

# 100% Erneuerbare Energie Region Landkreis und Hansestadt Lüneburg

## Potentiale der erneuerbaren Energien



Institut für nachhaltige Chemie und Umweltchemie (INUC)  
Prof. Dr.-Ing. W. Ruck  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg

erstellt von:

Dr. Alexa K. Lutzenberger  
Dipl. Umweltwiss. Rafael Wehrspann  
Bsc. Umweltwiss. Adeline Wagner

Folgende Abschlussarbeiten flossen in diese Studie mit ein:

Beyer, Tobias (2012): Analyse des nachhaltigen Nutzungspotenzials der Forste im Landkreis Lüneburg für eine Energieerzeugung aus fester Biomasse  
Eichhoff, Nehle (2011): „Geothermisches Potenzial zur Stromerzeugung im Landkreis Lüneburg“  
Kastian, Karina (2010): Geothermiepotenziale der Gemeinde Lütjensee in Schleswig-Holstein  
Lutzenberger, Alexa K. (2009): Nachwachsende Rohstoffe zur Substitution von Mineralkraftstoffen – Möglichkeiten und Grenzen –SVH Verlag ISBN 978-3-8381-0076-0  
Morgenroth, Andreas (2011): Potentialanalyse des Repowerings von Windenergieanlagen im Landkreis Lüneburg  
Regenbrecht, Albert (2011): Energiespeicherung in Wasserkanälen- Potenzialanalyse eines Pumpspeicherwerks in Scharnebeck und dessen Beitrag zu einem 100% CO<sub>2</sub>-neutralen und energieautarken Landkreis Lüneburg  
Schüttpelz, Nele Sophie(2012): Energetische Potenziale aus Abfall im Landkreis Lüneburg  
Smith, Benjamin (2012): Energiespeichertechnologie „eE-Methan“ - Eine Potentialanalyse für die Nutzung von „eE- Methan“ als Energiespeicher im Rahmen des Projekts “100% Erneuerbare-Energie-Region Landkreis und Hansestadt Lüneburg”  
Storck, Felix (2010): CO<sub>2</sub>-neutraler und energieautarker Landkreis Lüneburg – Potential durch Windenergienutzung –  
Wagner, Adeline (2011): Ermittlung des Photovoltaikpotenzials der öffentlichen Gebäude in Hansestadt und Landkreis Lüneburg  
Wehrspann, Rafael (2012): „100% Erneuerbare-Energie-Regionen“ Landkreis und Hansestadt Lüneburg: Stromverbrauchsszenarien für die Jahre 2030 und 2050  
Wischnewski, Johannes (2012): Windenergie im Wald – Potential für den 100%-EE Landkreis Lüneburg

Dipl. Umweltwiss. Oliver Opel – Klimaneutraler Campus  
Dr. Thomas Schmidt - Thermobattery

Lüneburg, den 17.09.2012

Quellen der Bilder auf der Titelseite:  
<http://www.widopan.de/news/news-article/der-windpark-in-suedergellersen/>  
<http://www.solarserver.de/news/news-10961.html>  
<http://www.pfi.de/index.php?id=>

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VII</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>X</b>
<b>1. KLIMA- UND ENERGIESTUDIE LANDKREIS UND HANSESTADT LÜNEBURG .....</b>	<b>1</b>
1.1. Klima .....	3
1.2. Ressourcen.....	6
1.3. Energie .....	7
1.4. 100% Regionen .....	9
1.5. Potentiale .....	12
<b>2. UNTERSUCHUNGSRAUM LANDKREIS UND HANSESTADT LÜNEBURG .....</b>	<b>15</b>
2.1. Geographische Lage.....	15
2.2. Bevölkerung .....	16
2.3. Infrastruktur .....	16
2.4. Entwicklung der Energieversorgung .....	16
<b>3. ERNEUERBARE ENERGIEN - GRUNDLAGEN .....</b>	<b>19</b>
3.1. Photovoltaik .....	19
3.1.1. Modularten .....	20
3.1.2. Leistung.....	22
3.2. Wind .....	23
3.2.1. Standortfaktoren für Windenergieanlagen .....	24

3.2.2.	Funktion und Aufbau von WEA .....	26
3.2.3.	Stand der Technik.....	29
3.2.4.	Wind im Wald .....	30
<b>3.3.</b>	<b>Solarthermie .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.</b>	<b>Biomasse.....</b>	<b>34</b>
3.4.1.	Feste Bioenergieträger .....	34
3.4.2.	Gasförmige Bioenergieträger .....	40
3.4.3.	Energiegewinnung aus Biomasse.....	43
3.4.4.	Energiegewinnung aus Abfall.....	44
<b>3.5.</b>	<b>Geothermie .....</b>	<b>49</b>
3.5.1.	Oberflächennahe Geothermie .....	49
3.5.2.	Tiefengeothermie.....	51
3.5.3.	Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie .....	51
<b>3.6.</b>	<b>Speichertechnologien .....</b>	<b>54</b>
3.6.1.	Stromspeichersysteme.....	55
3.6.2.	Wärmespeichersysteme .....	57
<b>4.</b>	<b>ERNEUERBARE ENERGIEN - POTENTIALE.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.</b>	<b>Photovoltaik.....</b>	<b>59</b>
4.1.1.	Rechtliche Grundlagen .....	59
4.1.2.	Methodik.....	60
4.1.3.	Potential öffentliche Gebäude .....	62
4.1.4.	Potential Industrie- und Gewerbegebäude .....	65

4.1.5.	Potential Privathaushalte.....	65
4.1.6.	Konversionsflächennutzung .....	66
4.1.7.	Zusammenfassung Potentiale PV.....	67
<b>4.2.</b>	<b>Wind .....</b>	<b>68</b>
4.2.1.	Rechtliche Grundlagen .....	68
4.2.2.	Abstandsregelungen.....	72
4.2.3.	Windpotential.....	74
<b>4.3.</b>	<b>Wind im Wald .....</b>	<b>80</b>
4.3.1.	Rechtliche Ausschlusskriterien .....	80
4.3.2.	Waldumwandlung .....	82
4.3.3.	Abwägungskriterien .....	84
4.3.4.	Durchführung .....	84
<b>4.4.</b>	<b>Solarthermie .....</b>	<b>85</b>
<b>4.5.</b>	<b>Biomassepotentiale .....</b>	<b>85</b>
<b>4.6.</b>	<b>Biogaspotentiale.....</b>	<b>86</b>
4.6.1.	Wirtschaftsdünger.....	88
4.6.2.	Holzartige Biomasse .....	88
4.6.3.	Abfall.....	92
<b>4.7.</b>	<b>Geothermie .....</b>	<b>101</b>
<b>4.8.</b>	<b>Speicher .....</b>	<b>108</b>
4.8.1.	Wasserkanäle.....	111
4.8.2.	Windmethan.....	115

4.8.3.	Bedeutung und Potentiale der Wärmespeicherung im Aquifer für eine effiziente Nahwärmeversorgung aus Biomasse/Biogas in Lüneburg .....	121
4.8.4.	Potentiale für eine Einbindung weiterer Nahwärmesysteme .....	133
4.8.5.	Thermobattery .....	134
<b>5.</b>	<b>STROM .....</b>	<b>141</b>
<b>5.1.</b>	<b>Methodik.....</b>	<b>141</b>
5.1.1.	Abgrenzung .....	141
5.1.2.	Erfassung und Systematisierung der Datengrundlage.....	142
<b>5.2.</b>	<b>Stromverbrauch nach Sektoren.....</b>	<b>145</b>
5.2.1.	Liegenschaften .....	145
5.2.2.	Private Haushalte.....	148
5.2.3.	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und Industrie .....	149
<b>5.3.</b>	<b>Szenarien.....</b>	<b>150</b>
5.3.1.	Rahmendaten für die Szenarien.....	150
5.3.2.	BUSINESS AS USUAL-Szenario.....	154
5.3.3.	GOOD CASE-Szenario .....	155
5.3.4.	2050 100%-Szenario.....	156
5.3.5.	Private Haushalte.....	156
5.3.6.	GHD .....	158
5.3.7.	Industrie.....	160
5.3.8.	Gesamtstromverbrauch .....	161
<b>6.</b>	<b>WÄRME .....</b>	<b>163</b>

<b>6.1. Methodik</b> .....	<b>163</b>
6.1.1. Abgrenzung .....	163
6.1.2. Erfassung und Systematisierung der Datengrundlage.....	164
<b>6.2. Wärmeverbrauch nach Sektoren</b> .....	<b>164</b>
6.2.1. Liegenschaften .....	165
6.2.2. Private Haushalte.....	167
6.2.3. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und Industrie .....	168
<b>6.3. Szenarien</b> .....	<b>169</b>
6.3.1. Rahmendaten und Annahmen für die Szenarien .....	169
6.3.2. BUSINESS AS USUAL-Szenario.....	169
6.3.3. GOOD CASE-Szenario .....	169
6.3.4. 2050 100%-Szenario.....	170
6.3.5. Private Haushalte.....	170
6.3.6. GHD .....	172
6.3.7. Industrie.....	173
6.3.8. Gesamtwärmeverbrauch.....	175
<b>7. ZUSAMMENFÜHRUNG DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>177</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>186</b>
<b>ANHANG</b> .....	<b>200</b>
<b>Datentabelle zu den Liegenschaftserhebungen</b> .....	<b>200</b>
<b>Bevölkerungsentwicklung 1989-2050</b> .....	<b>247</b>
<b>Angaben der EVU zum sektoralen Energieverbrauch</b> .....	<b>247</b>

