert bei 1 kW elektrischer Leistung eine thermische Leistung von 2,5 kW und stellt damit die einzige Anlage für den technisch sinnvollen Betrieb im Privatkundensegment dar. Die Hauptanwendungsgebiete der Anlagen sind (Klein)Gewerbe- und Hotelbetriebe sowie die Objektversorgung. Marktführer ist die Firma Senertec mit dem vielfach verkauften Dachs (5 kW<sub>el</sub> / 14 kW<sub>th</sub>) (Energie & Management Verlagsgesellschaft mbH, 2011, S. 18).

3.1.5.6. Steckbrief BHKW-VKM

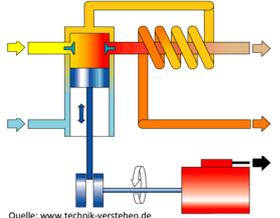
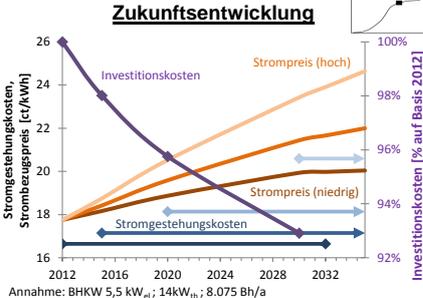
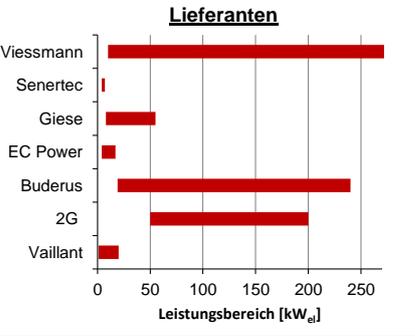
<b>BHKW-VKM</b>	
 <p>Quelle: Schreiber HSM</p>	<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Brennstoff wird in Stationärmotor in Strom und Wärme umgesetzt</li> <li>- interne Verbrennung, Stromerzeugung durch Generator</li> <li>- Wärmenutzung: Abgas, Ölkühlsystem und Zylinderkühlwasser</li> <li>- Betrieb: wärme- oder stromgeführt</li> <li>- Brennstoffe (Otto): Erdgas, Biogas, Klärgas, Holzgas, Flüssiggas</li> <li>- Brennstoffe (Diesel): Pflanzenöl, Biodiesel, Heizöl</li> </ul>
 <p>Quelle: www.technik-verstehen.de</p>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- elektrische Effizienz</li> <li>- ausgereifte Technologie</li> <li>- Verfügbarkeit</li> <li>- Brennstoffvariabilität</li> <li>- Stromkennzahl</li> </ul> <p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wartungsintensität/-kosten</li> <li>- Lärmentwicklungen</li> <li>- Schwingungen</li> <li>- Emissionen</li> <li>- Brennstoffmanagement/-kosten</li> </ul>
<p><b>Anwendungsgebiet / Kundengruppen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hotelbetrieb, öffentliche Einrichtungen, Objektversorgung</li> <li>- Industrie- und Gewerbebetrieb</li> <li>- Nah- und Fernwärmenetz</li> </ul> <p>(- eingeschränkte Anwendung in Ein-/Mehrfamilienhaushalt: laut Herstellerbefragung ist Vaillant Eco Power 1.0 einzige verfügbare Anlage; Stromgestehungskosten 63 ct/kWh)</p>	
<p><b>Zukunftsentwicklung</b></p>  <p>Annahme: BHKW 5,5 kW<sub>el</sub>; 14kW<sub>th</sub>; 8.075 Bth/a</p>	<p><b>Technologie-Markt-Bewertung</b></p>  <p>— Minimum — Maximum</p>
<p><b>Gestehungskosten:</b> mittlere Stromgestehungskosten: 11 - 20 ct/kWh Bewertung der Wärme: 7,3 ct/kWh</p>	<p><b>Lieferanten</b></p>  <p>Leistungsreichweite [kW<sub>el</sub>]</p>
<p><b>Forschungsaktivitäten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzung alternativer Kraftstoffe</li> <li>- Minderung der Emissionen</li> <li>- Abgasreinigung</li> <li>- Motoreffizienz</li> <li>- Steuerung / Überwachung BHKW</li> <li>- Optimierung Motorsteuerung</li> </ul>	
<p><b>Quellen / Informationen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schaumann (2009): "Kraft-Wärme-Kopplung"</li> <li>- Energie der Zukunft (2010): "Mikro-KWK"</li> <li>- www.bhkw-prinz.de</li> <li>- www.asue.de</li> </ul>	
<p><b>Umfeld:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Genehmigung:</b> Stmk. Bauordnung, Stmk. EIWOG, Gewerbeordnung 1994, Immissionschutz für Nachbarn (indirekt), Stmk. Feuerungsanlagengesetz</li> <li>- <b>Investitionsförderung:</b> umweltrelevante Kosten durch KPC (maximal 10-25 % der Gesamtinvestition)</li> <li>- <b>Einspeisetarife:</b> 19,5 ct/kWh bei Biogasbetrieb für 15 Jahre (ÖSET-VO 2012)</li> </ul>	

Abbildung 3.6.: Steckbrief BHKW-VKM

### 3.1.6. BHKW-Stirlingmotor

BHKWs auf Basis des Stirlingantriebes werden seit 2010 am Markt angeboten (ASUE, 2011b, S. 12). Der „WhisperGen“ des neuseeländischen Herstellers WhisperTech war die erste Anlage am Markt. Mittlerweile haben auch die Firmen Remeha, Senertec und Viessmann nachgezogen und ein entsprechendes Gerät am Markt platziert.

#### 3.1.6.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

In Bezug auf Kapitel 3.1.1 wird an dieser Stelle lediglich auf die Antriebsart und die nutzbaren Wärmequellen eingegangen.

##### Antrieb

Der Stirlingmotor, auch Heißgasmotor, ist eine hermetisch abgeriegelte Wärmekraftmaschine, die ein Arbeitsgas (z.B. Luft, Helium, Stickstoff) von außen erwärmt und abkühlt und dabei mechanische Energie erzeugt. Genutzt werden kann der Motor auch, um Wärme oder Kälte zu produzieren, je nachdem, ob der thermodynamische Prozess nach links oder rechts läuft. In Abbildung 3.7 ist das Funktionsprinzip schematisch dargestellt. (Steimle et al., 2007, S. 1f)

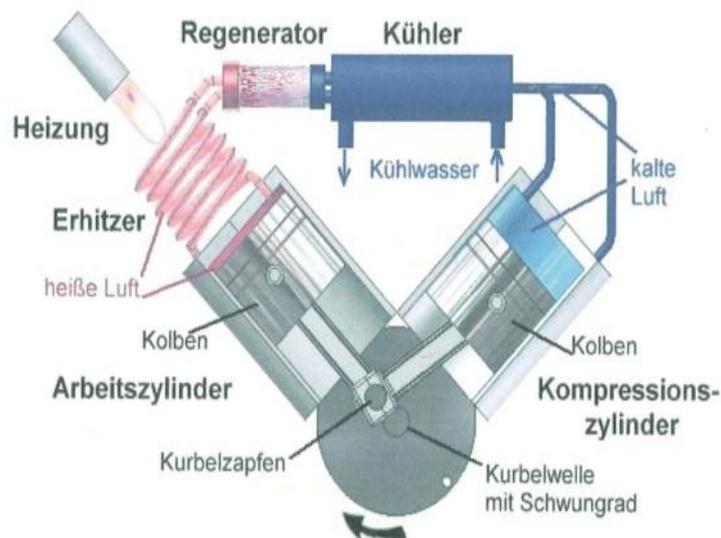


Abbildung 3.7.: Funktionsprinzip Stirlingmotor (Fette, 2008, S. 1)

Der Stirlingmotor hat einen permanent heißen und kalten Bereich, zwischen welchen sich das Arbeitsgas bewegt. In Abbildung 3.7 ist der Zustand dargestellt, in dem sich das

Arbeitsgas fast vollständig im Kompressionszylinder befindet. Temperatur und Druck im Motor sind auf einem niedrigen Niveau. Durch den Brenner (Heizung) wird das Arbeitsgas im Erhitzer erwärmt und dehnt sich aus. Dadurch wird der Arbeitskolben Richtung Kurbelwelle bewegt, dieser drückt gleichzeitig den Kompressionskolben nach oben und schiebt das Arbeitsgas in den warmen Bereich. Durch die kontinuierliche Beheizung steigen Temperatur und Druck in der Maschine an, das Gas dehnt sich aus und strömt ab einem bestimmten Betriebspunkt zurück in den Kompressionskolben, in dem es gekühlt wird und somit an Volumen verliert. Dadurch sinken Temperatur und Druck ähnlich des Anfangszustandes auf das niedrige Niveau. Der Motor nutzt die Volumenänderung beim Erhitzen und Abkühlen des Arbeitsgases, um daraus mechanische Energie zu erzeugen. Oft wird ein sogenannter Regenerator verwendet, welcher die Wärmeenergie auf dem Weg des Arbeitsgases vom heißen zum kalten Raum speichert und in der Gegenrichtung wieder abgibt. Das verbessert den Wirkungsgrad und wird in fast allen Ausführungen eingesetzt. (Fette, 2008)

Stirlingmotoren gibt es in den verschiedensten Ausführungen, die im Wesentlichen nach dem vorher beschriebenen Prinzip arbeiten. Der hier beschriebene Motor entspricht dem Alpha-Typ, mit zwei getrennten Zylindern, die durch einen Kanal verbunden sind. Bei einem Beta-Typ sind zwei Kolben in einem gemeinsamen Zylinder integriert. Der Gamma-Typ besitzt einen Verdrängerzylinder mit einem heißen und kalten Bereich sowie einen kleinen Arbeitszylinder, der entweder an der heißen oder kalten Seite des Verdrängerzylinders angeschlossen ist. (Steimle et al., 2007, S. 27ff)

Auch die Hersteller verwenden unterschiedliche Ausführungen. Während Remeha und Senertec einen Einzylinder-Freikolben-Stirlingmotor (Beta-Typ) verwenden, setzt der Hersteller Whispertech auf einen Vierzylinder-Stirlingmotor (Gamma-Typ) (Groß et al., 2010, S. 10).

### **Wärmenutzung**

Die von der Heizung bzw. dem Brenner produzierte Wärme wird in einem Rauchgaswärmetauscher (Erhitzer) verwendet, um das Arbeitsgas zu erhitzen und den Motor in Betrieb zu halten. Über einen zusätzlichen Wärmetauscher im Rauchgaskanal wird die Restwärme des Rauchgases zur Bereitstellung von Nutzwärme verwendet. Eine weitere Quelle zur Bereitstellung von Nutzwärme ist der Motorkühlkreislauf. Für einen hohen elektrischen Wirkungsgrad, sollte der kalte Bereich des Motors bestmöglich abgekühlt werden. Dementsprechend wird das Wasser aus dem Heizungsrücklauf zuerst im Motor vorgewärmt, da dieses aufgrund der geringen Temperatur die beste Kühlmöglichkeit darstellt. Danach wird das Wasser im Rauchgaswärmetauscher auf die Vorlauftemperatur angehoben. (Obernberger, 2004, S. 6ff)

Stirling-BHKWs im kleinen Leistungsbereich verfügen im Allgemeinen über zwei Brenner. Der Hauptbrenner ist die Antriebsquelle für den Motor, während der zweite Brenner nur an Tagen mit besonders hohem Wärmebedarf die Spitzenlastabdeckung übernimmt. (2G Home GmbH, 2010, S. 1)

### 3.1.6.2. Stand der Technik

Anlagen auf Basis des Stirlingantriebes sind seit kurzer Zeit am Markt erhältlich und werden vorwiegend in Kleinserien produziert (Dittmann, 2011, S. 10). Dementsprechend befindet sich die Technologie in der Phase der Kinderkrankheiten. Dieser Sachverhalt kann durch die Informationen einer österreichischen Vertriebsfirma für Stirling-BHKWs bestätigt werden. Demzufolge können derzeit keine Anlagen vom Hersteller „X“ installiert werden, da dieser an der Anhebung von Qualitätsstandards der Serienproduktion arbeitet (Stand 08/2012). Die Befragung der Hersteller ergab außerdem, dass für die Anlagen mit einer Lebensdauer von 10 - 15 Jahren oder umgerechnet ca. 30.000 Betriebsstunden gerechnet werden kann (2G Home GmbH, 2010, S. 2).

Die marktreifen Anlagen ( $1 \text{ kW}_{\text{el}} / 5 - 7 \text{ kW}_{\text{th}}$ ) sind vorwiegend für das Privatkundensegment konzipiert. Eine Ausnahme ist die Firma Stirling DK, welche Anlagen im Bereich von  $35 \text{ kW}_{\text{el}}$  herstellt. Mit dieser Technologie ist die Versorgung größerer Objekte möglich. Die Stirlingaggregate erreichen Gesamtwirkungsgrade von 95 %, allerdings ist die elektrische Effizienz (10 - 15 %) deutlich geringer als bei den anderen Antriebstechnologien (ASUE, 2011b, S. 12). Da der Wirkungsgrad stark vom Temperaturverhältnis abhängt, sollte die Wärmezufuhr auf einem möglichst hohen, und die Wärmeabfuhr auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau stattfinden. Die Hersteller werben zudem mit einem nahezu wartungsfreien Motor, auf eine jährliche Wartung des kompletten Systems kann dennoch nicht verzichtet werden. Die Kosten dafür werden mit 150 - 200 €/a angegeben. Ähnlich den motorischen BHKWs verfügen auch die Stirlingmaschinen über bedienungsfreundliche Touch Screens und können bei Bedarf aus der Ferne gesteuert werden.

### 3.1.6.3. Vor- und Nachteile

Die Vorteile dieser Technologie leiten sich weitestgehend aus dem Verbrennungskonzept ab. Das Konzept der kontinuierlichen äußeren Verbrennung ermöglicht sehr geringe Schadstoffemissionen und einen geräuscharmen Betrieb. Außerdem gelangen keine Brennstoffe oder Verunreinigungen in den Motor, wodurch die Motoren nahezu wartungsfrei betrieben werden können. Die jährlichen Wartungskosten sind dementsprechend deutlich niedriger als bei anderen Antriebstechnologien. Vorteilhaft ist außerdem die Brennstoffvariabilität. Neben flüssigen und gasförmigen Brennstoffen, kann die Wärme auch durch Festbrennstoffe oder eine Prozessabwärme bereitgestellt werden. (Steimle et al., 2007, S. 199f)

Die Praxis hat allerdings gezeigt, dass derzeit fast ausschließlich gasförmige und flüssige Brennstoffe zum Einsatz kommen. Grund dafür ist die Verschmutzung der Wärmetauscherflächen sowie das Ascheschmelzverhalten beim Einsatz von festen Brennstoffen. (Zeymer et al., 2009, S. 18)

Ein großer Nachteil dieser Technologie ist die geringe elektrische Effizienz und die damit verbundene Stromkennzahl. Die Anlagen produzieren viel mehr Wärme als elektrische Energie und erzielen zudem eine deutlich geringere Anzahl an Betriebsstunden

als die vergleichbaren BHKWs auf Basis der VKM (Vaillant ecopower 1.0). Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Anlagen aufgrund der hohen spezifischen Investitionskosten derzeit noch nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig sind.

#### 3.1.6.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Stirling-BHKWs erreichen Gesamtwirkungsgrade von 95 %. Bedauerlicherweise ist der elektrische Wirkungsgrad von 10 - 15 % im Vergleich zur VKM und Gasturbine deutlich geringer. Dieser Sachverhalt soll jedoch an dieser Stelle nicht bewertet werden. Der theoretisch mögliche Wirkungsgrad liegt bei 100 %. Demnach ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,95. *Bewertungsstufe 4*

**Nachhaltigkeit:** Zur Stromproduktion wird vorrangig Erdgas eingesetzt. Zudem stellt die Verwendung von Biogas bzw. Biomasse eine mögliche Option dar. *Bewertungsstufe 2-3*

**Reifegrad:** Stirling-BHKWs sind seit kurzer Zeit am Markt erhältlich und stellen eine neue verfügbare Technologie dar. Mit elektrischen Leistungen von einem kW sind die Anlagen für die Anwendung im Privatkundensegment ausgelegt. Demzufolge besteht ein sehr großes Markt- und Wettbewerbspotential. Große Potentiale für Weiterentwicklungen sind die elektrische Effizienz sowie die Senkung der Herstellungskosten bzw. der Anlagenpreise. Die Technologie wird folglich als Schlüsseltechnologie eingestuft. *Bewertungsstufe 3*

**Wirtschaftlichkeit:** Die fehlende Wirtschaftlichkeit ist derzeit ein großer Nachteil der Technologie. Mit durchschnittlichen Stromgestehungskosten von 60 - 90 ct/kWh wird die Netzparität nicht erreicht. Für die Bewertung wird der mittlere Strombezugspreis des Privatkundensegmentes von 21,02 ct/kWh herangezogen, da die Anlagen hauptsächlich im Einfamilienhaushalt verwendet werden. Demnach ergibt sich ein Verhältnis von 0,23 - 0,35. *Bewertungsstufe 1*

**Verfügbarkeit:** Als Ergebnis der Marktanalyse kann festgehalten werden, dass derzeit drei Hersteller ihre Anlagen am Markt platziert haben. Durch die Lieferzeit von einem bis zu drei Monaten ergibt sich eine gute Bewertung. *Bewertungsstufe 3*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz nach Oberschmidt (2010, S. 172f) für gasbetriebene BHKWs von umgerechnet 2,73 (Stufe 3) bleibt unverändert. Das Projektteam ist der Auffassung, dass weder der Genehmigungsaufwand, noch die Standortfaktoren und die Bequemlichkeit einen großen Einfluss auf die Akzeptanzbewertung haben. *Bewertungsstufe 3*

#### 3.1.6.5. Technologielieferanten

Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 3.1.5.5 wurden auch für diese Subtechnologie geeignete Hersteller identifiziert und bewertet. Da die Zahl der Anbie-

ter noch sehr klein ist, sind in Abbildung 3.8 alle möglichen Lieferanten dargestellt. Mit Ausnahme der Firma Stirling DK, von der im Zuge der Erhebung kein Angebot

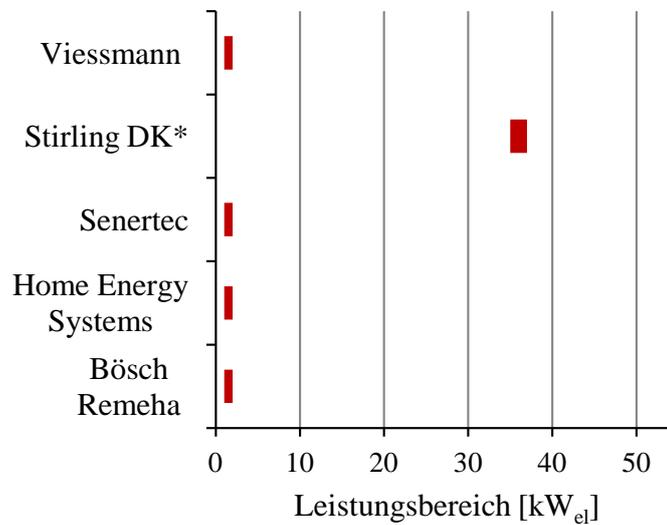
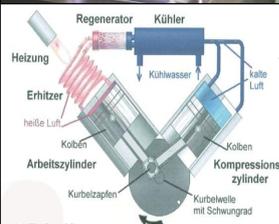


Abbildung 3.8.: Lieferanten BHKW-Stirlingmotor

beschafft werden konnte, produzieren alle Hersteller Anlagen für das private Kundensegment mit einer Leistung von 1 kW<sub>el</sub>. Laut Dittmann (2011, S. 11) ist die Firma WhisperTech mit über 300 verkauften Geräten (Stand 05/2011) in Europa führend. Auf der Firmenhomepage von WhisperGen (<http://www.whispergen-europe.com>) ist aktuell von Anlagen in tausenden europäischen Haushalten die Rede. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Hersteller WhisperTech, Remeha und Senertec den Vertrieb nach Österreich über Partnerfirmen abwickeln. Außerdem sei festgehalten, dass in den kommenden Jahren mit einem Zuwachs der potentiellen Anbieter zu rechnen ist, da viele Hersteller an der Markteinführung eines Stirlingaggregates arbeiten. Die mit einem Stern (\*) gekennzeichnete Hersteller haben kein Angebot abgegeben.

3.1.6.6. Steckbrief BHKW-Stirlingmotor

### BHKW-Stirlingmotor

Quelle: E. Haldmann

**Kurzbeschreibung:**

- durch externe Verbrennung wird Brennstoff in Wärme umgewandelt, diese treibt den hermetisch abgeriegelten Motor an, wodurch ein Generator elektrische Energie erzeugt
- Wärmenutzung: Abgas, Kühlsystem
- Brennstoffe: Erdgas, Flüssiggas (Biogas, feste Brennstoffe)
- Antrieb über externe Wärmequelle möglich (z.B. Prozesswärme)

**Vorteile:**

- Motor nahezu wartungsfrei
- geräuscharm
- Emissionsverhalten
- Antrieb über Wärme möglich
- Marktpotential

**Nachteile:**

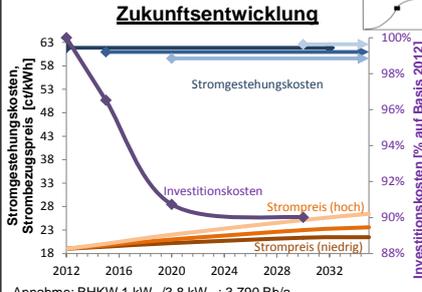
- elektrische Effizienz
- niedrige Stromkennzahl
- Wettbewerbsfähigkeit

**Anwendungsgebiet / Kundengruppen:**

- hauptsächlich Anlagen mit 1kW<sub>el</sub> am Markt:
  - Einfamilien- und Zweifamilienhaushalt
- Stirling DK bietet 35 kW<sub>el</sub> Anlage an:
  - Versorgung größerer Objekte möglich: Hotel- und Gewerbebetriebe, öffentliche Einrichtungen

---

**Zukunftsentwicklung**



Annahme: BHKW 1 kW<sub>el</sub>/3,8 kW<sub>th</sub>; 3.790 Bh/a

**Technologie-Markt-Bewertung**



---

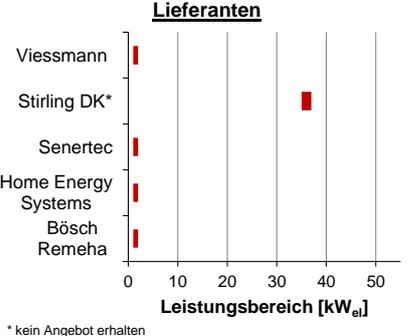
**Gestehungskosten:**  
mittlere Stromgestehungskosten: 60 - 90 ct/kWh  
Bewertung der Wärme: 8,2 ct/kWh

**Forschungsaktivitäten:**

- direkte Umwandlung von Solarenergie
- Weiterentwicklung am Motor
- Optimierung der Emissionen
- Verwendung von Biobrennstoffen

**Quellen / Informationen:**  
Schaumann (2009): "Kraft-Wärme-Kopplung"  
- www.whispergen.com  
- www.remeha.de  
- www.bhkw-prinz.de

**Lieferanten**



\* kein Angebot erhalten

---

**Umfeld:**

- **Genehmigung:** Stmk. Bauordnung, Stmk. EIWOG, Immissionschutz für Nachbarn (indirekt), Emissionen gemäß Vereinbarung Art.15a B-VG Feuerungsanlagen
- **Investitionsförderung:** umweltrel. Kosten durch Kommunalkredit Public Consulting (10-25 % der Investition)
- **Einspeisetarife:** 19,5 ct/kWh bei Biogasbetrieb für 15 Jahre (ÖSET-VO 2012)

Abbildung 3.9.: Steckbrief BHKW-Stirlingmotor

### 3.1.7. BHKW-Gasturbine

Gasturbinen sind eine weitere Technologie, die als Antrieb für KWK-Anlagen von Bedeutung sind. Die verwendeten Turbinen im Leistungsbereich bis 250 kW<sub>el</sub> werden im allgemeinen Sprachgebrauch als Mikrogasturbinen bezeichnet. Ist in weiterer Folge von Turbinen die Rede, so sei darauf verwiesen, dass es sich um „kleine“ Aggregate, sprich Mikrogasturbinen handelt. Die Firma Capstone begann in den neunziger Jahren mit der Entwicklung dieser Anlagen und verkaufte 1998 erstmals eine Mikroturbine als stationäre Stromerzeugungsanlage. (Capstone Turbine Corporation, 2011, S. 2)

Seit dem Jahr 2000 sind die Mikroturbinen auch am österreichischen Markt erhältlich.

#### 3.1.7.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

In Bezug auf Kapitel 3.1.1 wird an dieser Stelle lediglich auf die Antriebsart und die nutzbare Wärmequelle eingegangen.

#### Antrieb

Der Antrieb dieser Technologie wird durch eine Mikrogasturbine realisiert. Wie solch eine Maschine aufgebaut ist, wird in Abbildung 3.10 verdeutlicht. Die Anlage besteht aus

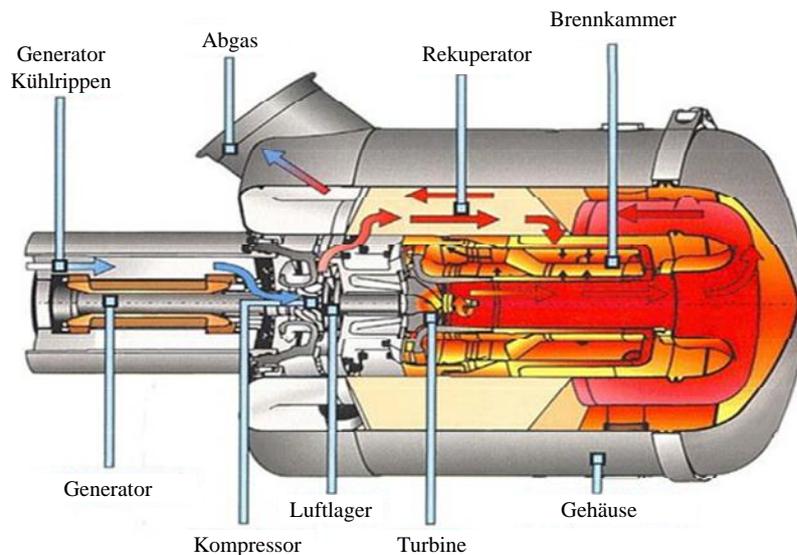


Abbildung 3.10.: Aufbau einer Mikrogasturbine (VTA Technologie GmbH, 2010, S. 2)

einer Verdichter- und Turbineneinheit, die gemeinsam mit dem Generator auf einer Welle sitzen. Die Verbrennungsluft wird durch den Radialkompressor von links angesaugt und kühlt im ersten Schritt den Generator. Durch den Kompressor wird der Druck der

Ansaugluft erhöht. Danach strömt die Ansaugluft durch den internen Wärmetauscher (Rekuperator) und wird durch die heißen Abgase vorgewärmt. Anschließend wird die erwärmte Luft mit dem Brennstoff vermischt und in der Brennkammer verbrannt. Die daraus entstehenden Heißgase werden in der Turbine auf Umgebungsdruck entspannt und verlassen die Maschine über den Rekuperator. Die in der Turbinenstufe erzeugte Leistung wird einerseits zum Antrieb des Kompressors und hauptsächlich für die Stromerzeugung durch den Generator genutzt. (Soares, 2007, S. 93ff)

In Gasturbinen wird ein Druck im Bereich von 4 - 8 Bar realisiert. Zur Optimierung der Emissionen werden die Anlagen mit Verbrennungstemperaturen von 800 - 900 °C betrieben. Nach der Turbinenstufe haben die Verbrennungsgase eine Temperatur von ca. 600 °C. Je nach Verwendung und Wirkungsgrad des Rekuperators haben die Abgase am Maschinenaustritt eine Temperatur zwischen 300 - 600 °C. (VTA Technologie GmbH, 2010; Schaumann & Schmitz, 2009, S. 93ff)

#### **Wärmenutzung**

In Gasturbinen wird die Nutzwärme aus dem Abgas gewonnen. Als Standard wird ein Abgaswärmetauscher zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser verwendet, mit Vor- und Rücklauftemperaturen von 80 °C bzw. 60 °C. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, haben die Abgase Temperaturen im Bereich von 300 - 600 °C und eröffnen der Technologie zusätzliche Nutzungsmöglichkeiten. Solche sind beispielsweise die Erzeugung von Prozesswärme ( $T > 100$  °C), die Dampferzeugung oder die Kopplung mit einer Absorptionskältemaschine im Sinne einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. (VTA Technologie GmbH, 2010, S. 4)

#### **3.1.7.2. Stand der Technik**

Mikroturbinen sind seit ca. 15 Jahren am Markt verfügbar und stellen somit eine ausgereifte Technologie dar, dazu haben vor allem die langjährigen Betriebserfahrungen der Energieerzeugung im großen Leistungsbereich sowie die vielfache Anwendung in der Luftfahrt beigetragen (Dittmann, 2011, S. 10). Gasturbinen-BHKWs sind im Leistungsbereich von 30 - 250 kW<sub>el</sub> am Markt erhältlich. Die Technologie deckt demzufolge einen großen Leistungsbereich ab und kann mit Ausnahme des Privatkundensegmentes universal eingesetzt werden.

Entsprechend den Herstellerinformationen beträgt die Lebensdauer der Aggregate ca. 80.000 Betriebsstunden, wobei nach 40.000 Einsatzstunden eine Generalüberholung nötig ist. Mit Wartungsintervallen von 8.000 Stunden gelten Turbinen als wartungsarm und überzeugen zudem durch eine hohe jährliche Verfügbarkeit. (E-Quad Power Systems GmbH, 2010, S. 2)

Nedomlel (2006, S. 12) nennt als Richtwerte für Wartungskosten ca. 0,6 - 1 ct/kWh<sub>el</sub> bzw. 0,38 - 0,52 €/Betriebsstunde. Gasturbinen-BHKWs erreichen derzeit Gesamtwirkungsgrade bis 85 %, wobei die elektrische Effizienz 25 - 30 % beträgt (Dittmann, 2011, S. 10).

### 3.1.7.3. Vor- und Nachteile

Ein Vorteil der Technologie ist die Bereitstellung von Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau. Dadurch wird die Anwendung von Gasturbinenanlagen vor allem im gewerblichen Bereich interessant, in welchen z.B. Prozesswärme oder -dampf benötigt wird. Ein großer Unterschied zu herkömmlichen Gasturbinen (im großen Leistungsbereich) ist, dass das Optimum des Wirkungsgrades nicht mehr bei hohem sondern bei geringem Druck (bis 4 Bar) liegt. In Folge dessen können einfache, kostengünstige und einstufige Radialturbinen und -verdichter eingesetzt werden. Außerdem überzeugen die Gasturbinen durch den niedrigen Wartungsaufwand sowie den damit verbundenen Kosten. Im Vergleich zu der Motorenttechnologie (2.000 - 4.000 Stunden) müssen Gasturbinen nur alle 8.000 Betriebsstunden gewartet werden. Durch das kontinuierliche Verbrennungskonzept, ähnlich der Stirling-Technologie, lassen sich die geltenden Emissionsgrenzwerte auch bei der Nutzung von Biobrennstoffen einfach erreichen. Außerdem verfügen Mikroturbinen über hervorragende Lastwechseleigenschaften, womit z.B. mehrere Aggregate als virtuelles Kraftwerk zügig und flexibel auf plötzliche Lastanforderungen bzw. -änderungen reagieren können. (Karl, 2006, S. 173f)

Das große Privatkundensegment kann von den Mikrogasturbinen derzeit nicht bedient werden. Die kleinste Mikroturbine erzeugt eine Leistung von 30 kW<sub>el</sub> und 70 kW<sub>th</sub> und wäre für den Ein- und Mehrfamilienhaushalt deutlich zu groß und absolut ungeeignet. Ein Nachteil ist zudem, dass die Turbinen weder die elektrische Effizienz noch den Gesamtwirkungsgrad der BHKWs mit VKM erreichen. Der Literatur ist zu entnehmen, dass Mikrogasturbinenkonzepte einen Vorteil durch geringe Investitionskosten aufweisen (Karl, 2006, S. 174). In der Praxis kann diese Information nicht bestätigt werden. Die Marktanalyse hat gezeigt, dass die spezifischen Investitionskosten für Gasturbinen-BHKWs erheblich höher sind, als für vergleichbare Anlagen auf Basis der VKM. Darüber hinaus ist die Leistungsabgabe der Gasturbine vom Umgebungszustand abhängig. Umgebungstemperatur und -druck beeinflussen den Wirkungsgrad der Anlagen und sollten bei der Auslegung beachtet werden. Als Beispiel sei die Vereisungsgefahr des Kompressors bei niedrigen Außentemperaturen angeführt. (Lechner & Seume, 2010, S. 969 ff)

### 3.1.7.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Laut Dittmann (2011, S. 10) erreichen Gasturbinen-BHKWs Gesamtwirkungsgrade von ca. 85 %. Im Vergleich zu dem theoretisch möglichen Wirkungsgrad von 100 % ergibt sich ein Verhältnis von 0,85. *Bewertungsstufe 4*

**Nachhaltigkeit:** Zur Stromproduktion wird vorrangig Erdgas eingesetzt. Zudem stellt die Verwendung von Biogas bzw. Biomasse eine mögliche Option dar. *Bewertungsstufe 2-3*

**Reifegrad:** Gasturbinen sind am Markt etabliert und stellen eine ausgereifte Technologie dar. Gasturbinen werden in der Luftfahrt vielfach eingesetzt und kontinuierlich verbessert. Dadurch haben Gasturbinen ein Level erreicht, an dem lediglich geringes Weiterentwicklungspotential besteht. Demzufolge werden Gasturbinen-BHKWs als Basistechnologie eingestuft. *Bewertungsstufe 4*

**Wirtschaftlichkeit:** Im Rahmen der wirtschaftlichen Anlagenbewertung erreichen die Gasturbinen-BHKWs mittlere Stromgestehungskosten von 17 - 25 ct/kWh. Aufgrund der elektrischen und thermischen Leistungen ist das Hauptanwendungsgebiet das (Klein)Gewerbe. Die Stromgestehungskosten werden demzufolge mit einem mittleren Strombezugspreis von 19,71 ct/kWh verglichen, woraus ein Verhältnis von 0,75 - 1,15 resultiert. *Bewertungsstufe 3-4*

**Verfügbarkeit:** Infolge der Marktrecherche konnten drei Lieferanten identifiziert werden. Die Lieferzeiten für die Anlagen betragen vier bis fünf Monate. Demzufolge ergibt sich eine durchschnittliche Bewertung. *Bewertungsstufe 2*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz nach Oberschmidt (2010, S. 172f) für gasbetriebene BHKWs von umgerechnet 2,73 (Stufe 3) bleibt unverändert. Das Projektteam ist der Auffassung, dass weder der Genehmigungsaufwand, noch die Standortfaktoren und die Bequemlichkeit einen großen Einfluss auf die Akzeptanzbewertung haben. *Bewertungsstufe 3*

#### 3.1.7.5. Technologielieferanten

Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 3.1.5.5 wurden acht Hersteller bzw. Lieferanten identifiziert und bewertet. In der folgenden Beschaffungsmarkterhebung hat sich jedoch gezeigt, dass sehr viele Hersteller ihre Produkte nicht nach Österreich vertreiben. Abbildung 3.11 listet die möglichen Technologielieferanten auf. Marktführer ist der amerikanische Hersteller Capstone Turbine Corporation, der Gasturbinen-BHKWs in unterschiedlichen Leistungsklassen anbietet und in Österreich durch die Wels Strom GmbH (Biogasbetrieb) und die Firma VTA Technologie GmbH (Erdgasbetrieb) vertreibt. Die Firma Turbec ist ein weiterer Hersteller von Mikroturbinen, allerdings war es im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse nicht möglich, ein Angebot zu organisieren. Die mit einem Stern (\*) gekennzeichneten Hersteller haben kein Angebot abgegeben.