<b>PV-Potentialtabelle öffentliche Gebäude LK LG .....</b>	<b>248</b>
<b>Windkarten LK LG .....</b>	<b>281</b>
<b>Windkarten Landkreis Lüneburg .....</b>	<b>282</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Strompreise in Deutschland im Vergleich	2
Abbildung 2 - Globale Treibhausgasemissionen und Aufteilung nach Gasen und Sektoren	4
Abbildung 3 - Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland (Mio. t)	5
Abbildung 4 - Weltweite Ölproduktion historisch und in die Zukunft weitergerechnet. Zur Abschätzung des zukünftigen Bedarfs sind Daten der WEO mit abgebildet.	6
Abbildung 5 - Reaktorunglück in Fukushima	8
Abbildung 6 - Erneuerbare Energie Szenarien	10
Abbildung 7 - 100% Erneuerbare-Energie-Regionen	11
Abbildung 8 - Potentiale	12
Abbildung 9 - Kostenentwicklung der Photovoltaik	13
Abbildung 10 - Landkreis mit Gemeindegrenzen	15
Abbildung 11 - Funktionsweise einer monokristallinen Solarzelle	20
Abbildung 12 - Entwicklung der Solarzellenwirkungsgrade	22
Abbildung 13 - Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht	25
Abbildung 14 - Abhängigkeit Turmhöhe und Windgeschwindigkeiten	26
Abbildung 15 - Aufbau einer Gondel mit Getriebe	27
Abbildung 16 - Aufbau einer Gondel ohne Getriebe	27
Abbildung 17 - Größenwachstum WEA seit 1980	29
Abbildung 18 - Funktionsweise einer Solarthermieanlage Warmwasser- und Heizbedarf	31
Abbildung 19 - Differenz zwischen Heiz- und Brennwert bei unterschiedlichen Wassergehalten	38
Abbildung 20 - Heizwerte verschiedener Kiefer- und Buchensortimente	39
Abbildung 21 - Aufbau und Funktion einer Holzpellettheizung	40
Abbildung 22 - Aufbau und Funktion einer Biogasanlage	41
Abbildung 23 - Kennzahlen typischer KWK-Anlagen	43
Abbildung 24 - Nutzung oberflächennaher Geothermie	50
Abbildung 25 - Nutzung hydrothermalen Geothermie	52
Abbildung 26 - Beispiel: Auswahl und Markierung geeigneter Dachflächen	63
Abbildung 27 - Aufteilung der möglichen Dachnutzung der Dachflächen Lüneburgs (Anzahl; Prozentual)	64
Abbildung 28 - Abstände vor und nach dem Repowering	73
Abbildung 29 - Repowering Jahresertrag in kWh	79
Abbildung 30 - Potentialflächen für WEA im Wald	85
Abbildung 31 - Vier Schritte zur Optimierung der Bio- und Grünabfallverwertung	100
Abbildung 32 - Klimabilanz für die Kompostierung und eine optimierte Vergärung	100
Abbildung 33 - Geologische Übersicht von Niedersachsen und Bremen	102
Abbildung 34 - Gesteinsschichten Ilmenau - Rechts	103
Abbildung 35 - Geologisches Profil	105
Abbildung 36 - Entwicklung der Strom-Überschussmengen für Energiespeicher	109
Abbildung 37 - Zukunftstechnologie eE-Methan	111
Abbildung 38 - Prinzip von Power-to-Gas	115
Abbildung 39 - Systemwirkungsgrad von eE-Methan	116
Abbildung 40 - Schnitt in Nord-Süd-Richtung durch den Standort Scharnhorststraße.	125
Abbildung 41 - Temperaturprofil und Mineralisierung des Speicherwassers	126
Abbildung 42 - Schemazeichnung der Speicherkonzeption und Bohrungsplanung	127
Abbildung 43 - Standorte für die Aquiferspeicherbohrungen auf dem Unicampus	127
Abbildung 44 - Exergetisch sinnvolle Energienutzung im Campussystem	128
Abbildung 45 - Einbindung des Aquiferwärmespeichers in das Campusnetz	129
Abbildung 46 - Bedarfsprofil des Abnehmersystems Campus und Bockelsberg	129
Abbildung 47 - Temperaturen im Heiznetz Campus/Bockelsberg	130
Abbildung 48 - Temperaturen des geothermischen Speicherfluids	130
Abbildung 49 - Rückgewinnungsgrade in Abhängigkeit von den Ein- und Ausspeichertemperaturen	131
Abbildung 50 - Wirtschaftlichkeit des Aquiferspeicher-Systems	132
Abbildung 51 - Methodische Darstellung Thermobatterie	139
Abbildung 52 - Differenz der erhobenen Stromverbräuche zu den Lieferdaten der EVU in Prozent	144
Abbildung 53 - Anteiliger Stromverbrauch der GK 2009 in Prozent	146
Abbildung 54 - Energieeffizienz (Strom) der Liegenschaften	147
Abbildung 55 - Anzahl und Stromverbrauch der Haushalte nach Haushaltsgröße 2009	148

Abbildung 56 - Anteiliger Verbrauch der Wirtschaftssektoren	149
Abbildung 57 - Bevölkerungsentwicklung Landkreis Lüneburg	150
Abbildung 58 - Bevölkerungsentwicklung der Gemeinden und Städte im Landkreis Lüneburg	151
Abbildung 59 - Bevölkerungsstruktur LK LG 2009, 2030	152
Abbildung 60 - Entwicklung der Haushalte nach Haushaltsgröße LK LG	153
Abbildung 61 - Stromverbrauchsentwicklung privater Haushalte 2009-2050	157
Abbildung 62 - Stromverbrauchsentwicklung GHD 2009-2050	159
Abbildung 63 - Stromverbrauchsentwicklung Industrie 2009-2050	160
Abbildung 64 - Pro-Kopf-Verbrauchsentwicklung (Strom) 2009-2050	161
Abbildung 65 - Stromverbrauchsentwicklung Gesamt 2009-2050	162
Abbildung 66 - Anteiliger Wärmeverbrauch der GK 2009 in Prozent	165
Abbildung 67 - Energieeffizienz (Wärme) der Liegenschaften	166
Abbildung 68 - Anzahl und Stromverbrauch der Haushalte nach Haushaltsgröße 2009	167
Abbildung 69 - Anteiliger Verbrauch (Wärme) der Wirtschaftssektoren	168
Abbildung 70 - Wärmeverbrauchsentwicklung nach Sanierungsgrad	169
Abbildung 71 - Wärmeverbrauchsentwicklung privater Haushalte 2009-2050	171
Abbildung 72 - Wärmeverbrauchsentwicklung GHD 2009-2050	173
Abbildung 73 - Wärmeverbrauchsentwicklung Industrie 2009-2050	174
Abbildung 74 - Pro-Kopf-Verbrauchsentwicklung (Wärme) 2009-2050	175
Abbildung 75 - Wärmeverbrauchsentwicklung (gesamt) 2009-2050	176
Abbildung 76 - Installierte Leistung und Jahresstromproduktion Hansestadt und Landkreis Lüneburg	177
Abbildung 77 - Stromerzeugung eE und Jahresstromverbrauch	178
Abbildung 78 - Photovoltaik-Potentiale	179
Abbildung 79 - Windpotentiale	179
Abbildung 80 - Biogaspotentiale	180
Abbildung 81 - Wärmeproduktion aus Erneuerbaren Energien IST	180
Abbildung 82 - Potentieller Wärmeertrag GWh/a	181
Abbildung 83 - Benötigte Jahresproduktion Strom aus eE 2011-2050	182
Abbildung 84 - Benötigte Jahresproduktion Wärme aus EE 2011-2050	184

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 - Zusammenfassung der PV-Potentiale</i>	67
<i>Tabelle 2 - WEA Typ 3,2 MW</i>	76
<i>Tabelle 3 - WEA-Standorte im Landkreis Lüneburg</i>	77
<i>Tabelle 4 - Eigentumsverhältnisse der Wälder im LK LG</i>	90
<i>Tabelle 5 - Ergebnisse der Ist-Analyse</i>	90
<i>Tabelle 6 - Referenz- und Umwelt-Szenario</i>	92
<i>Tabelle 7 - Ausgewählte Abfallarten, ihr Aufkommen in Tonnen</i>	94
<i>Tabelle 8 - Exergieeffizienz und Exergieaufwandsfaktor für verschiedene Wärmeversorgungssysteme</i>	124
<i>Tabelle 9 - Nutzungsprofil Aquiferspeichersystem</i>	131
<i>Tabelle 10 - Kosten Aquiferspeichersystem</i>	133
<i>Tabelle 11 - Speicherarten nach Freisetzung</i>	135
<i>Tabelle 12 - Datensystematisierung für die erhobenen Liegenschaftsverbräuche (Strom)</i>	142
<i>Tabelle 13 - Datenrücklauf der GK-Erhebung</i>	143

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
Art.	Artikel
a-Si	Amorphe Siliziumzelle
BAU	Business as usual
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BbgNatSCHG	Brandenburgisches Naturschutzgesetz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BHD	Brusthöhendurchmesser
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
bspw.	beispielsweise
BtL	Biomass-to-liquid
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
BWE	Bundesverband Windenergie
BWZK	Bauwerkszuordnungskatalog
CdTe	Cadmium-Tellurid
CFK	kohlefaserverstärktem Kunststoff
CIS	Kupfer-Indium-Selenid
COP	coefficient of performance
ct	Cent
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
ebd.	ebenda
EBS	Ersatzbrennstoff
EDLC	Electrochemical Double Layer Capacitor
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
Efm	Erntefestmeter
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnWG	Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung
ESK	Elbe-Seitenkanal
EVDB	Energieversorgung Dahlenburg-Bleckede
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EWD	Elektrizitätswerk Dahlenburg
EWEA	European Wind Energy Association
Fa.	Firma
FFH	Flora-Fauna-Habitat
FGW	Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien
Fm	Festmeter
GC	Good case
Geotis	Geothermisches Informationssystem für Deutschland
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GHD	Gewerbe-Handel-Dienstleistungen
GI	Gewerbe und Industrie
GIS	Geoinformationssystem
gkAöR	gemeinsame kommunale Anstalt des öffentlichen Rechts

GUD	Gas-und-Dampf
GUD-FW	Gas-und-Dampf-Fernwärme
GWh	Gigawattstunden
HASTRA	Hannover-Braunschweigische Stromversorgungsaktiengesellschaft
HD	Handel und Dienstleistungen
HDR	Hot Dry Rock
HEA	Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung
i. d. R.	in der Regel
IHK	Industrie- und Handelskammer
IKT	Informations- und Kommunikationsgeräte
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IWET	Ingenieurwerkstatt Energietechnik
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KUP	Kurzumtriebsplantagen
KWB	Kraftwerk Bleckede Ludolf Stamer GmbH
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kWp	Kilowatt-Peak
LK	Landkreis
LROP	Landesraumordnungsprogramm
LSKN	Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Nds.
MBA	mechanisch-biologische Abfallbehandlung
MBS	mechanisch-biologische Stabilisierung
MBV	mechanisch-biologische Vorbehandlung
MPS	mechanisch-physikalische Stabilisierung
MW	Megawatt
NBauO	Niedersächsische Bauordnung
Nds.	Niedersachsen
NDSchG	Niedersächsisches Denkmalschutzgesetz
NEbltBRG	Gesetz über das Biosphärenreservat „Niedersächsische Elbtal- aue
NGF	Nettogrundfläche
NIW	Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung
NN	Normal Null
No.	Nummer
NWaldLG	Niedersächsisches Gesetz über den Wald und die Land- schaftsordnung
OVG	Oberverwaltungsgericht
PBL	Planetary Boundary Layer
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification
PR	Performance Ratio
Preussag	Preußische Elektrizitäts-Aktiengesellschaft
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PTG	Power-to-Gas
PV	Photovoltaik
Rm	Raummeter
RME	Rapsöl-Methylester
ROG	Raumordnungsgesetz
RROP	Regionales Raumordnungsprogramm
SG	Samtgemeinde
SMES	Supraleitende Spulen
SvB	sozialversicherungspflichtig Beschäftigte
TA	Technische Anleitung

TEV	Thermische Ersatzbrennstoff-Verwertungsanlage
u.a.	und andere
UBA	Umweltbundesamt
UM	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
Vlh.	Volllaststunden
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
WEA	Windenergieanlage
WZ	Wirtschaftszweig
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

# 1. Klima- und Energiestudie Landkreis und Hansestadt Lüneburg

Diese Studie wurde im Jahr 2011 vom Landkreis Lüneburg und der Hansestadt Lüneburg in Auftrag gegeben. Ziel dieser Untersuchung ist festzustellen, ob sich der Landkreis und die Hansestadt Lüneburg vollständig mit Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien, welche aus der betrachteten Region stammen, versorgen können. Damit bringen sich Landkreis und Hansestadt Lüneburg in die aktuellen Prozesse der Transformation der Energiebereitstellung ein. Nach dem Atomunfall in Fukushima hat die Bundesrepublik beschlossen endgültig aus der Atomenergie auszusteigen. Dadurch und durch die beschlossenen Ziele zur Verringerung der Treibhausgase gewinnen die erneuerbaren Energien stark an Bedeutung.

Die Transformation des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Energien besteht letztendlich aus mehreren transformativen Prozessen. Zum einen wird ein stark nachfrageorientiertes System zur Versorgung mit Strom umgestellt auf ein fluktuierendes Angebotssystem, das durch Speichersysteme, intelligente Netze und einem ausgefeilten Lastmanagement zukünftig den Verbrauch mit dem Angebot synchronisieren muss. Zentrale Strukturen, wie die der Atom- und Kohlekraftwerke, werden ersetzt durch eine große Anzahl dezentraler Anlagen. Damit sind die Netze, die konventionell einer Baumstruktur ähneln, von einem Umbau betroffen, da der Konsument auch gleichzeitig zum Produzenten wird, es entsteht eine Prosumentenstruktur. Diese Umstellungen ziehen gleichzeitig eine Änderung der Kapitalströme in der Energiebranche nach sich. Erneuerbare Energieanlagen wurden bisher zu einem großen Teil aus Privatkapital finanziert, so dass auch die Gewinne aus der Energieerzeugung wieder zu den Privatinvestoren fließen und somit in den Regionen neue Wertschöpfungsketten entstehen. Diese entstehenden Wertschöpfungsketten stärken vor allem die ländlichen Räume und strukturschwachen Regionen. Die begonnene Energiewende ist Teil der notwendigen Transformation in eine energie- und ressourcensparende zukünftige nachhaltige Gesellschaft.

Immer wieder in der Diskussion stehen die Effekte der Energiewende auf den Strompreis. Der Anteil der EEG-Umlage ist und wird zukünftig auch weiter ansteigen, jedoch werden die Kosten des EEG vor allem auf Haushaltskunden umgelegt, während Industriebetriebe mit hohen Stromverbräuchen kaum Mehrkosten durch das EEG haben. Die Aussage, dass erneuerbare Energien den Industriestandort Deutschland und auch die heimische Industrie in den Regionen gefährdet, ist nicht richtig. Die erneuerbaren Energien haben mittlerweile

durch den Merit-Order-Effekt eine dämpfende Wirkung auf die Strompreisentwicklung. Dieser Effekt wird sich zukünftig noch deutlich verstärken.



Abbildung 1 - Strompreise in Deutschland im Vergleich

In dieser Studie werden zur Bestimmung des Strom und Wärmebedarfs der Zukunft Szenarien entwickelt. Diese Szenarien sind mögliche Optionen nach derzeitiger Datenlage, und verwendeten Prognosen. Ereignisse wie zum Beispiel die Ansiedelung von Großindustrie, einer deutlichen Veränderung der Bevölkerungsdaten oder Auswirkungen durch Veränderungen in Bundes- und Landespolitik sind nicht vorhersehbar und können deutliche Abweichungen zu den hier präsentierten Ergebnissen hervorrufen.

Diese Studie berechnet sowohl die Verbräuche als auch die energetischen Potentiale immer in Form einer Jahresbilanz. Mehrverbräuche und Überproduktionen durch die Fluktuation der erneuerbaren Energiebereitstellung können so nicht dargestellt werden. Hierzu wäre eine Spezifizierung durch eine Simulation der Lastgänge mit hoher zeitlicher Auflösung notwendig, welche im Rahmen dieser Studie nicht leistbar war. Ebenso ist dadurch bedingt eine Berechnung der Netzkapazitäten und damit die Frage des Ausbaus der Netze für die Zukunft nicht Bestandteil dieser Studie.

Ein Fokus der Studie liegt auf der Betrachtung der kommunalen Liegenschaften in Hansestadt und Landkreis. Hier wurden die Energieverbräuche spezifiziert, sowohl regional als auch nach Trägern unterschieden und mit heute empfohlenen vorgeschriebenen Standards

verglichen. Ebenso wurde das Potential für Photovoltaik bzw. Solarthermie für den öffentlichen Gebäudesektor gesondert erhoben und berechnet.

Der Bereich Verkehr wurde in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet. Da der Landkreis Lüneburg durch die Autobahn und die Bundesstraßen bedingt einen hohen Anteil an Durchgangsverkehr aufweist, ist die Berechnung eines Einsparpotentials sehr schwierig.

Der Landkreis- und die Hansestadt Lüneburg haben jetzt schon einen weit über den Bundesdurchschnitt liegenden Anteil von erneuerbarer Energie aus der Region vor allem im Stromsektor. Dies ist eine hervorragende Ausgangsposition, um eine 100% erneuerbare Energie Versorgung zu erreichen.

## 1.1. Klima

Als Klimagase werden Verbindungen bezeichnet, deren Wirkung in der Atmosphäre zu Veränderungen des Klimas auf der Erde führt. Bei den vom Menschen emittierten Gasen sind die Hauptverursacher Kohlendioxid, Methan und Distickstoffmonoxid (Lachgas), die auch als Treibhausgase bezeichnet werden. Weiter gehören fluorierte Kohlenwasserstoffe zu den klimaschädlichen Gasen, diese werden aber in dieser Studie nicht weiter behandelt.

Die Wirkung der Gase auf das Klima erfolgt in der Regel in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Die Bestimmung der Koeffizienten verschiedener Treibhausgase zur Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente erfolgt aufgrund ihres Potentials das Klima zu ändern. Dieses Global Warming Potential wird vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definiert und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen angepasst (Von Witzke et al., 2007). Zurzeit wird Lachgas mit 296 und Methan mit dem Faktor 23 gegenüber Kohlendioxid bewertet.

Kohlendioxid ist mit einem Anteil von über  $\frac{3}{4}$  der global ausgestoßenen Klimagase einer der wichtigsten Verursacher der Klimaänderung unter den Treibhausgasen. Methan und Lachgas sind zusammen für über  $\frac{1}{5}$  des globalen Ausstoßes von Treibhausgasen verantwortlich.

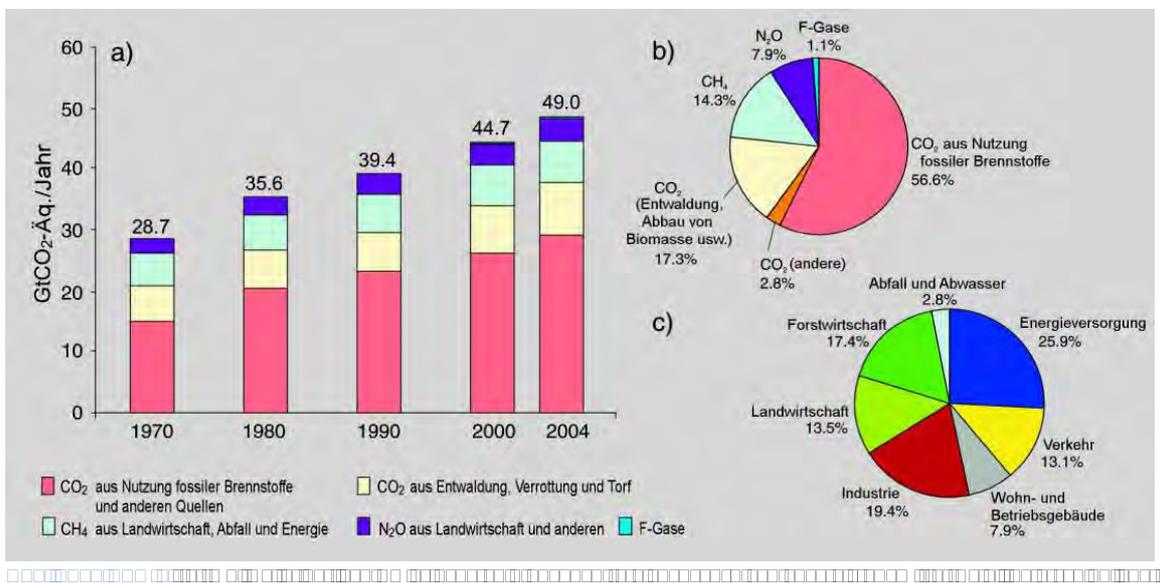
Deutschland als Industrienation emittiert mehr Kohlendioxid, geringfügig weniger Lachgas, aber deutlich weniger Methan als der globale Durchschnitt.

Der Ausstoß dieser Klimagase, die über die natürlichen Emissionen hinausgehen, wird als anthropogen bezeichnet, vom Menschen verursacht. Klimagase bewirken durch die Zunahme ihrer Konzentration in der Atmosphäre eine Veränderung der Zusammensetzung derselben, sodass als Folge die durchschnittliche Temperatur auf der Erde ansteigt.

Dieser Temperaturanstieg lässt sich durch Messungen der globalen Luft- und Wassertemperatur zeigen, aber auch die Reduzierung der globalen Schnee- und Eismassen und dadurch bedingt das Ansteigen des Meeresspiegels sind überprüfbare Ereignisse (Benndorf, 2008).

Im 20. Jahrhundert wurde ein Temperaturanstieg von 0,7°C gemessen (BMELV, 2005), zurzeit werden Steigerungen des Temperaturmittels von 0,2°C pro Jahrzehnt festgestellt. Die Folgen des Klimawandels sind nicht absehbar, allerdings berechnet die Weltbank die Folgen des Klimawandels mit 5-20% des globalen Bruttoinlandsproduktes, was eine Summe von bis zu 5,5 Billionen € bedeuten könnte, von Hungersnöten und Trinkwasserknappheit in vielen Regionen der Erde ganz zu schweigen (Moritz, 2008). Angestrebt wird nun die Beschränkung des globalen Temperaturanstieges auf 2°C in diesem Jahrhundert bezogen auf das vorindustrielle Niveau. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die globalen Klimagasemissionen bis zum Jahr 2050 in Bezug auf das Jahr 2000 mindestens halbiert werden (Benndorf, 2008).

Allerdings steigt der Ausstoß von Treibhausgasen weltweit kontinuierlich an. Insofern müssen alle treibhausgasverursachenden Bereiche in den nächsten Jahren deutliche Maßnahmen zur Reduzierung des Ausstoßes treffen.

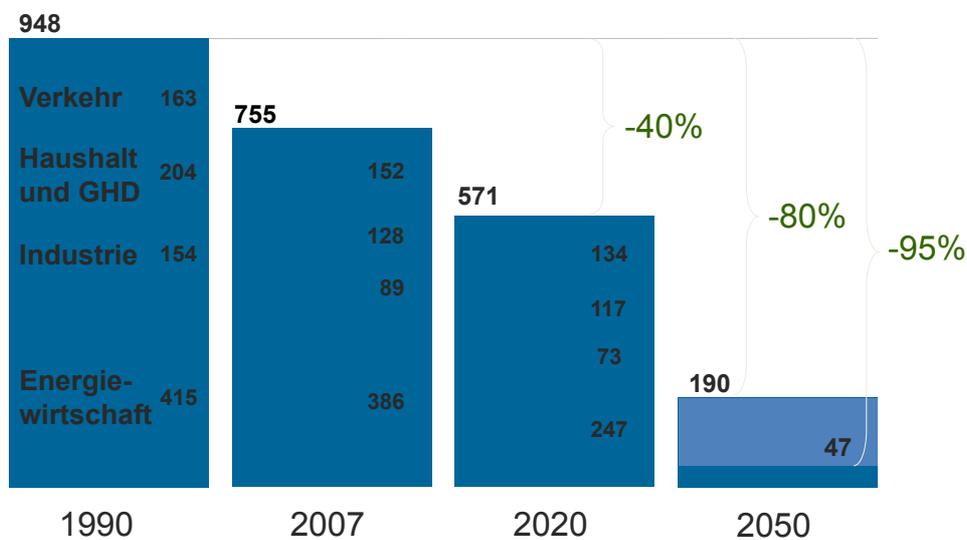


**Abbildung 2 - Globale Treibhausgasemissionen und Aufteilung nach Gasen und Sektoren**  
 Quelle: IPCC, 2007

Der größte Verursacher von Treibhausgasemissionen ist weltweit betrachtet die Energiebereitstellung.