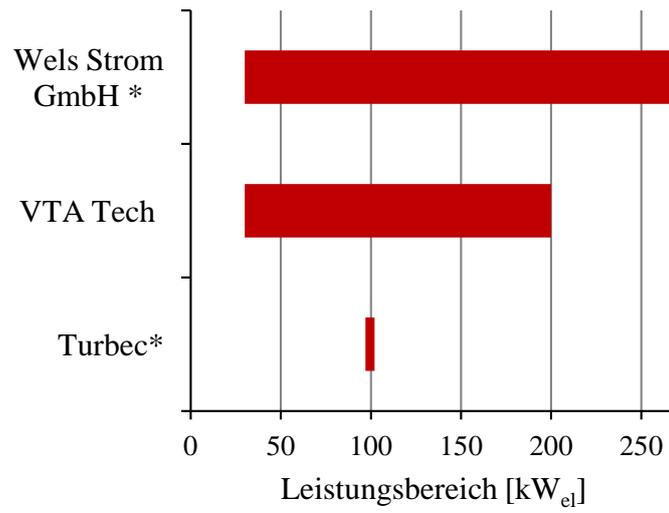


Abbildung 3.11.: Lieferanten BHKW-Gasturbine

3.1.7.6. Steckbrief BHKW-Gasturbine

### BHKW-Gasturbine



Quelle: VTA Technologie GmbH

**Kurzbeschreibung:**

- Brennstoff wird in Turbine in Strom und Wärme umgesetzt
- interne kontinuierliche Verbrennung, Stromerzeugung über Generator
- Wärmenutzung: Abgas (ca. 300°C)
- Betrieb: wärme- oder stromgeführt
- Brennstoffe: Erdgas, Flüssiggas, Klärgas, Holzgas (bei ausreichendem Heizwert), Kerosin, Diesel

**Vorteile:**

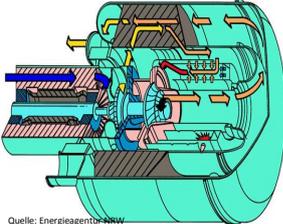
- Wartungsaufwand
- Emissionen
- hohes Temperaturniveau der Wärmeabgabe

**Nachteile:**

- Anlagen erst ab 30 kW<sub>el</sub>
- geringerer elektrischer Wirkungsgrad als VKM
- Wirkungsgrad von Umgebungszustand abhängig

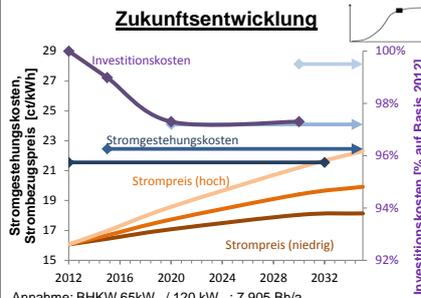
**Anwendungsgebiet / Kundengruppen:**

- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
- Dampferzeugung
- öffentliche Einrichtungen
- Hotelbetrieb
- Industrie- und Gewerbebetriebe
- Fern- und Nahwärmenetz



Quelle: Energieagentur NRW

**Zukunftsentwicklung**



Annahme: BHKW 65kW<sub>el</sub> / 120 kW<sub>th</sub>; 7.905 Bh/a

**Technologie-Markt-Bewertung**



**Gestehungskosten:**  
mittlere Stromgestehungskosten: 17-22 ct/kWh (30-200 kW<sub>el</sub>); Bewertung der Wärme: 7,3 ct/kWh

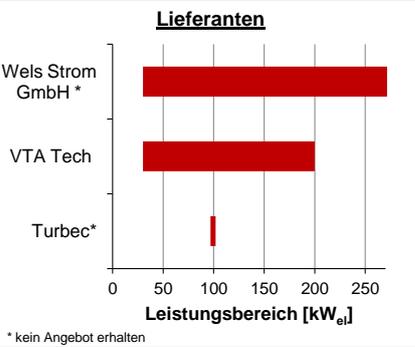
**Forschungsaktivitäten:**

- Micro Turbine Technology BV plant Mikroturbine mit 3 kW<sub>el</sub> und 15 kW<sub>th</sub> - ab 2013 verfügbar
- Verwendung alternativer Brennstoffe
- Wirkungsgradoptimierung: Schaufelbeschichtung, Erhöhung Turbineneintrittstemperatur, Minimierung Druckverluste, Flammenstabilität

**Quellen / Informationen:**

- Schaumann (2009): "Kraft-Wärme-Kopplung"
- www.microturbine.com
- www.capstoneturbine.com
- www.turbec.com

**Lieferanten**



\* kein Angebot erhalten

**Umfeld:**

- **Genehmigung:** Stmk. Bauordnung, Stmk. Gewerbeordnung, Stmk. EIWOG, Immissionschutz für Nachbarn (indirekt), Emissionen gemäß Vereinbarung Art.15a B-VG Feuerungsanlagen, VEXAT Verordnung
- **Investitionsförderung:** umweltrel. Kosten durch Kommunalkredit Public Consulting (10-25 % der Investition)
- **Einspeisetarife:** 19,5 ct/kWh bei Biomassebetrieb für 15 Jahre (ÖSET-VO 2012)

Abbildung 3.12.: Steckbrief BHKW-Gasturbine

### 3.1.8. Vergasungsanlagen

Die Vergasungstechnologie nimmt in dieser Untersuchung eine Sonderstellung ein, da sie prinzipiell nicht der Energieerzeugung dient. Im Wesentlichen wird durch die Vergasung von Biomasse ein brennbares Gas hergestellt, welches in weiterer Folge zur Produktion von Strom und Wärme eingesetzt werden kann. Über den Umweg der Biomassevergasung ist es demzufolge möglich, Strom (und Wärme) aus festen Brennstoffen herzustellen. Vor allem diese Tatsache macht die Technologie interessant, da die bisher beschriebenen Erzeugungsmöglichkeiten vorwiegend mit flüssigen und gasförmigen Brennstoffen betrieben werden.

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Möglichkeiten, feste Brennstoffe in gasförmige oder flüssige umzuwandeln (Vergärung, Pyrolyse und thermische Vergasung). Bei der Vergärung werden vorwiegend landwirtschaftliche Reststoffe in großen Fermentationsanlagen in brennbare Biogase umgewandelt. Die Pyrolyse dient der Erzeugung von flüssigen, lagerfähigen Brennstoffen aus kohlenstoffhaltigen Brennmaterialien. Durch die thermische Vergasung wird holzartige Biomasse in Holzgas (Produktgas) umgewandelt. (Karl, 2006, S. 176ff)

Da für diese Untersuchung die Verwendung von holzartiger Biomasse im Vordergrund stand, wird in weiterer Folge lediglich das Prinzip der thermischen Vergasung beschrieben.

Diese Technologie stellt eine Kombination aus einer der vorher erläuterten KWK-Anwendungen und einer Biomassevergasungsanlage dar. Das BHKW (VKM, Stirlingmotor, Gasturbine) wird durch einen zusätzlichen Vergasungsreaktor, sowie eine Gasreinigung- und -kühlungsanlage ergänzt. Diese Aggregate werden im System vor der Antriebseinheit (BHKW) installiert und dienen der Brennstoffbereitstellung und -aufbereitung. In Abbildung 3.13 soll dieser Sachverhalt vereinfacht dargestellt werden. Das hier gezeigt-

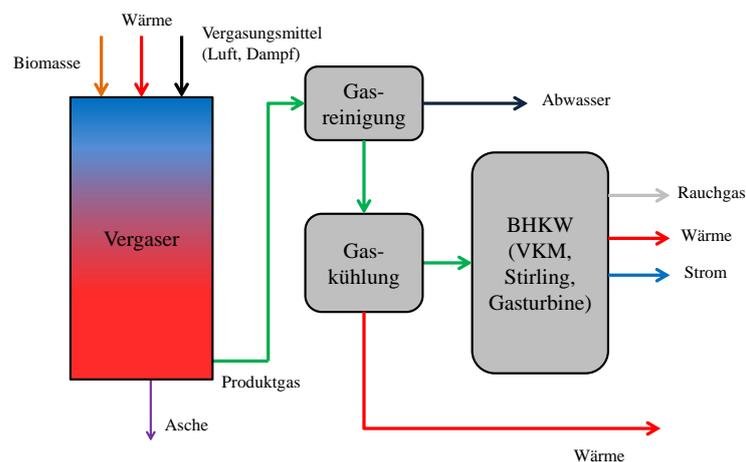


Abbildung 3.13.: Funktionsprinzip Vergasungsanlage und BHKW

te Schema stellt eine große Vereinfachung der in der Realität verwendeten Anlagen dar. Für eine erste Abschätzung der Funktionsweise ist sie dennoch ausreichend. Unter Verwendung von holzartiger Biomasse, Prozesswärme und einem Vergasungsmittel (z.B. Luft, Sauerstoff, Dampf) wird im Vergasungsreaktor ein brennbares Produktgas erzeugt. In Abhängigkeit des Brennstoffes ist dieses Gas verschieden stark mit Verunreinigungen belastet und muss vor der weiteren Nutzung gereinigt werden. Für die Anwendung in einer VKM muss das Gas außerdem gekühlt werden, um die Energiedichte zu erhöhen. (Vos et al., 2009, S. 16f)

Eine wesentliche Bewertungskennzahl der Vergasungsverfahren ist der Kaltgaswirkungsgrad  $\eta_G$ . Dieser beschreibt das Verhältnis der im Produktgas gespeicherten chemischen Energie zu der dafür eingesetzten Energie des festen Brennstoffes (Karl, 2006, S. 178).

$$\eta_G = \frac{\dot{m}_G \cdot H_{u,G}}{\dot{m}_f \cdot H_{u,F}} \quad (3.5)$$

$\eta_G$ :	Kaltgaswirkungsgrad
$\dot{m}_G$ :	Massenstrom des erzeugten Brenngases [kg/s]
$\dot{m}_f$ :	Massenstrom des Festbrennstoffes [kg/s]
$H_{u,G}$ :	unterer Heizwert des erzeugten Brenngases [kJ/kg]
$H_{u,F}$ :	unterer Heizwert des Festbrennstoffes [kJ/kg]

Bei der Anwendung des Kaltgaswirkungsgrades werden lediglich die temperaturbereinigten chemischen Energieinhalte bewertet. Derzeit werden Kaltgaswirkungsgrade von 70 - 85 %, in Abhängigkeit des Vergasungsverfahrens und der Brennstoffqualität, erreicht (Karl, 2006, S. 177).

### 3.1.8.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Im folgenden Kapitel soll ein kurzer Überblick zu den Elementen einer Biomassevergasungsanlage gegeben werden. Die in Kapitel 3.1.1 dokumentierten Anlagenbestandteile werden durch eine Vergasungseinheit ergänzt. In Abbildung 3.14 werden die wichtigsten Prozesse und Systemkomponenten einer solchen Maschine dargestellt. Eine in der Praxis umgesetzte Anlage versteht sich als Kombination von mehreren der hier aufgezählten Komponenten. Im Allgemeinen sollte mindestens eine Komponente aus jedem Prozess verwendet werden. Entsprechend den Kombinationsmöglichkeiten ergeben sich einige Ausführungsvarianten, die hier im Detail nicht beschrieben werden sollen. Vielmehr sollen die Funktionen der einzelnen Prozessschritte erläutert und beschrieben werden.

Der erste wichtige Prozess ist die Brennstoffversorgung und -lagerung. Da die Vergasungsanlagen in der Regel zur Grundlastabdeckung mit einem möglichst kontinuierlichen Betrieb eingesetzt werden, sollte ein ausreichender Brennstoffvorrat (zwei bis drei Tage) gewährleistet sein. Außerdem haben Lagerung, Transport und Vorbehandlung (z.B. Trocknung) des Brennstoffes einen wesentlichen Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften und den Vergasungsprozess. Durch geeignete automatische Brennstoffbeschickungssysteme kann zudem der Betriebsaufwand gesenkt werden.



Abbildung 3.14.: Prozesskette einer Biomassevergasungsanlage mit möglichen Systemkomponenten (in Anlehnung an Vos et al., 2009, S. 13)

Die eigentliche Vergasung findet im Vergasungsreaktor statt. Diese Reaktoren werden nach den unterschiedlichen Bettarten (Festbett, Wirbelschicht, gestufte Vergasung) klassifiziert. Laut Vos et al. (2009, S. 15f) werden im kleinen Leistungsbereich vorwiegend Festbettvergaser im Gleich- oder Gegenstromprinzip eingesetzt. Zur Veranschaulichung zeigt die folgende Abbildung 3.15 einen Festbettvergaser. Dieser arbeitet nach dem Gleichstromprinzip, sprich Brennstoff und Vergasungsmittel strömen in die gleiche Richtung. Die Marktrecherche hat allerdings gezeigt, dass die Hersteller viele verschiedene Prinzipien anwenden. Somit sind im untersuchten Leistungsbereich auch Wirbelschichten bzw. gestufte Vergasungen anzufinden.

In Abhängigkeit des Vergasungsprinzips durchläuft der eingesetzte Brennstoff die vier Umwandlungsschritte der Trocknung, Pyrolyse, partielle Oxidation und Reduktion. Für die Umwandlung der Biomasse entstehen in der Oxidationszone Temperaturen über 1000 °C. Das Produktgas verlässt den Reaktor nach der Reduktionszone mit 600 - 800 °C (Kaltschmitt et al., 2009, S. 606). Während der Oxidation und der Reduktion entstehen neben den gewünschten Produkten (Methan, Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid) auch unerwünschte Produkte (Staub, Teer, Ruß, Alkalimetallverbindungen, organische Verunreinigungen), die gegebenenfalls durch geeignete Reinigungssysteme zu entfernen sind (Vos et al., 2009, S. 15). Die für den Vergasungsvorgang benötigte Wärme kann entweder intern, durch eine partielle Verbrennung des Brennstoffes (autotherm) oder extern, durch eine von außen zugeführte Wärme (allotherm), bereitgestellt werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei der autothermen Vergasung das Produktgas durch die Verbrennungsgase verdünnt wird und dadurch einen geringeren Heizwert als bei der allothermen Vergasung erreicht. Die allotherme Vergasung kommt hauptsächlich bei der Verwendung von Gasturbinen zum Einsatz, da für diese Anwendung ein hoher Produktgasheizwert erforderlich ist. (Karl, 2006, S. 177)

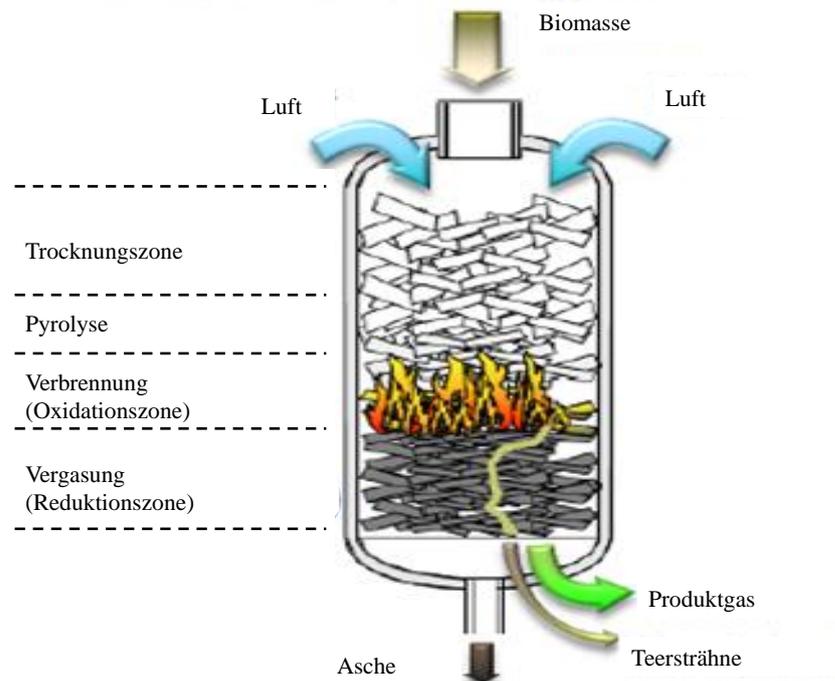


Abbildung 3.15.: Festbettreaktor im Gleichstromprinzip (autotherm) (Karl, 2006, S. 191)

Um den Anforderungen der Gasmotorenhersteller gerecht zu werden, muss das Produktgas gereinigt und gekühlt werden. Das erzeugte Rohgas ist mit Feststoffpartikeln (Staub, Ruß), Teer, Ammoniak, Salzsäure, Schwefelwasserstoff, Alkalien und anderen Säuren beladen. Die Konzentrationen der einzelnen Bestandteile richten sich nach den verwendeten Brennstoffen und dem Vergasungsverfahren. Je nach Verunreinigung ist das Gas durch geeignete Methoden bzw. Apparaturen (entsprechend Abbildung 3.14) zu reinigen. Die dabei entstehenden Abwässer und Reststoffe sind ordnungsgemäß zu entsorgen. Für die Anwendung im Gasmotor ist es außerdem notwendig, dass Produktgas abzukühlen und somit die Energiedichte zu erhöhen. Die dadurch gewonnene Abwärme kann zur Wirkungsgradoptimierung im Prozess (Vergasungsreaktor, Brennstofftrocknung) verwendet werden. (Vos et al., 2009, S. 16f)

Für die Umsetzung des in der Vergasungsanlage hergestellten Holzgases finden die vorher beschriebenen KWK-Technologien auf Basis VKM, Stirlingmotor und Gasturbine Anwendung und werden an dieser Stelle nicht noch einmal erläutert. In jedem Fall ist ein Notfackelsystem zu installieren, um das erzeugte Produktgas im Falle des BHKW-Ausfalls zu verbrennen bzw. zu vernichten.

### 3.1.8.2. Stand der Technik

Aufgrund der durchgeführten Marktrecherche kann festgehalten werden, dass derzeit kein Lieferant die Marktreife bzw. das Stadium einer Serienproduktion erreicht hat. Dennoch gibt es Hersteller die bereits Prototypen und Demonstrationsanlagen installiert haben und auf dem Sprung zur Marktreife sind. Aus diesem Grund ist die Abschätzung der Anlagenlebensdauer unmöglich. Die reine Funktionsfähigkeit der Anlagen steht derzeit im Vordergrund.

Laut den Herstellerinformationen der Beschaffungsmarkterhebung erreichen die bereits realisierten Pilot- und Testanlagen Gesamtwirkungsgrade von 75 - 80 % (Anhang A.1). Zu den geringen Verlusten der BHKWs addieren sich die Verluste der Vergasung, welche aus dem Wärmebedarf, dem Kaltgaswirkungsgrad sowie dem Restkohlenstoffgehalt der Asche resultieren. Der erreichte Gesamtwirkungsgrad und die Gasqualität sind ganz wesentlich vom Brennstoff abhängig. Ein möglichst homogener und ebenso trockener Brennstoff ermöglicht eine optimale Energieerzeugung. Demzufolge werden hauptsächlich Holzpellets und Holzhackschnitzel verwendet.

Der Wartungsaufwand für Vergasungsanlagen ist im Vergleich zu den anderen Technologien als hoch zu bewerten. Aufgrund der nicht vorhandenen Langzeittests, ist eine genaue Bezifferung der Wartungskosten nicht möglich. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass der Betrieb einer Vergasungsanlage deutlich mehr Aufwand (Arbeitszeit und Kosten) bedarf, als der Betrieb einer KWK-Anlage ohne Vergasungseinheit. Aufwände entstehen vor allem durch das nötige Brennstoffmanagement (Beschaffung, Beschickung, Kontrolle/Nachbearbeitung) und der Gasreinigung. Die Entsorgung der Reststoffe (Asche, Staub und Ruß, Abwasser) ist ebenso notwendig wie der Wechsel von Filteranlagen. Des Weiteren ist die Gasqualität (Teerbeladung), speziell für die Nutzung in motorischen BHKWs ständig zu überprüfen.

Der Vergasungsprozess ist in der Regel träge und dauert mehrere Stunden. Häufige An- und Abfahrvorgänge sind dementsprechend zu vermeiden bzw. gar nicht möglich. Folglich sind die Anlagenkonzepte vorrangig zur Grundlastdeckung mit einem möglichst langen zusammenhängenden Betriebsintervall einzusetzen. Als mögliche Kundengruppen kommen vor allem große Gewerbebetriebe sowie Fern- und Nahwärmenetze in Frage.

Eine Ausnahme stellt die Anlage der Firma Christoph Group/REP dar. Mit einer thermischen Leistung von 30 kW ist die Anwendung auch in kleineren Objekten bzw. im privaten Kundensegment möglich.

### 3.1.8.3. Vor- und Nachteile

Der große Mehrwert der Technologie ist die Stromerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen, da die vorher beschriebenen Technologien ausschließlich mit gasförmigen und flüssigen Brennstoffen betrieben werden. Die Nutzung biogener Materialien ist zudem sehr umweltfreundlich und nachhaltig.

Dass sich die Vergasungstechnologie bisher nicht am Markt etablieren konnte, liegt an den Problemen, die die geringe bzw. schwankende Gasqualität sowie die Verunreinigungen des Produktgases (z.B. durch Teer) mit sich bringen (Karl, 2006, S. 184). Der Gesamtwirkungsgrad der realisierten Maschinen ist im Vergleich zu KWK-Anlagen mit anderen Antrieben kleiner, wobei der nötige Betriebs- und Wartungsaufwand höher ist. Außerdem ist der Wirkungsgrad im großen Maße vom Brennstoff abhängig. Die mit der Vergasung verbundenen Prozesse der Brennstofflagerung, Vergasung, Gasreinigung und -kühlung benötigen viele verschiedene Komponenten, die neben den Anschaffungskosten auch einen großen Platzbedarf zur Folge haben. Ein weiterer Nachteil der Vergasungstechnologie sind die nicht vorhandenen Standards. Die Unternehmen entwickeln jeweils komplette Anlagensysteme, anstatt sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren.

#### 3.1.8.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Laut den Herstellerinformationen erreichen die Anlagen Gesamtwirkungsgrade von 75 - 80 % (Anhang A.1). Im Vergleich zu dem theoretisch möglichen Wirkungsgrad von 100 % ergibt sich ein Verhältnis von 0,75 - 0,8. *Bewertungsstufe 3*

**Nachhaltigkeit:** Zur Stromproduktion wird feste Biomasse eingesetzt. *Bewertungsstufe 3*

**Reifegrad:** Zurzeit stehen keine marktreifen Technologien zur Verfügung. Angesichts der möglichen Stromproduktion aus fester Biomasse wird seit langem an der Vergasungstechnologie geforscht. Jedoch hat es bisher kein Hersteller über das Stadium der Pilot- und Testanwendungen hinaus geschafft. Die Vergaser werden als Schrittmachertechnologie eingestuft. *Bewertungsstufe 2*

**Wirtschaftlichkeit:** Im Zuge der wirtschaftlichen Anlagenbewertung erreichen die Vergasungsanlagen in Kombination mit einem BHKW mittlere Stromgestehungskosten von 13 - 22 ct/kWh. Aufgrund der Betriebscharakteristik wird das Großkundensegment als Hauptanwendungsgebiet angesehen. Die Stromgestehungskosten werden demzufolge mit einem mittleren Strombezugspreis von 17,74 ct/kWh verglichen, woraus ein Verhältnis von 0,78 - 1,36 resultiert. *Bewertungsstufe 3-4*

**Verfügbarkeit:** Als Resultat der Marktanalyse kann festgehalten werden, dass derzeit keine marktreife Technologie vorhanden ist. Dennoch gibt es vier bis fünf Hersteller, die erfolgreiche Testphasen abgeschlossen haben und auf dem Sprung zur Marktreife stehen. In Abhängigkeit der Anlagengröße ergeben sich Lieferzeiten von fünf bis zehn Monaten. *Bewertungsstufe 2*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz basiert auf der Einschätzung von Oberschmidt (2010, S. 172f) für biogasbetriebene BHKWs. Die erreichte Bewertung von 3,25 (Stufe 3) wird durch die Einschätzung des Projektteams um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend ist der hohe Betriebsaufwand bzw. die ein-

geschränkte Bequemlichkeit sowie die aufwendige und unklare Genehmigungssituation.  
*Bewertungsstufe 2*

### 3.1.8.5. Technologielieferanten

Obwohl die Technologie noch keine Marktreife erreicht hat, sollen in Abbildung 3.16 Lieferanten dargestellt werden, welche kurz vor dem Sprung zur Marktreife stehen. Die Lieferanten beschäftigen sich derzeit damit, Pilotanlagen bzw. Demonstrationsanlagen am Markt zu platzieren um somit die Funktionsfähigkeit und -sicherheit der Maschinen zu demonstrieren.

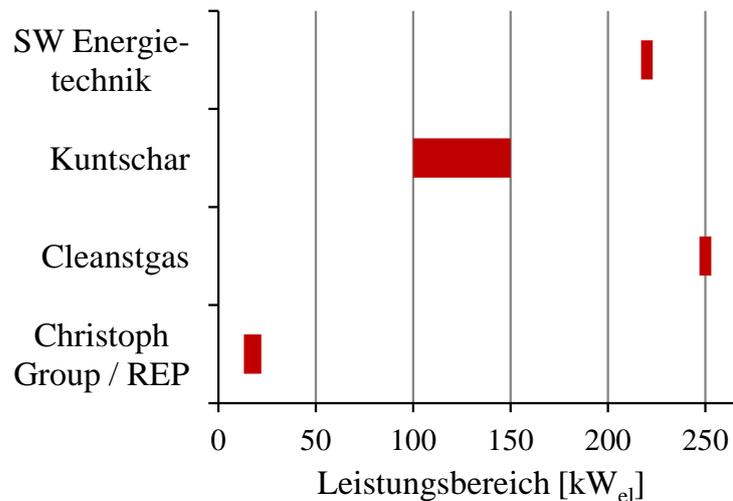


Abbildung 3.16.: Lieferanten BHKW-Vergaser

Die Firma Christoph Group/REP bietet als einzige eine Anlage für das Segment der Privatkunden an und hat in Form einer „0“-Serie derzeit drei Anlagen beim Kunden installiert. Alle weiteren Lieferanten sind mit der Produktion und Entwicklung deutlich größerer Anlagen beschäftigt, die in erster Linie zur Versorgung von Gewerbebetrieben, großen Objekten und Fern- und Nahwärmenetzen Anwendung finden. Von allen hier aufgelisteten Herstellern konnte ein entsprechendes Angebot beschafft werden.

3.1.8.6. Steckbrief Vergasungsanlagen

### Vergaser + BHKW

Quelle: Kurt. Dezentrale Energiesysteme

**Kurzbeschreibung:**

- thermische Zersetzung fester Biomasse (ca.1000°C) in ein brennbares Produktgas (Hauptkomponenten: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) welches nach Gasreinigung und -kühlung im BHKW in Strom und Wärme umgesetzt wird
- Prozesssträgheit erfordert kontinuierlichen Anlagenbetrieb
- Brennstoffe: holzartige Biomasse (Pellets, Holzhackschnitzel, etc.)
- Betriebsweise: wärmegeführt, vorwiegend für Grundlast geeignet

**Vorteile:**

- direkte Stromerzeugung aus festen Brennstoffen
- Nachhaltigkeit

**Nachteile:**

- Wirkungsgrad brennstoffabhängig
- Wärmebedarf für Vergasung
- aufwendige Gasreinigung (Teer)
- derzeit keine marktreife Technologie verfügbar

**Anwendungsgebiet / Kundengruppen:**

- Grundlastabdeckung mit wenigen Ein- und Ausschaltvorgängen
- Hotelbetrieb
- Industrie- und Gewerbebetriebe
- Fern- und Nahwärmenetz
- Ausnahme: Anlage von Christoph Group/REP für Ein- und Zweifamilienhaushalte möglich

**Zukunftsentwicklung**

Annahme: BHKW 220 kW<sub>el</sub> / 460 kW<sub>th</sub>; 5.659 Bh/a

**Technologie-Markt-Bewertung**

— Minimum (red), — Maximum (blue)

**Gestehungskosten:**  
mittlere Stromgestehungskosten: 13 - 23 ct/kWh (250-13 kW<sub>el</sub>) ; Bewertung der Wärme: 2,7 ct/kWh

**Forschungsaktivitäten:**

- Steigerung der Zuverlässigkeit
- Nutzung verschiedener Brennstoffe (z.B. Stroh)
- Verringerung der Teerbildung
- Entwicklung technisch ausgereifter Verfahren
- Herstellung von synthetischen Kraftstoffen
- Standardisierung von Anlagenkomponenten

**Quellen / Informationen:**

- Leitfaden Biomassevergasung 2009
- Energietechnologien 2050- Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung
- www.cleanstgas.com

**Lieferanten**

**Umfeld:**

- **Genehmigung:** Stmk. Bauordnung, Stmk. EIWOG, Stmk. Gewerbeordnung, IG-L, Stmk. Abfallrecht, Stmk. Landesgasgesetz und Naturschutzrecht (vereinfachtes Verfahren bis 500 kW<sub>el</sub>)
- **Investitionsförderung:** umweltrel. Kosten durch Kommunalkredit Public Consulting (10-25 % der Investition)
- **Einspeisetarife:** 19,9 ct/kWh für 15 Jahre (ÖSET-VO 2012)

Abbildung 3.17.: Steckbrief Vergasungsanlagen

## 3.2. Kleinwindkraft

Die Nutzung der Windkraft hat eine sehr lange Tradition. Bereits vor über 3.000 Jahren machte sich der Mensch die Kraft des Windes zunutze und betrieb Windmühlen zum Mahlen von Getreide oder zu Bewässerungszwecken. Diese frühen Anwendungsformen nutzten das Widerstandsprinzip und hatten einen eher geringen Wirkungsgrad. (Quaschnig, 2011, S. 239)

Seit den Ölkrisen in den siebziger Jahren und dem steigenden Umweltbewusstsein hat die Nutzung der Windenergie einen Aufschwung, der bis heute anhält, erfahren. Am Markt hat sich das Auftriebsprinzip aufgrund der Wirkungsgrade durchgesetzt. (Pehnt et al., 2011, S. 75)

Als Leistungsgrenze für Kleinwindkraftanlagen hat sich in der Branche der Wert von 100 kW etabliert (IRENA, 2012, S. 9).

### 3.2.1. Allgemeine Informationen

Im Zuge dieser Untersuchung wurden die Technologien der vertikal- und horizontalachsigen Kleinwindenergieanlagen (KWEA) analysiert. Dabei standen Systeme zur elektrischen Versorgung von Haushalten bzw. für den Netzparallelbetrieb im Vordergrund. Gemäß dem Kapitel 1.3 beschränkt sich diese Arbeit auf Maschinen im Leistungsbereich von 1 - 10 kW. Anlagen mit Leistungen unter 1 kW dienen hauptsächlich als Batterielader (z.B. Schifffahrt oder Inselbetrieb in netzfernen Gebieten) und sind genauso wenig Bestandteil dieser Untersuchung wie Anlagen mit einer Leistung größer als 10 kW. Die Bestimmung dieser Grenze resultiert aus der Beschaffungsmarkterhebung. Einerseits nimmt die Anzahl der Technologiehersteller ab 10 kW stark ab, andererseits konnten keine Angebote für Anlagen mit einer Leistung größer als 10 kW beschafft werden. Bei der Kleinwindkraft wird keine Kundeneinteilung analog den KWK-Technologien vorgenommen werden. Unabhängig vom jeweiligen Kunden, bestimmt in erster Linie der Standort über die Sinnhaftigkeit einer Windkraftanlage. Ausgehend von der oberen Leistungsgrenze (10 kW) steht die private Nutzung dennoch im Vordergrund, wobei die gewerbliche Nutzung damit keinesfalls ausgeschlossen sein soll.