In der Politik wurde eine Reihe von Verträgen zur Reduktion des Ausstoßes der Treibhausgase geschlossen. Die aktuelle Beschlußlage sieht vor, das in der EU bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 20% gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden müssen. Deutschland hat sich darüber hinaus auf eine Senkung um 40% verpflichtet.

Leider ergaben sich auf den letzten Klimakonferenzen keine nennenswerten Fortschritte in Richtung einer globalen Klimaschutzpolitik. Einzelne Länder sind auch aus dem Kyoto Vertrag ausgestiegen.



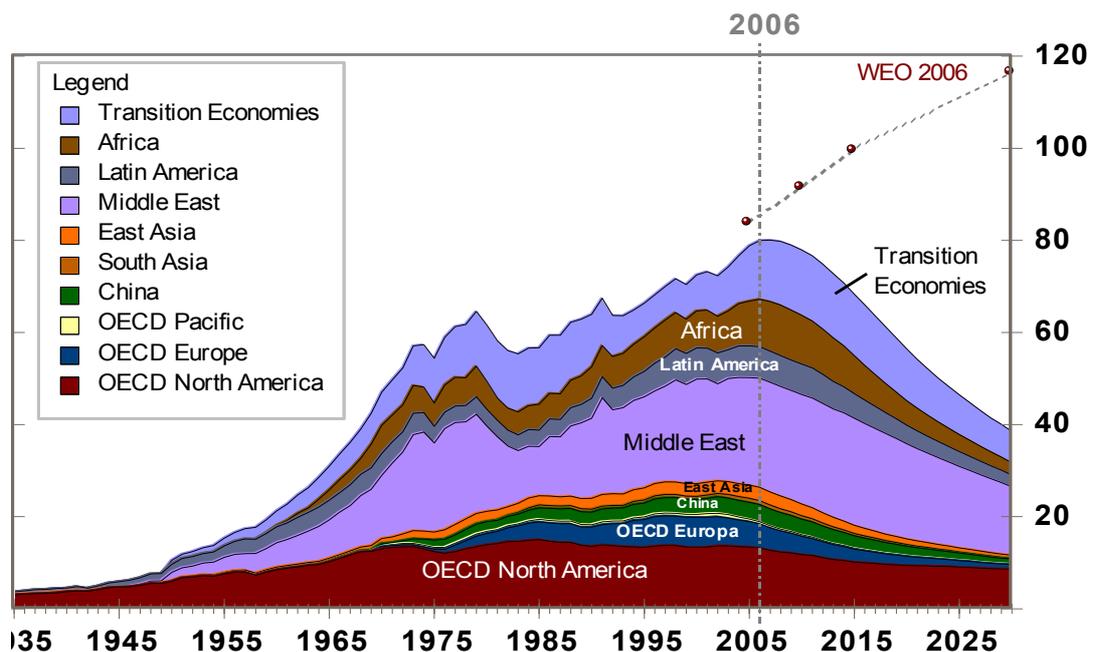
**Abbildung 3 - Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland (Mio. t)**  
 Quelle: Lehmann, Harry Vorlesung Lüneburg 2011

Deutschland kann, wie das Umweltbundesamt und andere Studien aufzeigen, bis 2050 etwa 95% der Treibhausgasemissionen aus der Energieerzeugung einsparen. Vor allem die Umstellung der Energieerzeugung auf regenerative Energie leistet dazu den Hauptbeitrag.

Auch im Landkreis und der Hansestadt Lüneburg können die energiebedingten Emissionen massiv gesenkt werden. Eine große Herausforderung besteht im Bereich Verkehr. Da der Landkreis Lüneburg durch Autobahnen, Bundesstraßen und Eisenbahn im Grunde eine „Transitregion“ ist, können die Verkehrsemissionen aus eigener Kraft nur wenig gesenkt werden. Hier ist entscheidend, welche Technologien sich aus der Wissenschaft heraus entwickeln und am Markt umgesetzt werden. Auch bundespolitische Instrumente und Maßnahmen werden dies beeinflussen und sind derzeit nicht absehbar.

## 1.2. Ressourcen

Die Abkehr von der Nutzung von endlichen Ressourcen ist ein weiterer zentraler Punkt der Energiewende. Die Abhängigkeit unserer Wirtschaftssysteme von Ressourcen wie Erdöl, Erdgas, Kohle und anderen Rohstoffen ist immens. Mittlerweile ist international anerkannt, dass zum Beispiel bei Erdöl die Reserven und Ressourcen auf dieser Welt begrenzt sind.



**Abbildung 4 – Weltweite Ölproduktion historisch und in die Zukunft weitergerechnet. Zur Abschätzung des zukünftigen Bedarfs sind Daten der WEO mit abgebildet.**  
 Quelle: Energy Watch Group - LBST Munich

Dies zeigt sich nicht zuletzt in der Entwicklung der Ölpreise in den vergangenen Jahren. Allerdings sind andere Rohstoffe weit schneller betroffen als Öl. Die Diskussion der vergangenen Jahre um Vorkommen und Häufigkeit der seltenen Erden zeigt dies dramatisch. Aber auch Wasser und Fläche sind begrenzte Ressourcen. Die politischen Ebenen haben deswegen dem Thema Ressourcen Gewicht gegeben. So ist in dem Strategiepapier Europa 2020 der Europäischen Kommission das Thema Ressourceneffizienz eines der sieben Leitthemen. Die Bundesregierung erarbeitete im letzten Jahr die nationale Ressourcenstrategie ProGress. Der wissenschaftliche Beirat für globale Umweltfragen stellt in seinem letzten Gutachten „Die große Transformation“ die Ressourceneffizienz ebenfalls in den Mittelpunkt und auch die Enquete-Kommission Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität sieht den Ressourcenverbrauch kritisch.

### 1.3. Energie

Unsere Wirtschaft und auch unser Lebensstil sind von bereitgestellter Energie in Form von Strom, Wärme/Kälte und Treibstoffen für den Bereich Mobilität abhängig. In den letzten beiden Jahrhunderten begann die systematische Nutzung und Erschließung von fossilen Energiequellen wie Steinkohle, Braunkohle, Erdöl und Erdgas. Vorteil dieser Energieträger war die scheinbar große Verfügbarkeit, relativ hohe Energiedichte, vor allem bei Erdöl und die Fähigkeit zu Transport und Lagerung. Die billige Energie führte zu einer rasanten Umstellung der Wirtschaft auf eine energieintensive Produktion, die durch die damit mögliche Industrialisierung gleichzeitig den Faktor Mensch aus der Produktion verdrängte. Güter und Waren wurden günstiger, der Wohlstand materialisierte sich dadurch zunehmend bis heute. Energie galt aber auch in der Gesellschaft als billig und allseits verfügbar. Die Sicherheit der Energieversorgung ist heute eine zentral definierte Aufgabe der Politik.

Die Nachteile der auf fossilen Energieträgern beruhenden Energieversorgung sind vielfach. Umweltschäden entstehen durch die Förderung, Transport und Lagerung. Gerade die Nutzung von Erdöl hat in Vergangenheit und Gegenwart immer wieder große Umweltkatastrophen hervorgerufen, genauso wie der Transport mit Öltankern oder über Land mit Pipelines. Aber auch die Förderung von Kohle zieht massive Umweltzerstörungen nach sich, wie zum Beispiel der Braunkohletagebau. CO<sub>2</sub>-Emissionen wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben führen zu massiven Änderungen unserer Lebensbedingungen. Die Nutzung der Kernenergie ist risikobehaftet, wie jüngst Fukushima deutlich zeigte, die durch Unfälle entstehenden Schäden nicht abseh- und bezifferbar. Auch die Endlagerung ist weltweit noch nicht zufriedenstellend gehandhabt.



**Abbildung 5 - Reaktorunglück in Fukushima**

Erneuerbare Energien haben dagegen deutlich weniger Umweltauswirkungen. Natürlich werden zur Produktion der Anlagen Ressourcen, wie Rohstoffe, Energie und Wasser verbraucht. Auch werden CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion verursacht. Aber die Anlagen benötigen im Gegensatz zu fossilen Kraftwerken im Betrieb keine weiteren Ressourcen. Als Beispiel sind hier vor allem Wind und PV genannt, wo letztendlich auch die Recyclingketten teilweise schon bestehen beziehungsweise erschlossen werden.

Die Nutzung von Biomasse in Bioenergieanlagen hingegen verbraucht auch im laufenden Betrieb Ressourcen. Allerdings sind diese nachwachsend und damit weitestgehend CO<sub>2</sub>-neutral. Biomasse stammt jedoch von der Fläche, welche ebenfalls eine begrenzte Ressource darstellt. In Anbetracht verschiedener Faktoren die auf die Nachfrage und die Produktion von Biomasse einwirken, können langfristig Konkurrenzsituationen mit anderen Nutzungszweigen entstehen. Daher sollte in langen Zeiträumen der Schwerpunkt der Biomassenutzung auf Abfall- und Reststoffen liegen. Hier ist vor allem an die Verwertung von Wirtschaftsdüngern und Gülle gedacht, sowie an biologische Abfälle aus Haushalten und Lebensmittelproduktion sowie Einsatzstoffe von nicht zur Nahrungsmittelproduktion geeigneten Flächen, wie Landschaftspflegegut oder Straßenbegleitgrün. Feste Biomasse sollte möglichst aus nachhaltig bewirtschafteten Forsten stammen, auch hier liegt der Fokus auf der regionalen Nutzung. Biokraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen unterliegen derselben Einschränkung wie die anderen Biomassepfade. Eine Kompensation des derzeitigen fossilen Kraftstoffangebotes nur durch Biokraftstoffe ist nicht möglich. Allerdings können Biokraftstoffe nach derzeitigem Stand der Technik durchaus sinnvoll eingesetzt werden in Land- und

Forstwirtschaft, bei kommunalen Fahrzeugparks und begrenzt auch im öffentlichen Nahverkehr.

Während die oberflächennahe Geothermie schon seit ca. 40 Jahren Einzug in Planung und Durchführung aber auch Renovierung von Gebäuden genommen hat und damit zu einer bewährten und bekannten Technik herangereift ist, ist die Tiefengeothermie bis auf einige Pilotanlagen in Deutschland nicht weit verbreitet. Die norddeutsche Tiefebene besitzt aufgrund ihrer geologischen Struktur große Potentiale für die Gewinnung von Erdwärme mit Hilfe der hydrothermalen Geothermie. Die Verstromung dieser ist allerdings nicht überall möglich. Auch in Lüneburg werden die möglichen Temperaturen voraussichtlich nicht für eine Verstromung reichen. Aufgrund dessen und auch den Kosten ist dieses Verfahren in dieser Studie nicht näher betrachtet worden.