Der Wind ist eine regenerative Energiequelle und entsteht auf Grund der unterschiedlichen Erwärmung der Luftmassen durch die Sonne. Daraus resultieren Gebiete mit hohem und niedrigem Luftdruck, welche von Luftmassenbewegungen wieder ausgeglichen werden. Der dadurch entstehende Wind besitzt eine Leistung, die mittels KWEA genutzt werden kann. Mithilfe der Formel 3.6 lässt sich die Leistung des Windes folgendermaßen berechnen:

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A \cdot v^3 \quad (3.6)$$

$P_{\text{Wind}}$ :	Windleistung [kW]
$\rho_{\text{Luft}}$ :	Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
A:	Rotorfläche [m <sup>2</sup> ]
v:	Windgeschwindigkeit [m/s]

Aus dieser Gleichung kann abgeleitet werden, dass die Leistung im großen Maße von der Windgeschwindigkeit abhängt. Weitere Einflüsse resultieren aus der überdeckten Rotorfläche. Die Dichte der Luft ist in erster Linie temperaturabhängig und schwankt lediglich im Zehntelbereich, dementsprechend gering ist der Einfluss auf die Leistung. (Quaschnig, 2011, S. 247)

Die im Wind gespeicherte Leistung wird durch die Abbremsung der Luftmassen zunächst in eine Drehbewegung des Rotors, sprich mechanische Energie, umgewandelt. Anschließend erzeugt ein Generator aus der Drehbewegung elektrische Energie. Windkraftanlagen können dem Wind nicht die vollständige Leistung entziehen, da der Wind einen Teil der Geschwindigkeit benötigt, um den Rotor bzw. die Turbine wieder zu verlassen. Im optimalen Fall wird der Wind auf ein Drittel seiner ursprünglichen Geschwindigkeit abgebremst. Durch den betzischen Leistungsbeiwert  $c_{p,\text{Betz}} = 16/27 = 0,59$  ergibt sich der theoretisch maximale Wirkungsgrad einer KWEA von 59 %. Die mechanische Leistung einer verlustfreien KWEA wird nach der folgenden Formel 3.7 berechnet. (Gasch & Twele, 2010, S. 37)

$$P_{\text{mech}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A \cdot v^3 \cdot c_{p,\text{Betz}} \quad (3.7)$$

$P_{\text{Wind}}$ :	Windleistung [kW]
$\rho_{\text{Luft}}$ :	Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
A:	Rotorfläche [m <sup>2</sup> ]
v:	Windgeschwindigkeit [m/s]
$c_{p,\text{Betz}}$ :	betzischer Leistungsbeiwert

Auftriebsläufer erreichen in der Praxis Leistungsbeiwerte bis zu  $c_{p,\text{Betz}} = 0,5$  und Widerstandsläufer bis zu  $c_{p,\text{Betz}} = 0,2$ . (Gasch & Twele, 2010, S. 37)

Die erzeugte Leistung einer KWEA ist im hohen Maße vom Standort abhängig. Vor einer Investition bzw. Installation, sollten die Standortverhältnisse durch eine Windmessung überprüft werden. Diese gibt Aufschluss, ob sich der Bau einer Anlage wirtschaftlich rentieren kann. Aus den beschriebenen Gleichungen resultiert die große Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Für einen annähernd rentablen Betrieb sollte eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5 - 7 m/s und größer herrschen (Pehnt et al., 2011, S. 78). Der Ertrag wird zudem durch die vorhandenen Anströmverhältnisse beeinflusst. Im optimalen Fall ist die Anströmung frei und linear. Ertragsminderungen entstehen durch Hindernisse wie Gebäude und Wälder, wodurch der Wind zunehmend abgebremst und turbulent wird. Solche Verhältnisse können beispielsweise durch geeignete Turmhöhen vermieden werden.

Abbildung 3.18 soll die Funktionsweise von Auftriebs- und Widerstandsläufern veranschaulichen.

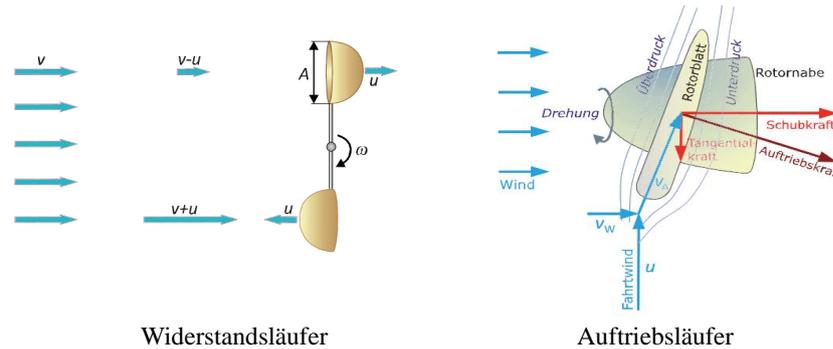


Abbildung 3.18.: Funktionsprinzip Widerstands- und Auftriebsläufer (in Anlehnung an Quaschnig, 2011, S. 250ff)

Widerstandsläufer nutzen die Kraft des Windes, die entsteht, wenn eine Fläche quer zum Wind aufgestellt wird. Das Prinzip wird in erster Linie bei vertikalachsigen KWEA (z.B. Schalenkrananemometern) angewendet. Der geringe Wirkungsgrad hat jedoch dazu geführt, dass heute überwiegend das Prinzip der Auftriebsläufer angewendet wird. Dabei wirkt infolge der Windanströmung eine Auftriebskraft auf die Rotorblätter und setzt diese in Bewegung.

Windkraftanlagen können nach den folgenden Kriterien unterschieden werden (Gasch & Twele, 2010, S. 51):

- Achse (horizontal/vertikal),
- Prinzip (Auftrieb/Widerstand),
- Ausrichtung zum Wind (luv/lee),
- Anzahl Rotorblätter.

Wie einleitend bereits erwähnt, werden in weiterer Folge Technologien mit den verschiedenen Achssystemen (horizontale und vertikale) analysiert.

### 3.2.2. Rechtliche Rahmenbedingungen

Nachfolgend sollen die wichtigsten Informationen bezüglich der Genehmigungsverfahren, Investitionsförderung und den Einspeisetarifen zusammengetragen werden.

#### Steiermärkisches Raumordnungsgesetz 1974

Für die Nutzung eines bestimmten Grundstückes ist die jeweilige Flächenwidmung relevant. Flächenwidmungspläne unterscheiden grundsätzlich zwischen Bauland, Verkehrsflächen und Freiland, wobei für die Aufstellung einer KWEA in erster Linie Bauland,

Freiland und Vorbehaltsflächen<sup>7</sup> in Frage kommen. Vor der Errichtung sollte die jeweilige Flächenwidmung bei der zuständigen Gemeinde überprüft bzw. die Fläche in eine Sondernutzungsfläche für Energieerzeugungsanlagen umgewandelt werden. (Das Land Steiermark, 2009, S. 19ff)

### **Steiermärkisches Naturschutzgesetz 1976 (Stmk. NschG)**

Im Stmk. NschG sind einzelne Gebiete zu Schutzzwecken der Natur, Landschaft sowie der Erhaltung und Gestaltung der Umwelt als Lebensraum für Menschen, Pflanzen und Tiere ausgewiesen. Innerhalb eines solchen Gebietes dürfen keine schädigenden Eingriffe oder beeinträchtigende Landschaftsveränderungen vorgenommen werden. Die Errichtung einer KWEA in einem geschützten Gebiet ist demzufolge nicht möglich. Vorhaben außerhalb der Schutzgebiete sind im Sinne der Ankündigungspflicht der Bezirkshauptmannschaft bekannt zu geben. (Bundesland Steiermark, 2012b, S. 2ff)

### **Stmk. EIWOG 2005**

Gemäß Kapitel 3.1.4 (rechtliche Grundlagen KWK) gelten die gleichen Bestimmungen auch für KWEA. Es werden im Allgemeinen vereinfachte Verfahren angewendet und der Netzbetreiber ist verpflichtet, den erzeugten Strom abzunehmen und zu verteilen.

### **Stmk. BauG (Stand 21.08.2008)**

Die Anlagenhöhe einer KWEA ist ausschlaggebend dafür, ob das Vorhaben anzeigepflichtig ist. Anlagen bis zu einer Höhe von 5 m sind bewilligungsfrei, größere Anlagen stellen ein anzeigepflichtiges Vorhaben dar und müssen bei der Behörde angemeldet werden. (Bundesland Steiermark, 2012a, S. 16f)

### **Förderungsmöglichkeiten**

Für KWEA gibt es derzeit keine Investitionsförderung. Einzige Ausnahme ist der Inselbetrieb einer Anlage, die zur Eigenversorgung in netzfernen Gebieten verwendet wird. Förderungsstelle ist die KPC, die Investitionszuschüsse bis zu 35 % der förderungsfähigen Kosten gewährt. Die Förderung können alle gewerblichen Betriebe und konfessionelle Einrichtungen beantragen, wobei die Mindestinvestition 10.000 Euro betragen muss. (KPC, 2012a, S. 1ff)

Außerdem wird die erzeugte Strommenge im Sinne der Ökostromverordnung 2012 gefördert. Für elektrische Energie aus Windkraftanlagen wurde für die nächsten 13 Jahre der Einspeisetarif von 9,5 ct/kWh (Antragstellung 2012) bzw. 9,45 ct/kWh (Antragstellung ab 2013) festgelegt. (BMWFJ, 2012, S. 2)

<sup>7</sup>Flächen, die für öffentliche Zwecke dem umliegenden Gebiet zugeordnet sind, beispielsweise für Kindergärten, Schulen und Energieversorgungsanlagen

### 3.2.3. Horizontale Windkraftanlagen

Der heutige Markt wird von horizontalen Windrädern dominiert. Laut IRENA (2012, S. 9) sind 95 - 98 % aller Windkraftanlagen mit einer horizontalen Drehachse ausgestattet. Vor allem im großen Leistungsbereich gibt es fast ausschließlich horizontale Maschinen. Nur im Bereich der Kleinwindkraft sind zusätzlich vertikalachsigere Anlagensysteme am Markt verfügbar.

#### 3.2.3.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Horizontalachsigere Systeme nutzen die im Wind gespeicherte Energie unter Anwendung des Auftriebsprinzips. Durch die Umströmung der Rotorblätter (Abbildung 3.18) wirkt eine Auftriebskraft, die den Rotor in Bewegung setzt. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels sollen die wichtigsten Anlagenkomponenten, welche in Abbildung 3.19 dargestellt sind, beschrieben werden.

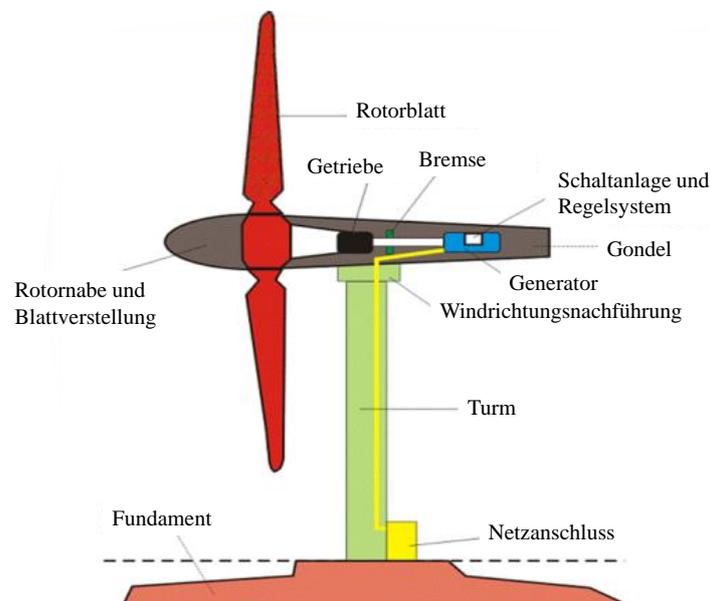


Abbildung 3.19.: Komponenten einer horizontalen KWEA (Steffens, 2004, S. 1)

Nach Quaschnig (2011, S. 257) besteht eine horizontale Anlage hauptsächlich aus:

- Rotor (Rotorblätter, Rotornabe, Rotorbremse, ggf. Blattverstellmechanismus),
- Antriebseinheit (Generator, Umrichter und ggf. Getriebe),
- Windmesssystem und Windnachführung,
- Gondel, Turm und Fundament,
- elektrische Schaltanlagen, Regelung und Netzanschluss.

**Rotor:** Das wichtigste Bauteil einer KWEA ist der Rotor, welcher für die Energieerzeugung verantwortlich ist. In der Praxis haben sich vor allem Ausführungen mit drei Rotorblättern bewährt und werden vielfach angewendet. Diese erreichen einen optimalen Leistungsbeiwert, passen optisch am besten in die Landschaft und laufen visuell ruhig. Anlagen mit einem, zwei oder vier Rotorblättern sind ebenfalls am Markt verfügbar. Die Rotorblätter sind an der Rotornabe befestigt, welche die Verbindung zur Antriebswelle darstellt. Blattverstellmechanismen und Rotorbremsen dienen der Regelung bzw. Sturmabschaltung der Anlagen und kommen in Abhängigkeit des verwendeten Regelungskonzeptes zum Einsatz. Bremsen haben außerdem die Aufgabe, die Rotoren bei schwachem Wind festzuhalten. Bei Windgeschwindigkeiten unter der Anlaufgeschwindigkeit ist der Ertrag sehr gering und zudem können die Anlagen zu einem Leistungsverbraucher werden. (Quaschnig, 2011, S. 258f)

Im untersuchten Leistungsbereich werden vorwiegend mechanische Blattwinkelverstellungen mit Fliehgewichten angewendet. Durch diese Gewichte werden die Rotorblätter bei zu hohen Drehzahlen passiv verstellt und somit vor Überdrehzahlen geschützt. (Gasch & Twele, 2010, S. 71f)

**Antriebseinheit:** Die Antriebseinheit besteht hauptsächlich aus einem Getriebe, Generator und Umrichter. Für die Kombination der jeweiligen Komponenten gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Zur Stromerzeugung werden Generatoren (Gleichstrom- und Wechselstromgenerator) verwendet. Die günstigen Drehstrommaschinen haben sich am Markt durchgesetzt und die teureren Gleichstrommaschinen verdrängt. Selbst wenn ein Gleichstrom benötigt wird, sind Drehstrommaschinen in Verbindung mit einem Gleichrichter die günstigere Alternative. Im untersuchten Leistungsbereich werden vorwiegend Synchron- und Asynchronmaschinen verwendet. (Quaschnig, 2011, S. 265f)

Bei der Verwendung eines Asynchrongenerators wird ein Getriebe zur Übersetzung der Rotordrehzahl benötigt, damit der Generator Strom mit der Netzfrequenz erzeugen kann. Werden Synchrongeneratoren in Verbindung mit Frequenzumrichtern eingesetzt, kann auf ein Getriebe verzichtet werden. (Hübner et al., 2010, S. 5)

Im Leistungsbereich (1 - 10 kW) sind demzufolge Anlagen mit und ohne Getriebe verfügbar. Getriebe lose Anlagen können kleiner und kompakter gebaut werden, benötigen aber in der Regel einen vielpoligen Generator, um die erforderliche Netzfrequenz zu erzeugen. (Gasch & Twele, 2010, S. 79f)

Infolge des verwendeten Generatorkonzeptes bzw. des jeweiligen Anwendungsfalls können zusätzliche Umrichter (Wechsel- und Gleichrichter) benötigt werden. Die Umrichtertechnik ermöglicht einen drehzahlvariablen Anlagenbetrieb, welche ein optimiertes Betriebsverhalten sowie die Entlastung der Antriebseinheit bei böigem Wind bewirkt. (Gasch & Twele, 2010, S. 375)

**Windmesssystem und -nachführung:** Windmesssysteme dienen in erster Linie der Messung der Windgeschwindigkeit und -richtung. Diese Maschinen werden vor allem bei aktiven Blattwinkelverstellmechanismen und der aktiven Windnachführung benötigt. Zur Windnachführung sind sowohl aktive als auch passive Systeme verfügbar,

die die Gondel<sup>8</sup> samt den Rotorblättern entsprechend der Windrichtung in die optimale Position drehen. Aktive Nachführungen (z.B. Azimutantriebe) werden in größeren Anlagen im untersuchten Leistungsbereich eingesetzt, in den kleinsten Anlagen (Leistung 1 - 5 kW) werden vielfach passive Systeme (Windfahne) verwendet. (Quaschnig, 2011, S. 262f)

**Gondel, Turm und Fundament:** Turm und Fundament haben die wesentliche Aufgabe, Rotor und Gondel zu tragen. Da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt, nehmen auch die Kräfte auf Rotor, Gondel und Turm zu. Dementsprechend werden die Fundamente mit steigender Anlagenhöhe stärker belastet. Im untersuchten Leistungsbereich finden neben freistehenden Türmen (mit Fundament) auch durch Abspannseile gesicherte Türme Anwendung. Das Konzept der Aufdachmontage ist ebenfalls möglich, wird aber hauptsächlich bei vertikalachsigen Systemen angewendet.

**Elektrische Schaltanlagen und Regelungskonzepte:** Sobald eine Windkraftanlage die Nenn Drehzahl erreicht hat, ist es nötig, diese Drehzahl zu halten. Anderenfalls droht die Überlastung des Generators bzw. ein Ausfall der Anlage. Dafür stehen laut Quaschnig (2011, S. 260f) die folgenden Regelungsmaßnahmen zur Verfügung:

- Pitch-Regelung (aktiv/passiv): Verkleinerung des Anstellwinkels mittels Blattverstellmechanismus, wodurch die Leistungsaufnahme reduziert wird
- Stall-Regelung (aktiv/passiv): Vergrößerung des Anstellwinkels mittels Blattverstellmechanismus, dadurch wird mit dem Ziel der Leistungssenkung ein Strömungsabriss produziert
- Aus-dem-Wind-drehen: Verkleinerung der vom Rotor genutzten Fläche, Leistungssenkung durch drehen oder kippen des Rotors

Die Marktrecherche hat gezeigt, dass sich keine Kombination aus den vorher beschriebenen Komponenten als die „Beste“ bewährt hat. Demzufolge sind je nach Philosophie und Strategie der Hersteller, sowie den unterschiedlichen Kundenbedürfnissen, viele verschiedene Ausführungen am Markt erhältlich.

### 3.2.3.2. Stand der Technik

Getrieben vom zunehmend spürbaren Klimawandel sucht der Mensch vermehrt nach Alternativen, ressourcenschonend Strom zu erzeugen. Demzufolge ist das allgemeine Interesse an der Kleinwindkraft in den letzten Jahren stark angestiegen. Die Nutzung von KWEA ist jedoch ein komplexes Unterfangen.

Entsprechend der Photovoltaik könnte die Leistung einer KWEA auch als „Peakleistung“ angegeben werden, da die Energieerzeugung der Anlagen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit variiert. Die von den Herstellern angegebene Nennleistung einer Anlage, wird erst ab der Nenngeschwindigkeit erreicht. Auf Grund des großen Einflusses der Geschwindigkeit, nimmt die erzeugte Leistung mit steigender Windgeschwindigkeit sehr stark zu.

<sup>8</sup>Gehäuse für Antriebseinheit und Regelungssysteme

Die Charakteristik von horizontalen KWEA wird durch die folgenden Geschwindigkeiten bestimmt. Die angegebenen Geschwindigkeiten sind als Durchschnittswerte von den in der Markterhebung untersuchten Anlagen zu verstehen (siehe Tabelle A.2).

Anlaufgeschwindigkeit:	2,5 - 3 m/s
Nenngeschwindigkeit:	10 - 12 m/s
Abschaltgeschwindigkeit:	25 m/s
Überlebensgeschwindigkeit:	50 - 70 m/s

Angesichts der stark schwankenden Leistungsabgabe ist die Bestimmung eines Wirkungsgrades schwierig. Im Allgemeinen geben die Hersteller eine Leistungscharakteristik entsprechend der Windgeschwindigkeit bekannt, verzichten aber gänzlich auf die Angabe von Wirkungsgraden. Nach Gasch & Twele (2010, S. 37) erreichen horizontale Windkraftanlagen einen Wirkungsgrad bis zu 50 %, welcher vorwiegend von Anlagen im großen Leistungsbereich (MW) erreicht wird. Eine selbstständig durchgeführte Berechnung der Wirkungsgrade infolge der genutzten Flächen und Nenngeschwindigkeiten der Anlagen hat ergeben, dass im Durchschnitt mit Wirkungsgraden von 32 % zu rechnen ist (siehe Tabelle A.2). Da der Wirkungsgrad bei Windkraftanlagen eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Angabe der Nenn- und Anlaufgeschwindigkeit deutlich aussagekräftiger.

Seit 1970 wurden Kleinwindkraftanlagen ständig verbessert und profitieren in großem Maße von den Entwicklungen bei Großwindkraftanlagen<sup>9</sup>. Für eine breitere Akzeptanz ist insbesondere die Betriebssicherheit und die Lärmemission zu verbessern. (IRENA, 2012, S. 9)

KWEA gelten als robust und erreichen ohne weiteres eine Lebensdauer von 20 Jahren oder 120.000 Betriebsstunden, wobei die Hersteller Garantien zwischen einem und zehn Jahren gewähren (European Commission, 2010, S. 8). Laut Fraunhofer ISE (2012, S. 15) erreichen alle in Deutschland betriebenen Windkraftanlagen im Durchschnitt 1.500 bis 1.800 Volllaststunden. Diese Werte können als Richtwerte angenommen werden, wobei die Anzahl der Volllaststunden auf Grund der Topografie und den Windverhältnissen in der Steiermark (bzw. in Österreich) nach unten zu korrigieren ist.

Gemäß den Herstellerinformationen kann mit geringen Wartungskosten bzw. Wartungsaufwand gerechnet werden. Vor allem die Hersteller der KWEA (z.B. Braun Windturbinen GmbH) versuchen möglichst wartungsfreie Anlagen am Markt zu platzieren. Wartungsaufwand entsteht häufig durch Wetterereignisse (Sturmschäden, Blitzschlag, Einfrieren der Windfahne) und ist schwierig kalkulierbar.

### 3.2.3.3. Vor- und Nachteile

Die Stromerzeugung durch KWEA ist sehr nachhaltig und effizient. Im Vergleich zur Photovoltaik (10 - 20 %), erreichen die Kleinwindkraftanlagen deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade (ca. 32 %). In Abhängigkeit des Windangebotes können KWEA

<sup>9</sup>Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehreren MW

24 Stunden am Tag Strom produzieren. Die durchschnittlich erreichten Jahresvolllaststunden von 1.500 wirken sich positiv auf die Energieerzeugung aus. Zudem überzeugen KWEA durch einen geringen Wartungsaufwand und eine hohe Anlagenverfügbarkeit.

Nachteilig wirken sich vor allem die Lärmemissionen und der Schattenwurf aus, die besonders in urbanen Gebieten als störend empfunden werden. Aus diesem Grund ist der Betrieb von horizontalen Anlagen in städtischen Bereichen nur begrenzt möglich. Dieser Sachverhalt wird durch den Bedarf einer möglichst freien Anströmung verstärkt, da Hindernisse wie z.B. Gebäude den Ertrag senken. Nicht nur der Ertrag einer KWEA ist stark standortabhängig, auch das Betriebsverhalten kann durch den Standort beeinflusst werden. So besteht in Nebelgebieten die Gefahr der Vereisung der Rotorblätter sowie dem damit verbundenen Eiswurf (Braun Windturbinen GmbH, 2011, S. 6). Zudem existiert die Möglichkeit der Vereisung der Regelungssysteme. Horizontale KWEA müssen dem Wind nachgeführt werden und benötigen dementsprechende Vorrichtungen, welche mit konstruktivem Aufwand und Kosten verbunden sind.

In Bezug auf die Technologieanwendung in der Steiermark, ist der Standort als Nachteil zu bewerten. Die Steiermark bietet gute bis hervorragende Windeigenschaften nur in Höhenlagen ab 1.400 m, wobei auf Grund der Geländeform, Kammlagen als Standorte zu präferieren sind (Frühwald & Ulrich, 2007, S. 26). Da der Hauptanteil der Bevölkerung unter einer Seehöhe von 1.400 m lebt, sind die Bedingungen für eine großflächige Nutzung nicht gegeben. Für eine breite Anwendung der Technologie müssten in erster Linie die Erträge bei kleinen Windgeschwindigkeiten optimiert oder die Investitionskosten gesenkt werden.

#### 3.2.3.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Die Angabe vom Wirkungsgrad eines Windrades ist sehr untypisch und wird weder in der Literatur noch auf den technischen Datenblättern der Hersteller angegeben. Aus eigenen Berechnungen (Tabelle A.2) auf Basis der Anlagengröße (Fläche) und Nenngeschwindigkeit wurden die Wirkungsgrade von verschiedenen Anlagen berechnet. Im Durchschnitt werden beim Betrieb mit der Nenngeschwindigkeit Wirkungsgrade von 32 % erreicht. Der theoretisch mögliche Wirkungsgrad ist durch den betzchen Leistungsbeiwert auf 59 % begrenzt (Gasch & Twele, 2010, S. 37). Demzufolge ergibt sich ein Verhältnis von 0,54 und eine durchschnittliche Bewertung. *Bewertungsstufe 2*

**Nachhaltigkeit:** Während der Betriebsphase entstehen keine umweltrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Bewertungsstufe 4*

**Reifegrad:** Horizontale KWEA sind seit einiger Zeit am Markt verfügbar. Sie profitieren von den Weiterentwicklungen der Großanlagen und unterliegen stetigen Verbesserungen. Optimierungspotential besteht vor allem bei der Effizienz und der Nutzung

von niedrigen Windgeschwindigkeiten. Die Technologie wird von vielen Herstellern am Markt angeboten, hat sich bisher jedoch nicht durchgesetzt. Ein Grund dafür sind überschätzte Erträge der Hersteller sowie nicht verifizierte Leistungsangaben der Anlagen. Horizontale KWEA werden als Schlüsseltechnologie eingestuft. (AEE, 2009, S. 1ff) *Bewertungsstufe 3*

**Wirtschaftlichkeit:** Im Rahmen der wirtschaftlichen Anlagenbewertung erreichen horizontale KWEA mittlere Stromgestehungskosten von 32 - 218 ct/kWh (bei  $v_m = 3,22$  m/s). Aufgrund der Leistung der untersuchten Anlagen wird das Privatkundensegment als Hauptanwendungsgebiet angesehen. Die Stromgestehungskosten werden demzufolge mit einem mittleren Strombezugspreis von 21,02 ct/kWh verglichen, woraus ein Verhältnis von 0,09 - 0,66 resultiert. *Bewertungsstufe 0-3*

**Verfügbarkeit:** Infolge der durchgeführten Markterhebung konnten 40 Hersteller identifiziert werden. Das Angebot an möglichen Lieferanten ist dementsprechend groß. In Verbindung mit Lieferzeiten von zwei bis vier Monaten ergibt sich eine sehr gute Marktverfügbarkeit. *Bewertungsstufe 4*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wurde einheitlich für alle Technologien der Kleinwindkraft vorgenommen. Bewertungsgrundlage ist die Einschätzung von Oberschmidt (2010, S. 172f) mit einem Wert von 2,43 (Stufe 2). Anschließend wurde die Bewertung durch das Projektteam um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend sind die Windverhältnisse in der Steiermark, die eine breite Technologieanwendung förmlich ausschließen. *Bewertungsstufe 1*

### 3.2.3.5. Technologielieferanten

Der Markt für horizontalachsige KWEA ist sehr unübersichtlich und geprägt von vielen KMUs. Im Laufe der Markterhebung konnten ca. 40 Hersteller bzw. Lieferanten identifiziert werden. Die Mehrzahl produziert Anlagen bis zu einer Leistung von 10 kW, im Leistungsbereich darüber ist die Anzahl stark abnehmend. Aus diesem Grund liegt der Fokus auf Herstellern, die Anlagen im Bereich zwischen 1 - 10 kW herstellen. In Abbildung 3.20 sind die erfolgversprechendsten Lieferanten zusammengefasst. Alle aufgelisteten Hersteller haben im Zuge der Beschaffungsmarkterhebung ein entsprechendes Angebot abgegeben.

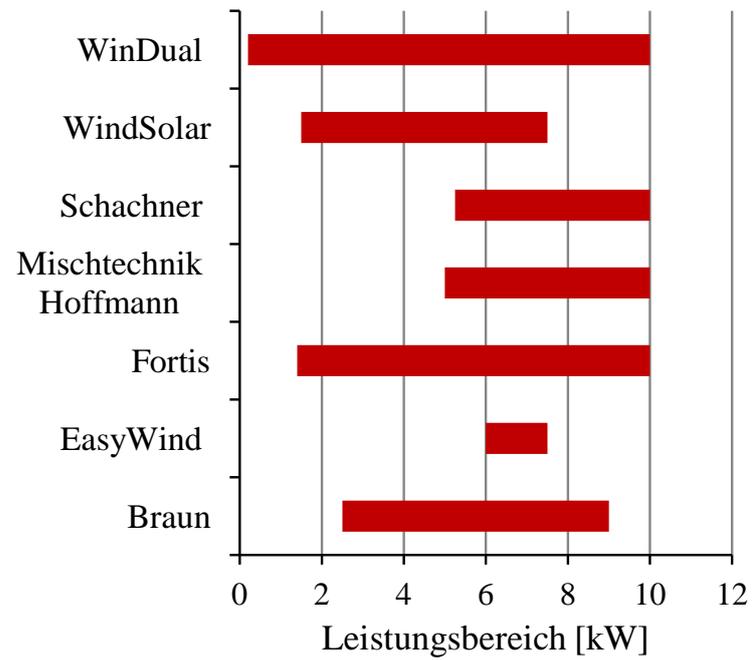


Abbildung 3.20.: Lieferanten horizontalachsige Windkraftanlagen

3.2.3.6. Steckbrief horizontalachsige Windkraftanlagen

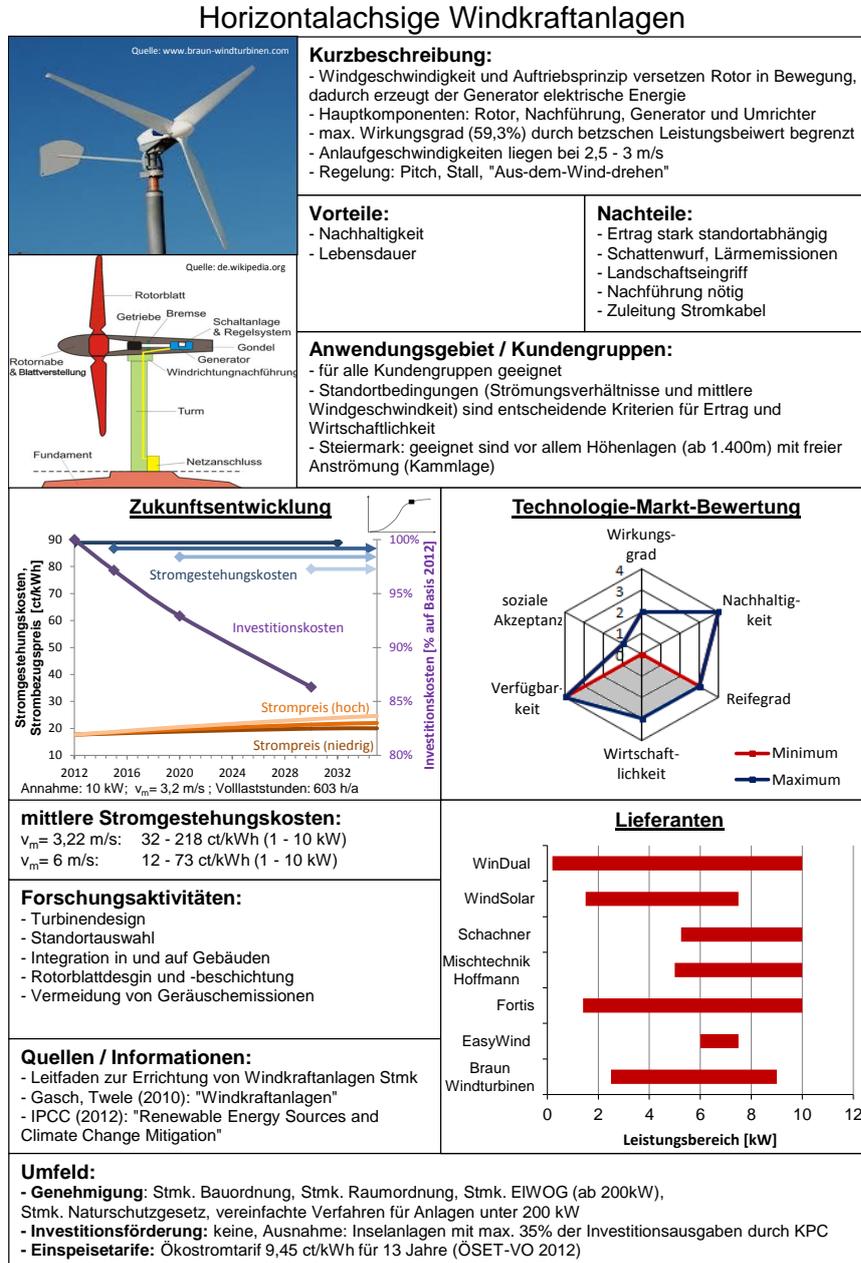


Abbildung 3.21.: Steckbrief horizontalachsige Windkraftanlagen

### 3.2.4. Vertikale Windkraftanlagen

Vertikale Widerstandsläufer gehören zu den ältesten Bauformen und wurden bereits vor 3.000 Jahren verwendet (Quaschnig, 2011, S. 239). Auch heute gibt es vertikalachsige Anlagen am Markt, die infolge der Dominanz von horizontalen Anlagen aber eher ein Nischendasein pflegen. Lediglich drei bis fünf Prozent der weltweit installierten Windkraftanlagen haben eine vertikale Drehachse. (IRENA, 2012, S. 9)

Werden nur die KWEA (Leistung kleiner 100 kW) betrachtet, so ist die Bilanz der vertikalen Anlagen deutlich positiver. Dem Internetportal „www.allsmallwindturbines.com“ kann entnommen werden, dass von derzeit 674 weltweit registrierten KWEA, 152 mit einer vertikalen Achse ausgeführt sind. Das entspricht zumindest einem Marktanteil von ca. 20 %. Welche Ausführungsprinzipien sich am Markt bewährt haben, soll in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

#### 3.2.4.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Im Gegensatz zu den horizontalen Ausführungsformen sind die vertikalen KWEA sehr einfach aufgebaut. Die Anlagen bestehen im Wesentlichen aus Rotor, Antriebseinheit sowie Turm und Fundament.

**Rotor:** Bei den vertikalen KWEA haben sich drei verschiedene Ausführungsformen am Markt etabliert. Entsprechend Abbildung 3.22 sind das Savonius-, Darrieus- und H-(Darrieus-) Rotoren.

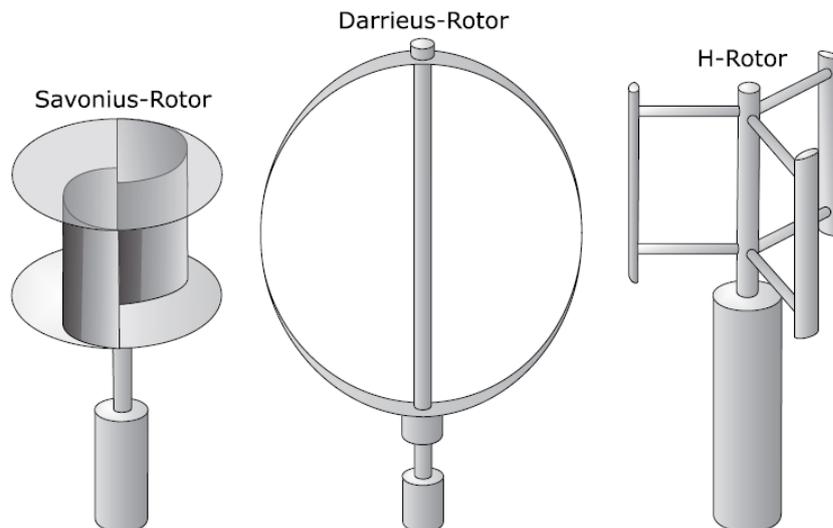


Abbildung 3.22.: Bauformen von vertikalachsigen Windkraftanlagen (Quaschnig, 2011, S. 255)

Der Savonius-Rotor besteht aus zwei Halbschalen, welche in verschiedene Richtungen geöffnet sind und arbeitet überwiegend nach dem Widerstandsprinzip. Bei einigen Ausführungen sind die Schaufeln in Achsnähe leicht überlappend ausgeführt, sodass der Wind nach der Umlenkung in der ersten Schaufel auch die zweite Schaufel durchströmt. Hierdurch kann in kleinem Maße das Auftriebsprinzip genutzt werden und ein geringfügig höherer Wirkungsgrad als bei reinen Widerstandsläufern erreicht werden. Darrieus-Rotoren bestehen aus zwei oder drei Rotorblättern in Parabelform, welche nach dem Auftriebsprinzip arbeiten. Anlagen dieser Bauform können allerdings nicht selbstständig anlaufen und benötigen eine Anlaufhilfe. H-Rotoren sind eine Weiterentwicklung der Darrieus-Rotoren. Die meist mit drei senkrechten Rotorblättern ausgestatteten Anlagen arbeiten ebenfalls nach dem Auftriebsprinzip. (Quaschnig, 2011, S. 255f)

**Antriebseinheit:** Die Antriebseinheit besteht hauptsächlich aus einem Getriebe, Generator, Umrichter und einer Welle. An dieser Stelle sei auf die Ausführungen bzgl. der Antriebseinheit in Kapitel 3.2.3.1 verwiesen, die in gleicher Weise für die vertikalen Anlagentechnologien gelten. In der Regel werden zur Stromerzeugung Drehstrom-Asynchron- oder -Synchrongeneratoren verwendet. Gegebenenfalls verfügen die Anlagen über ein Getriebe, welches die Drehzahl vom Rotor in die benötigte Generatordrehzahl umwandelt. Die Verwendung von Stromumrichtern ermöglicht einen drehzahlvariablen Anlagenbetrieb. Der Unterschied zu horizontalen Anlagen ist, dass die Antriebseinheit aufgrund der Konstruktionseigenschaften in Bodennähe installiert werden kann, was mögliche Wartungsarbeiten stark erleichtert. Vertikale KWEA besitzen zudem eine Bremse, die bei zu großen und zu kleinen Windgeschwindigkeiten die Turbine abschaltet.

**Elektrische Schaltanlagen und Regelungskonzepte:** Die Anwendung von Regelungskonzepten ist generell möglich, jedoch im untersuchten Leistungsbereich unüblich (Hübner et al., 2010, S. 5). Vertikale KWEA können allseitig angeströmt werden und benötigen keine Systeme zur Windnachführung.

**Turm und Fundament:** Turm und Fundament haben die Aufgabe, den Rotor zu tragen, wobei die Kräfte bzw. die Anforderungen an das Fundament mit zunehmender Anlagenhöhe steigen. Bei vertikalen Anlagen stellt auch die Aufdachmontage oder Gebäudeintegration eine gebräuchliche Installationsmöglichkeit dar. Dadurch können Kosten für das Fundament und die Turmhöhe gespart werden. Allerdings sollte die Übertragung von Vibrationen auf die Dachkonstruktion vermieden werden.

### 3.2.4.2. Stand der Technik

Vertikale Anlagen erreichen laut Hübner et al. (2010, S. 4) elektrische Wirkungsgrade von maximal 30 - 40 %. Eigene Berechnungen auf Basis verschiedener Anlagendokumentationen der Hersteller haben diese Werte bestätigt. Für den Anlagenbetrieb mit der Nenngeschwindigkeit werden in der Praxis mittlere Wirkungsgrade von 28 % erreicht (Tabelle A.3).

Im Gegensatz zu horizontalen KWEA können die vertikalen auch turbulente Winde

verwerten. Die Auswirkungen von Hindernissen und Gebäuden auf den Ertrag sind eher gering. Diese Eigenschaft, in Verbindung mit niedrigen Geräuschemissionen, ermöglicht die Anwendung in urbanen Gebieten. Darüber hinaus sind vertikalachsige Technologien allseitig anströmbar und benötigen keine Einrichtungen zur Windnachführung, dies bewirkt eine Einsparung an Bauteilen und konstruktivem Know-how. Im untersuchten Leistungsbereich ist außerdem mit einem geringen Wartungsaufwand zu rechnen. Einige Hersteller (z.B. Silent Future Tec) werben mit einer Wartungsfreiheit in den ersten 15 Betriebsjahren. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass der Wartungsaufwand gering ist und in erster Linie durch Sturmschäden, Blitzschlag und ähnliche Ereignisse entsteht. Infolge der Bauteilanordnung können eventuelle Wartungsarbeiten meistens am Boden und ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Die Charakteristik von horizontalen KWEA wird durch die folgenden Geschwindigkeiten bestimmt. Die angegebenen Geschwindigkeiten sind als Durchschnittswerte von den in der Markterhebung untersuchten Anlagen zu verstehen (Tabelle A.3).

Anlaufgeschwindigkeit:	3 m/s
Nenngeschwindigkeit:	11 - 12 m/s
Abschaltgeschwindigkeit:	20 - 30 m/s
Überlebensgeschwindigkeit:	50 m/s

#### 3.2.4.3. Vor- und Nachteile

Wie bereits zu Beginn erwähnt, erreichen vertikale Anlagen nicht die gleichen Wirkungsgrade wie die horizontalen. Mit einer maximalen Effizienz von ca. 30 % ist die Leistungsausbeute geringer und damit ein Nachteil. Günstig ist jedoch die Nutzung turbulenter Winde, wodurch ein Anlagenbetrieb in Städten möglich ist. Für die Anwendung in urbanen Gebieten sind der zu vernachlässigende Schattenwurf und geringe Geräuschemissionen ebenso von großem Vorteil. Die niedrigen Geräuschemissionen resultieren aus den niedrigen Blattspitzengeschwindigkeiten. Außerdem gestaltet sich die Wartung deutlich einfacher als bei horizontalen Anlagen, da wartungsintensive Komponenten (z.B. Generator) in Bodennähe installiert werden können.

Neben dem bereits erwähnten Wirkungsgradnachteil, ist der hohe Materialbedarf sowie das Anlagengewicht zu nennen. Dies ist die Ursache, warum es Savonius-Rotoren nur im kleinen Leistungsbereich gibt. Außerdem erzeugen die Anlagen hohe Schwingungen, was vor allem bei der Aufdachmontage und Gebäudeintegration unangenehme Auswirkungen haben kann.

#### 3.2.4.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Die Angabe vom Wirkungsgrad einer vertikalen KWEA ist sehr untypisch und wird weder in der Literatur noch auf den technischen Datenblättern der Hersteller angegeben. Aus eigenen Berechnungen (Tabelle A.3) auf Basis der Anlagengröße (Fläche) und Nenngeschwindigkeit wurden die Wirkungsgrade von verschiedenen Anlagen berechnet. Im Durchschnitt werden beim Betrieb mit der Nenngeschwindigkeit Wirkungsgrade von 28 % erreicht. Der theoretisch mögliche Wirkungsgrad ist durch den betzischen Leistungsbeiwert auf 59 % begrenzt (Gasch & Twele, 2010, S. 37). Demzufolge ergibt sich ein Verhältnis von 0,47 und eine durchschnittliche Bewertung. *Bewertungsstufe 2*

**Nachhaltigkeit:** Während der Betriebsphase entstehen keine umweltrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Bewertungsstufe 4*

**Reifegrad:** Obwohl in dieser Analyse kein Angebot für eine vertikale KWEA beschafft werden konnte, sind die Anlagen grundsätzlich am Markt verfügbar. Sie besitzen ein hohes Weiterentwicklungspotential. Die Erträge bei niedrigen Windgeschwindigkeiten bzw. die Senkung der Produktionskosten könnten die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen. Dafür ist allerdings ein hoher Entwicklungsaufwand nötig. Vertikale KWEA werden als Schlüsseltechnologie eingeschätzt. *Bewertungsstufe 3*

**Wirtschaftlichkeit:** Da für die wirtschaftliche Anlagenbewertung keine Angebote beschafft werden konnten, wird der Bewertung die Studie von Hübner et al. (2010, S. 17) zugrunde gelegt. Hier wurden die Stromgestehungskosten einer vertikalen Anlage bei  $v_m = 3,9$  m/s mit 91 ct/kWh berechnet. Bei einer Senkung der mittleren Windgeschwindigkeit um 30 % steigen die Gestehungskosten auf 322 ct/kWh. Demzufolge ergibt sich ein Kostenbereich, der mit den Annahmen der von Ortner (2012) durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnung vergleichbar ist. Aufgrund der Leistungen der Anlagen wird das Privatkundensegment als Hauptanwendungsgebiet gesehen. Die Stromgestehungskosten werden demzufolge mit einem mittleren Strombezugspreis von 21,02 ct/kWh verglichen, woraus ein Verhältnis von 0,06 - 0,23 resultiert. *Bewertungsstufe 0-1*

**Verfügbarkeit:** Für eine Angebotslegung waren im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse keine Hersteller zu gewinnen. Dementsprechend sind keine Daten für die Anlagelieferzeiten vorhanden. Da es dennoch drei bis vier Hersteller gibt, die im Zuge einer neuerlichen Marktanalyse befragt werden könnten, wird die Marktverfügbarkeit mit Stufe eins bewertet. *Bewertungsstufe 1*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wurde einheitlich für alle Technologien der Kleinwindkraft vorgenommen. Bewertungsgrundlage ist die Einschätzung von Oberschmidt (2010, S. 172f) mit einem Wert von 2,43 (Stufe 2). Anschließend wurde die Bewertung durch das Projektteam um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend sind die Windverhältnisse in der Steiermark, die eine breite Technologieanwendung förmlich ausschließen. *Bewertungsstufe 1*

### 3.2.4.5. Technologielieferanten

Entsprechend den zuvor beschriebenen Technologien, wurden im Zuge der Marktanalyse einige Hersteller von vertikalen Windkraftanlagen identifiziert und bewertet. Die Kontaktaufnahme war jedoch nicht von Erfolg gekrönt, da die Anfragen entweder unbeantwortet blieben oder die angeforderten Daten (Angebot und Leistungskurve) nicht zur Verfügung gestellt werden konnten. Einige Hersteller antworteten mit realitätsfernen Datenblättern und konnten somit nicht in die Untersuchung aufgenommen werden. In Abbildung 3.23 sind Hersteller aufgelistet, die bislang nicht kontaktiert wurden oder bisher nur Angebote für horizontale Anlagen zur Verfügung gestellt haben. Nach Ab-

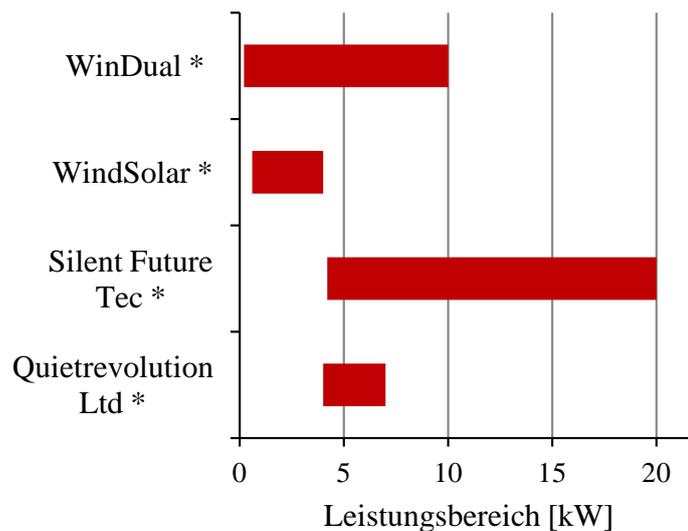


Abbildung 3.23.: Lieferanten vertikalachsige Windkraftanlagen

schluss der Beschaffungsmarkterhebung wurden die Hersteller Silent Future Tec und WindSolar zusätzlich gefunden, aus Zeitgründen konnten diese in der Analyse jedoch nicht mehr kontaktiert werden. Der Hersteller Windual hat lediglich horizontale Anlagen angeboten. Durch eine weitere Kontaktaufnahme könnte gegebenenfalls ein Angebot für eine vertikale KWEA beschafft werden. Quietrevolution Ltd mit Sitz und Produktion in England wurde bisher aus Entfernungsgründen nicht kontaktiert.

3.2.4.6. Steckbrief vertikalachsig Windkraftanlagen

### Vertikalachsig Windkraftanlagen

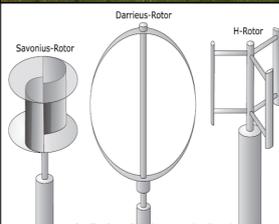
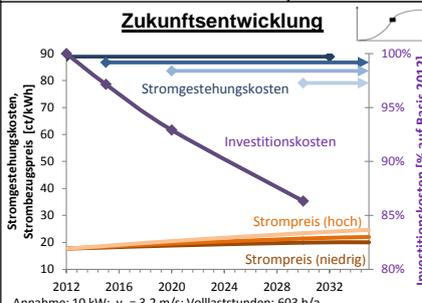
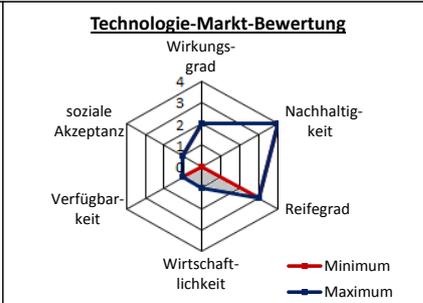
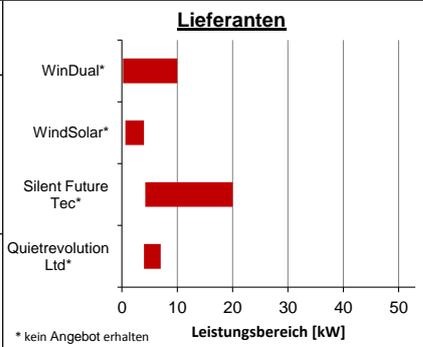
 <p style="font-size: small; text-align: center;">Quelle: www.solarserver.de</p>	<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Windgeschwindigkeit und Auftriebs- oder Widerstandsprinzip versetzen Rotor in Bewegung, dadurch erzeugt der Generator elektrische Energie</li> <li>- Hauptkomponenten: Rotor, Generator und Umrichter</li> <li>- max. Wirkungsgrad (59,3%) durch betriebsweisen Leistungsbeiwert begrenzt</li> <li>- Anlaufgeschwindigkeiten liegen bei ca. 3 m/s</li> <li>- Ausführungen: Savonius-, Darrieus- und H-Rotor</li> </ul>
 <p style="font-size: small; text-align: center;">Quelle: Quaschnig-Regenerative Energiesysteme</p>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachhaltigkeit</li> <li>- keine Abschaltung bei Starkwind</li> <li>- keine Nachführung</li> <li>- geräuscharm</li> <li>- Nutzung turbulenter Winde</li> </ul> <p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ertrag stark standortabhängig</li> <li>- Wirkungsgrad</li> <li>- Anlagengewicht</li> <li>- Schwingungen</li> </ul>
<p><b>Anwendungsgebiet / Kundengruppen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- für alle Kundengruppen geeignet</li> <li>- Standortbedingungen sind entscheidende Kriterien für Ertrag und Wirtschaftlichkeit</li> <li>- Nutzung vorwiegend in urbanen Gebieten</li> <li>- Aufdachmontage und Gebäudeintegration möglich</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>Zukunftsentwicklung</b></p>  <p style="font-size: x-small;">Annahme: 10 kW; <math>v_m = 3,2 \text{ m/s}</math>; Volllaststunden: 603 h/a</p>	<p style="text-align: center;"><b>Technologie-Markt-Bewertung</b></p> 
<p><b>mittlere Stromgestehungskosten:</b>  <math>v_m = 3,9 \text{ m/s}</math>: 91 ct/kWh     <math>v_m = 2,73 \text{ m/s}</math>: 322 ct/kWh                  Quelle: Hübner et al. (2010)</p>	
<p><b>Forschungsaktivitäten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimierung bestehender Anlagen</li> <li>- Standortwahl; Strömungssimulation zur optimalen Positionierung</li> <li>- Integration in und auf Gebäuden</li> <li>- Rotorblattedesign und -beschichtung</li> <li>- Minderung Geräuschemissionen</li> </ul>	
<p><b>Quellen / Informationen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitfaden zur Errichtung von Windkraftanlagen Stmk</li> <li>- Gasch, Twele (2010): "Windkraftanlagen"</li> <li>- www.bundesverband-kleinwindanlagen.de</li> <li>- www.urbanwind.org</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>Lieferanten</b></p>  <p style="font-size: x-small; text-align: center;">* kein Angebot erhalten</p>	
<p><b>Umfeld:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Genehmigung:</b> Stmk. Bauordnung, Stmk. Raumordnung, Stmk. EIWOG (ab 200kW) und Stmk. Naturschutzgesetz (vereinfachtes Verfahren unter 200 kW)</li> <li>- <b>Investitionsförderung:</b> keine, Ausnahme: Inselanlagen mit bis zu 35% durch KPC</li> <li>- <b>Einspeisetarife:</b> Ökostromtarif 9,45 ct/kWh für 13 Jahre (ÖSET-VO 2012)</li> </ul>	

Abbildung 3.24.: Steckbrief vertikalachsig Windkraftanlagen

### 3.3. Kleinwasserkraft

Die Nutzung der Wasserkraft hat in Analogie zur Windkraft eine lange Tradition. Frühe Anwendungsformen waren Wassermühlen und Wasserräder zum Antrieb von Werkzeugmaschinen. Der Durchbruch der Wasserkraft gelang Mitte des 19. bzw. zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit der Entwicklung der Francis-, Pelton- und Kaplan-Turbine. Heute werden Wasserkraftanlagen überwiegend zur Stromerzeugung in Speicher- und Laufwasserkraftwerken eingesetzt. (Draxler, 2012, S. 1ff)

Österreich ist aufgrund der topographischen Gegebenheiten für die Nutzung der Wasserkraft prädestiniert. Derzeit werden ca. 2.600 Kleinwasserkraftwerke betrieben, die 9 % des österreichischen Strombedarfes decken. Bis zum Jahr 2020 besteht ein weiteres Potential von ca. 1,5 - 2,5 TWh durch Neubau und Revitalisierung. Das größte Potential (in Anlagenzahlen) wird im Leistungsbereich zwischen 0 - 200 kW gesehen. (Prechtel, 2012, S. 3f)

#### 3.3.1. Allgemeine Informationen

In Österreich werden Anlagen bis zu einer Leistung von 10 MW als Kleinwasserkraftwerke bezeichnet (Penche, 2004, S. 3). Infolge der Leistungsbegrenzung auf 250 kW, wird in dieser Untersuchung nur der kleinste Leistungsbereich analysiert. Die Technologieauswahl ist ein Resultat der Beschaffungsmarktanalyse, in welcher die Lieferanten um eine Angebotslegung für vier verschiedene Standorte gebeten wurden. Die angebotenen Technologien sind Pelton-, Kaplan-, Durchströmturbine sowie die Wasserkraftschnecke und sollen in den kommenden Kapiteln untersucht werden. Eine Kundensegmentierung entsprechend der Anlagengröße wird nicht vorgenommen. Sofern eine Wasserquelle zur Verfügung steht, ist die Nutzung durch jede Kundengruppe möglich.

Infolge des natürlichen Wasserkreislaufes, verdunstet Wasser durch die Sonne, fällt als Niederschlag wieder auf den Boden und wird dadurch auf ein höheres Niveau angehoben. Die daraus entstandene Lageenergie kann durch Wasserkraftanlagen genutzt werden. Zur Energieerzeugung wird diese potentielle Energie zunächst in Bewegungsenergie umgewandelt. Durch eine Turbine erfolgt die Umformung in mechanische Energie, womit ein Generator elektrische Energie erzeugt. Die wichtigsten Anlagenkomponenten einer Wasserkraftanlage sind die Turbine, der Generator und die wasserbaulichen Bestandteile (Wehr, Staudamm, Ein- und Auslaufbauwerk, etc.), die in Abhängigkeit der einzelnen Technologien in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

Für die Berechnung der Leistung einer Wasserkraftanlage, sind im Wesentlichen die nutzbare Fallhöhe und die Wassermenge entscheidend. Nach Formel (3.8) lässt sich die Leistung einer Anlage abschätzen. Die Auswirkungen der Wasserdichte und der Wirkungsgrade (von Turbine und Generator) sind von geringerer Bedeutung. (Energieinstitut Vorarlberg, 2004, S. 6)

$$P_{el} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot g \cdot Q_A \cdot H_n \quad (3.8)$$

$P_{el}$ :	elektrische Leistung [W]
$\rho_{Wasser}$ :	Dichte von Wasser [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\eta_T$ :	Wirkungsgrad der Turbine
$\eta_G$ :	Wirkungsgrad des Generators
$g$ :	Erdbeschleunigung [ $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ ]
$Q_A$ :	Ausbauwassermenge [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$H_n$ :	Nutzfallhöhe [m]

Für die Anlagenauslegung wird eine Jahresdauerlinie der Abflüsse verwendet. Diese Linie zeigt, welche Wassermengen an wie vielen Tagen eines Jahres zu erwarten sind. Da die Abflussmengen über ein Jahr schwanken, ist die Auslegung ein Kompromiss zwischen optimaler Turbinennutzung und maximaler Stromerzeugung. Wird der Ausbaudurchfluss unterschritten, arbeiten die Anlagen im Teillastbereich oder werden gänzlich abgeschaltet. Zu große Abflussmengen müssen ungenutzt über Wehr- oder Stauanlagen abgeführt werden. Die Energieerzeugung ist somit vom jeweiligen Wasserangebot abhängig und unterliegt einer jährlichen Schwankung. (Quaschnig, 2011, S. 295ff)

Bedingt durch den technischen Fortschritt ist in den letzten Jahren vor allem die Modernisierung und Revitalisierung von Kraftwerken interessant geworden. Die betrachteten Technologien sind demnach nicht nur Möglichkeiten zur Nutzung neuer Standorte, sondern stellen auch Erweiterungs- und Erneuerungspotential bereits bestehender Anlagen dar.

### 3.3.2. Rechtliche Rahmenbedingungen

Im folgenden Abschnitt sollen die relevanten Informationen bezüglich der Genehmigungsverfahren, Investitionsförderung und den derzeit gültigen Einspeisetarifen zusammengefasst werden.

#### **Wasserrechtsgesetz (Stand 01.10.2012)**

Das Wasserrechtsgesetz regelt im Wesentlichen die Benutzung, den Schutz und die Reinhaltung des Gewässers sowie den Schutz vor Gefahren des Wassers. Die grundlegenden Ziele der Reinhaltung und des Schutzes aller öffentlichen Gewässer sind in § 30 zusammengefasst. In der Regel gilt, dass der ökologische Zustand und das ökologische Potential der Gewässer nicht verschlechtert werden darf (Verschlechterungsverbot). Für die Errichtung und den Betrieb von Wasserkraftanlagen ist § 30a und b von großer Relevanz. Diese regulieren die Umweltziele sowie die Veränderungen der Oberflächenwasserkörper. Demzufolge kann die zuständige Verwaltungsbehörde einer Veränderung zustimmen, sofern die nutzbringenden Ziele nicht durch andere sinnvolle Mittel umgesetzt werden können. Eine Bewilligung/Genehmigung erfolgt nach den wasserrechtlichen Vorschriften, das Stmk. BauG findet hier keine Anwendung. Die dafür nötigen Verfahren sind sehr aufwendig und können einige Zeit in Anspruch nehmen. (Bundeskanzleramt Österreich, 2012b, S. 1ff)

### **Stmk. EIWOG 2005**

Gemäß Kapitel 3.1.4 (rechtliche Grundlagen KWK) gelten die gleichen Bestimmungen auch für Kleinwasserkraftanlagen. Es werden im Allgemeinen vereinfachte Verfahren angewendet und der Netzbetreiber ist verpflichtet, den durch Kleinwasserkraftanlagen erzeugten Strom abzunehmen und zu verteilen.

### **Stmk. NschG 1976**

Im Stmk. NschG sind einzelne Gebiete zu Schutzzwecken der Natur, Landschaft sowie der Erhaltung und Gestaltung der Umwelt als Lebensraum für Menschen, Pflanzen und Tiere ausgewiesen. Innerhalb solcher Gebiete dürfen keine schädigenden oder beeinträchtigenden Landschaftsveränderungen vorgenommen werden. Für die Errichtung von Wasserkraftanlagen an fließenden Gewässern außerhalb eines Naturschutzgebietes ist in jedem Fall eine Bewilligung der Landesregierung bzw. der Bezirksverwaltung einzuholen (§ 7(1) Schutz von stehenden und fließenden Gewässern). (Bundesland Steiermark, 2012b, S. 5f)

### **Förderungsmöglichkeiten**

Gemäß dem Ökostromgesetz gewährt die OeMAG einen Investitionszuschuss für Kleinwasserkraftanlagen. Dadurch soll in erster Linie die Stromerzeugung durch regenerative Energieträger gefördert werden. Förderungsgegenstand sind Anlagen mit einer Leistung bis 10 MW, wobei jede natürliche und juristische Person, die eine Kleinwasserkraftanlage errichtet, betreibt oder revitalisiert, um die Förderung ansuchen kann. Die Zuschüsse belaufen sich im untersuchten Leistungsbereich auf 1.500 Euro/kW. (OeMAG, 2012, S. 1ff)

Außerdem wird die durch Kleinwasserkraftanlagen erzeugte Strommenge im Sinne der Ökostromverordnung 2012 vergütet. Demnach ist für die ersten 500.000 kWh/a ein Einspeisetarif von 10,6 ct/kWh festgeschrieben. (BMWFJ, 2012, S. 5)

### 3.3.3. Pelton-Turbine

Die Pelton-Turbine wurde vom amerikanischen Ingenieur Lester Allen Pelton im Jahre 1880 entwickelt. Sie wird hauptsächlich im Hochgebirge zur Nutzung großer Fallhöhen und kleiner Wassermengen eingesetzt. Die Turbine findet auch im untersuchten Leistungsbereich Anwendung, etwa in Trinkwasserleitungen oder zur Nutzung von Fallhöhen ab 15 m. (Quaschnig, 2011, S. 308)

#### 3.3.3.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Pelton-Turbinen ähneln durch den Aufbau einem Wasserrad. Sie bestehen aus einem becherförmigen Laufrad, einer Druckrohrleitung samt Düse(n) sowie einem Generator. Abbildung 3.25 zeigt eine Peltonmaschine mit dem typischen Peltonrad. Für einen Anlagenbetrieb sind zudem wasserbauliche Komponenten (Ein- und Auslaufbauwerk, Druckrohrleitung, Wehr, etc.) nötig.

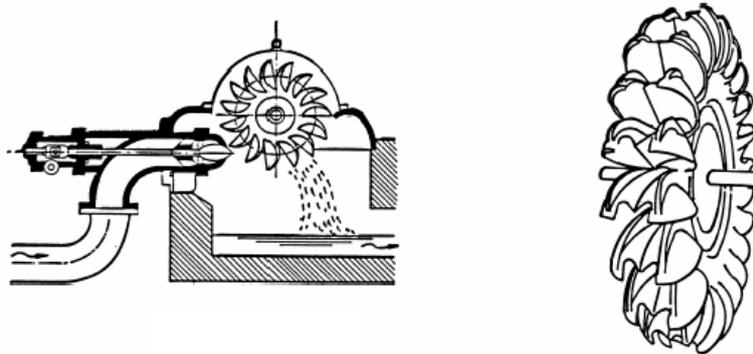


Abbildung 3.25.: Pelton-Turbine (Energieinstitut Vorarlberg, 2004, S. 27)

**Laufrad:** Das Herzstück der Turbine ist das Laufrad. Dieses besteht aus mehreren becherförmigen Schaufeln, welche den auftreffenden Wasserstrahl um ca.  $180^\circ$  umlenken. Auf diese Weise erfolgt eine Impulsübertragung vom Wasser auf das Laufrad. Die dadurch entstehende Drehbewegung wird anschließend im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Für eine gleichmäßige Kraftübertragung besitzen die Becher eine Aussparung (Abbildung 3.25), sodass jeweils zwei Becher vom Wasserstrahl beaufschlagt werden. Die becherförmigen Schaufeln besitzen zudem eine Mittelschneide, welche einen Staupunkt im Becherzentrum vermeidet und dadurch den Verschleiß senkt. (Watter, 2011, S. 87)

**Druckrohrleitung:** Zur Überwindung der Höhendifferenz zwischen Wasserreservoir und Maschinensatz werden Druckrohrleitungen verwendet. Diese bestehen meist aus Glasfaser verstärkten Kunststoffen und sind sehr belastbar. Für die Minimierung der

Druckverluste sollten die Rohre möglichst glatt und krümmungsfrei gebaut werden. (Penche, 2004, S. 147)

**Düse:** Durch eine oder mehrere Düsen wird der Druck aus der Rohrleitung in eine große Geschwindigkeit des Wasserstrahles umgewandelt und auf die Turbinenschaufeln geleitet. Durch ein integriertes Nadelventil kann der Durchfluss und somit die Leistung der Turbine reguliert werden. Aufgrund der kleinen Öffnung und der hohen Wassergeschwindigkeit sind Nadel und Düse starken Abnutzungserscheinungen ausgesetzt. Die Regelung durch die Nadelventile kann nur sehr langsam erfolgen, da andernfalls große Druckstöße in der Rohrleitung auftreten. Zur Realisierung schneller Regelungsvorgänge (z.B. Notaus) ist ein Strahlableiter vorgesehen. (Huber, 2010, S. 34f)

**Generator:** Grundsätzlich werden in Wasserkraftanlagen vorwiegend Synchron- und Asynchrongeneratoren verwendet. Als ein Resultat der Herstellerbefragung kann festgehalten werden, dass im untersuchten Leistungsbereich vorwiegend Synchrongeneratoren eingesetzt werden. Dieser Sachverhalt wird in den Ausführungen von Quasnig (2011, S. 309) bestätigt. Da die Laufräder hohe Drehzahlen erreichen, sind die Anlagen in der Regel getriebelos ausgeführt. Das Laufrad sitzt demzufolge direkt auf der Generatorwelle.

Der Betrieb einer Wasserkraftanlage erfordert zudem bauliche Komponenten. Diese sind Wehre bzw. Dämme zur Aufstauung des Wassers, Recheneinheiten für die Filterung von grobem Treibgut sowie Ein- und Auslaufbauwerk zur Führung des Wassers. Da Laufrad und Düse sehr verschleißanfällig sind, ist die Installation eines Sandfanges im Bereich des Einlaufbauwerkes zweckmäßig. Dadurch wird feines Schwemmgut entfernt und der erosive Verschleiß an den Bauteilen gering gehalten. Neben den beschriebenen Komponenten sind Überwachungs-, Steuerungs- und Regelungsanlagen erforderlich.

### 3.3.3.2. Stand der Technik

Peltonmaschinen stellen eine bewährte Technologie dar, welche in einem breiten Leistungsbereich angewendet werden kann. Mit Fallhöhen von  $H = 15 - 250$  m und einem Wasserdurchfluss von  $Q = 0,025 - 1,25$  m<sup>3</sup>/s erzeugen die Anlagen Leistungen von  $P = 15 - 2.000$  kW. (Simader et al., 2008, S. 36)

Die Turbinen erreichen Wirkungsgrade bis zu 94 %. Verluste entstehen durch die Verdrängung der Luftmassen aufgrund der Schaufelbewegung sowie durch Reibungsverluste in den Lagerstellen. (Huber, 2010, S. 34)

Auf Basis der Herstellerinformationen schwanken die Gesamtwirkungsgrade zwischen 65 % für Kleinstanlagen (Pelton-Pico mit Leistungen bis zu einem kW) und 85 % für größere Anlagen. Ausschlaggebend sind Druckverluste in der Rohrleitung, Reibungsverluste sowie Geschwindigkeitsverluste, bedingt durch die Restgeschwindigkeit des Wassers beim Verlassen der Schaufeln (Huber, 2010, S. 35).

Nach Simader et al. (2008, S. 48f) ist für die Wartung und Instandhaltung mit einem durchschnittlichen Aufwand von 3,25 % der Investitionssumme pro Jahr zu rechnen. Zudem werden als rechnerische Anlagenutzungsdauer 25 Jahre angesetzt.

### 3.3.3.3. Vor- und Nachteile

Die Nutzung von Pelton-Turbinen ist eine saubere, emissionsfreie und nachhaltige Form der Stromproduktion. Peltonmaschinen haben einen einfachen Aufbau mit wenigen beweglichen Teilen. Die Komponenten sind sehr robust ausgeführt und für eine große Nutzungsdauer ausgelegt. Zudem sind Pelton-Turbinen gut regelbar und erzielen auch im Teillastbereich hohe Wirkungsgrade. (Energieinstitut Vorarlberg, 2004, S. 27)

Der große Nachteil der Peltonmaschine ist die hohe Verschleißanfälligkeit. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Wasserstrahles kommt es vor allem im Bereich der Druckrohrleitung, der Düse und des Laufrades zu Erosionen. In Abhängigkeit des Standortes einer Anlage ist mit aufwendigen Genehmigungsverfahren und umfangreichen baulichen Maßnahmen zu rechnen. (Watter, 2011, S. 87)

### 3.3.3.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Peltonmaschinen erreichen entsprechend den Herstellerinformationen von Lingenhölle und Gugler Gesamtanlagenwirkungsgrade von 65 - 85 %. Der theoretisch mögliche Anlagenwirkungsgrad liegt bei 100 %. Demnach ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,65 - 0,85. *Bewertungsstufe 3-4*

**Nachhaltigkeit:** Während der Betriebsphase entstehen keine umweltrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Bewertungsstufe 4*

**Reifegrad:** Die Turbinen sind seit Jahren am Markt etabliert und allgemein anerkannt. Die Technologie wird von allen Herstellern beherrscht und besitzt somit geringes Wettbewerbspotential. Zudem bestehen nur geringe Verbesserungsmöglichkeiten. Demzufolge gelten Pelton-Turbinen als Basistechnologie. (Pehnt et al., 2011, S. 128) *Bewertungsstufe 4*

**Wirtschaftlichkeit:** Infolge der wirtschaftlichen Anlagenbewertung erreichen die Pelton-Turbinen mittlere Stromgestehungskosten von 9 - 50 ct/kWh. Aufgrund der Anlagenleistung wird als Vergleichswert der durchschnittliche Strombezugspreis für (Klein)Gewerbekunden von 19,71 ct/kWh herangezogen. Aus diesem Grund ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,39 bis 2,19. *Bewertungsstufe 1-4*

**Verfügbarkeit:** Als Resultat der Lieferantenbewertung konnten fünf potentielle Lieferanten identifiziert werden. Für eine Projektrealisierung stehen deshalb genügend Anbieter bereit, die vergleichbare Angebote einreichen können. Allerdings betragen die Lieferzeiten zwischen zehn und zwölf Monaten, was in Summe eine durchschnittliche Bewertung ergibt. *Bewertungsstufe 2*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wurde einheitlich für alle Technologien der Kleinwasserkraft vorgenommen. Da die soziale Akzeptanz von Wasserkraftanlagen in Oberschmidt (2010, S. 172f) nicht bewertet wurde, wird die

durchschnittliche Bewertung für erneuerbare Erzeugungsanlagen als Basis herangezogen (Stufe 3). Anschließend wurde die Bewertung durch das Projektteam um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend sind die schwierigen und aufwendigen Genehmigungsverfahren sowie der Betriebsaufwand. *Bewertungsstufe 2*

### 3.3.3.5. Technologielieferanten

Im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse wurden 15 Pelton-Turbinenhersteller identifiziert und bewertet. Im weiteren Verlauf wurden die am besten eingestufteten Lieferanten kontaktiert und um eine Angebotslegung gebeten. Für die Ausarbeitung der Angebote wurden reale Daten zu Fallhöhe und Wasserdurchfluss von vier verschiedenen Standorten übermittelt. Die in Abbildung 3.26 aufgelisteten Lieferanten gelten infolge der durchgeführten Lieferantenbewertung als vielversprechend. Alle angeführten Lieferanten produzieren Anlagen im untersuchten Leistungsbereich, wobei die Hersteller Lingenhölle (Trinkwasserturbine) sowie Gugler (146 kW, horizontale Wellenlage, eindüsig) und WWS (145 kW, horizontale Wellenlage, eindüsig) die Anfrage mit einer entsprechenden Offerte beantworteten.