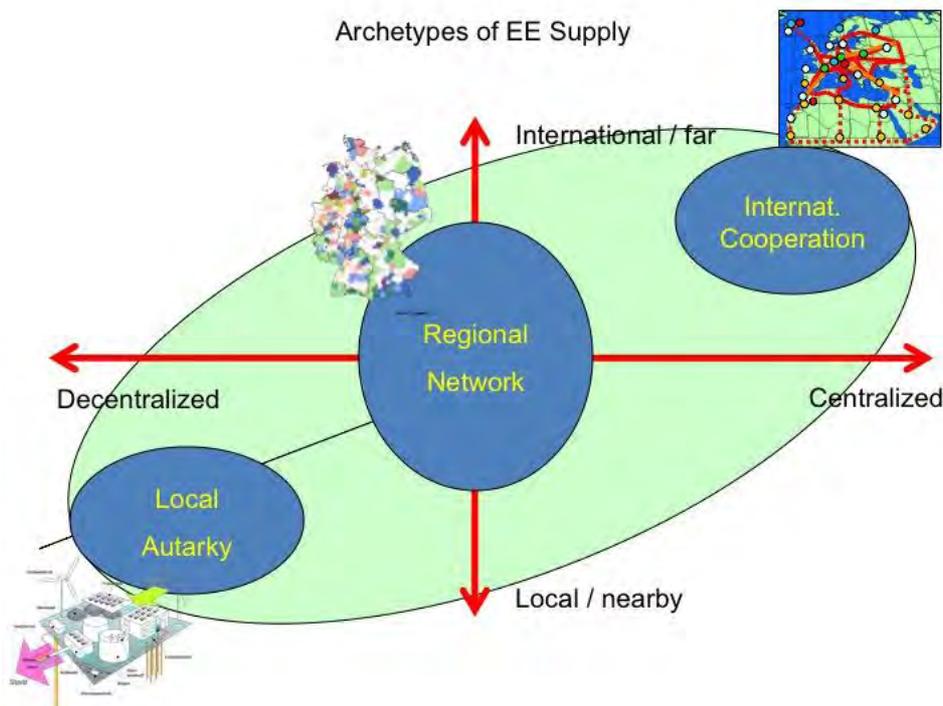
Allerdings zeigt diese Studie, dass die Potentiale in der Region ausreichen, um den Landkreis und die Hansestadt mit erneuerbaren Energie in Strom und Wärme/Kälte zu versorgen. Der Sektor Verkehr ist hier nicht eingerechnet worden.

#### **1.4. 100% Regionen**

Eine 100% Versorgung mit erneuerbaren Energien ist prinzipiell auf verschiedenen Ausbaumöglichkeiten zu erreichen. Dabei reicht die Bandbreite von internationalen Systemen bis zu lokaler Autarkie.

Eine internationale Kooperation mit zentralen Energieerzeugungsanlagen würde bspw. Strom aus solarer Erzeugung in Nordafrika, Spanien und den südeuropäischen Ländern kombinieren mit Windenergie von der Atlantikküste und Speicherung in Pumpwasserspeichern in den alpinen Regionen. Ein solches System benötigt einen massiven Netzausbau im Hochspannungsbereich und ein zentralisiertes Lastmanagement.

Lokale Autarkie bildet im Gegensatz zum internationalen Szenario die kleinste Einheit. Hier geht es um die Autarkie bis hin zum einzelnen Gebäude. Damit steht die absolute Dezentralität im Vordergrund, was bedeutet, dass auch Speichermöglichkeiten für Strom und Wärme in diesem kleinen Maßstab bereitstehen müssten.



**Abbildung 6 - Erneuerbare Energie Szenarien**  
Quelle: Lehmann, Harry Vorlesung Lüneburg 2011

Zwischen diesen beiden Szenarien liegt das Szenario der Regionen. Hier streben Regionen wie zum Beispiel Landkreise danach ihre Energieversorgung möglichst regional zu erreichen. Dabei werden die energetischen Potentiale benutzt und je nach Struktur der Region in kleineren und mittleren dezentralen Anlagen produziert. Städte beziehen dabei ihre umliegenden Regionen mit ein, so dass auch die Städte mit erneuerbaren Energien versorgt werden können. Insofern entspricht das Regionenmodell einer Mischung von zentralen und dezentralen Anlagen.

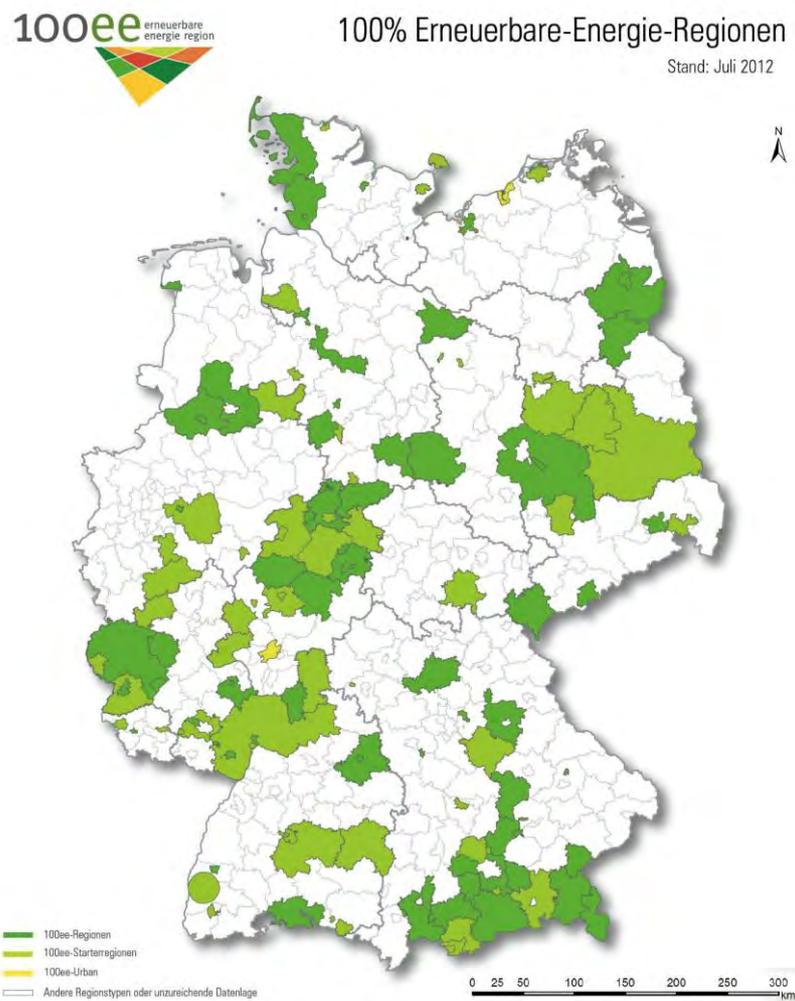
Als 100ee Regionen werden Regionen bezeichnet, die durch den Einsatz innovativer Technologien, der Schaffung neuartiger Organisations- und Kooperationsformen regionale Handlungsspielräume erweitern. Dabei werden sie durch einen breiten Konsens der Bevölkerung bei der Umsetzung der Energiewende unterstützt. Wichtig sind außerdem umfangreiche planerische und konzeptionelle Vorarbeiten und der Einsatz erprobter Instrumente in der Öffentlichkeitsarbeit. Die energetische Versorgung der Region stammt bilanziell überdurchschnittlich aus erneuerbaren Energien (DENET, 2012).

100ee Starterregionen sind dagegen Regionen, die sich in der Vorbereitung auf dem Weg zu 100ee Region befinden. Sie können dabei auf die Erfahrungen der 100ee Regionen zurückgreifen. Erste planerische und konzeptionelle Vorarbeiten werden erstellt und unterstützt von

engagierten Akteuren aus allen Bereichen der Gesellschaft. Die Energieversorgung erfolgt schon zum Teil aus erneuerbaren Energien (DENET, 2012).

Ziel aller 100ee Regionen ist die vollständige Deckung ihres Energiebedarfs aus der Region. Die vorhandenen Potentiale werden nachhaltig, akzeptiert und wirtschaftlich effizient genutzt. Damit tragen die erneuerbaren Energien nachhaltig, sicher und umweltverträglich zur regionalen Wertschöpfung bei (DENET, 2009).

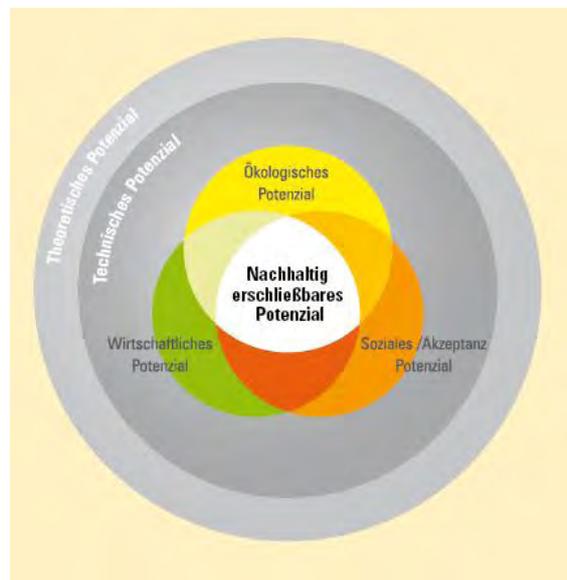
Mittlerweile gibt es in Deutschland 74 100ee Regionen und 56 100ee-Starterregionen. Insgesamt leben in diesen 132 Regionen ca. 19.7 Mio. Einwohner, die Gesamtfläche beträgt 101.989 km<sup>2</sup> (DENET, 2012).



**Abbildung 7 - 100% Erneuerbare-Energie-Regionen**  
Quelle: <http://www.100-ee.de/>

## 1.5. Potentiale

Potentiale werden unterschieden in theoretische und technische Potentiale. Das theoretische Potential beschreibt dabei die gesamte theoretisch nutzbare Menge. Das theoretische Potential der erneuerbaren Energien ist weltweit etwa zehntausend mal so groß wie der Energieverbrauch der Menschheit. Eine erste Eingrenzung des theoretischen Potentials erfolgt durch die Möglichkeiten der Technik, also der Ermittlung des technischen Potentials. Es beschreibt die Menge des theoretischen Potentials, welche mit dem derzeitigen Stand der Technik nutzbar ist. Das technische Potential vergrößert sich mit jeglichen Innovationen und technologischen Entwicklungen. Damit ist das technische Potential einer Dynamik in Abhängigkeit von technologischem Fortschritt unterworfen.



**Abbildung 8 - Potentiale**  
Quelle: DENET, 2008

Eine weitere Eingrenzung des theoretischen Potentials erfolgt durch die Bereiche Ökonomie, Soziales/Akzeptanz und die Ökologie.

Das ökologische Potential wird durch den Ausschluss beziehungsweise die Minimierung von Umweltschäden durch den Einsatz von erneuerbaren Energien gebildet. Weitere Begrenzungen stellen Natur- und Landschafts- und Vogelschutzgebiete dar. Bspw. sind Abstandsregelungen bei Windkraftanlagen zu Biotopen u.a. eine Eingrenzungsform des ökologischen Potentials. Aber auch die Nutzung von biotischen Ressourcen, wie Land und Wasser begrenzen die Potentiale der erneuerbaren Energien. Von den drei Bereichen, welche das

nachhaltig erschließbare Potential bilden, ist das ökologische Potential das am wenigsten dynamische.

Die soziale Akzeptanz steht immer wieder im Vordergrund bei der Planung von erneuerbaren Energieanlagen. Gefühlte Beeinträchtigungen und auch Emotionen wie Ängste und Unsicherheit sind ernst zu nehmen und die betroffenen Beteiligten sind in offene Planungsprozesse möglichst von Anfang einzubinden. Nichts destotrotz erfordert die Energiewende, die Bereitschaft aller Bürger, sich mit der Thematik auseinander zu setzen und auch gewisse Beeinträchtigungen zu tragen. Gesetzliche Regelungen wie wiederum Abstandsregelungen bei Wind zu Siedlungen und Ortschaften tragen der Problematik Rechnung. Die soziale Akzeptanz ist aber auch abhängig vom technischen Fortschritt, gerade die Reduzierung der Lautstärke von Windenergieanlagen durch eine verbesserte aerodynamische Form der Flügel kann eine Akzeptanzerhöhung mit sich bringen.