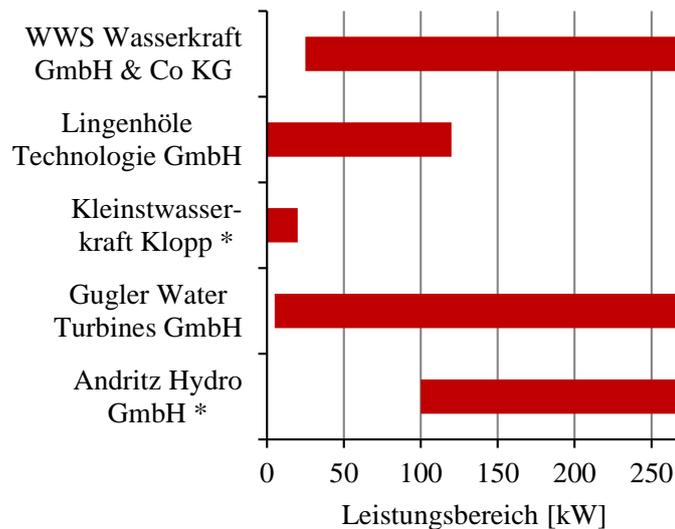


Abbildung 3.26.: Lieferanten Pelton-Turbine

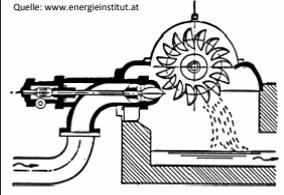
Die Kontaktaufnahme gestaltete sich schwierig und war vor allem dadurch geprägt, dass viele Hersteller ausschließlich für reale Projekte Angebote anfertigen. Außerdem sind Wartezeiten für eine Angebotserstellung von acht bis zwölf Wochen die Regel, wobei sehr oft auch nach Ablauf dieser Frist keine Bearbeitung erfolgte. Mit einem Stern (\*) gekennzeichnete Hersteller haben kein Angebot zurückgesendet.

3.3.3.6. Steckbrief Pelton-Turbine

### Pelton-Turbine



Quelle: www.gugler.com



Quelle: www.energieinstitut.at

**Kurzbeschreibung:**

- Wasserstrahl mit hoher Geschwindigkeit versetzt Laufrad in Bewegung, dadurch erzeugt der Generator elektrische Energie
- Komponenten: Druckrohrleitung, Düse, Laufrad, Generator, Gehäuse
- Regelung durch verstellbare Düse
- mehrdüsig ausgeführt möglich
- Picoturbinen: Standardgeräte im Leistungsbereich bis 1 kW<sub>el</sub>

**Vorteile:**

- Nachhaltigkeit
- einfache, robuste Bauweise
- gutes Teillastverhalten

**Nachteile:**

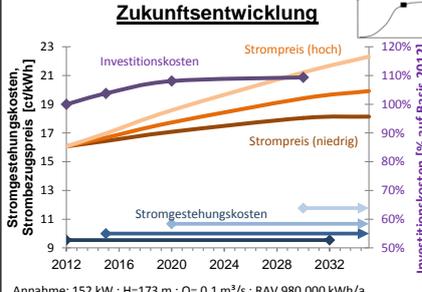
- Verschleißanfälligkeit
- hohe Reparaturkosten

**Anwendungs- / Einsatzgebiet:**

- Fallhöhe: 15 - 250 m
- Durchfluss: 0,025 - 1,25 m<sup>3</sup>/s
- Leistung: 15 - 2.000 kW
- Einsatz: große Fallhöhen und kleine Wassermengen

---

**Zukunftsentwicklung**



Annahme: 152 kW; H=173 m; Q=0,1 m<sup>3</sup>/s; RAV 980.000 kWh/a

**Technologie-Markt-Bewertung**



---

**mittlere Stromgestehungskosten:**  
9,5 ct/kWh (150 kW) - 50 ct/kWh (0,1 kW)

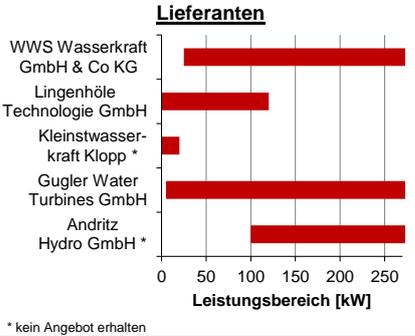
**Forschungsaktivitäten:**

- Leistungssteigerung durch optimierte Schaufelgeometrien
- Optimierung der Anströmung

**Quellen / Informationen:**

- www.lingenhoele.at
- Energieinstitut Vorarlberg: Leitfaden Kleinwasserkraft

**Lieferanten**



\* kein Angebot erhalten

---

**Umfeld:**

- **Genehmigung:** Wasserrechtsgesetz, Stmk. Naturschutzgesetz und Stmk. EIWOG
- **Investitionsförderung:** durch OeMAG 1500 €/kW bis max. 30% der Gesamtinvestition (Anlagen < 500 kW)
- **Einspeisetarife:** Tarif richtet sich nach erzeugter Energiemenge: 10,55 ct/kWh für die ersten 500.000 kWh/a (ÖSET-VO 2012)

Abbildung 3.27.: Steckbrief Pelton-Turbine

### 3.3.4. Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine wurde vom österreichischen Ingenieur Viktor Kaplan im Jahre 1912 entwickelt. Sie hat starke Ähnlichkeit mit einer Schiffsschraube und kommt überwiegend bei kleinen Fallhöhen und großen Wassermengen zum Einsatz. Der Hauptanwendungsfall ist in Laufwasser- bzw. Flusskraftwerken, wo diese Bedingungen typischerweise anzufinden sind. (Quaschnig, 2011, S. 306f)

#### 3.3.4.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Kaplan-Turbinen sind in den verschiedensten Ausführungen am Markt erhältlich. Infolge der Standortverhältnisse besteht die Auswahl zwischen Anlagen mit horizontaler und vertikaler Achse, sowie mit festen oder verstellbaren Leit- und Laufschaufeln. Vertikalachsige Anlagen (Schachtturbinen) sind am weitesten verbreitet. Zur Nutzung geringer Fallhöhen haben sich zudem horizontale Anlagen (Rohrturbinen) am Markt etabliert. Turbinen mit festen Laufschaufeln (Propellerturbinen) eignen sich für konstante Durchflüsse und Volumenströme. Verstellbare Laufschaufeln können entsprechend dem Wasserangebot reguliert werden und eignen sich für schwankende Abflussmengen. Ausführungen mit verstellbarem Lauf- und Leitapparat stellen die komplizierteste Bauform dar. Diese Anlagen sind für stark schwankende Abflussmengen sehr gut geeignet. (Chapallaz et al., 1995, S. 82)

Durch die Strömung des Wassers wird das Turbinenlaufrad in Bewegung gesetzt. Diese Drehbewegung wird über eine Antriebswelle und gegebenenfalls ein Getriebe an den Generator übertragen, welcher elektrische Energie erzeugt. Der Energieumsatz in Kaplan-Turbinen erfolgt hauptsächlich durch den genutzten Volumenstrom. Im Gegensatz zur Pelton-Turbine erfolgt keine große Umlenkung der Wasserströmung, demzufolge hat die Geschwindigkeitsänderung in der Turbinenstufe keine großen Auswirkungen auf die erzeugte Leistung. (Watter, 2011, S. 89)

Die axial angeströmte Turbineneinheit besteht hauptsächlich aus Laufrad, Leitapparat, und Generator. Die in Abbildung 3.28 dargestellte Turbine entspricht der herkömmlichen Ausführungsform mit vertikaler Antriebswelle (Schacht- bzw. Spiralturbine).

**Laufrad:** Der wichtigste Bestandteil der Turbine ist das Laufrad. Dieses ähnelt einer Schiffsschraube und ist mit drei bis acht festen oder verstellbaren Schaufeln bestückt. Durch die Verstellung der Schaufeln erfolgt eine Regulierung des Durchflusses, womit die Turbinenleistung optimal an das Wasserangebot angepasst werden kann. (Watter, 2011, S. 88f)

**Leitapparat:** Der Leitapparat besteht ebenfalls aus festen oder verstellbaren Schaufeln, welche die Wassermassen umlenken und parallel zur Welle auf die Schaufeln leiten. Durch diese Umlenkung erfolgt die optimale Anströmung der Turbinenschaufeln.

**Generator:** Laut Quaschnig (2011, S. 309) werden in Wasserkraftanlagen hauptsächlich Synchrongeneratoren eingesetzt. Diese haben in einem breiten Leistungsbereich einen konstanten Wirkungsgrad, welcher erst im extremen Teillastbereich merklich absinkt.

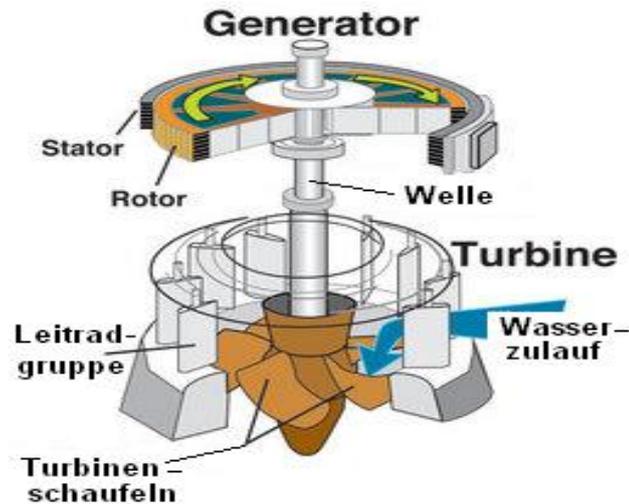


Abbildung 3.28.: Kaplan-Turbine (NHT-Engineering, 2008, S. 1)

Für den Betrieb einer Kaplan-Turbine sind außerdem bauliche Komponenten nötig. Ein Rechen samt -reinigungsanlage schützt die Turbine vor Schwemmgut und Verschmutzungen. Für die Aufstauung des Wassers sind Wehre bzw. Staudämme erforderlich. Vertikal ausgeführte Kaplan-Turbinen besitzen typischerweise ein spiralförmiges Einlaufbauwerk. Zur Wirkungsgradoptimierung werden Saugrohre als Auslaufbauwerke verwendet. Neben den beschriebenen Komponenten sind Überwachungs-, Steuerungs- und Regelungsanlagen erforderlich. Da Kaplan-Turbinen hauptsächlich in Flussläufen installiert werden, ist im Sinne des ökologischen Wasserbaus eine Fischaufstiegshilfe nötig.

#### 3.3.4.2. Stand der Technik

Kaplan-Turbinen sind seit langer Zeit am Markt verfügbar und gelten als ausgereifte Technologie. Das Anwendungsfeld im Bereich der Kleinwasserkraft erstreckt sich über Fallhöhen von  $H = 1 - 25$  m und Wasserdurchflüssen von  $Q = 0,5 - 15$  m<sup>3</sup>/s. Demzufolge erzeugen die Anlagen Leistungen von  $P = 5 - 3.000$  kW. (Simader et al., 2008, S. 36)

Die Anlagen erreichen Wirkungsgrade von 85 - 95 % (Watter, 2011, S. 89). In Verbindung mit einem Generator (Wirkungsgrad 90 - 95 %) ergeben sich Anlagenwirkungsgrade von 80 - 85 %. Laut Informationen der Firma WWS-Wasserkraft GmbH & Co KG sinkt der Wirkungsgrad selbst bei 50 % Teillast nicht unter 80 %.

In Analogie zu den Pelton-Turbinen ist für die Wartung und Instandhaltung mit einem durchschnittlichen Aufwand von 3,25 % der Investitionssumme pro Jahr zu rechnen. Zudem werden als rechnerische Anlagenutzungsdauer 25 Jahre angenommen. (Simader et al., 2008, S. 48f)

### 3.3.4.3. Vor- und Nachteile

Die Energieerzeugung durch Kaplan-Turbinen ist weitestgehend emissionsfrei und nachhaltig. Das gute Anpassungsvermögen an stark schwankende Abflüsse bringt vor allem im untersuchten Leistungsbereich einen großen Mehrwert. Daraus resultiert ein sehr gutes Teillastverhalten mit konstant hohem Wirkungsgrad.

Der größte Nachteil der Technologie ist die Kavitationsanfälligkeit. Dadurch können Wirkungsgradminderungen und große Schäden an den Anlagen entstehen. Kaplan-Turbinen besitzen zudem eine aufwendige Konstruktion mit vielen beweglichen Bauteilen, die entsprechende Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten erfordern. Die Errichtung einer Anlage ist mit aufwendigen Genehmigungsverfahren und umfangreichen baulichen Maßnahmen verbunden.

### 3.3.4.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Im Allgemeinen werden Turbinenwirkungsgrade von 85 - 95 % erreicht. Mit Generatorwirkungsgraden von 90 - 95 % sowie einem sehr guten Teillastverhalten ist mit Gesamtwirkungsgraden von 80 - 85 % zu rechnen (Watter, 2011, S. 89). Der theoretisch mögliche Anlagenwirkungsgrad liegt bei 100 %. Demnach ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,8 - 0,85. *Bewertungsstufe 4*

**Nachhaltigkeit:** Während der Betriebsphase entstehen keine umweltrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Bewertungsstufe 4*

**Reifegrad:** Kaplan-Turbinen sind wie die Pelton-Turbinen seit Jahren am Markt etabliert und allgemein anerkannt. Die Technologie wird von vielen Herstellern beherrscht und besitzt somit ein geringes Wettbewerbspotential. Zudem bestehen nur geringe Verbesserungsmöglichkeiten. Kaplan-Turbinen stellen eine Basistechnologie dar. (Pehnt et al., 2011, S. 128) *Bewertungsstufe 4*

**Wirtschaftlichkeit:** Resultierend aus der wirtschaftlichen Anlagenbewertung ergeben sich mittlere Stromgestehungskosten von 11 - 36 ct/kWh. Aufgrund der Anlagenleistung wird als Vergleichswert der durchschnittliche Strombezugspreis für (Klein)Gewerbekunden von 19,71 ct/kWh herangezogen. Damit ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,55 bis 1,41. *Bewertungsstufe 2-4*

**Verfügbarkeit:** Im Zuge der Marktanalyse konnten elf Hersteller erhoben werden. Für eine Projektrealisierung stehen genügend Anbieter bereit, die vergleichbare Angebote einreichen können. Da die Anlagen nicht auf Lager, sondern je nach Bestellung produziert werden, ist mit Lieferzeiten von zwölf Monaten zu rechnen. Daraus abgeleitet ergibt sich eine durchschnittliche Bewertung. *Bewertungsstufe 2*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wurde einheitlich für alle Technologien der Kleinwasserkraft vorgenommen. Da die soziale Akzeptanz von

Wasserkraftanlagen in Oberschmidt (2010, S. 172f) nicht bewertet wurde, wird die durchschnittliche Bewertung für erneuerbare Erzeugungsanlagen als Basis herangezogen (Stufe 3). Anschließend wurde die Bewertung durch das Projektteam um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend sind die schwierigen und aufwendigen Genehmigungsverfahren sowie der Betriebsaufwand. *Bewertungsstufe 2*

### 3.3.4.5. Technologielieferanten

Im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse konnten elf Hersteller von Kaplan-Turbinen im untersuchten Leistungsbereich identifiziert werden. Als Resultat der anschließenden Lieferantenbewertung gelten die in Abbildung 3.29 aufgelisteten Hersteller als vielversprechend. Analog dem Vorgehen der Pelton-Turbinen, wurden diese Lieferanten kontak-

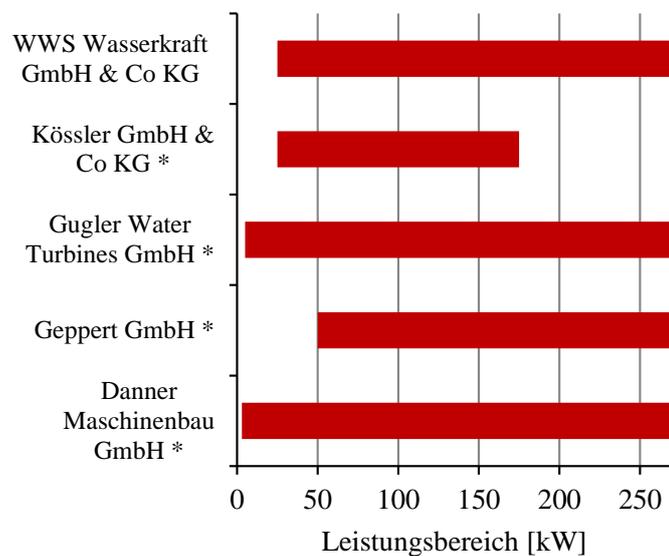


Abbildung 3.29.: Lieferanten Kaplan-Turbine

tiert und um eine Angebotslegung gebeten. Die Kontaktaufnahme war in den meisten Fällen nicht erfolgreich. Obwohl alle aufgelisteten Hersteller passende Anlagen in ihrem jeweiligen Produktangebot führen, konnten bzw. wollten viele Hersteller nicht an dieser Untersuchung teilnehmen. Mit einem Stern (\*) gekennzeichnete Hersteller haben kein Angebot zurückgesendet. WWS-Wasserkraft GmbH & Co KG reichte zwei Angebote für Kaplan Schachtturbinen (17 kW und 62 kW) mit senkrechter Achslage, verstellbaren Lauf- und Leitapparat und vierflügeligen Laufrad ein.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Mehrzahl der Hersteller lediglich für reale Projekte mit entsprechenden Informationen (Zeichnungen, Skizzen, hydrologischen Gutachten, Bodenbeschaffenheit, etc.) zur Angebotslegung bereit ist.

3.3.4.6. Steckbrief Kaplan-Turbine

### Kaplan-Turbine

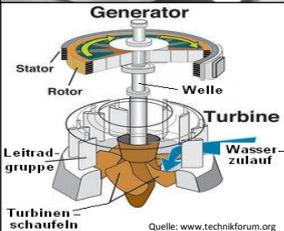
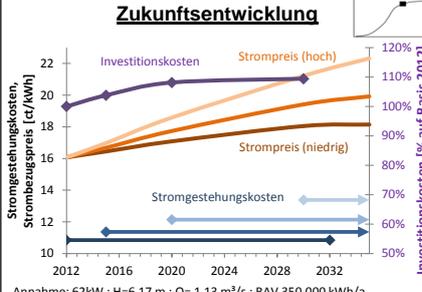
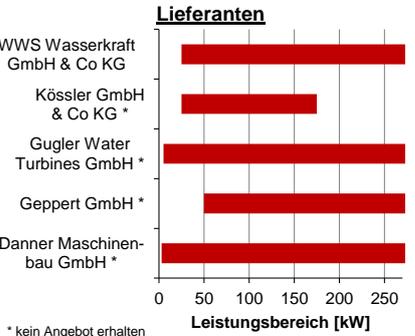
 <p style="font-size: small; text-align: center;">Quelle: www.koessler.com</p>	<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wasser versetzt schiffsschraubenähnliches Laufrad in Bewegung, dadurch erzeugt Generator elektrische Energie</li> <li>- Komponenten: Gehäuse, Leitapparat, Laufrad, Saugrohr, Generator, Rechen, Einlaufbauwerk</li> <li>- Regelungsmöglichkeiten durch Leit- und Laufschaufelverstellung</li> <li>- vertikale (Schachtturbine) oder horizontale (Rohrturbine) Ausführung</li> </ul>		
 <p style="font-size: small; text-align: center;">Quelle: www.technikforum.org</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"> <p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachhaltigkeit</li> <li>- große Schluckfähigkeit</li> <li>- Anpassungsfähigkeit</li> <li>- gutes Teillastverhalten</li> </ul> </td> <td style="width: 50%;"> <p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- aufwendige Konstruktion</li> <li>- Kavitationsgefahr</li> <li>- aufwendige bauliche Maßnahmen</li> </ul> </td> </tr> </table>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachhaltigkeit</li> <li>- große Schluckfähigkeit</li> <li>- Anpassungsfähigkeit</li> <li>- gutes Teillastverhalten</li> </ul>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- aufwendige Konstruktion</li> <li>- Kavitationsgefahr</li> <li>- aufwendige bauliche Maßnahmen</li> </ul>
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachhaltigkeit</li> <li>- große Schluckfähigkeit</li> <li>- Anpassungsfähigkeit</li> <li>- gutes Teillastverhalten</li> </ul>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- aufwendige Konstruktion</li> <li>- Kavitationsgefahr</li> <li>- aufwendige bauliche Maßnahmen</li> </ul>		
<p><b>Anwendungs- / Einsatzgebiet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fallhöhe: 1 - 25 m</li> <li>- Durchfluss: 0,5 - 15 m<sup>3</sup>/s</li> <li>- Leistung: 5 - 3.000 kW</li> <li>- Einsatz: vorwiegend im Niederdruckbereich, bei großen Wassermengen und bei schwankenden Abflüssen</li> </ul>			
<p style="text-align: center;"><b>Zukunftsentwicklung</b></p>  <p style="font-size: x-small;">Annahme: 62kW ; H=6,17 m ; Q= 1,13 m<sup>3</sup>/s ; RAV 350.000 kWh/a</p>	<p style="text-align: center;"><b>Technologie-Markt-Bewertung</b></p> 		
<p><b>mittlere Stromgestehungskosten:</b></p> <p style="text-align: center;">11 ct/kWh (62kW) - 36 ct/kWh (17kW)</p>			
<p><b>Forschungsaktivitäten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Strömungsoptimierung durch CFD Analyse sowie Geometrieanpassung und Bauteiloptimierung</li> <li>- Verringerung von Verschleiß und Kavitation</li> </ul>			
<p><b>Quellen / Informationen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- www.koessler.com</li> <li>- Energieinstitut Vorarlberg Leitfaden Kleinwasserkraft</li> <li>- Umweltbundesamt (2009): "Role and Potential of Renewable Energy"</li> </ul>			
<p><b>Umfeld:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Genehmigung:</b> Wasserrechtsgesetz, Stmk. Naturschutzgesetz, Stmk. EIWOG</li> <li>- <b>Investitionsförderung:</b> durch OeMAG 1500 €/kW bis max. 30% der Gesamtinvestition (Anlagen &lt; 500 kW)</li> <li>- <b>Einspeisetarife:</b> Tarif richtet sich nach erzeugter Energiemenge: 10,55 ct/kWh für die ersten 500.000 kWh/a (ÖSET-VO 2012)</li> </ul>			
<p style="text-align: center;"><b>Lieferanten</b></p>  <p style="text-align: center;">* kein Angebot erhalten</p>			

Abbildung 3.30.: Steckbrief Kaplan-Turbine

### 3.3.5. Durchströmturbine

Die Durchström- oder Ossberger-Turbine wurde in den zwanziger Jahren vom Ingenieur Fritz Ossberger entwickelt. Sie eignet sich hauptsächlich für den kleinen Leistungsbe-  
reich mit geringen Fallhöhen und stark schwankenden Abflussmengen. Die Turbine ist  
zudem in verunreinigten Gewässern einsetzbar (z.B. Abwasser). (Ossberger GmbH +  
Co, 1999, S. 2ff)

#### 3.3.5.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Wie der Name bereits andeutet, fließt das Arbeitsmedium bei dieser Turbine quer durch  
den Läufer. Das walzenförmige Laufrad wird zunächst von außen nach innen und danach  
ein zweites Mal von innen nach außen durchströmt. Der große Vorteil dieses Prinzips ist,  
dass Verunreinigungen (Laub, Gras, etc.) sofort wieder ausgewaschen werden. (Kalide  
& Sigloch, 2010, S. 292)

Ossberger-Turbinen sind radial beaufschlagte Freistrahlturbinen mit einer geringen  
spezifischen Drehzahl. Durch einen mehrzelligen Aufbau können sie optimal an stark  
schwankende Abflüsse angepasst werden. Mehrzellig bedeutet in diesem Zusammen-  
hang, dass in Abhängigkeit des Wasserangebotes ein bestimmter Teil des Laufrades  
beaufschlagt wird. Das entspricht im Grunde einer Kopplung von zwei Teilturbinen in  
einem Gehäuse. Die Anlage besteht hauptsächlich aus Laufrad, Leitschaufeln, Genera-  
tor und Saugrohr sowie wasserbaulichen Komponenten (Abbildung 3.31). (Klebsattel  
et al., 2000, S. 4f)

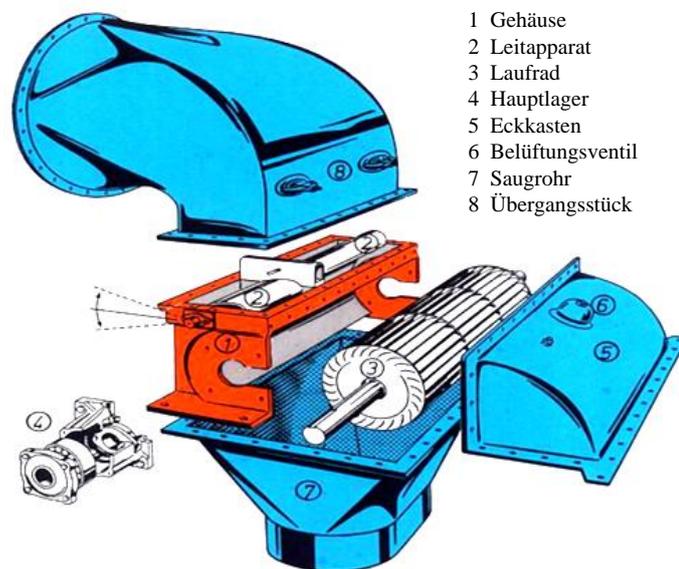


Abbildung 3.31.: Ossberger-Turbine (Ossberger GmbH + Co, 2003b, S. 1)

**Lauftrad:** Das walzen- bzw. trommelförmige Lauftrad besteht aus nicht verstellbaren Schaufeln, die durch Zwischen- und Endscheiben miteinander verschweißt sind. Somit besitzt der Läufer eine hohe Festigkeit und ist schwingungsunanfällig. Der Läufer ist in der Regel zweizellig aufgebaut, wodurch eine Teilbeaufschlagung von  $1/3$ ,  $2/3$  und  $3/3$  stattfinden kann.

**Leitschaufeln:** Die Leitschaufeln sind entsprechend dem Lauftrad unterteilt und sorgen für einen stoßfreien Wassereintritt in die Turbine. Dadurch kann auch im Teillastbereich ein flacher Wirkungsgradverlauf realisiert werden.

**Generator:** Die Verwendung von Synchron- und Asynchrongeneratoren ist generell möglich. In der Praxis hat sich in Analogie zur Kaplan-Turbine der Synchrongenerator durchgesetzt, der dem Asynchrongenerator technisch und wirtschaftlich überlegen ist. (Simader et al., 2008, S. 38)

**Saugrohr:** Durchströmturbinen benötigen einen Freihang und sind demzufolge über dem Unterwasserspiegel angeordnet. Die Nachschaltung eines Saugrohres begünstigt die Energieumsetzung, weil dadurch auch die Saughöhe genutzt wird. (Klebsattel et al., 2000, S. 4)

Im Betrieb saugt die strömende Flüssigkeit die Luft aus dem Gehäuse und es entsteht ein Unterdruck. Das Gehäuse ist mit einem Belüftungsventil zur Regulierung der Wasserspiegelhöhe im Saugrohr versehen. Für den Betrieb sind zudem bauliche Komponenten nötig. Ein Rechen filtert grobes Schwemmgut aus dem Gewässer und schützt die Turbine. Für die Aufstauung des Wassers sind Wehre bzw. Staudämme erforderlich. Das Einlaufbauwerk bzw. die Triebwasserleitung ist mit Zulaufklappen und Schließgewichten für die Teilbeaufschlagung versehen. Neben den beschriebenen Komponenten sind Überwachungs-, Steuerungs- und Regelungsanlagen erforderlich. (Klebsattel et al., 2000, S. 4ff)

### 3.3.5.2. Stand der Technik

Durchströmturbinen sind seit langer Zeit am Markt verfügbar und gelten als ausgereifte Technologie. Das Anwendungsfeld erstreckt sich über Fallhöhen von  $H = 2 - 50$  m und Wasserdurchflüssen von  $Q = 0,02 - 7$  m<sup>3</sup>/s. Demzufolge erzeugen die Anlagen Leistungen von  $P = 10 - 500$  kW. (Simader et al., 2008, S. 36)

Die Wirkungsgradkurve einer Durchströmturbine hat einen konstanten Verlauf bei ca. 85 %. Aufgrund der optimalen Anpassung an das Wasserangebot werden auch im extremen Teillastbereich (15 % der Ausbauwassermenge) noch Wirkungsgrade über 80 % erreicht. (Ossberger GmbH + Co, 2003a, S. 1)

Laut Ossberger GmbH + Co (1999, S. 2ff) erreichen Durchströmturbinen Einsatzzeiten von 30 Jahren und länger. Darüber hinaus sind die Turbinen äußerst wartungsarm und -freundlich.

### 3.3.5.3. Vor- und Nachteile

Der größte Nutzen der Technologie ist der konstant hohe Wirkungsgrad im Teillastbereich. Somit können vor allem stark schwankende Abflussmengen wirtschaftlich und effizient genutzt werden. Des Weiteren besteht keine Kavitations- und Verschmutzungsgefahr, was zu einem geringen Wartungsaufwand sowie einer hohen Anlagenlebensdauer führt. Die nachhaltige Produktion von elektrischer Energie ist ebenfalls ein Vorteil der Technologie.

Nachteilig ist der niedrige Spitzenlastwirkungsgrad zu bewerten. Kaplan- und Pelton-Turbinen sind im Betrieb mit der Ausbauwassermenge effizienter. Die Errichtung einer Anlage ist mit aufwendigen Genehmigungsverfahren und umfangreichen baulichen Maßnahmen verbunden.

### 3.3.5.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Die Anlagen erreichen Gesamtwirkungsgrade von 80 - 85 % (Ossberger GmbH + Co, 2003a, S. 1). Der theoretisch mögliche Anlagenwirkungsgrad liegt bei 100 %. Demnach ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,8 - 0,85. *Bewertungsstufe 4*

**Nachhaltigkeit:** Während der Betriebsphase entstehen keine umweltrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Bewertungsstufe 4*

**Reifegrad:** Durchströmturbinen sind seit Jahren am Markt etabliert sowie allgemein erprobt und anerkannt. Die Technologie wird von den Herstellern beherrscht und besitzt somit geringes Wettbewerbspotential. Zudem bestehen nur geringe Verbesserungsmöglichkeiten. Demzufolge gelten Durchströmturbinen als Basistechnologie. (Pehnt et al., 2011, S. 128) *Bewertungsstufe 4*

**Wirtschaftlichkeit:** Resultierend aus der wirtschaftlichen Anlagenbewertung ergeben sich mittlere Stromgestehungskosten von 9 - 33 ct/kWh. Aufgrund der Anlagenleistung wird als Vergleichswert der durchschnittliche Strombezugspreis für (Klein)Gewerbekunden von 19,71 ct/kWh herangezogen. Damit ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,59 bis 2,19. *Bewertungsstufe 2-4*

**Verfügbarkeit:** Im Laufe der Marktanalyse konnten sechs Hersteller erhoben werden. Für eine Projektrealisierung stehen genügend Anbieter bereit, die vergleichbare Angebote einreichen können. Da die Anlagen nicht auf Lager, sondern je nach Bestellung produziert werden, ist mit Lieferzeiten von neun Monaten zu rechnen. Daraus abgeleitet ergibt sich eine durchschnittliche Bewertung. *Bewertungsstufe 2*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wurde einheitlich für alle Technologien der Kleinwasserkraft vorgenommen. Da die soziale Akzeptanz von Wasserkraftanlagen in Oberschmidt (2010, S. 172f) nicht bewertet wurde, wird die

durchschnittliche Bewertung für erneuerbare Erzeugungsanlagen als Basis herangezogen (Stufe 3). Anschließend wurde die Bewertung durch das Projektteam um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend sind die schwierigen und aufwendigen Genehmigungsverfahren sowie der Betriebsaufwand. *Bewertungsstufe 2*

### 3.3.5.5. Technologielieferanten

Im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse konnten sechs Hersteller von Durchströmturbinen im untersuchten Leistungsbereich identifiziert werden. Als Resultat der anschließenden Lieferantenbewertung gelten die in Abbildung 3.29 aufgelisteten Hersteller als aussichtsreich. Analog dem Vorgehen der Pelton-Turbinen, wurden diese Lieferanten

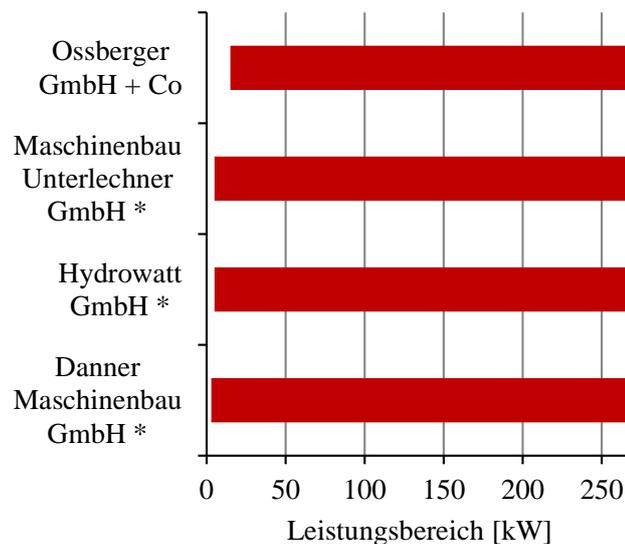


Abbildung 3.32.: Lieferanten Durchströmturbine

kontaktiert und zu einer Angebotslegung eingeladen. Die Kontaktaufnahme war in den meisten Fällen nicht erfolgreich. Obwohl alle aufgelisteten Hersteller passende Anlagen in ihrem jeweiligen Produktangebot führen, konnten bzw. wollten viele Hersteller nicht an dieser Untersuchung teilnehmen. Mit Ausnahme der Firma Ossberger GmbH + Co blieb die gestellte Anfrage unbeantwortet. Ossberger reichte zwei Angebote für Durchströmturbinen (14 kW und 53 kW) ein. Mit einem Stern (\*) gekennzeichnete Hersteller haben kein Angebot zurückgesendet.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Mehrzahl der Hersteller lediglich für reale Projekte mit entsprechenden Informationen (Zeichnungen, Skizzen, hydrologischen Gutachten, Bodenbeschaffenheit, etc.) zur Angebotslegung bereit ist.

3.3.5.6. Steckbrief Durchströmturbine

### Durchströmturbine

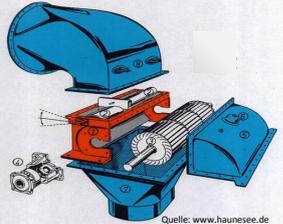
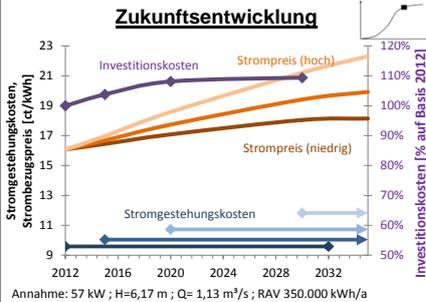
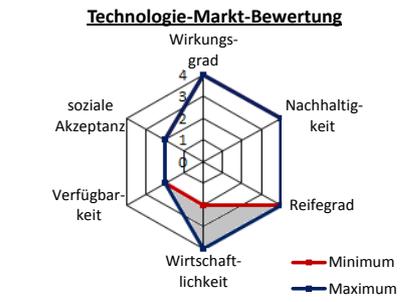
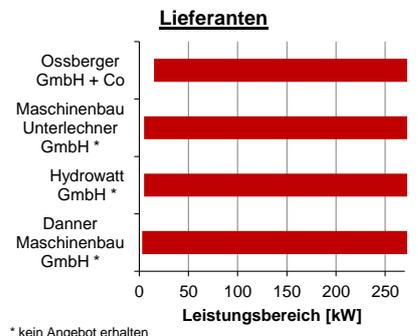
 <p style="font-size: small; text-align: center;">Quelle: www.energyprof.com</p>	<p><b>Kurzbeschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- walzenförmiger Läufer wird von Wasser quer durchströmt und versetzt diesen in Bewegung, Generator erzeugt elektrische Energie</li> <li>- Komponenten: Leitapparat, Gehäuse, Laufrad, Saugrohr, Generator</li> <li>- Läufer wird doppelt durchströmt: Selbstreinigungseffekt</li> <li>- Ausführungen mit vertikaler oder horizontaler Anströmung</li> <li>- Regelbarkeit durch mehrzelligen Aufbau (Beaufschlagung: 1/3; 2/3; 3/3)</li> </ul>
 <p style="font-size: small; text-align: center;">Quelle: www.haunese.de</p>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachhaltigkeit</li> <li>- sehr gutes Teillastverhalten</li> <li>- keine Verschmutzungsgefahr</li> <li>- keine Kavitation</li> <li>- geringe Baukosten</li> </ul> <p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- niedrigerer Spitzenwirkungsgrad als Kaplan- und Pelton-Turbine</li> </ul>
<p><b>Anwendungs- / Einsatzgebiet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fallhöhe: 2 - 50 m</li> <li>- Durchfluss: 0,02 - 7 m³/s</li> <li>- Leistung: 10 - 500 kW</li> <li>- Ertrag stark standortabhängig</li> <li>- besonders effizient bei stark schwankenden Abflussmengen</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>Zukunftsentwicklung</b></p>  <p style="font-size: x-small;">Annahme: 57 kW ; H=6,17 m ; Q= 1,13 m³/s ; RAV 350.000 kWh/a</p>	<p style="text-align: center;"><b>Technologie-Markt-Bewertung</b></p>  <p style="font-size: x-small;">— Minimum (red line) — Maximum (blue line)</p>
<p><b>mittlere Stromgestehungskosten:</b> 9,5 ct/kWh (60 kW) - 33,00 ct/kWh (15 kW)</p>	
<p><b>Forschungsaktivitäten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- permanente Weiterentwicklung</li> <li>- strömungstechnische Optimierung und verbesserte Bauteilauslegung</li> </ul>	
<p><b>Quellen / Informationen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- www.ossberger.de</li> <li>- www.maschinenbau-unterlercher.at</li> <li>- www.kleinwasserkraft.at</li> <li>- Energieinstitut Vorarlberg: Leitfaden Kleinwasserkraft</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>Lieferanten</b></p>  <p style="font-size: x-small; text-align: center;">* kein Angebot erhalten</p>	
<p><b>Umfeld:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Genehmigung:</b> Wasserrechtsgesetz, Stmk. Naturschutzgesetz und Stmk. EIWOG</li> <li>- <b>Investitionsförderung:</b> durch OeMAG 1500 €/kW bis max. 30% der Gesamtinvestition (Anlagen &lt; 500 kW)</li> <li>- <b>Einspeisetarife:</b> Tarif richtet sich nach erzeugter Energiemenge: 10,55 ct/kWh für die ersten 500.000 kWh/a (ÖSET-VO 2012)</li> </ul>	

Abbildung 3.33.: Steckbrief Durchströmturbine

### 3.3.6. Wasserkraftschnecke

Die Idee der Wasserkraftschnecke stammt aus der griechischen Antike. Damals wurde das Prinzip der archimedischen Schraube genutzt, um Wasser nach oben zu befördern. Heute wenden Wasserkraftschnecken die Umkehrung dieses Prinzips an und erzeugen elektrische Energie. Sie erreichen Leistungen bis zu 500 kW und werden vorwiegend als Ersatz für Wasserräder, im Klarwasserlauf von Kläranlagen als auch zur Nutzung von Restwassermengen eingesetzt. (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 2)

#### 3.3.6.1. Anlagenkomponenten und Funktionsweise

Die von Archimedes entwickelte Schraubenpumpe wird durch die Umkehrung des Arbeitsprinzips zu einer Kraftmaschine. Das Wassergewicht bzw. die Schwerkraft setzt die Schnecke in Bewegung und wandelt die potentielle Energie des Wassers in mechanische Energie um. In weiterer Folge erzeugt ein Generator aus dieser mechanischen Energie elektrischen Strom. Wasserkraftschnecken bestehen hauptsächlich aus einer Schnecke, einer Antriebseinheit und einem Stahltrog (Abbildung 3.34). (Ritz-Atro, 2005, S. 5ff)

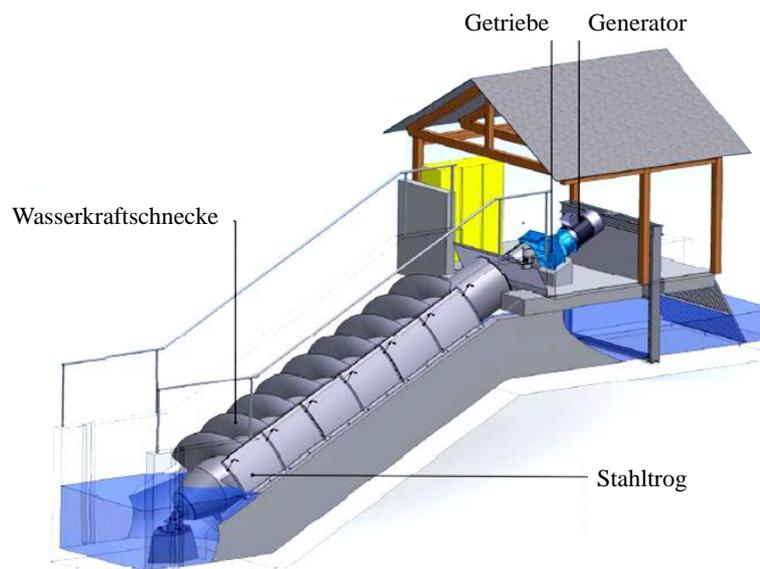


Abbildung 3.34.: Wasserkraftschnecke (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 3)

**Schnecke:** Die Schnecke ähnelt in erster Linie einer Schraube mit einem breiten Gewinde. Durch das Gefälle strömt Wasser entlang der schraubenförmigen Flügel und versetzt dabei die Rotorwelle in Drehung. Die Schnecken verfügen über zwei bis vier Flügel und können Durchmesser von bis zu 5 m erreichen. Sie werden im Ober- und

Unterwasser gelagert und sind von einem Stahltrog umgeben. (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 3)

**Stahltrog:** Der Stahltrog hat die Aufgabe der Wasserführung und ist gleichzeitig das Gehäuse der Kraftanlage. In der Praxis werden freitragende oder hintergossene Tröge sowie Kompaktanlagen, in denen der Trog als komplettes Rohr (Rohrschnecke) ausgeführt ist, verwendet. (Rehart GmbH, 2011, S.10)

**Antriebseinheit:** Die Antriebseinheit besteht in der Regel aus Generator und Getriebe. Wasserkraftschnecken werden im Niederdruckbereich eingesetzt und erreichen niedrige Drehzahlen zwischen 20 und 80 Umdrehungen pro Minute. Aus diesem Grund ist ein Getriebe nötig, welches die Rotordrehzahl auf die erforderliche Generatordrehzahl übersetzt. Entsprechend den gewonnenen Informationen der Beschaffungsmarkanalyse werden für die Stromerzeugung überwiegend Asynchrongeneratoren verwendet. (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 4)

Für den Betrieb benötigen Wasserkraftschnecken einen Grobrechen, der die Rotorwelle vor großem Treibgut schützt. Zudem sind Stauanlagen sowie Ein- und Auslaufbauwerke für die Wasserführung nötig. Trotz der Fischverträglichkeit benötigen die Anlagen eine Fischaufstiegshilfe, um eine Fischwanderung vom Unter- ins Oberwasser zu ermöglichen. Neben den beschriebenen Komponenten sind Überwachungs-, Steuerungs- und Regelungsanlagen erforderlich. (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 10ff)

Im Allgemeinen ist anzumerken, dass in der Literatur sehr wenige Daten und Fakten bzgl. der Wasserkraftschnecken verfügbar sind. Aus diesem Grund stützen sich die gefundenen Informationen überwiegend auf die Angaben der Hersteller.

### 3.3.6.2. Stand der Technik

Wasserkraftschnecken sind seit dem Jahr 2000 am Markt verfügbar und gelten als ausgereifte Technologie. Das Anwendungsfeld erstreckt sich über Fallhöhen von  $H = 1 - 10$  m und Wasserdurchflüssen von  $Q = 0,25 - 10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Demzufolge erzeugen die Anlagen Leistungen von  $P = 1 - 500 \text{ kW}$ . (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 2)

Der Hersteller Andritz Atro wirbt mit einem maximalen Schneckenwirkungsgrad von 92 %. Mit neuartigen Wasserkraftschnecken werden über nahezu den gesamten Teillastbereich (20 - 100 % der Ausbauwassermenge) Anlagenwirkungsgrade zwischen 70 und 80 % erreicht. Der Wirkungsgrad wird durch Spaltverluste zwischen Rotorwelle und Trog sowie durch Reibungsverluste begrenzt. (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 2ff)

### 3.3.6.3. Vor- und Nachteile

Große Vorteile der Technologie sind die nachhaltige Stromproduktion und die ökologische Verträglichkeit, da Fische, Schwemnteilchen und Geschiebe das Kraftwerk problemlos passieren können. Durch ein gutes Teillastverhalten eignen sich die Anlagen für stark schwankende Abflüsse. Wasserkraftschnecken können einfach in den Flusslauf integriert werden und benötigen keinen aufwendigen Tiefbau. Zudem besitzen die Anlagen eine einfache, robuste und zuverlässige Konstruktion, die äußerst wartungsarm ist

und keinerlei Reinigung bedarf. Positiv ist außerdem, dass sich die Antriebseinheit über der Wasseroberfläche befindet und für eventuelle Wartungsarbeiten frei zugänglich ist. (Ritz-Atro, 2005, S. 9ff)

Nachteilig ist der niedrige Spitzenlastwirkungsgrad im Vergleich zu Kaplan- und Francis-Turbinen zu bewerten. Zudem senken Spaltverluste zwischen Trog und Schnecke den Ertrag.

#### 3.3.6.4. Technologie-Markt-Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Technologie analog dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen bewertet. Zur Beurteilung werden die definierten technologie- und marktorientierten Kriterien verwendet.

**Wirkungsgrad:** Die Anlagen erreichen Wirkungsgrade von 70 - 80 % (Andritz Atro GmbH, 2012, S. 2ff). Der theoretisch mögliche Anlagenwirkungsgrad liegt bei 100 %. Demnach ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,7 - 0,8. *Bewertungsstufe 3*

**Nachhaltigkeit:** Während der Betriebsphase entstehen keine umweltrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Bewertungsstufe 4*

**Reifegrad:** Wasserkraftschnecken sind am Markt etabliert und allgemein anerkannt. Die Technologie wird von den Herstellern beherrscht und besitzt somit ein geringes Wettbewerbspotential. Zudem bestehen nur geringe Verbesserungsmöglichkeiten. In Anbetracht dessen gelten die Schnecken als Basistechnologie. *Bewertungsstufe 4*

**Wirtschaftlichkeit:** Als Resultat der wirtschaftlichen Anlagenbewertung ergeben sich mittlere Stromgestehungskosten von 14 - 36 ct/kWh. Aufgrund der Anlagenleistung wird als Vergleichswert der durchschnittliche Strombezugspreis für (Klein)Gewerbekunden von 19,71 ct/kWh herangezogen. Damit ergibt sich für die Bewertung ein Verhältnis von 0,55 bis 1,41. *Bewertungsstufe 2-4*

**Verfügbarkeit:** Im Zuge der Marktanalyse konnten vier Hersteller bzw. Lieferanten identifiziert werden. Für eine Projektrealisierung stehen demzufolge einige Anbieter bereit, die vergleichbare Angebote einreichen können. Zudem betragen die Lieferzeiten zwischen drei und sechs Monaten. In Summe ergibt sich eine gute Marktverfügbarkeit. *Bewertungsstufe 3*

**Soziale Akzeptanz:** Die Bewertung der sozialen Akzeptanz wurde einheitlich für alle Technologien der Kleinwasserkraft vorgenommen. Da die soziale Akzeptanz von Wasserkraftanlagen in Oberschmidt (2010, S. 172f) nicht bewertet wurde, wird die durchschnittliche Bewertung für erneuerbare Erzeugungsanlagen als Basis herangezogen (Stufe 3). Anschließend wurde die Bewertung durch das Projektteam um eine Stufe nach unten korrigiert. Ausschlaggebend sind die schwierigen und aufwendigen Genehmigungsverfahren sowie der Betriebsaufwand. *Bewertungsstufe 2*

#### 3.3.6.5. Technologielieferanten

Im Rahmen der Beschaffungsmarktanalyse konnten vier Hersteller von Wasserkraftschnecken identifiziert werden. Jeder Hersteller wurde in der Lieferantenbewertung als

A-Lieferant eingestuft und ist in Abbildung 3.29 aufgelistet. Analog dem Vorgehen der

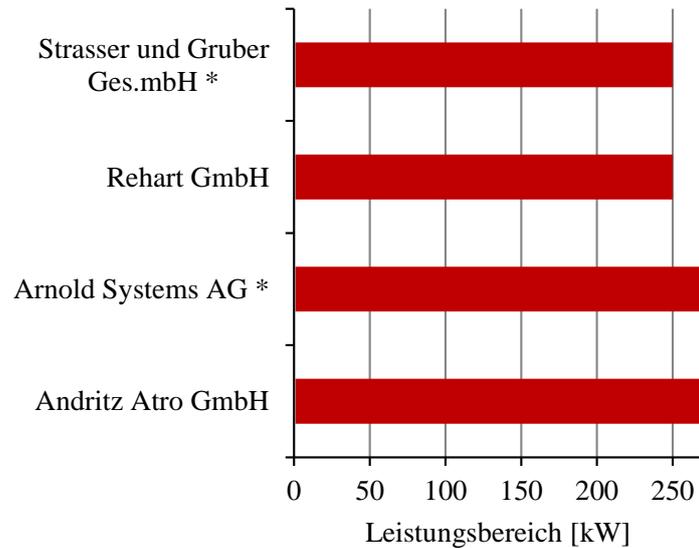


Abbildung 3.35.: Lieferanten Wasserkraftschnecke

Pelton-Turbinen, wurden diese Lieferanten kontaktiert und um eine Angebotslegung gebeten. Andritz Atro und Rehart haben jeweils zwei Angebote für Wasserkraftschnecken eingereicht. Die angebotenen Anlagen haben Leistungen von ca. 20 - 60 kW. Mit einem Stern (\*) gekennzeichnete Hersteller haben kein Angebot abgegeben.

3.3.6.6. Steckbrief Wasserkraftschnecke

### Wasserkraftschnecke



Quelle: www.60399.com

**Kurzbeschreibung:**

- Wasserkraftschnecke wird durch das Gewicht des Wassers in Drehung versetzt, dadurch erzeugt ein Generator elektrische Energie
- Prinzip: umgekehrte archimedische Schraube
- Hauptkomponenten: Schnecke, Generator, Getriebe, Stahltrog
- Schnecken sind höhenverstellbar für Anpassung an Wasserstände

**Vorteile:**

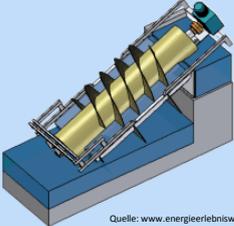
- Nachhaltigkeit
- gutes Teillastverhalten
- Fischverträglichkeit
- geringe Baukosten

**Nachteile:**

- Vereisungsgefahr und dadurch entstehende Lärmemissionen
- Spaltverluste zwischen Trog und Läufer

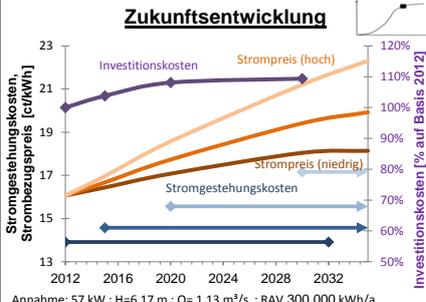
**Anwendungs- / Einsatzgebiet:**

- Fallhöhe: 1 - 10 m
- Durchfluss: 0,25 - 10 m³/s
- Leistung: 1 - 500 kW
- Einsatz: Ersatz für Wasserräder, Restwasserschnecke, in Kläranlagen und Bewässerungswehren



Quelle: www.energieerlebnisweg.de

**Zukunftsentwicklung**



Annahme: 57 kW ; H=6,17 m ; Q= 1,13 m³/s ; RAV 300.000 kWh/a

**Technologie-Markt-Bewertung**



**mittlere Stromgestehungskosten:**  
 14 ct/kWh (57 kW) -  
 36 ct/kWh (15 kW)

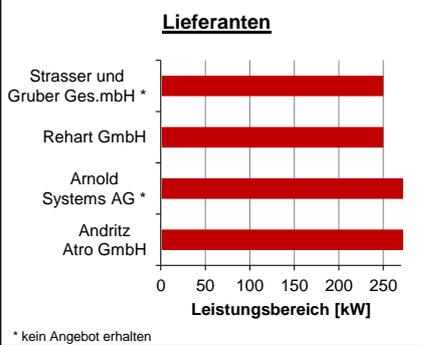
**Forschungsaktivitäten:**

- Verwendung alternativer Materialien z.B. Verbundwerkstoffe zur Kosteneinsparung
- Automatisierung des Betriebes
- Betriebsüberwachung

**Quellen / Informationen:**

- www.andritz.com
- www.kleinwasserkraft.at
- Energieinstitut Vorarlberg: Leitfaden Kleinwasserkraft

**Lieferanten**



\* kein Angebot erhalten

**Umfeld:**

- **Genehmigung:** Wasserrechtsgesetz, Stmk. Naturschutzgesetz und Stmk. EIWOG
- **Investitionsförderung:** durch OeMAG 1500 €/kW bis max. 30% der Gesamtinvestition (Anlagen < 500 kW)
- **Einspeisetarife:** Tarif richtet sich nach erzeugter Energiemenge: 10,55 ct/kWh für die ersten 500.000 kWh/a (ÖSET-VO 2012)

Abbildung 3.36.: Steckbrief Wasserkraftschnecke

### 3.4. Technologievergleich

Im folgenden Kapitel sollen die beschriebenen Technologien miteinander verglichen werden. Dabei wird auf verschiedene Kenndaten und Anlagencharakteristika eingegangen, die noch einmal anschaulich und plakativ in tabellarischer Form dargestellt werden.

Zu Beginn kann festgehalten werden, dass es keine „beste“ oder „schlechteste“ Technologie gibt. Jede Technologie hat für sich eine Daseinsberechtigung und besitzt in Abhängigkeit von Aufbau und Funktionsweise verschiedene Vor- und Nachteile. Für eine Technologieanwendung ist es wichtig, die Vorzüge einer Technologie im speziellen Einsatzfall zu analysieren. Dafür spielen quantitative Fakten eine übergeordnete Rolle. Trotzdem sollte der Fokus nicht nur auf dem Wirkungsgrad, den Investitions- oder Stromgestehungskosten liegen. Fallweise werden auch Technologien, die nicht den höchsten Wirkungsgrad oder die kürzeste Amortisationsdauer haben, dem Anwender einen großen Mehrwert liefern.

Zunächst sollen die einzelnen Technologien bzgl. KWK, Kleinwindkraft und Kleinwasserkraft ins Verhältnis gesetzt werden, bevor dann abschließend ein Überblick zu allen untersuchten Technologien erfolgt.

#### 3.4.1. KWK-Technologien

Die analysierten KWK-Technologien sollen im folgenden Abschnitt verglichen werden. In diesem Zusammenhang sind die entscheidenden Kenndaten in Tabelle 3.6 dargestellt. Diese Daten basieren auf der durchgeführten Beschaffungsmarkterhebung und spiegeln einen Querschnitt der erhaltenen Technologieangebote wieder. Die beschriebenen Leis-

	VKM	Stirling	Gasturbine	Vergaser + BHKW
thermische Leistung [kW]	2,5 - 321	3,8 - 7,5	65 - 270	31 - 429
elektrische Leistung [kW]	1 - 250	1	30 - 200	13 - 250
Gesamtwirkungsgrad [%]	90 - 95	95	85	75 - 80
el. Wirkungsgrad [%]	26 - 37,5	12 - 15	26 - 33	25 - 32
th. Wirkungsgrad [%]	47 - 74	80 - 90	47 - 59	48 - 57
Stromkennzahl	0,34 - 0,78	0,13 - 0,26	0,46 - 0,74	0,42 - 0,65
Wartungsaufwand	mittel	niedrig	niedrig	hoch

Tabelle 3.6.: Vergleich der KWK-Technologien

tungsbereiche geben einen ersten Eindruck darüber, welches Kundensegment von der jeweiligen Technologie bedient werden kann. Ausschlaggebend ist vor allem die thermische Leistung der Anlagen, da diese im untersuchten Leistungsbereich vorwiegend wärmegeführt betrieben werden. Demzufolge richtet sich die Dimensionierung der Anlage in erster Linie nach dem Wärmebedarfsprofil des Nutzers. Während BHKWs auf

der Basis der VKM universal in jedem Kundensegment einsetzbar sind, spezialisieren sich die anderen Technologien auf verschiedene Zielgruppen. Aufgrund der elektrischen Leistung von 1 kW werden die Stirling-BHKWs vorwiegend im Privatkundensegment angewendet. Genau diese Privatkunden werden von der Gasturbinentechnologie nicht angesprochen. Entsprechend dem Leistungsbereich sind Gasturbinen-BHKWs hauptsächlich im (Klein)Gewerbe und bei einem Großkunden im Einsatz. Die Vergasungstechnologien werden vorwiegend in dem Bereich der Großkunden verwendet, da aufgrund der Anlagencharakteristik ein möglichst kontinuierlicher Betrieb anzustreben ist. Als Ausnahme ist hier die Anlage von REP/Christoph Group anzuführen, welche als einzige der Branche den Privatkundenmarkt bedienen kann.

Die Gesamtwirkungsgrade bzw. Brennstoffausnutzungsgrade sind auf einem konstant hohen Niveau. Gasturbinen-BHKWs und Vergasungstechnologien erreichen die Spitzenwirkungsgrade der VKM- und Stirling-BHKWs nicht gänzlich, sind aber im Vergleich zu einer zentralen Energieerzeugung deutlich effizienter. Stirling-BHKWs erzielen einen sehr hohen Gesamtwirkungsgrad, erzeugen aber im Vergleich zu den anderen Technologien sehr wenig elektrische Energie. Der elektrische Wirkungsgrad bzw. die Stromkennzahl der Anlagen ist gering und ein großer Nachteil der Technologie. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die motorischen BHKWs höhere elektrische Wirkungsgrade realisieren als die Gasturbinen-BHKWs, bei gleicher Anlagengröße.

Abschließend sei der Wartungsaufwand der einzelnen Technologien erwähnt. Stirling- (einmal jährlich) und Gasturbinenanlagen (alle 8.000 Betriebsstunden) überzeugen mit sehr niedrigen Aufwänden. Deutlich wartungsintensiver sind BHKWs auf Basis der VKM mit Wartungsintervallen von 2.000 - 4.000 Betriebsstunden. Bedingt durch den Einsatz fester Brennstoffe, sind die Vergasungsanlagen mit dem größten Wartungsaufwand behaftet. Demgegenüber steht die Möglichkeit der Stromerzeugung aus festen Brennstoffen, welche von keiner der vorher erwähnten Technologien bewältigt wird.

### 3.4.2. Kleinwindkraft

In diesem Abschnitt werden horizontale und vertikale Kleinwindkraftkonzepte miteinander verglichen. In Tabelle 3.7 sind die wichtigsten Kenndaten der Technologien angeführt. Die Werte verstehen sich als Mittelwerte auf Basis der Herstellerinformationen und deren Produktbeschreibungen (Tabelle A.2; A.3). Die horizontalen Anlagenkonzepte sind den vertikalen deutlich überlegen. Im Mittel besitzen horizontale Anlagen eine geringere Anlaufgeschwindigkeit und erzeugen dementsprechend auch bei kleineren Windgeschwindigkeiten Energie. Der mittlere Wirkungsgrad wurde aus der überstrichenen Fläche und der Nenngeschwindigkeit errechnet. Horizontale Anlagen erzielen bei kleineren Nenngeschwindigkeiten eine höhere Effizienz. Aufgrund des enormen Geschwindigkeitseinflusses auf die erzeugte Leistung, ist dieser Sachverhalt durchaus bemerkenswert. Allerdings resultiert dieser Zusammenhang aus dem beschriebenen Leistungsbeiwert nach Betz. (Gasch & Twele, 2010, S. 37f)

Die Vorteile der vertikalen Anlagenkonzepte können durch diese quantitativen Pa-

	horizontale Windkraftanlage	vertikale Windkraftanlage
Anlaufgeschwindigkeit [m/s]	2,5 - 3	3 - 4
Nenngeschwindigkeit [m/s]	10 - 12	12 - 14
Abschaltgeschwindigkeit [m/s]	25	15 - 30
mittlerer Wirkungsgrad [%]	32	28

Tabelle 3.7.: Vergleich der Kleinwindkraft-Technologien

parameter nicht wiedergegeben werden. Sie resultieren aus dem Aufbau (Konstruktion) und den Betriebseigenschaften. Aufgrund der kleineren Blattspitzengeschwindigkeit entsteht deutlich weniger Lärm. Zudem benötigen sie keine aktive Windnachführung, haben einen minimalen Schattenwurf und können auch turbulente Winde bei akzeptabler Effizienz verwerten. Im Gegensatz zu horizontalen KWEA, ist die Nutzung von vertikalen Anlagen auch im urbanen Gebiet möglich. Daraus könnte sich ein großes Anwendungspotential entwickeln.

Trotz der nachhaltigen Energieerzeugung ist das Potential zur Nutzung der Windkraft in der Steiermark als gering einzustufen. Die Steiermark bietet gute bis hervorragende Windeigenschaften nur in Höhenlagen ab 1.400 m, wobei auf Grund der Geländeform Kammlagen als Standorte zu präferieren sind (Frühwald & Ulrich, 2007, S. 26). Einer breiten Technologieanwendung stehen die niedrigen Windgeschwindigkeiten unterhalb dieser Höhe gegenüber. Ein wirtschaftlicher und effizienter Anlagenbetrieb ist derzeit nur in Einzelfällen möglich.

### 3.4.3. Kleinwasserkraft

Die untersuchten Kleinwasserkrafttechnologien sollen im weiteren Verlauf verglichen werden. Dabei werden die realisierten Anlagenwirkungsgrade sowie die Technologiecharakteristika gegenübergestellt.

Zunächst kann festgehalten werden, dass die Technologieauswahl stark von den hydrologischen Standortbedingungen abhängt. Die Dauerlinie der Abflussmengen sowie die nutzbare Höhendifferenz sind die wichtigsten Auswahl- und Auslegungskriterien. In Tabelle 3.8 sind die Merkmale der einzelnen Kraftwerkstypen dargestellt.

Im Bezug auf einen möglichen Anlagenstandort, geben die Daten der Hüllkurve (Fallhöhe und Durchfluss) einen ersten Überblick, welche Technologien für einen Einsatz in Frage kommen. Die größten Wirkungsgrade können durch Kaplan-, Pelton- und Durchströmturbinen realisiert werden. Alle Technologien weisen ein ähnlich gutes Teillastverhalten auf, die Wirkungsgradabnahmen liegen entsprechend den Herstellerinformationen im einstelligen Prozentbereich (bei 20 % der Ausbauwassermenge). Dieser

	Pelton-Turbine	Kaplan-Turbine	Durchström-turbine	Wasserkraftschnecke
Fallhöhe [m]	15 - 250	1 - 25	2 - 50	1 - 10
Durchfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,025 - 1,25	0,5 - 15	0,02 - 7	0,25 - 10
Leistung [kW]	15 - 2000	5 - 3000	10 - 500	1 - 500
Wirkungsgrad [%]	65 - 85	80 - 85	80 - 85	70 - 80
benötigte Wasserqualität	rein	möglichst gut	schlecht	schlecht
Wartungsaufwand	hoch	hoch	gering	gering

Tabelle 3.8.: Vergleich der Kleinwasserkraft-Technologien

Sachverhalt ist vor allem im untersuchten Leistungsbereich wichtig, da die Abflussmengen großen jährlichen Schwankungen unterliegen. Vorteile von Durchströmturbinen und Wasserkraftschnecken sind die geringe Wartungsintensität sowie die Möglichkeit, auch verschmutzte Gewässer zu nutzen. Demgegenüber stehen die Wirkungsgradvorteile von Kaplan- und Pelton-Turbinen. Allerdings entstehen bei diesen Turbinenarten deutlich höhere Aufwände für bauliche Komponenten.

Die Entscheidung für oder gegen eine Technologie ist äußerst vielschichtig und muss an jedem Standort neu bewertet werden. Die betrachteten Technologien sind nicht nur Möglichkeiten zur Nutzung neuer Standorte, sondern stellen auch Erweiterungs- und Erneuerungspotential bereits bestehender Kraftwerke dar. Die Nutzung dieser Standorte (z.B. Ersatz von Wasserrädern, Nutzung von Restwassermengen) hat den großen Vorteil, dass die baulichen Komponenten in der Regel schon vorhanden sind und lediglich die Kraftanlagen nachgerüstet werden müssen. Dadurch wird das Investitionsvolumen gesenkt und die Anlagenwirtschaftlichkeit verbessert. Bezugnehmend auf das vorhandene Ausbaupotential von 1,5 - 2,5 TWh bis 2020 (Prechtl, 2012, S. 3f), wird die erzeugte Leistung durch Kleinwasserkraftanlagen in den kommenden Jahren steigen. Dieser Trend wird durch den steigenden Bedarf an nachhaltigen Energieversorgungskonzepten zusätzlich gefördert.

#### 3.4.4. Zusammenfassung der Technologie-Markt-Bewertung

Abschließend sollen die Gesamtergebnisse der Technologie-Markt-Bewertung dargestellt werden. Die Kriterienauswahl und -definition basierten auf dem Vorhaben, ein vergleichbares und für alle Technologien anwendbares Bewertungssystem zu entwickeln. Entsprechend den in Kapitel 2.5 beschriebenen Indikatoren, wurden die Technologien im Verlauf des Projektes bewertet. Die Summe der einzelnen Bewertungsstufen jener Technologien ergibt das in Tabelle 3.9 dargestellte Ranking.

Nr.	Technologie	Bewertung
1	BHKW-VKM	21,5
2	BHKW-Gasturbine	19
2	Kaplan-Turbine	19
2	Durchströmturbine	19
2	Wasserkraftschnecke	19
6	Pelton-Turbine	18,5
7	BHKW-Stirling	16,5
7	Horizontale Windkraftanlagen	16,5
9	Vergaser + BHKW	15,5
10	Vertikale Windkraftanlagen	11,5

Tabelle 3.9.: Technologieranking

Wie bereits zu Beginn des Abschnittes erwähnt, stellt dieses Ranking lediglich die Bewertung der Technologie unter den im Rahmen dieses Projektes festgelegten Randbedingungen dar. Ob BHKWs auf Basis der VKM die „beste“ und vertikale Windkraftanlagen die „schlechteste“ Technologie sind, soll und kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Es soll vielmehr eine Empfehlung sein, dass in der Einschätzung des Projektteams die Anwendung von Technologie „A“ im Vergleich zur Technologie „B“ vorteilhafter ist. Dieser Sachverhalt kann in den meisten Fällen zutreffen, hat aber keinesfalls eine allgemeine Gültigkeit. Für eine Technologieentscheidung sind vorwiegend die Standortbedingung, das Nutzerverhalten und nicht zuletzt der Kundenwunsch ausschlaggebend.