Das ökonomische Potential wird im Bereich erneuerbare Energien stark von der bundespolitischen Gesetzgebung bestimmt. Hier ist vor allem das Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) bestimmend für die Investitionssicherheit durch die garantierte Einspeisevergütung durch die Umlagefinanzierung des EEG. Das EEG ist keine Subvention des Bundes, hier wird lediglich die Vergütung pro kWh eingespeistem Strom durch Umlage der Kosten auf die Verbraucher festgesetzt und garantiert.



**Abbildung 9 - Kostenentwicklung der Photovoltaik**

Gleichzeitig sinken die Kosten pro kW installierte Leistung kontinuierlich, wie obige Abbildung am Beispiel der Photovoltaik zeigt. Dies betrifft ebenso Windkraft aber auch Anlagen für die energetische Nutzung von Biomasse. Weiter ist das ökonomische Potential stark abhängig von den Kosten fossiler Energieträger, hier sei vor allem der Ölpreis genannt, und

damit in Abhängigkeit auch die Preisentwicklung von Erdgas. Ein in Zukunft kostentreibender Faktor der fossilen Energieträger werden die Kosten für die CO<sub>2</sub>-Zertifikate sein. Die Berechnung von Kosten für die Energiewende gestaltet sich daher als sehr schwierig aufgrund der starken Volatilität der beeinflussenden Märkte, und der Nichtvorhersehbarkeit von politischen Entscheidungen über Novellierungen des EEG. Eine Kostendarstellung ist daher immer eine Momentaufnahme und berücksichtigt oben erwähnte Faktoren ebenso wenig wie den technischen Fortschritt.

Es zeigt sich, dass die Bereiche Ökonomie, Soziales und Ökologie eine starke Dynamik aufweisen, wodurch die Schnittstelle der drei Bereiche, das nachhaltig erschließbare Potential, ebenfalls veränderbar ist. Letztendlich ist aber gerade dieser Bereich dasjenige Potential, welches in einer Region wie dem Landkreis und der Hansestadt Lüneburg umgesetzt werden sollte.

In dieser Studie wurden diverse Eingrenzungen vor allem beim ökologischen Potential und auch der sozialen Akzeptanz vorgenommen. Dies betrifft sowohl den Bereich Wind als auch den Bereich Biomasse. Andere Bereiche wie die Photovoltaik oder die Solarthermie, aber auch die geothermischen Potentiale wurden dagegen vermehrt technisch berechnet, ohne Berücksichtigung der ökonomischen Faktoren. Die Eingrenzungen wurden nach einer Relevanzprüfung des Autorenteam's vorgenommen.

## 2. Untersuchungsraum Landkreis und Hansestadt Lüneburg

### 2.1. Geographische Lage

Der Landkreis Lüneburg liegt in südöstlicher Randlage der Metropolregion Hamburg (Abbildung 10). In der Metropolregion kooperieren acht niedersächsische Landkreise, sechs schleswig-holsteinische Kreise und die Hansestadt Hamburg. Hier leben und arbeiten vier Millionen Menschen im Schnittpunkt wichtiger transeuropäischer Verkehrsachsen.

Der Landkreis Lüneburg erstreckt sich über eine Fläche von 1.323,43 m<sup>2</sup> (LSKN, 2010). Geografisch grenzt der Landkreis im Norden an das Bundesland Schleswig-Holstein, im Nordosten an Mecklenburg-Vorpommern. Umgebende Landkreise sind in Niedersachsen Lüchow-Dannenberg, Uelzen, Soltau-Fallingb., Harburg, in Schleswig-Holstein der Landkreis Herzogtum Lauenburg und in Mecklenburg der Landkreis Ludwigslust. Der Landkreis ist insbesondere durch seine Naturräume geprägt. Zum einen durch die Lüneburger Heide.

Im Norden liegen große Teile des Landkreises innerhalb des UNESCO Biosphärenreservats Niedersächsische Elbtalaue. Historische Siedlungsstrukturen und die Erhaltung einer ganzen Reihe von Baudenkmalern und geschlossenen historischen Orts- und Stadtkernen prägen Hansestadt und Landkreis. Damit erfüllt der Untersuchungsraum als Naherholungsgebiet „raumbedeutende funktionale Eigenschaften“ (Jessel/Tobias, 2002) in der Metropolregion.



Abbildung 10 - Landkreis mit Gemeindegrenzen

Quelle: <http://www.lueneburg.de/desktopdefault.aspx/tabid-147/>

Die Hansestadt Lüneburg, drei Einheitsgemeinden (Adendorf, Amt Neuhaus, Stadt Bleckede) und sieben Samtgemeinden (SG) (Amelinghausen, Bardowick, Dahlenburg, Gellersen, Ilmenau, Ostheide und Scharnebeck) bilden mit dem Landkreis und dem Land Niedersachsen die Gebietskörperschaften im Untersuchungsraum.

## 2.2. Bevölkerung

Der Landkreis Lüneburg ist von 176.521 Menschen besiedelt. Das entspricht einer Dichte von 133,4 Einwohnern je km<sup>2</sup>. In der Hansestadt Lüneburg leben 72.492 Menschen. Das entspricht einer Dichte von etwa 1.030 Einwohnern je km<sup>2</sup> (Wehrspann, 2012). Der Landkreis liegt deutlich unter den Mittelwerten der Einwohnerdichte für Niedersachsen (166 Einwohnern pro km<sup>2</sup>) und Deutschland (229 Einwohnern pro km<sup>2</sup>) (Statistische Ämter, 2012).

## 2.3. Infrastruktur

Der Landkreis Lüneburg wird infrastrukturell durch die Verkehrsanbindung an die Metropole Hamburg geprägt. So durchlaufen den Landkreis die Bahnstrecke Hamburg-Hannover, die Bundesstraße B4 in Nord-Süd-Richtung, die B209 von Süd-West nach Nord-Ost, die B404, die B195 als nördliche Elbuferstraße und im Südosten die B216 und die Bundesautobahn A39. Insgesamt besitzen alleine die Bundes- und Landesstraßen im Untersuchungsraum eine Länge von 212 km. Zudem verfügt der Landkreis über zwei Wasserstraßen bestehend aus 63,5 km Flusslauf der Elbe mit Hafen in Bleckede und 19 km Elbeseitenkanal mit Binnenhafen in der Hansestadt Lüneburg (Lüneburg, o.A.).

## 2.4. Entwicklung der Energieversorgung

Mitte des 18. Jahrhunderts kam in der Hansestadt Lüneburg der Wunsch auf, die Stadt durch gasbetriebene Straßenlaternen nachts zu beleuchten. Die entsprechende Umsetzung wurde im Jahr 1855 von der Stadtverwaltung angestoßen und durch einen auswärtigen Privatunternehmer initiiert. Finanzierungsprobleme des Unternehmers führten allerdings dazu, dass die „Allgemeine Gas-Aktiengesellschaft zu Magdeburg“ als ausländisches Unternehmen (Lüneburg gehörte zum Königreich Hannover, Magdeburg gehörte zu Preußen) im Jahr 1857 das Vorhaben übernahm. Die Gesellschaft sicherte sich das Recht der Preisausgestaltung und das alleinige Recht für Hausinstallationen. Dies führte sowohl bei den Bürgern als auch im Handwerk zu Unmut (Ohle, 2008). Nach einer kurzen Bauverzögerung „erfolgte die Inbetriebnahme der Gasanstalt am 26. Oktober 1858 und die Stadt erleuchtete im Schein von 312 Gaslaternen und einem fünfflämmigen Kandelaber am Marktplatz“ (ebd.). 30 Jahre spä-

ter bekundete die Stadtverwaltung, mit dem Auslaufen der Konzessionsverträge, das Interesse, die Verträge mit der Magdeburger Gesellschaft zu kündigen und die Versorgung selbst zu übernehmen. Es kam zu unterschiedlichen Auffassungen bezüglich des Kaufwertes und ein Schiedsgericht wurde einberufen. Am 4. Juli 1888 wurde zugunsten der Stadt Lüneburg entschieden (ebd.).

Auch die folgende Stromproduktion Anfang des 19. Jahrhunderts ging zunächst auf private Initiativen zurück. Um das Entstehen weiterer kleiner Stromversorgungseinheiten zu verhindern, wurde im Jahre 1905 der Bau eines Elektrizitätswerkes beschlossen und am 11. Dezember 1907 wurde der Betrieb des „Städtischen Elektrizitätswerkes“ aufgenommen. „Nach dem Betriebsbericht vom 31. März 1909 waren 288 Haushalte bzw. Betriebe an das Stromnetz angeschlossen. Die neue Energie wurde in erster Linie zur Beleuchtung genutzt, 5.275 Glühlampen und 113 Bogenlampen brachten Licht in Wohnung und Werkstatt. Außerdem waren 106 Elektromotoren und 24 andere Elektrogeräte bei den Konsumenten in Gebrauch. [...] Im Jahr 1910 schloss man einen Stromlieferungsvertrag mit dem Überlandwerk des Landkreises Lüneburg, womit auch der Landkreis in das Stromversorgungsgebiet des Städtischen Elektrizitätswerkes einbezogen wurde“ (Ohle, 2008). Nach dem ersten Weltkrieg und den folgenden entbehrungsreichen Jahren der Weimarer Republik wurden die Werke am 18. Oktober 1927 in eine Gesellschaft mit beschränkter Haftung unter dem Namen „Lüneburger Kraft-, Licht- und Wasserwerke GmbH“ zusammen gefasst.

Auf Bestrebungen des preußischen Staates sollte für die Elektrizitätsversorgung des Landes ein rationelles, großräumiges Verbundnetz errichtet werden. Daraus entwickelte sich die Preußische Elektrizitäts-Aktiengesellschaft (Preussag). Das Tochterunternehmen, die Hannover-Braunschweigische Stromversorgungsaktiengesellschaft (HASTRA), übernahm am 1. April 1930 das Kreisüberlandwerk Lüneburg (Ohle, 2008). Wirtschaftlich schlechte Zeiten und der Verlust eines Teils des Versorgungsgebietes bewogen die Stadtverwaltung im August 1930 zum Verkauf der GmbH mit Ausnahme des Wasserwerkes an die HASTRA. 1962 ging die letzte öffentliche Gaslaterne an der Michaeliskirche vom Netz. Im Jahr 1999 ging die HASTRA durch eine Fusion mit anderen Unternehmen, die sich ebenfalls mehrheitlich im Besitz von Preussen Elektra befanden, in der neu gegründeten Avacon AG auf, die 2005 in E.ON Avacon umbenannt wurde (ebd.).

Auch in Dahlenburg und der Stadt Bleckede wurden bereits Anfang des 19. Jahrhunderts Elektrizitätswerke errichtet. In Dahlenburg wurde von ansässigen Unternehmern eine Genossenschaft zum Bau des Elektrizitätswerkes Dahlenburg gegründet. Im Jahr 1913 erfolgte der Bau einer Anschlussleitung nach Lüneburg (EVBD AG, 2008). Sukzessive wurden in den

folgenden Jahrzehnten die umliegenden Gemeinden in das Verbundnetz aufgenommen. Die Versorgung wurde durch die HASTRA in den 1930er Jahren mit der Errichtung einer 30.000 Volt Leitung zwischen Lüneburg-Dahlenburg gesichert. Trotz vieler Stimmen, die sich besonders nach den Kriegsjahren für den Verkauf des Unternehmens aussprachen, wurde die Modernisierung der Anlagen vorangetrieben und das Unternehmen erfolgreich in die „goldenen 50er“ Jahre geführt. Nicht zuletzt die „genossenschaftliche Unternehmensform“ hatte den Verkauf verhindert. Die Umwandlung in eine Aktiengesellschaft erfolgte im Jahr 1988 unter dem Namen Elektrizitätswerk Dahlenburg (EWD) AG (EVDB AG, 2011). Im Jahr 2010 fusionierte das lokale Energieversorgungsunternehmen (EVU) mit der Kraftwerk Bleckede Ludolf Stamer GmbH (KWB) zur Energieversorgung Dahlenburg-Bleckede (EVDB) AG, die heute etwa 21.100 Menschen mit Strom versorgt. „Die EVDB zählt zu den wenigen ländlichen EVU, die ihr Mittelspannungsnetz (297 km) und ihr Niederspannungsnetz (277 km) vollständig verkabelt haben“ (EVDB AG, 2011).

Das Stromnetzgebiet des Landkreises Lüneburg wird derzeit von drei EVU betrieben. Den größten Anteil (87,6%) mit einer Nettoabgabe von 699.991 Megawattstunden (MWh) im Jahr 2010 lieferte die E.ON Avacon AG.

### 3. Erneuerbare Energien - Grundlagen

#### 3.1. Photovoltaik

Photovoltaikmodule zeichnen sich durch verschiedene Eigenschaften aus und reagieren unterschiedlich auf gegebene Verhältnisse wie Strahlung, Verschattung, Ausrichtung und Temperatur. Eine Photovoltaikanlage arbeitet grundsätzlich am besten bei 25°C. Darüber hinaus wird Energie zur Kühlung der Anlage benötigt. Aus diesem Grund ist es gerade in Norddeutschland sinnvoll, die vergleichsweise geringe Strahlungsintensität mittels Photovoltaikanlagen zu nutzen, da weniger gekühlt werden muss als in südlicheren Regionen (SMA Solar Technology AG, 2011).

Die kleinsten Elemente einer Photovoltaikanlage sind die einzelnen Solarzellen, die miteinander verschaltet die sogenannten Solarmodule ergeben. Die Verschaltung ist notwendig, um eine genügend hohe Spannung zu erreichen, da in einer Solarzelle (Silizium) lediglich 0,5 Volt erzeugt werden (Stempel, 2007). Module, die sich auf der gleichen Tragfläche befinden, werden zu Paneelen verbunden, die in Reihe geschaltet die sogenannten Strings ergeben. Die Strings werden miteinander parallelgeschaltet und ergeben die größte Einheit, den Generator (Südtiroler Bauernbund, 2011).

Zur Funktionsfähigkeit einer Photovoltaikanlage gehören Stromkabel, Befestigungssysteme, Blitzableiter und vor allem ein passender Wechselrichter, um den erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln und ins Netz einspeisen zu können (Hennicke/Fischedick, 2007). Innerhalb der Solarzelle sorgen ein dünnes Gitter an der Oberseite und eine leitende Beschichtung auf der Unterseite für die elektrische Leitfähigkeit. Es ist dabei darauf zu achten, das Gitter auf der Oberseite möglichst dünn und klein zu halten, um die Eigenverschattung zu reduzieren. Damit möglichst wenig Strahlung reflektiert, wird zusätzlich eine Antireflexschicht aufgetragen (Haselhuhn, 2005).

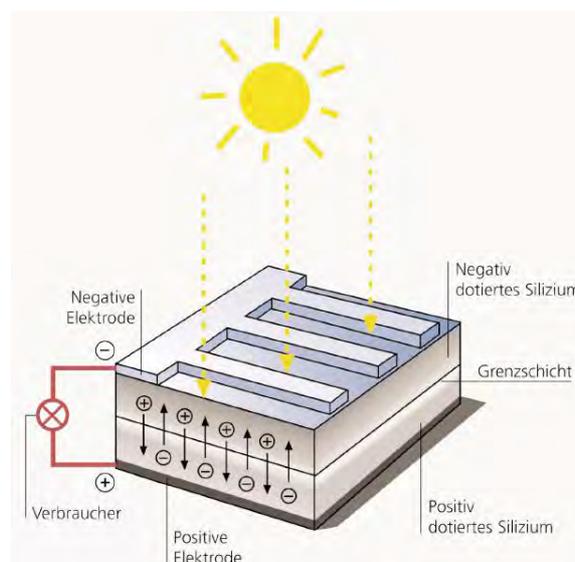
In der Solarzelle beginnt der Vorgang der Stromerzeugung. Der Aufbau dieser ist immer ähnlich. Man benötigt zwei unterschiedlich dotierte Halbleitermaterialien, um einen Ladungsunterschied zu erzeugen, der zur Ausprägung eines elektrischen Potentials führt. Dieses kann in elektrische Energie umgewandelt und genutzt werden. Beim Auftreffen der Sonnenstrahlung werden Elektronen in einen angeregten Zustand gebracht und sind frei beweglich, sodass ein Elektronenfluss entstehen kann. Dadurch, dass die beiden Schichten durch eine Grenzschicht getrennt sind, kann sich ein elektrisches Potential ausbilden. Dieser Vorgang geschieht innerhalb der Raumladungszone, die sich zwischen der positiv dotierten n-Schicht

und der negativ dotierten p-Schicht ausgebildet. Die durch die Strahlung angeregten, frei beweglichen Elektronen fließen in Richtung positiver n-Schicht, während die Elektronenlöcher zur p-Schicht diffundieren. Dieser Spannungsunterschied lässt sich durch Verbindung der beiden Schichten nutzen. Es fließt Strom, da sich Ladungen ausgleichen (Hufnagel, 2010). Leider lässt sich durch dieses Verfahren nur ein Bruchteil der auftreffenden Energie nutzen. Photovoltaikanlagen erreichen nach dem heutigen Stand der Technik im besten Fall einen Wirkungsgrad von 20%. Das liegt vor allem daran, dass viel Energie durch Umsetzung und Verschattung verloren geht (Haselhuhn, 2005). Trotz der geringen Wirkungsgrade ist von Photovoltaikanlagen nicht abzuraten. Ganz im Gegenteil: Es wird Energie genutzt, die unendlich vorhanden ist. Es werden also keine endlichen Ressourcen verbraucht. Deshalb ist selbst ein Wirkungsgrad von nur 10% noch lohnend, da Energie umgesetzt wird, die ansonsten einer technischen Nutzung verloren geht. Die unterschiedlichen Solarmodultypen, auf die im Folgenden eingegangen wird, unterscheiden sich vor allem in ihren Wirkungsgraden.

### 3.1.1. Modularten

#### Monokristalline Module

Monokristalline Solarzellen sind regelmäßige Kristallstrukturen aus Silizium, bei denen einige Siliziumatome durch Fremdatome ersetzt werden (dotieren), um zwei unterschiedlich dotierte Schichten zu erhalten. Häufig wird Phosphor für die negative Unterschicht (p) und Bor für die positive Oberschicht (n) verwendet.



**Abbildung 11 - Funktionsweise einer monokristallinen Solarzelle**  
Quelle: Witzel/Seifried, 2003

Diese Art von Solarzellen besteht aus einem einzigen Siliziumkristall und lässt sich deshalb an ihrer einheitlichen schwarz-blauen Struktur erkennen. Sie besitzt einen Wirkungsgrad von 14-18% und braucht verhältnismäßig wenig Fläche von 5-7,5 m<sup>2</sup> pro kWp Leistung (Kilowatt Peak, vgl. 3.1.2 Leistung von Photovoltaikmodulen). Durch das relativ aufwendige Herstellungsverfahren amortisiert sich dieser Solarmodultyp energetisch betrachtet nach ca. 7 Jahren (Seltmann, 2009; Südtiroler Bauernbund, 2011).

### Polykristalline Module

Auch polykristalline Solarzellen bestehen hauptsächlich aus Silizium. Sie werden aus Siliziumblöcken hergestellt und sind aus diesem Grund nicht so einheitlich in ihrer Struktur, was sich auch im niedrigeren Wirkungsgrad von 13-15% widerspiegelt. Für ihre Funktionsfähigkeit benötigen diese rund 6-9 m<sup>2</sup>/kWp. Mono- und polykristalline Solarzelltypen sind am weitesten verbreitet. Der niedrigere Wirkungsgrad der Polykristallinen gegenüber den Monokristallinen wird durch niedrigere Herstellungskosten und geringeren Energiebedarf ausgeglichen. Deshalb amortisieren sich die polykristallinen Solarzellen wesentlich schneller (3-4 Jahre) (Hennicke/Fischedick, 2007; Südtiroler Bauernbund, 2011).

### Dünnschichtmodule

Immer weiter verbreitet sind Module mit Dünnschichttechnologie. Hierbei wird auf ein Trägermaterial eine dünne Schicht Halbleiter aufgetragen. Der Vorgang geschieht im Gaszustand. Es entsteht ein komplettes Solarmodul, das später durch Laser in einzelne Zellen getrennt wird. Das Besondere ist, dass nur rund 1-2% des Siliziums der Menge von kristallinen Zellen benötigt wird. Zudem besitzen Dünnschichtmodule eine wesentlich höhere Verschattungs- und Temperaturtoleranz. Durch ihre Flexibilität in der Form, lassen sich Flächen besser ausnutzen. Auch eine gewisse Transparenz, wie z.B. für Dachfenster, liegt im Bereich des Möglichen (Haselhuhn, 2005; Südtiroler Bauernbund, 2011).

Die Amorphe Siliziumzelle (a-Si) ist eine Form, die Dünnschichttechnologie zu nutzen. Diese ressourcenschonende Herstellungsweise hat sich schon in Taschenrechnern bewährt und zeichnet sich durch einen Wirkungsgrad von 6-8% und Flächenbedarf von 12-24 m<sup>2</sup>/kWp aus. Eine Amortisationszeit von unter drei Jahren ist beachtlich. Das Besondere ist eine undotierte sogenannte i-Schicht, die sich zwischen der n- und p-Schicht befindet. Die *pin*-Struktur verhindert, dass sich die freigewordenen Elektronen direkt wieder rekombinieren. Der geringe Wirkungsgrad lässt sich mittels Stapelzellen erhöhen. Bei diesen werden mehrere Dünnschichtzellen übereinander gestapelt, wobei jede auf ein anderes Spektrum spezialisiert

ist, d.h., dass jede Zelle einen anderen Farbbereich des Lichts absorbiert und so effizienter die Strahlung nutzt. So lässt sich mit dieser Methode ein Rekordwert von 10,2% erreichen (Haselhuhn, 2005; Südtiroler Bauernbund, 2011).

Dünnschichtmodule können auch mit der Kupfer-Indium-Selenid (CIS) bzw. Cadmium-Tellurid-Technologie (CdTe) hergestellt werden. Bei der CIS Technologie agiert eine Kupfer-Indium-Selenid-Schicht als p-Schicht und eine Cadmium-Sulfid-Pufferschicht als n-Schicht. Der Wirkungsgrad dieser Zellen liegt bei 8-10% und der Flächenbedarf bei 10-13 m<sup>2</sup>/kWp. Die CdTe Solarzelle besteht aus einer Cadmium-Sulfid-Schicht (n) und einer Cadmium-Tellurid-Absorberschicht (p). Sie erreicht Wirkungsgrade von 6-8% bei einem Flächenbedarf von 13-17 m<sup>2</sup>/kWp (Haselhuhn, 2005; Südtiroler Bauernbund, 2011).