## 4. Reflexion des Vorgehensmodells

Der folgende Abschnitt soll die durchgeführte Beschaffungsmarkterhebung und Technologiebewertung reflektieren. Dabei sollen die wesentlichen Ziele beschrieben und auf Schwierigkeiten hingewiesen werden.

### 4.1. Kritische Analyse der Beschaffungsmarkterhebung

Die Beschaffungsmarkterhebung gliederte sich in die Phasen der Herstellersuche, -bewertung, -befragung sowie der Datenerhebung. Ziel war es, Technologielieferanten zu identifizieren, die markt- und technologieführenden Unternehmen herauszufiltern und ein entsprechendes Richtangebot zu organisieren.

**Herstellersuche:** Zur Identifikation der Hersteller wurde eine Internetrecherche durchgeführt. Dabei waren die Homepages verschiedener Verbände, Vereine und Organisationen sehr hilfreich. Eine Vielzahl der KWK-Hersteller wurde aus einer Erhebung der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. entnommen (ASUE, 2011a, S. 1ff). Die Suche nach Lieferanten der Wasserkraftanlagen wurde in enger Abstimmung mit den Experten der Energie Steiermark durchgeführt, welche die erarbeitete Liste annähernd vervollständigten. Schwierigkeiten bereitete die Lieferantensuche im Bereich der Windkraft. Hier ist der Markt sehr unübersichtlich und geprägt von vielen klein- und mittelständischen Unternehmen, deren Kernkompetenzen oft in anderen Bereichen liegen.

Durch mindestens 25 lokalisierte Hersteller je Technologie steht eine ausreichende Anzahl an Lieferanten bereit, die im Fall einer Projektrealisierung kontaktiert werden können. Da in der Praxis höchstens fünf bis zehn Hersteller um eine Angebotslegung gebeten werden, wurde versucht, die größten und wichtigsten Hersteller in die Liste aufzunehmen. Die Lieferantenliste mit über 200 Firmen gibt einen ausreichenden Überblick darüber, welche Lieferanten mit welchen Technologien derzeit am Markt verfügbar sind.

Die Frage, ob die führenden Hersteller wirklich erfasst wurden, kann nicht mit vollständiger Sicherheit beantwortet werden. Aufgrund der ausgiebigen Recherche und der Verwendungen von Energie Steiermark-internen Informationen ist davon auszugehen, dass zumindest neun von zehn der wichtigsten Hersteller in der Liste enthalten sind.

Auf eine Erweiterung der Liste wurde auf Grund des steigenden Zeit- und Wartungsaufwandes verzichtet. Durch die dynamischen Marktverhältnisse bedarf es mehrerer jährlicher Kontrollen und Aktualisierungen, um die Liste auf dem neuesten Stand zu halten.

**Herstellerbewertung:** Mit dem Ziel, die führenden Lieferanten herauszufiltern, wurden die identifizierten Hersteller im nächsten Arbeitsschritt detailliert untersucht. Die Bewertung der Hersteller erfolgte auf der Basis der in Tabelle A.5 aufgezählten Kriterien.

Die Bewertung der einzelnen Indikatoren erwies sich teilweise als sehr schwierig. Während Daten wie das Unternehmensalter, die Anzahl der Mitarbeiter, der Umsatz des Unternehmens und die Anzahl von Referenzprojekten vergleichsweise einfach zu ermitteln waren, konnten nur selten belastbare Daten zur Einschätzung der Markt- und Technologieposition beschafft werden. Außerdem kann festgehalten werden, dass die verfügbaren Informationen vor allem bei KMUs sehr begrenzt sind und sich zumeist auf das Unternehmensalter und die Anzahl der Mitarbeiter beschränkte. Die Einschätzung dieser Unternehmen basierte vorwiegend auf den Eindrücken und der Aktualität der Firmenpräsentation sowie den vielfach vorhandenen Pressemitteilungen.

Aufgrund der Presse- und Lieferanteninformationen konnte ein grobes Abbild der Hersteller gewonnen werden, um diese im Sinne einer ABC-Analyse zu klassifizieren. Die Dokumentation der Vorgehensweise befindet sich in Tabelle A.5, wobei die beschriebenen Messgrößen als Richtwerte zu verstehen sind. Durch die unterschiedlichen Reife- und Verbreitungsgrade der einzelnen Technologien ist es schwierig, die jeweiligen Messgrößen technologieübergreifend anzuwenden. Im Sinne der absoluten Genauigkeit, hätten die Messgrößen für jede Technologie neu bestimmt werden müssen. Ein BHKW-VKM-Hersteller, der erst fünf Referenzanlagen nachweisen kann, wäre mit Sicherheit schlechter zu bewerten als ein Hersteller von Vergasungsanlagen, der schon fünf Referenzanlagen vorweisen kann. Da es sich bei dieser Erhebung lediglich um eine Vorstudie handelte, hätte dieser Aufwand in keinem vernünftigen Verhältnis zum Nutzen gestanden.

Schwierigkeiten bereitete zudem die Bewertung von Herstellern, welche die Produktion bzw. Herstellung der hier untersuchten Technologien nicht als Kerngeschäft betreiben. Als Beispiel sei die Einschätzung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit erwähnt. Diese basiert auf Unternehmenskenndaten und kann in Einzelfällen eine zu gute Bewertung zur Folge haben, da diese das gesamte Produktangebot eines Lieferanten berücksichtigt.

**Herstellerbefragung:** Infolge der durchgeführten Klassifizierung wurden die A-Lieferanten kontaktiert und um eine Angebotslegung entsprechend ihres Produktportfolios für konkrete Projektszenarien gebeten. Dafür wurde je Technologie eine Anfrage vorbereitet. Für die Anfrage der KWK-Anlagen wurden von der Energie Steiermark vier reale Wärmeverbrauchsprofile zur Verfügung gestellt, an denen eine Auslegung der vom Hersteller angebotenen Anlagen stattfinden sollte.

Dieses Vorgehen war durchaus zielführend, jedoch hat die Ausarbeitung der Dauerlinien ca. drei Wochen in Anspruch genommen. Die Praxis hat gezeigt, dass diese Linien nur in seltenen Fällen für die Auslegung angewendet wurden. Durch die schlichte Angabe eines jährlichen Wärmebedarfes, hätte einige Zeit gespart werden können. Für eine

neuerliche Anfrage stellt sich die Frage, ob die Wärmebedarfskurven durch die Angabe eines Jahreswärmebedarfes zu ersetzen ist. Zudem könnte es zielführend sein, jeweils nur eine Wärmebedarfskurve in die Anfrage aufzunehmen, um dadurch die Komplexität gering zu halten und die Anfrage auf eine spezielle Anlage auszurichten.

Abgesehen davon war die Anfrage sehr umfassend. Nachdem die Untersuchung lediglich eine Vorstudie war, wäre die Erhebung der wichtigsten technologischen Parameter ausreichend gewesen. Auf ausdrücklichen Wunsch der Energie Steiermark wurden die Informationen sehr detailliert abgefragt und teilweise in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Durch eine Vereinfachung der Anfrage wäre die Erstellung und die Beantwortung weniger zeitintensiv gewesen, was womöglich die Rücklaufquote erhöht und die Wartezeit verkürzt hätte.

Aus dem Vorgehen der KWK-Anlagen wurden Lerneffekte für die weiteren Technologien abgeleitet. So bestanden die Anfragen der Wind- und Wasserkraftanlagen lediglich darin, die Kostenpositionen und Leistungskurven (Windkraftanlagen) bzw. Anlagencharakteristika (Wasserkraftanlagen) zu retournieren. Die Auslegung mit entsprechenden Standortdaten wurde innerhalb des Projektteams durchgeführt.

Schwierigkeiten bereitete die Kontaktierung der Lieferanten von Kleinwasserkraftanlagen. Da die Projektkosten wesentlich von den hydrologischen Gegebenheiten des ausgewählten Standortes bestimmt werden, haben sehr viele Lieferanten auf eine Angebotslegung verzichtet. Daraus resultiert eine sehr niedrige Rücklaufquote der gestellten Anfragen.

## 4.2. Kritische Analyse der Technologiebewertung

Im Folgenden soll die Vorgehensweise der Technologiebewertung kritisch hinterfragt werden. Dabei wird auf die Auswahlentscheidung des Bewertungsmodells sowie auf die Inhalte des Technologiesteckbriefes und deren Interpretation eingegangen.

Die Auswahl des Technologiesteckbriefes resultierte aus dem Vergleich von drei für die Technologiefrüherkennung relevanten Bewertungsmöglichkeiten. Die Vor- und Nachteile wurden gegenübergestellt und der Steckbrief aufgrund der variablen Gestaltungsmöglichkeiten und des hohen Informationsgehaltes ausgewählt. Diese Vorgehensweise war zielführend und ist für weitere Auswahlentscheidungen empfehlenswert.

Der Steckbrief war ursprünglich als anwendungsfreundliches und einfach aufgebautes Bewertungsmodell für eine Technologie geplant. Im Projektverlauf musste von diesem Vorhaben jedoch Abstand genommen werden. Die für die Energie Steiermark entscheidenden Stromgestehungskosten bzw. Zukunftsentwicklungen der Kosten konnte nicht auf der übergreifenden Technologieebene bearbeitet werden. Für diese Inhalte des Steckbriefes wurden die Kennwerte einzelner Anlagen bzw. Technologieausführungen herangezogen. Streng genommen müsste der Name nun Technologie- und Anlagensteckbrief sein. Im Speziellen beziehen sich die Daten der Zukunftsentwicklung auf eine ausgewählte Anlage und deren Einsatzgebiet. Die daraus abgeleiteten Informationen sind für den

dargestellten Anwendungsfall relevant, besitzen jedoch keine allgemeine Gültigkeit.

Zusätzlich ist der Steckbrief durch das Diagramm der Zukunftsentwicklung und der Technologie-Markt-Bewertung sehr komplex. Der Steckbrief bietet dadurch einen sehr großen Informationsgehalt, ist aber ohne eine Dokumentation der Diagramme nur schwer zu verstehen und zu deuten. Im Sinne der Anwendungsfreundlichkeit wäre es möglicherweise zielführender gewesen, die Komplexität der Diagramme niedrig zu halten.

Außerdem sei auf die Schwierigkeiten der Technologie-Markt-Bewertung hingewiesen. Die Vorgehensweise und die Kriterienbeschreibung sind in Kapitel 2.5 dargestellt. Hier wird versucht, durch sechs Indikatoren sehr unterschiedliche Technologien miteinander zu vergleichen. Dieser Vergleich der verschiedensten Technologien ist durchführbar, sollte aber äußerst vorsichtig behandelt werden. Die Kriterienwahl bzw. die Messgrößen sind sehr auf die Vergleichbarkeit ausgelegt, besitzen aber Schwachstellen. Als Beispiel sei die „Soziale Akzeptanz“ angeführt; durch eine repräsentative Kundenbefragung ließe sich dieser Indikator optimaler bewerten. Auch die Bewertung der Nachhaltigkeit bietet Optimierungspotential. Durch die Integration vom Herstellungs- und Entsorgungsprozess der jeweiligen Technologien könnte die Bewertung verbessert werden.

Abschließend sei darauf verwiesen, dass für die Bewertung der Kriterien jeweils reale Standort-, Kunden-, Anlagen- und Marktdaten verwendet wurden und die Bewertung auf tatsächlichen Anwendungsverhältnissen basiert. Aus diesem Grund ist der Vergleich der unterschiedlichen Technologien durchaus gerechtfertigt.

## 5. Zukunftsentwicklungen und Zusammenfassung

Im letzten Kapitel dieser Arbeit sollen qualitative Zukunftsentwicklungen der untersuchten Technologien dargestellt werden. Dabei stehen technologische Entwicklungen im Fokus. Investitionskostenprognosen, Veränderungen der Stromgestehungskosten und -bezugspreise sollen hier nicht thematisiert werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf Wirkungsgradentwicklungen, Qualitätsoptimierungen, konstruktiven Verbesserungen und im Einzelfall auch auf neuartigen Konzepten. Dafür werden einerseits die gewonnenen Daten der Herstellerbefragung, und andererseits Informationen aus Innovations- und Forschungsberichten zusammengetragen. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit den entsprechenden Erkenntnissen und Resultaten.

### 5.1. Technologieentwicklungen

Dass dezentrale Energiesysteme in Zukunft an Bedeutung gewinnen, ist ohne Zweifel. Die in Kapitel 1.1 aufgezählten Beispiele (Deutsche Telekom, VW, RWE) beweisen, dass kleine Erzeugungsanlagen mittlerweile ein großes Thema sind. Beispielhaft sei die Deutsche Telekom erwähnt, die bereits in den Energiemarkt eingetreten ist. Sie besitzt einen Servicevertrag mit dem BHKW-Hersteller Motoren-AT und übernimmt neben der Wartung auch die Installation der Anlagen. Dabei erfolgt die Fernwartung, Anlagenüberwachung und Datenaufzeichnung über eine Ethernet- bzw. Internetverbindung der Telekom. (VKW Kraftwerk GmbH, 2012, S. 6)

Dieses Beispiel soll zeigen, dass auch branchenfremde Großkonzerne wie die Deutsche Telekom die Entwicklungen am Energiemarkt aufmerksam verfolgen und an eine verbauchernahe, effiziente und saubere Energieerzeugung glauben.

#### 5.1.1. Kraft-Wärme-Kopplung

Im Folgenden soll ein Überblick zu aktuellen Forschungsthemen und technologischen Entwicklungen der KWK-Anlagen gegeben werden. Dafür werden die gefundenen Ergebnisse der einzelnen Antriebskonzepte dargestellt.

**VKM:** Entsprechend den Herstellerinformationen ist in den nächsten zehn Jahren mit einer Wirkungsgradsteigerung von unter zwei Prozentpunkten zu rechnen. Die Motoren sind aufgrund der millionenfachen Anwendung in der Automobilindustrie sehr hoch entwickelt und bieten nur geringes Potential für Verbesserungen. Neue Motoren

mit geringerem Verbrauch könnten noch Vorteile ermöglichen. Forschungsgegenstände der Hersteller sind die Nutzung alternativer Kraftstoffe, die Minderung der Emissionen, die Optimierung der Wärmenutzung sowie die automatisierte Steuerung und Überwachung des BHKWs.

**Stirlingmotor:** Die Forschungsaktivitäten der Stirlingmotoren sind vielfältig. Die Motoren werden bei hohen Temperaturen betrieben und benötigen deshalb große Wärmetauscherflächen. Diese Flächen sind speziell bei einem Einsatz von Biobrennstoffen verschmutzungsgefährdet. Aus diesem Grund beschäftigen sich aktuelle Forschungen mit der effizienten Nutzung von Biomasse. (Li et al., 2012, S. 1ff)

Entsprechend den Informationen der Hersteller wird permanent an der Weiterentwicklung gearbeitet. Dabei stehen die Senkung der Emissionen des Gesamtsystems sowie die Erhöhung der elektrischen Effizienz im Mittelpunkt.

**Gasturbine:** Die Firma Micro Turbine Technology BV aus Eindhoven plant den Markteintritt mit einem Gasturbinen-BHKW ( $3 \text{ kW}_{\text{el}} / 15 \text{ kW}_{\text{th}}$ ) Ende 2013. Derzeit werden die Anlagen in einem Feldtest überprüft. Bemerkenswert ist, dass die Anlage mit einem Preis von ca. 6.000 Euro am Markt angeboten werden soll. (Truschel, 2012, S. 1ff)

Zudem ist die Verwendung von alternativen Brennstoffen ein großes Forschungsthema. Von Thek et al. (2010, S. 1f) wird ein Gasturbinen-BHKW mit interner (Erdgas) und externer (Holzhackschnitzel) Verbrennung untersucht. Die Wärme der Holzhackschnitzelverbrennung wird zur Luftvorwärmung des Gasturbinenprozesses und als Wärmequelle für Heizung oder Warmwasser angewendet.

Die Forschungen des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) beschäftigen sich mit der Brennstoffvariabilität, Senkung der Schadstoffemissionen, Flammenstabilität und der Erhöhung der Effizienz. Das Ziel sind Gasturbinen, die ohne aufwändige Abgasnachbehandlungssysteme betrieben werden können und durch geringe Wartungskosten und lange Wartungszyklen überzeugen. Außerdem wird an der Realisierung von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungen gearbeitet. (BMW, 2011, S. 71)

**Vergaser:** Da zur Zeit noch keine Technologie die Marktreife erreicht hat, wird in erster Linie an der Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit der Anlagen gearbeitet. Forschungsbedarf im Bereich der Biomassenutzung und -vergasung besteht laut Rochlitz (2011, S. 23) im genauen Verständnis der chemisch physikalischen Prozesse. Das ist nötig, um einen zuverlässigen Anlagenbetrieb und niedrige Schadstoffemissionen zu gewährleisten. Außerdem wird an der Erprobung von möglichst vielen verschiedenen Brennstoffen gearbeitet. Dies bestätigen auch die Informationen, die aus der Herstellerbefragung gewonnen wurden. Dabei werden die Einflüsse auf den Vergasungsprozess und das Produktgas durch nicht homogene, feuchte und verschmutzte Brennstoffe analysiert. Geforscht wird zudem an der Senkung des Teergehaltes im Produktgas. Durch innovative Verfahren, z.B. die gestufte Vergasung der Firma Cleanstgas, konnten in Demonstrationsanlagen sehr niedrige Teerbelastungen des Produktgases erreicht werden.

### 5.1.2. Kleinwindkraft

Technologische Entwicklungen der Kleinwindkraft basieren im Wesentlichen auf den Verbesserungen der großen Erzeugungsanlagen. Seit ca. 20 Jahren liegt das Hauptaugenmerk der Forschung auf dem Bau von stetig wachsenden Anlagen. Während 1987 die durchschnittliche Leistung bei 50 kW lag, betrug sie im Jahr 2010 schon 2,06 MW. Das entspricht einer Steigerung auf das Vierzigfache, wobei die Tendenz immer noch wachsend ist. In Verbindung mit diesen Entwicklungen entstanden konstruktive Verbesserungen, Regelungskonzepte, Qualitätsstandards und Wirkungsgradsteigerungen, die in großem Maße auf die Kleinwindkraftanlagen übertragen wurden. Auch in Zukunft werden die technologischen Verbesserungen der Großanlagen einen Einfluss auf die KWEA haben. (Pehnt et al., 2011, S. 76)

Laut Bierther et al. (2012, S. 27) werden aktuell folgende Forschungsthemen gefördert:

- Weiterentwicklung der kompletten Anlage,
- Antriebsstrangkonzeppte,
- Rotorblätter,
- Windpotential,
- ökologische Begleitforschung.

Derzeitige Entwicklungsprojekte beschäftigen sich mit dem Entwurf von robusten und widerstandsfähigen Materialien. Diese Projekte sind vor allem für Off-Shore-Anlagen relevant, tragen aber dennoch zur Qualitätssteigerung bei (Bierther et al., 2012, S. 28ff). Die Leichtbauweise der kompletten Anlage ist ebenfalls ein großes Thema. Im Hinblick auf eine kostenoptimierte Produktion sind vorwiegend die Rotorblätter und der Antriebsstrang (Generator, Getriebe) im Blickfeld der Untersuchungen (Bierther et al., 2012, S. 31).

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist der Natur- und Umweltschutz im Sinne der ökologischen Begleitforschung. Dies betrifft in erster Linie die Geräuschemissionen sowie den Schutz der Vögel. An dieser Stelle soll speziell auf die Geräuschemissionen eingegangen werden. Durch kontinuierliche aerodynamische Verbesserungen (Rotorblattdesign), Geräuschisolierung der Maschinengondel sowie dem Verzicht auf bestimmte Baugruppen können die Emissionen weiterhin gesenkt werden (Pehnt et al., 2011, S. 76).

Zudem wird an der Integration von KWEA in und auf Gebäuden in Stadtgebieten geforscht. Für Aufdachkonstruktionen sind vor allem die Positionierung, Auswirkungen der Gebäudeumströmung und Turbulenzen die Untersuchungsgegenstände. Bei der Gebäudeintegration wird in erster Linie versucht, die Konzentratorwirkung der Fassaden zu nutzen. (Amme et al., 2012, S. 1ff)

Ein Problem der Kleinwindkraft ist das Fehlen von unabhängigen Prüfstellen bzw. Zertifizierungen der Anlagen. Derzeit betreibt die EVN AG (Energieversorgung Niederösterreich) einen Energieforschungspark in Lichtenegg-Pesendorf, in dem neun verschiedene KWEA vermessen werden. Die Auswertungsergebnisse werden im Herbst 2012 veröffentlicht. Für eine mögliche Technologie- bzw. Herstellerauswahl sollten diese In-

formationen in die Entscheidung einbezogen werden. ([www.energieforschungspark.at](http://www.energieforschungspark.at))

Abschließend soll festgehalten werden, dass nicht nur an der Technologie geforscht wird, sondern die Suche nach neuen Standorten für eine Technologieanwendung essenziell ist.

### 5.1.3. Kleinwasserkraft

Wasserkraftanlagen gelten im Allgemeinen als hochentwickelte und ausgereifte Technologien, die einen großen Teil der Ressourcen (global und auch in Österreich) bereits ausgeschöpft haben. Ausbaupotentiale sind dennoch vorhanden, z.B. Nutzung von Standorten mit niedrigen Fallhöhen und Wassermengen (Kleinstwasserkraftanlagen) sowie die Revitalisierung und Modernisierung bestehender Anlagen. Aufgrund des hohen Reifegrades und der langjährigen Marktverfügbarkeit ist in absehbarer Zukunft nicht mit einer Senkung der Investitionskosten zu rechnen, es wird sogar ein Kostenanstieg prognostiziert (Teske et al., 2010, S. 37).

Obwohl in den Wasserkraftanlagen bewährte und hochentwickelte Technologien eingesetzt werden und auch im Teillastbereich hohe Wirkungsgrade erzielbar sind, gibt es Raum für Verbesserungen. Laut Edenhofer et al. (2012, S. 474f) bestehen die Potentiale in der Betriebsoptimierung, Milderung und Verringerung der Umweltauswirkungen, der Anpassung an neue soziale und ökologische Verhältnisse sowie der robusten Anlagenausführung.

Neue Technologieentwicklungen sind darauf ausgelegt, niedrige und sehr niedrige Fallhöhen ( $< 5$  m) zu nutzen. Dadurch werden Standorte interessant, die bisher nicht wirtschaftlich nutzbar waren. Mit Hilfe der CFD<sup>10</sup>-gestützten Turbinenauslegung wird das Betriebsverhalten optimiert. Das betrifft in erster Linie die Effizienz im Teillastbetrieb und die Verschleißanfälligkeit der Laufräder. Zur Verbesserung der Abnutzungseigenschaften wird zudem an neuen Materialien geforscht. Die vorrangigen Ziele sind die Vermeidung von Korrosion und erosivem Verschleiß, z.B. durch die Beschichtung der Schaufeln. (Edenhofer et al., 2012, S. 474f)

Neben den bewährten Technologien erscheinen am Markt regelmäßig neue Konzepte, die im Wesentlichen eine Abwandlung der bekannten Technologien darstellen. Zu erwähnen ist eine innovative Entwicklung der Wasserkraft-Fischschnecke, mit integrierter Fischaufstiegshilfe. Dadurch können Fischtreppen und die baubedingten Kosten vermieden werden.

Ein anderes Konzept ist die Steff-Turbine. Die Funktionsweise ähnelt einem Wasserrad. Sie kann mit sehr geringen baulichen Maßnahmen zur Nutzung von Flusswasser, Stauwasser und Abwasser verwendet werden (Walter Reist Holding AG, 2011, S. 1ff).

Entsprechend den Informationen der Andritz AG, hat sich der Einsatz von Pumpen im Turbinenbetrieb bewährt. Anwendung finden vor allem Kreiselpumpen zur Nutzung von Trinkwasser, Rest- und Abwasser und Stoffsuspensionen in der Papierindustrie (Andritz AG, 2010, S. 2ff).

---

<sup>10</sup>Computational Fluid Dynamics

## 5.2. Zusammenfassung

Abschließend sollen noch einmal die Ziele, die durchgeführten Arbeiten und die daraus abgeleiteten Ergebnisse zusammengefasst werden. Zweck der Studie ist es, der Energie Steiermark eine umfassende Informationssammlung bezüglich dezentraler Erzeugungstechnologien zu erarbeiten, welche zukünftige Investitionsentscheidungen unterstützen soll.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Beschaffungsmarktanalyse und -erhebung sowie die Technologieanalyse und -bewertung durchgeführt. Den Einstieg in das untersuchte Themengebiet bildete eine umfangreiche Lieferantensuche. Von der Energie Steiermark wurde eine bereits existierende Liste mit möglichen Technologielieferanten bereitgestellt, welche im Rahmen dieser Diplomarbeit aktualisiert und erweitert wurde. Für die ausgewählten Technologien wurde der Markt analysiert, um eine möglichst vollständige Lieferantenübersicht zu erarbeiten. Die Liste der Herstellerdaten wurde auf 208 Lieferanten erweitert. Tabelle 5.1 zeigt einen kurzen Überblick, wieviele Hersteller der einzelnen Technologien identifiziert werden konnten.

<b>identifizierte Hersteller</b>	<b>208</b>
KWK	101
Kleinwindkraft	47
Kleinwasserkraft	34
PV	26

Tabelle 5.1.: Identifizierte Hersteller

In der nächsten Projektphase wurden die erhobenen Hersteller anhand von verschiedenen Indikatoren bewertet und in Form einer ABC-Analyse klassifiziert. Von den erhobenen 208 Lieferanten wurden 64 als A-Lieferanten eingestuft und kontaktiert. Der Einladung zu einer Angebotslegung entsprechend der gestellten Anfrage kamen 31 Lieferanten nach. Dadurch konnte eine breite Basis an Produktangeboten gesammelt werden, welche in der Folge als Grundlage für die technische und wirtschaftliche Bewertung diente. An dieser Stelle sei nochmals darauf verwiesen, dass die wirtschaftliche Anlagenbewertung nicht Bestandteil dieser Arbeit war, sondern von Ortner (2012) behandelt wurde.

Anschließend bestand die Aufgabe darin, ein geeignetes Bewertungssystem für die untersuchten Technologien zu entwickeln. Zu diesem Zweck sind die Vor- und Nachteile von drei verschiedenen Beurteilungsverfahren der Technologiefrüherkennung verglichen

worden. Als zentrales Bewertungselement wurde ein Technologiesteckbrief ausgewählt.

In diesem Technologiesteckbrief werden alle wichtigen Informationen der einzelnen Technologien zusammengefasst. Das betrifft technologiespezifische Eigenschaften, Vor- und Nachteile, Kundengruppen und Umfeldbedingungen. Neben der Recherche der beschriebenen Steckbriefinhalte, war die Beurteilung der Technologien in Form eines fünfstufigen Modells das zentrale Thema dieser Arbeit. Im Zuge dieser Technologie-Markt-Bewertung wurden drei technologie- (Wirkungsgrad, Nachhaltigkeit und Reifegrad) und marktorientierte (Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit, soziale Akzeptanz) Kriterien ausgewählt und die Einzeltechnologien danach bewertet. Außerdem wurden in dem Steckbrief aktuelle Forschungsinhalte und wichtige Informationsquellen benannt. Basierend auf den Erkenntnissen von Ortner (2012) und Granda (2012), ist im Steckbrief eine Prognose der Zukunftsentwicklungen der betreffenden Technologien enthalten.

Zum Abschluss kann festgehalten werden, dass der Einsatz von dezentralen BHKW-Anlagen sehr empfehlenswert ist. Technisch und ökologisch gesehen erzeugen die Anlagen bei einem ausreichendem Wärmebedarf des Nutzers einen großen Mehrwert. Die Anwendung von Vergasungskonzepten ist derzeit noch mit Vorsicht zu genießen, da die Anlagen die langjährige Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit erst noch nachzuweisen haben. Die Verwendung von erneuerbaren Erzeugungstechnologien (Kleinwindkraft, Kleinwasserkraft) ist im Allgemeinen zu empfehlen. Jedoch ist die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit stark vom Standort abhängig. Vor einer Projektrealisierung ist die Rentabilität im Einzelfall zu prüfen. Nach Einschätzung des Projektteams wird das Potential der Windkraft als gering eingestuft. Der Standort Steiermark bietet zu geringe Windgeschwindigkeiten und erscheint derzeit nicht geeignet für eine breite Technologieanwendung. In der österreichischen Energieerzeugungsstruktur ist die Nutzung der Wasserkraft sehr etabliert. In der nahen Umgebung sind zudem erstklassige Technologielieferanten verfügbar. Bei kontinuierlich ansteigenden Strombezugspreisen wird die Kleinwasserkraft künftig an Bedeutung gewinnen.

Das Ergebnis der durchgeführten Arbeiten sind die technischen Steckbriefe. Diese sollen dem Anwender ein komprimiertes Abbild der technischen und wirtschaftlichen Charakteristik der einzelnen Technologien liefern. Diese Zusammenfassung soll dem Leser und dem Auftraggeber als Grundlage für zukünftige Investitionsentscheidungen dienen.

## Literaturverzeichnis

- 2G Energy AG, 2012: *Leistungsbeschreibung agenitor 206*, [http://www.2-g.de/xt/getPartnerbereichFile.php?file=%2FErdgasmodule\\_deutsch%2Fagenitor206%2FD-603\\_LB\\_D\\_agenitor\\_206\\_Erdgas.pdf](http://www.2-g.de/xt/getPartnerbereichFile.php?file=%2FErdgasmodule_deutsch%2Fagenitor206%2FD-603_LB_D_agenitor_206_Erdgas.pdf), 09.09.2012.
- 2G Home GmbH, 2010: *Lieferumfang 2G Home-Whispergen*, [http://www.2g-home.de/wp-content/plugins/downloads-manager/upload/lieferumfang\\_systempaket-neu.pdf](http://www.2g-home.de/wp-content/plugins/downloads-manager/upload/lieferumfang_systempaket-neu.pdf), 14.09.2010.
- AEE, 2009: *Vorsicht bei Investitionen in Kleinwindkraftanlagen*, Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft erneuerbare Energie NÖ-Wien.
- Amme J., Buddeke M., Twele J., 2012: *Nutzung von kleinen Windkraftanlagen auf Gebäuden in städtischen Gebieten am Beispiel Berlin*, Technischer Bericht, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, [http://kleinwind.htw-berlin.de/website/uploads/media/12-03\\_HTW\\_Neue\\_Energien-Beitraege\\_Positionen\\_2012.pdf](http://kleinwind.htw-berlin.de/website/uploads/media/12-03_HTW_Neue_Energien-Beitraege_Positionen_2012.pdf), 18.10.2012.
- Andritz AG, 2010: *Wasser - Magazin der Andritz Pumpen*, [http://atl.g.andritz.com/c/com2011/00/02/18/21856/1/1/0/-212475753/oi-pumps\\_magazine\\_de.pdf](http://atl.g.andritz.com/c/com2011/00/02/18/21856/1/1/0/-212475753/oi-pumps_magazine_de.pdf), 20.10.2012.
- Andritz Atro GmbH, 2012: *Wasserkraftschnecken*, <http://atl.g.andritz.com/c/com2011/00/02/13/21385/1/1/0/-27106103/oi-atro-hydrodynamic-screws-de.pdf>, 13.10.2012.
- ASUE, 2010: *BHKW-Grundlagen*, Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., <http://asue.de/cms/upload/inhalte/blockheizkraftwerke/broschuere/bhkw-grundlagen-2010.pdf>, 25.10.2012.
- ASUE, 2011a: *BHKW-Kenndaten 2011*, Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., <http://asue.de/cms/upload/broschueren/2011/bhkw-kenndaten/asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf>, 31.10.2012.
- ASUE, 2011b: *Die Strom erzeugende Heizung - Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz*, Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., <http://asue.de/cms/upload/broschueren/>

- 2011/stromerzeugende-heizung/asue-stromerzeugende-heizung-2011.pdf, 08.09.2012.
- ASUE, 2012: *BHKW-Fibel*, Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., [http://asue.de/cms/upload/broschueren/2012/bhkw\\_fibel/asue\\_bhkw\\_fibel\\_2012.pdf](http://asue.de/cms/upload/broschueren/2012/bhkw_fibel/asue_bhkw_fibel_2012.pdf), 08.09.2012.
- Bierther M., Schäfer B., Doller K., 2012: *Innovation durch Forschung - Jahresbericht 2011 zur Forschungsförderung im Bereich der erneuerbaren Energien*, Technischer Bericht, BMU.
- Bittermann W., Gollner M., 2011: *Modellierung des Stromverbrauchs in den privaten Haushalten Österreichs nach unterschiedlichen Verwendungszwecken*, [http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=OCCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.statistik.at%2Fweb\\_de%2FRedirect%2Findex.htm%3FdDocName%3D057712&ei=Qch6UIyHBY7KtAbH3IH4Ag&usg=AFQjCNGGyQjEB9OROXGpGZZfmniGZ7AKuA](http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=OCCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.statistik.at%2Fweb_de%2FRedirect%2Findex.htm%3FdDocName%3D057712&ei=Qch6UIyHBY7KtAbH3IH4Ag&usg=AFQjCNGGyQjEB9OROXGpGZZfmniGZ7AKuA), 14.10.2012.
- BMWA, 2001: *Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren - BMWA 2001*, Technischer Bericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- BMWFJ, 2010: *Energie Strategie Österreich*, <http://www.bmfj.gv.at/EnergieUndBergbau/EnergiestrategieUndEnergiepolitik/Seiten/Energiestrategie.aspx>, 25.10.2012.
- BMWFJ, 2012: *Ökostromverordnung 2012 - ÖSVO 2012*, <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20007993/%C3%96SET-V0%C2%A02012%2c%20Fassung%20vom%2005.10.2012.pdf>, 05.10.2012.
- BMWi, 2011: *Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, Technischer Bericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/6-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, 31.10.2012.
- Braun Windturbinen GmbH, 2011: *Kleinwindanlagen für Haus und Hof*, [http://www.braun-windturbinen.com/medien.html?file=user\\_files/documents/BRAUN%20Windturbinen%20Praesentation.pdf](http://www.braun-windturbinen.com/medien.html?file=user_files/documents/BRAUN%20Windturbinen%20Praesentation.pdf), 02.10.2012.
- Bundeskanzleramt Österreich, 2012a: *KWK Gesetz*, <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20005916/KWK-Gesetz%2c%20Fassung%20vom%2010.10.2012.pdf>, 10.10.2012.
- Bundeskanzleramt Österreich, 2012b: *Wasserrechtsgesetz - Stand 1.10.2012*, [http://www.jusline.at/index.php?cpid=f04b15af72dbf3fdc0772f869d4877ea&law\\_id=208](http://www.jusline.at/index.php?cpid=f04b15af72dbf3fdc0772f869d4877ea&law_id=208), 05.10.2012.

- Bundesland Steiermark, 2001: *Gesetz vom 12. Juni 2001 über das Inverkehrbringen, die Errichtung und den Betrieb von Feuerungsanlagen*, Landesgesetzblatt Nr. 26, [http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrStmk/LRST\\_8210\\_001/LRST\\_8210\\_001.pdf](http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrStmk/LRST_8210_001/LRST_8210_001.pdf), 12.09.2012.
- Bundesland Steiermark, 2005: *Steiermärkisches Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2005 - Stmk ElWOG 2005*, [http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=LrStmk&Dokumentnummer=LRST\\_7800\\_004](http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=LrStmk&Dokumentnummer=LRST_7800_004), 14.10.2012.
- Bundesland Steiermark, 2012a: *Steiermärkisches Baugesetz*, [http://www.jusline.at/Steiermaerkisches\\_Baugesetz\\_%28Stmk.\\_BauG\\_%29\\_Langversion.html](http://www.jusline.at/Steiermaerkisches_Baugesetz_%28Stmk._BauG_%29_Langversion.html), 12.09.2012.
- Bundesland Steiermark, 2012b: *Steiermärkisches Naturschutzgesetz 1976 - NschG 1976*, [http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrStmk/LRST\\_5500\\_002/LRST\\_5500\\_002.pdf](http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrStmk/LRST_5500_002/LRST_5500_002.pdf), 28.09.2012.
- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., 2009: *Kraft-Wärme-Kopplung*, [http://www.bkwk.de/aktuelles/Broschur/Broschur\\_Internet.pdf](http://www.bkwk.de/aktuelles/Broschur/Broschur_Internet.pdf), 20.09.2012.
- Capstone Turbine Corporation, 2011: *Capstone Corporate Brochure*, [http://www.capstoneturbine.com/\\_docs/corporate%20brochure\\_onepage\\_lowres.pdf](http://www.capstoneturbine.com/_docs/corporate%20brochure_onepage_lowres.pdf), 18.09.2012.
- Chapallaz J.M., Mombelli H.P., Renaud A., 1995: *Kleinwasserkraftwerke Wasserturbinen*, Technischer Bericht, Bundesamt für Konjunkturfragen.
- Das Europäische Parlament, 2004: *Richtlinie 2004/8/EG des europäischen Parlaments und des Rates*, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0050:DE:PDF>, 25.10.2012.
- Das Europäische Parlament, 2009: *Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und des Rates*, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:de:PDF>, 25.10.2012.
- Das Land Steiermark, 2009: *Steiermärkisches Raumordnungsgesetz 1974 i.d.g.F.*, [http://www.raumplanung.steiermark.at/cms/dokumente/10231089\\_241551/fcff9628/ROG%202009.pdf](http://www.raumplanung.steiermark.at/cms/dokumente/10231089_241551/fcff9628/ROG%202009.pdf), 28.09.2012.
- Deutscher Verband Flüssiggas e.V., 2011: *Flüssiggas für reinere Luft*, [http://www.dvfg.de/cms/media/dvfg\\_proklimaundgesundheit\\_download.pdf](http://www.dvfg.de/cms/media/dvfg_proklimaundgesundheit_download.pdf), 25.10.2012.
- Dittmann L., 2011: *Status quo und Anforderungen an Technologien dezentraler KWK*, in: *Berliner Energietage 2011*, Berliner Energieagentur GmbH, [http://www.energieagenturen.de/media/file/139.110520\\_Dittmann\\_BEA.pdf](http://www.energieagenturen.de/media/file/139.110520_Dittmann_BEA.pdf), 08.09.2012.

- Draxler P., 2012: *Erfahrungsbericht aus Betreibersicht*, in: *Tag der Wasserkraft 13.3.2012*, [http://www.salzburg.gv.at/06\\_tag\\_d\\_wasserkraft\\_draxler.pdf](http://www.salzburg.gv.at/06_tag_d_wasserkraft_draxler.pdf), 05.10.2012.
- E-Quad Power Systems GmbH, 2010: *Datenblatt C30 Mikrogasturbine*, [http://www.microturbine.de/images/stories/pdf/Datenblatt\\_C30.pdf](http://www.microturbine.de/images/stories/pdf/Datenblatt_C30.pdf), 18.09.2012.
- Edenhofer O., Madruga R.P., Sokona Y., 2012: *Renewable Energy sources and Climate Change Mitigation*, Technischer Bericht, IPCC, [http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC\\_SRREN\\_Full\\_Report.pdf](http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf), 20.10.2012.
- Energie & Management Verlagsgesellschaft mbH, 2011: *Rang und Namen BHKW*, in: *Energie & Management 15.11.2011*, S. 18, <http://www.energiemarkt-medien.de/fileadmin/sonderdruck/92463.Rang.und.Namen.pdf>, 10.09.2012.
- Energie Steiermark AG, 2012: *Firmenhomepage*, <http://www.e-steiermark.com>, 06.06.2012.
- Energieinstitut Vorarlberg, 2004: *Leitfaden Kleinwasserkraftwerke*, Technischer Bericht, Energieinstitut Vorarlberg.
- European Commission, 2010: *Urban Wind Turbines - Technology Review*, Technischer Bericht, Intelligent Energy Europe, [http://www.iee-library.eu/images/all\\_ieelibrary\\_docs/510%20wineur.pdf](http://www.iee-library.eu/images/all_ieelibrary_docs/510%20wineur.pdf), 18.10.2012.
- Fette P., 2008: *Der Stirling Prozess*, <http://www.oocities.org/peterfette/prozess.htm>, 14.09.2012.
- Fraunhofer ISE, 2012: *Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*, Technischer Bericht, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf>, 01.10.2012.
- Frühwald O., Ulrich C., 2007: *Leitfaden zur Errichtung von Windkraftanlagen in der Steiermark*, Technischer Bericht, Landesenergieverein Steiermark, [http://www.lev.at/download/Leitfaden\\_Windkraft\\_2007.pdf](http://www.lev.at/download/Leitfaden_Windkraft_2007.pdf), 02.10.2012.
- Gabler Wirtschaftslexikon, 2012: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/technologiemangement.html>, 13.06.2012.
- Gasch R., Twele J., 2010: *Windkraftanlagen*, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 6. Auflage.
- Granda J.A., 2012: *Entwicklung und Evaluierung zukünftiger Geschäftsmodelle für die dezentrale Erzeugung von Strom und Wärme*, Diplomarbeit, TU Graz.

- Groß B., Guss H., Barth J., 2010: *Energiewirtschaftliche perspektive dezentraler KWK und virtueller Regelkraftwerke*, [http://www.asue.de/cms/upload/inhalte/veranstaltungen/fachveranstaltungen/vortraege/virtuelle-kraftwerke/01\\_dr\\_gross\\_2010-11-23.pdf](http://www.asue.de/cms/upload/inhalte/veranstaltungen/fachveranstaltungen/vortraege/virtuelle-kraftwerke/01_dr_gross_2010-11-23.pdf), 15.09.2012.
- Haas R., Kranzl L., Müller A., Corradini R., Zotz M., Frankl P., Menichetti E., 2008: *Szenarien der gesamtwirtschaftlichen Marktchancen verschiedener Technologielinien im Energiebereich*, Technischer Bericht, Energy Economics Group TU Wien.
- Haas R., Müller A., Prügler W., Rezania R., 2010: *Mikro-KWK*, Technischer Bericht, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. ; Austrian Bioenergy Center.
- Hübner G., Pohl J., Bovet J., Meinel F., Schikora K., Pehnt M., Duscha M., Otter P., Fehrenbach H., Daum J., Wiese R., Schacht V., Tetzlaff V., Brenner G., Kupfer D., Carstensen B., 2010: *Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen*, Technischer Bericht, Martin-Luther-Universität Halle - Wittenberg.
- Hell F., 1985: *Thermische Energietechnik*, VDI Verlag GmbH Düsseldorf.
- Huber C., 2010: *Zukünftige Rahmenbedingungen der europäischen Wasserkraftwirtschaft*, Dissertation, TU Graz.
- IRENA, 2012: *Wind Power*, Technischer Bericht, International Renewable Energy Agency, [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE\\_Technologies\\_Cost\\_Analysis-WIND\\_POWER.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf), 01.10.2012.
- Kalide W., Sigloch H., 2010: *Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen*, Cark Hanser Verlag München, 10., bearbeitete Auflage.
- Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H., 2009: *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag Heidelberg, Dordrecht, London, New York.
- Karl J., 2006: *Dezentrale Energiesysteme*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2., verbesserte Auflage, München, Wien.
- Klebsattel G., K.Schneider, Wirth D., 2000: *Bau einer Kleinwasserkraftanlage mit Durchströmturbine an der Wehratalsperre*, <http://www.ossberger.de/cms/uploads/media/1-1-12.pdf>, 12.10.2012.
- Kornmeier K., 2009: *Determinanten der Endkundenakzeptanz mobilkommunikationsbasierter Zahlungssysteme*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- KPC, 2012a: *Stromerzeugung in Insellage auf Basis erneuerbarer Energieträger*, [http://www.publicconsulting.at/uploads/ufi\\_standardfall\\_infoblatt\\_stromprod.pdf](http://www.publicconsulting.at/uploads/ufi_standardfall_infoblatt_stromprod.pdf), 28.09.2012.

- KPC, 2012b: *Erdgas-Kraft-Wärme-Kopplung für Betriebe*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, [http://www.umweltfoerderung.at/uploads/ufi\\_standardfall\\_infoblatt\\_erdgkwk.pdf](http://www.umweltfoerderung.at/uploads/ufi_standardfall_infoblatt_erdgkwk.pdf), 12.09.2012.
- Lechner C., Seume J., 2010: *Stationäre Gasturbinen*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2., neu bearbeitete Auflage.
- Li T., Tang D., Li Z., Du J., Zhou T., Jia Y., 2012: *Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro-CHP system*, Technischer Bericht, Chinese Academy of Sciences.
- Little A.D., 1985: *Management im Zeitalter der Strategischen Führung*, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden.
- Nedomlel H., 2006: *Mikroturbine*, Nachhaltig Wirtschaften, [http://download.nachhaltigwirtschaften.at/edz\\_pdf/20061019\\_dg-tagung\\_vortrag\\_15\\_nedomlel.pdf](http://download.nachhaltigwirtschaften.at/edz_pdf/20061019_dg-tagung_vortrag_15_nedomlel.pdf), 18.09.2012.
- NHT-Engineering, 2008: *Kaplan-Turbines*, <http://www.newmillshydro.com/products/item/4/kaplan-turbines>, 13.10.2012.
- Obernberger I., 2004: *Biomasse-Verstromung mittels Stirlingmotor - Grundlagen und praktische Erfahrungen*, Technischer Bericht, Bioenergiesysteme GmbH, <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Presentation-VerstromungMittelsStirlingmotor-2004-04-16.pdf>, 17.09.2012.
- Oberschmidt J., 2010: *Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme*, Dissertation, Universität Göttingen.
- OeMAG, 2012: *Investitionszuschuss für Kleinwasserkraftanlagen gemäß §26 Ökostromgesetz*, [http://www.oem-ag.at/oemag/investitionsfoerderung/informationsblatt\\_investitionsfoerderung\\_kleinwasserkraft\\_oesg2012.pdf](http://www.oem-ag.at/oemag/investitionsfoerderung/informationsblatt_investitionsfoerderung_kleinwasserkraft_oesg2012.pdf), 05.10.2012.
- Ortner D., 2012: *Analyse von Anlagen bzw. Anlagenkonzepten dezentraler Systeme für die Erzeugung von Strom und Wärme*, Diplomarbeit, TU Graz.
- Ossberger GmbH + Co, 1999: *Die Original Ossberger Turbine*, [http://www.ossberger.de/cms/uploads/media/1-1-02\\_01.pdf](http://www.ossberger.de/cms/uploads/media/1-1-02_01.pdf), 12.10.2012.
- Ossberger GmbH + Co, 2003a: *Vorteile der Ossberger-Turbine*, [http://www.ossberger.de/cms/fileadmin/content/hydro/ossberger\\_turbine/1-1-03.pdf](http://www.ossberger.de/cms/fileadmin/content/hydro/ossberger_turbine/1-1-03.pdf), 12.10.2012.
- Ossberger GmbH + Co, 2003b: *Gegenüberstellung der Turbinentypen*, <http://www.ossberger.de/cms/uploads/media/5-1-03.pdf>, 12.10.2012.

- Paula M., 2002: *Technologieporträt Kraft-Wärme-Kopplung*, Technischer Bericht, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, [http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw\\_pdf/1034\\_technologieportrait\\_kwk.pdf](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/1034_technologieportrait_kwk.pdf), 14.10.2012.
- Pehnt M., Brischke L.A., Jacobsen S., Reinhardt G., Fehrenbach H., Vogt R., Walter J., 2011: *Erneuerbare Energien - Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft*, Technischer Bericht, BMU.
- Penche C., 2004: *Handbuch zur Planung und Errichtung von Kleinwasserkraftwerken*, Technischer Bericht, ESHA.
- Pokojski M., Horenkamp W., Hube W., Jäger J., Kleimaier M., Kühn W., Nestle D., Pickhan R., Raphael T., Scheffler J., Schulz C., Schwaegerl C., Wielsch D., Witzmann R., 2007: *VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020*, Technischer Bericht, <http://www.vde.com/de/fg/ETG/Pbl/Studien/Documents/MCMS/VDEStudieDezentraleEnergieversorgung2020gesamt.pdf>, 14.10.2012.
- Prechtl M., 2012: *Kleinwasserkraft - Stand und Ausblick*, [http://www.bauernbund.at/fileadmin/Inhaltsdateien/Teilorganisationen/Bauernbund/3.Kleinwasserkraft\\_fertig.pdf](http://www.bauernbund.at/fileadmin/Inhaltsdateien/Teilorganisationen/Bauernbund/3.Kleinwasserkraft_fertig.pdf), 13.10.2012.
- Quaschnig V., 2011: *Regenerative Energiesysteme*, Hanser Verlag München, 7., aktualisierte Auflage.
- Rehart GmbH, 2011: *Wasserkraftanlagen - Energie der Zukunft*, <http://rehart.de/fileadmin/daten/pdf/WasserkraftSept2012Homepage.pdf>, 13.10.2012.
- Ritz-Atro, 2005: *Die Wasserkraftschnecke*, [http://www.aeev.at/presse-berichte/veranstaltungen/copy\\_of\\_seminar-klein-windkraftwerke/wasserschnecke-ritz-atro.pdf](http://www.aeev.at/presse-berichte/veranstaltungen/copy_of_seminar-klein-windkraftwerke/wasserschnecke-ritz-atro.pdf), 13.10.2012.
- Rochlitz L., 2011: *Biomassenutzung aus Sicht des Fraunhofer ISE*, Technischer Bericht, Fraunhofer ISE.
- RWE, 2012: <http://www.rwe.com/web/cms/de/237382/rwe/innovationen/energieanwendung/dezentrale-erzeugung/>, 14.06.2012.
- Schaumann G., Schmitz K.W., 2009: *Kraft-Wärme-Kopplung*, Springer Verlag, 4. Auflage.
- Schawel C., Billing F., 2012: *Top 100 Management Tools*, Gabler Verlag, Wiesbaden, 4. überarbeitete Auflage.
- Schuh G., Klappert S., 2011: *Technologiemanagement*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage.

- Simader G.R., Indinger A., Krawinkler R., Schmidl J., Tretter H., 2008: *Techno-ökonomische Bewertung von Klein- bzw. Kleinstanlagen vorwiegend für die Stromerzeugung*, Technischer Bericht, Austrian Energy Agency.
- Simader G.R., Ritter H., Benke G., Pinter H., Trnka G., 2004: *Mikro- und Mini-KWK-Anlagen in Österreich*, Technischer Bericht, Austrian Energy Agency, <http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/publikationen/broschueren/2004-2006/endbericht-mini-kwk-analgen-2004.pdf>, 09.07.2012.
- Soares C., 2007: *Microturbines*, Butterworth-Heinemann Verlag.
- Spring E., 2009: *Elektrische Maschinen*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage.
- Steffens R., 2004: *Die schematische Darstellung einer Windkraftanlage*, [http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schema\\_windkraftwerk.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schema_windkraftwerk.png), 16.10.2012.
- Steimle F., Lamprichs J., Beck P., 2007: *Stirling-Maschinen-Technik*, C.F.Müller Verlag, Heidelberg, 2., völlig neu bearbeitete Auflage.
- Strebel H., 2007: *Innovations- und Technologiemanagement*, Facultas Verlags- und Buchhandels AG, 2. Auflage.
- Teske S., Zervos A., Lins C., Muth J., 2010: *energy [r]evolution*, Technischer Bericht, European Renewable Energy Council.
- Thek G., Brunner T., Obernberger I., 2010: *Externally with biomass and internally with natural gas fired mirco gas turbine*, Technischer Bericht, TU Graz Institut für Prozess- und Partikeltechnik.
- Thuncke K., Remmele E., 2002: *Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke - Leitfaden*, Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, <http://www.lfu.bayern.de/energie/pflanzenoele/doc/leitfaden.pdf>, 08.07.2012.
- Truschel R., 2012: *MTT Presentation*, Technischer Bericht, Micro Turbine Technology BV.
- Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, 2012: *Prospekt KWK*, Technischer Bericht, <http://www.vaillant.de/stepone2/data/downloads/21/4b/00/Prospekt-KWK.pdf>, 13.09.2012.
- Viessmann; ESS Energie Systeme und Service GmbH, 2010: *Technische Beschreibung Vitobloc 200 EM-70/115*, Technischer Bericht, [http://www.linear.de/onlinebrowser/VIESSMANN/Pdf/DEU/DB%20Erdgas%20Vitobloc%20200%20EM-70\\_115.pdf](http://www.linear.de/onlinebrowser/VIESSMANN/Pdf/DEU/DB%20Erdgas%20Vitobloc%20200%20EM-70_115.pdf), 09.09.2012.
- VKW Kraftwerk GmbH, 2012: *BHKWs von MAT*, <http://www.apritec.de/BHKW/pdf/BHKW%20Prospekt.pdf>, 20.10.2012.

- Vos J., Knoef H., Hauth M., Seifert U., Hofbauer H., Fuchs M., Cusco L., Véchet L., Ivanov I., Buehler R., Oettel E., 2009: *Leitfaden für die sichere und umweltverträgliche Biomassevergasung*, Technischer Bericht, [http://www.gasification-guide.eu/gsg\\_uploads/documenten/D10.Leitfaden\\_Biomassevergasung\\_final\\_April%202010.pdf](http://www.gasification-guide.eu/gsg_uploads/documenten/D10.Leitfaden_Biomassevergasung_final_April%202010.pdf), 26.09.2012.
- VTA Technologie GmbH, 2010: *Planermappe MicroTurbine*, <http://www.vta.cc/userupload/editorupload/files/files/MicroTurbine-Planermappe.pdf>, 19.09.2012.
- Walter Reist Holding AG, 2011: *Steffturbine*, <http://www.steffturbine.com/medias/steffturbine/home/-prospekt-210x297-steffturbine-d.pdf>, 20.10.2012.
- Watter H., 2011: *Regenerative Energiesysteme*, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 2., erweiterte Auflage.
- Zahn E., 1995: *Handbuch Technologiemanagement*, Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart.
- Zeymer M., Rösch S., Klemm M., 2009: *Nutzung fester Brennstoffe in kleintechnischen KWK-Anlagen*, Bundeswettbewerb Bioenergie Regionen, [http://www.bioenergie-regionen.de/fileadmin/bioenergie-regionen/dateien/Vortrag\\_2010-03-09\\_Feste\\_Biomasse\\_in\\_kleintechnischer\\_KWK\\_DBFZ.pdf](http://www.bioenergie-regionen.de/fileadmin/bioenergie-regionen/dateien/Vortrag_2010-03-09_Feste_Biomasse_in_kleintechnischer_KWK_DBFZ.pdf), 26.09.2012.

# **A. Anhang**

## **A.1. Tabellen**

---

<b>Hersteller</b>	<b>elektrischer Wirkungsgrad [%]</b>	<b>thermischer Wirkungsgrad [%]</b>	<b>Gesamtwirkungsgrad [%]</b>
Cleanstgas	28	48	75
SW Energietechnik	30	bis 60	ca. 75
Kuntschar	32	50	ca. 80
Christoph Group	25	55	80

Tabelle A.1.: Wirkungsgrade der Vergasungsanlagen + BHKW

$\rho_{\text{Luft}}$	1,2 kg/m <sup>3</sup>	$P_{\text{th}} = 1/2 * \rho_{\text{Luft}} * A * (v_{\text{nenn}})^3$									
Windrad	Hersteller	d [m]	$v_{\text{nenn}}$ [m/s]	$P_n$ [kW]	$P_{\text{th}}$ [kW]	Wirkungsgrad	Anlaufgeschwindigkeit [m/s]	Abschaltgeschwindigkeit [m/s]	Überlebensgeschwindigkeit [m/s]		
SW 10	Schachner	7,8	11	9,9	38,14	25,96%	3	25	k.A.		
Aerocraft 1	Fortis	2,4	9	1	1,98	50,56%	3	k.A.	40		
SW 350	Superwind	1,22	12,5	0,35	1,37	25,56%	3,5	keine	k.A.		
Antaris 2.5	Braun	3	11	2,5	5,64	44,31%	2,2	k.A.	60		
Antaris 3.5	Braun	4	12	3,5	13,02	26,88%	2,2	k.A.	60		
Windspot 3.5	Windsolar	4,1	11	3,5	10,54	33,21%	3	22	k.A.		
Nova Wind 6	Easy Wind	6	10,6	6	20,19	29,71%	3	k.A.	70		
Windspot 7.5	Windsolar	5,9	11	7,5	21,82	34,37%	3	25	k.A.		
Ecovent 10	Hoffmann	8,4	10	9,9	33,23	29,79%	3	25	50		
Alice 10	Fortis	6,3	13	10	41,07	24,35%	3	25	60		
WD 10	Win Dual	9,8	9	10	32,98	30,32%	2,5	25	60		
SW 5	Schachner	5,6	11	5,25	19,66	26,70%	2,3	25	k.A.		
<b>Durchschnitt</b>						<b>31,81%</b>					

Tabelle A.2.: Anlagendaten horizontale Windkraftturbinen

Rho <sub>Luft</sub>	1,2 kg/m <sup>3</sup>	$P_{th} = 1/2 * \rho_{Luft} * A * (v_{nenn})^3$									
Windrad	Hersteller	Breite [m]	Länge [m]	v <sub>nenn</sub> [m/s]	P <sub>n</sub> [kW]	P <sub>th</sub> [kW]	Wirkungsgrad	Anlaufgeschwindigkeit [m/s]	Abschaltgeschwindigkeit [m/s]	Überlebensgeschwindigkeit [m/s]	
H75	HEOS	15	13,3	14	75	328,46	22,83%	3	16	32	
SFT-V4.2	Silent Future	4	4	11,3	4,2	13,85	30,32%	3	13	50	
SFT-V8-12	Silent Future	6	5,3	11	8	25,4	31,50%	3	15	50	
SFT-V15-20	Silent Future	8	7,5	11	15	47,92	31,30%	3	13	50	
QR 5	Quitrevolution	3	5	11	4,6	11,98	38,40%	5	26	k.A.	
WS600	Windsolar	1,6	1,4	12	0,6	2,32	25,83%	3,5	30	55	
WS1000	Windsolar	2,7	1,8	12	1	5,04	19,85%	3	30	55	
WS4000	Windsolar	3	4,4	12	4	13,69	29,23%	3,5	30	55	
660W	Neuhäuser	1,8	1,5	13	0,66	3,56	18,54%	2,8	keine	k.A.	
Vata H5	Neuhäuser	3,3	5,2	11,4	5	15,25	32,78%	1,5	20	50	
Notos H40	Neuhäuser	12	9	13	40	142,37	28,10%	3,5	20	50	
Durchschnitt:											
							<b>28,06%</b>				

Tabelle A.3.: Anlagendaten vertikale Windkraftturbinen

Firmenname	Strasse	PLZ	Ort	Land	Telefon	Fax	E-Mail	Internet
2G Bio-Energietechnik AG	Benzstrasse 3	48619	Heek	DE	+49 0151174 67981	+49 2568 /934715	<a href="mailto:o.kolata@2-g.de">o.kolata@2-g.de</a>	<a href="http://www.2-g.de">www.2-g.de</a>
2g-home	Siemensstraße 15	48619	Heek	DE	+49 2568 /933004	+49 2568 /933006	<a href="mailto:info@2g-home.de">info@2g-home.de</a>	<a href="http://www.2g-home.de">www.2g-home.de</a>
A-Tron	Otto-Lilienthal-Str. 14	31535	Neustadt a. Rbge.	DE	+49 (0)5032-91294-0	+49 (0)5032-91294-29	<a href="mailto:info@a-tron.de">info@a-tron.de</a>	<a href="http://www.a-tron.de">www.a-tron.de</a>
August Brötje GmbH	August-Brötje-Str. 17	26180	Rastede	DE	+49 4402/80-0	+49 4402/80-583	<a href="mailto:webmaster@broetje.de">webmaster@broetje.de</a>	<a href="http://www.broetje.de">www.broetje.de</a>
Berndt Energys-Aisin	Otto Hahn Straße 6	53501	Grafschaft Gelsdorf	DE	+49 2225913 290	+492225/913298		<a href="http://www.berndt-energys.de">www.berndt-energys.de</a>
Bosch KWK Systeme GmbH	Justus-Kilian-Straße 29-33	35457	Lollar	DE	+49 6406 /91030	+49 6406 /910330	<a href="mailto:bhkw@de.bosch.com">bhkw@de.bosch.com</a>	<a href="http://www.koehler-ziegler.de">www.koehler-ziegler.de</a>
Buderus	Sophienstraße 30-32	35576	Wetzlar	DE	+49 6441 /418-0	+49 6441 /45602	<a href="mailto:info@buderus.de">info@buderus.de</a>	<a href="http://www.buderus.de">www.buderus.de</a>
Button Energy Energiesysteme GmbH	Kleine Feldgasse 26	2281	Raasdorf	AT	02249/28 198 – 0	02249/28 198 – 14	<a href="mailto:office@buttonenergy.at">office@buttonenergy.at</a>	<a href="http://www.buttonenergy.at">www.buttonenergy.at</a>
Capstone Turbine Corporation	21211 Nordhoff Street	CA 91311	Chatsworth	US	+1 818 /734-5300	+1 866 /4-CAPSTONE		<a href="http://capstoneturbine.com">capstoneturbine.com</a>
CERVENY Elektro - Diesel - Gas - Technik GmbH	Stahlstraße 38	4020	Linz	AT	+43 732 /665819	+43 732 /665819-14	<a href="mailto:office@cerveny.at">office@cerveny.at</a>	<a href="http://www.cerveny.at">www.cerveny.at</a>
Cogenon GmbH	Nartenstraße 14a	21079	Hamburg	DE	+49 40 /7699696-0	+49 40 /7699696-96	<a href="mailto:info@cogenon.com">info@cogenon.com</a>	<a href="http://cogenon.com">cogenon.com</a>
COMUNA-metall GmbH	Südstraße 7	32130	Enger	DE	+49 5224 /911970	+49 5224 /911970	<a href="mailto:bhkw@comuna-metall.de">bhkw@comuna-metall.de</a>	<a href="http://www.comuna-metall.de">www.comuna-metall.de</a>
De Dietrich Remeha GmbH	Rheiner Str. 151	48282	Emstetten	DE	+49 180 /3777077	+49 2572 /23-102	<a href="mailto:dennis.ooink@remeha.nl">dennis.ooink@remeha.nl</a>	<a href="http://www.remeha.de">www.remeha.de</a>
EAW Energieanlagenbau GmbH	Oberes Tor 106	98631	Westenfeld	DE	+49 369 /48-48132	+49 36948 /84152	<a href="mailto:info@eaw-energieanlagenbau.de">info@eaw-energieanlagenbau.de</a>	<a href="http://www.eaw-energieanlagenbau.de">www.eaw-energieanlagenbau.de</a>
EC Power	Samsøvej 25	8382	Hinnerup	DK	+45 87 434 100	+45 87 434 101	<a href="mailto:ik@ecpower.dk">ik@ecpower.dk</a>	<a href="http://www.ecpower.dk">www.ecpower.dk</a>
EMC Michael Jacobs	Dieselstraße 31	46539	Dinslaken	DE	+49 2064 /829970		<a href="mailto:info@emc-mj.de">info@emc-mj.de</a>	<a href="http://www.emc-mj.de">www.emc-mj.de</a>
Energiewerkstatt Gesellschaft für rationelle Energie mbH & Co. KG	Bartweg 16	30453	Hannover	DE	+49 511 /94974-0	+49 511 /94974-74	<a href="mailto:kontakt@energiewerkstatt.de">kontakt@energiewerkstatt.de</a>	<a href="http://www.energiewerkstatt.de">www.energiewerkstatt.de</a>
enertec - Kraftwerke GmbH	Trefffurter Weg 11	99974	Mühlhausen	DE	+49 3601 /40685-0	+49 3601 /40685-21	<a href="mailto:info@enertec-kraftwerke.de">info@enertec-kraftwerke.de</a>	<a href="http://www.enertec-kraftwerke.de">www.enertec-kraftwerke.de</a>

Tabelle A.4.: Auszug der Technologielieferantenliste am Beispiel BHKW-VKM

Dokumentation Lieferantenbewertung						
Kriterien	Beschreibung	Messgröße				
		Messgrößenbeschreibung				
Position des Unternehmens am Markt	gemessen wird der relative Marktanteil des Unternehmens im Vergleich zum Marktführer	[%Marktanteil des Unternehmens Marktführer]	laut Quelle, sofern vorhanden			
Größe des Unternehmens	gemessen wird die Mitarbeiterzahl des Unternehmens	[%Marktführer] Anzahl Mitarbeiter [#]	Lieferantenangaben, Presse			
Umsatz des Unternehmens	gemessen wird der Umsatz des Unternehmens	Umsatz [Mio €]	Lieferantenangaben, Presse			
Unternehmensalter	gemessen wird das Alter seit Gründung oder Aufkauf	Alter [Jahre]	Lieferantenangaben, Presse			
Eigentumsverhältnisse	gemessen werden die Eigentumsverhältnisse, insbesondere Eigentumsanteile von großen Unternehmen am betrachteten Anbieter/Lieferanten	[%]	Lieferantenangaben, Presse			
wirtschaftliche Leistungsfähigkeit	abzuschätzen sind die Möglichkeiten zur Vorfinanzierung von Anlagen, der Kapazitäten des Unternehmens, des Know-hows, ...	gut-mittel-schlecht	<table border="1"> <tr> <td><b>gut</b> Umsatz &gt; 100 Mio €, Mitarbeiter &gt; 50</td> <td><b>mittel</b> keine Angaben vorhanden Umsatz &gt; 10 Mio €,</td> <td><b>schlecht</b> Umsatz &lt; 10 Mio €, Mitarbeiter &lt; 15</td> </tr> </table>	<b>gut</b> Umsatz > 100 Mio €, Mitarbeiter > 50	<b>mittel</b> keine Angaben vorhanden Umsatz > 10 Mio €,	<b>schlecht</b> Umsatz < 10 Mio €, Mitarbeiter < 15
<b>gut</b> Umsatz > 100 Mio €, Mitarbeiter > 50	<b>mittel</b> keine Angaben vorhanden Umsatz > 10 Mio €,	<b>schlecht</b> Umsatz < 10 Mio €, Mitarbeiter < 15				
Technologieposition	abzuschätzen ist die technologische Stellung der eingesetzten Technologie am Markt, z.B. hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und des Potentials der Technologie	führend-neutral-veraltet	<table border="1"> <tr> <td><b>führend</b> Patente vorhanden, hohe F+E Aufwendungen hoher Wirkungsgrad, große Lebensdauer</td> <td><b>neutral</b> mittlerer F+E Aufwand, guter Wirkungsgrad, mittlere Lebensdauer, wenn keine Angaben vorhanden</td> <td><b>veraltet</b> keine Patente, geringer F+E Aufwand, schlechter Wirkungsgrad, geringe Lebensdauer</td> </tr> </table>	<b>führend</b> Patente vorhanden, hohe F+E Aufwendungen hoher Wirkungsgrad, große Lebensdauer	<b>neutral</b> mittlerer F+E Aufwand, guter Wirkungsgrad, mittlere Lebensdauer, wenn keine Angaben vorhanden	<b>veraltet</b> keine Patente, geringer F+E Aufwand, schlechter Wirkungsgrad, geringe Lebensdauer
<b>führend</b> Patente vorhanden, hohe F+E Aufwendungen hoher Wirkungsgrad, große Lebensdauer	<b>neutral</b> mittlerer F+E Aufwand, guter Wirkungsgrad, mittlere Lebensdauer, wenn keine Angaben vorhanden	<b>veraltet</b> keine Patente, geringer F+E Aufwand, schlechter Wirkungsgrad, geringe Lebensdauer				
Referenzprojekte (RP)	gemessen werden Anzahl und Umfang der Referenzprojekte im ausgewählten Suchfeld	viele-mittel-wenige	<table border="1"> <tr> <td><b>viele</b> RP &gt; 15</td> <td><b>mittel</b> 15 &lt; RP &gt; 5</td> <td><b>wenige</b> RP &lt; 5</td> </tr> </table>	<b>viele</b> RP > 15	<b>mittel</b> 15 < RP > 5	<b>wenige</b> RP < 5
<b>viele</b> RP > 15	<b>mittel</b> 15 < RP > 5	<b>wenige</b> RP < 5				
Gesamtbewertung	Schlussfolgernde Bewertung aus den vorherigen Kriterien	A-B-C	<table border="1"> <tr> <td><b>A</b> beste Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten</td> <td><b>B</b> durchschnittliche Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten, wenige Angaben vorhanden</td> <td><b>C</b> schlechte Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten, Hersteller insolvent</td> </tr> </table>	<b>A</b> beste Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten	<b>B</b> durchschnittliche Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten, wenige Angaben vorhanden	<b>C</b> schlechte Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten, Hersteller insolvent
<b>A</b> beste Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten	<b>B</b> durchschnittliche Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten, wenige Angaben vorhanden	<b>C</b> schlechte Bewertungen im Vergleich zu anderen Lieferanten, Hersteller insolvent				

Tabelle A.5.: Kriterien für die Lieferantenbewertung und deren Ausprägung