Mit dem Energiewechsel und der Notwendigkeit einer alternativen Stromerzeugung wird sich in den nächsten Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit im Bereich der Solarforschung einiges bewegen und neue und effizientere (energetisch und wirtschaftlich) Methoden entwickelt und weiterentwickelt werden, sodass alternative Energiequellen konventionelle bald vollständig und sicher ablösen können. Eine Entwicklung allein bis 2010 zeigt die folgende Grafik.

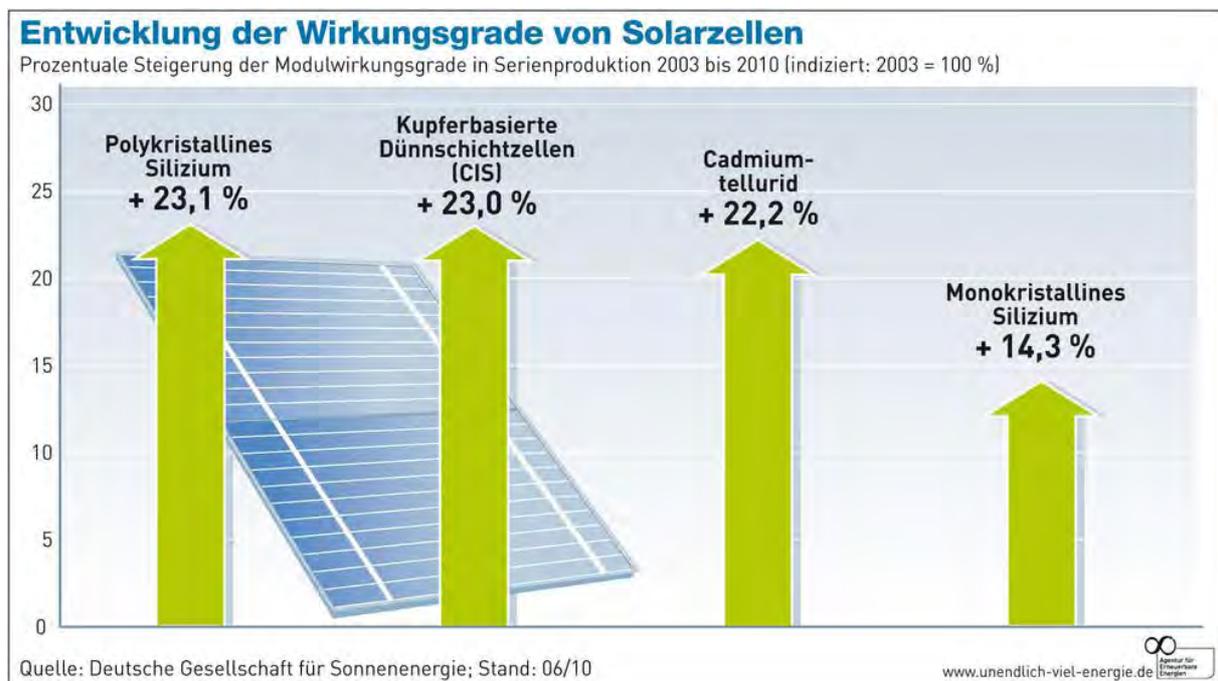


Abbildung 12 - Entwicklung der Solarzellenwirkungsgrade

### 3.1.2. Leistung

Die Leistung von Photovoltaikmodulen wird über ihre Nenn- bzw. Peakleistung (kWp) be-

geschrieben. Diese ist an Standardbedingungen von 25°C, einer Globalstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup> und AM von 1,5 (Luftmassezahl für Europa) gebunden.

Nach Schwister (2003) gilt:

$$\text{Peakleistung [Wp]} = \text{Globalstrahlung} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \times \text{Fläche Zelle [m}^2\text{]} \\ \times \text{Wirkungsgrad}$$

Die Leistung eines Photovoltaikmoduls ist demnach immer von den äußeren Bedingungen, wie der Globalstrahlung, abhängig. Mit Hilfe der dargestellten Gleichung lässt sich die Leistung eines Moduls abschätzen. Zu beachten sind hierbei unterschiedliche Temperaturen und Globalstrahlungswerte, die die reale Leistung der Module stark beeinflussen (Schwister, 2003). Vereinfacht kann man annehmen, dass 1000 Watt Peak Leistung mit einer rund 10 m<sup>2</sup> großen Photovoltaikanlage erreicht werden können. Wobei die benötigte Fläche je nach Modulart variiert. Monokristalline Module benötigen eher weniger Fläche, Dünnschichtmodule hingegen eher mehr (Brück, 2008). Die Annahme von 10 m<sup>2</sup>/kWp wird für die Bestimmung der Leistung der einzelnen Solargeneratoren genutzt, die später für den Finanzteil benötigt wird.

### 3.2. Wind

Windkraft nutzt die kinetische Kraft der Winde. Diese strömenden Luftmassen entstehen durch Druckunterschiede, bzw. als Ausgleicherscheinung zwischen Lufträumen über erwärmten und abgekühlten Erdoberflächen. Die Rotorblätter der WEA werden durch diesen Wind nach dem (Widerstands- bzw.) Staudruckprinzip in Bewegung versetzt (Watter, 2011; Kaltschmitt, 2006), die Nabe dreht sich um ihre Achse und der Wind wird in seiner Geschwindigkeit reduziert, jedoch nicht vollständig. Ihm wird lediglich ein Teil seiner Leistung entzogen (Quaschnig, 2007).

Die Windenergie wird dabei über drei Energiezustände umgewandelt: die windeigene Bewegungsenergie in eine rotatorische, und diese, oft mittels Getriebe, in elektrische per Generator, bzw. Transformator.

Dass eine vollständige Entziehung der Energie des Windes durch Windkonverter nicht zustande kommt, ergibt sich aus dem Betz'schen Leistungsbeiwert als prozentuale Angabe der aus dem Wind entnommenen Leistung geteilt durch dessen Gesamtleistung (ebd.; Kaltschmitt et al., 2006). Somit liegt der Wirkungsgrad einer WEA bei maximal 59,3%.

WEA sind jeweils für bestimmte Windgeschwindigkeiten ausgelegt. Unterhalb dieser könnte ihre Steuerung mehr Energie verbrauchen, als sie erzeugen kann. WEA werden daher mechanisch per Bremse am Anlaufen gehindert, bis die Windgeschwindigkeit einen definierten Startpunkt erreicht (Quaschnig, 2007).

Ferner ist zu beachten, dass die Leistungsdichte des Windes mit seiner Windgeschwindigkeit zunimmt: beträgt die Windleistung weniger als  $1 \text{ W/m}^2$  bei  $1 \text{ m/s}$ , so erreicht sie bei Sturmstärke mit  $30 \text{ m/s}$   $16,6 \text{ kW/m}^2$  (Quaschnig, 2007); Faktor 30 in der Geschwindigkeit zieht umgerechnet ca. Faktor 16.000 in der Leistung mit sich. Diese steigt daher nicht linear an, sondern exponentiell. Je laminarer zudem die Windströmung ist, d.h. je weniger Turbulenzen auftreten, desto weniger müssen WEA ihre Stellung zur sich verändernden Windrichtung ausrichten. Dies ist zumeist an den Küstengebieten der Fall (Quaschnig, 2007).

### 3.2.1. Standortfaktoren für Windenergieanlagen

Ein Problem der Windstromerzeugung hängt mit der in der jeweiligen Geländebeschaffenheit (Orografie) zusammen: Je mehr Hindernisse in Form von Bewuchs, geologischen Formationen oder Gebäuden sich in der Nähe von WEA befinden, desto geringer wird i. d. R. die Windgeschwindigkeit. Zusätzlich belasten Turbulenzen die Rotorblätter sowie die Antriebseinheit, je geringer die Gesamthöhe ausfällt (BWE, 2010). Dies gewinnt für das Repowering an Relevanz, da hier die Turmhöhe und Rotorradien leistungsbestimmend werden. WEA-Eigner sind daher prinzipiell bemüht, ihre Anlagen in möglichst großer Höhe zu betreiben, um genannten Effekte zu minimieren.

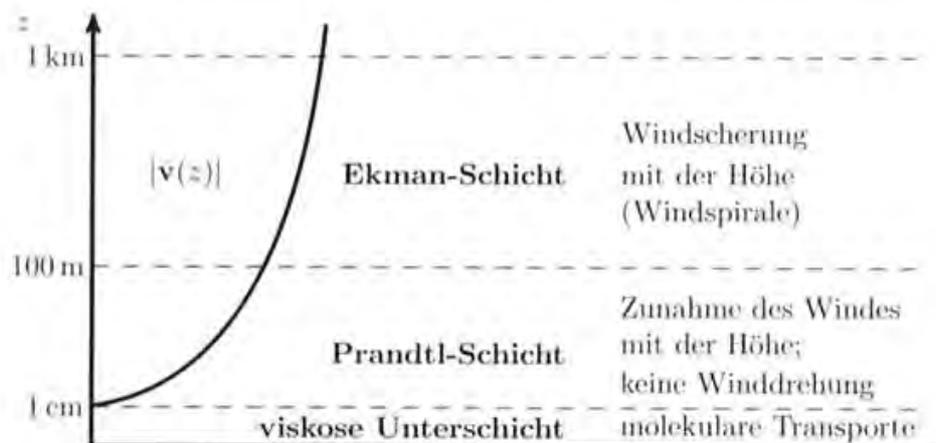
Analog zur Orografie des avisierten Standortes verändert sich die Rauheitslänge, die in Meter mit 0,0002 für die Meeresoberfläche bis 2 für Großstadtbebauung angegeben wird. Verlustbedeutsam sind demnach besonders Standorte mit Wäldern, bzw. Ortschaften die in der Hauptwindrichtung liegen (Quaschnig, 2007). Sie sorgen für Verwirbelungen und drosseln so die Windgeschwindigkeit (Keppler, 2008). Erreicht werden unter diesen Umständen dennoch bis zu 2000 Vlh pro Jahr im Landkreis Lüneburg.

Schwankungen in der Erzeugung des Windstromes an einem Standort ergeben sich aus verschiedenen Gesichtspunkten: Zum einen sind unterschiedliche Temperaturen nachts und tagsüber für Druckschwankungen verantwortlich, und zum anderen die verschiedenen Jahreszeiten. Besonders Herbst und Winter sorgen durch erhöhte Sturmereignisse für größere Strommengen. Zusätzlich werden Auswirkungen des Klimawandels deutlich. Während noch in den 80'er Jahren des vergangenen Jahrhunderts die Windvorhersagen eher saisonal

gleichbleibend waren, sind sie gegenwärtig unregelmäßiger geworden; Windstillen wie stärkere Böigkeiten treten vermehrt in Erscheinung, das Wetter wird mit Blick auf die Verschiebung der Jahreszeiten extremer (Keppler, 2008; BMU, 2008).

Der für Windgutachten meist genutzte Faktor ist die Weibull-Verteilung, mit der zur statistischen Ermittlung der Häufigkeit des Auftretens vorherrschender Windrichtungen gleichfalls die mittlere Windgeschwindigkeit bestimmt werden kann (Kaltschmitt et al., 2006). Eine Ausführung der Rayleigh-Verteilung wird daher hier nicht weiter ausgeführt. In 30-40 m (Naben-) Höhe nahe der Küste enthält der Wind ca.  $320 \text{ W/m}^2$  Flügelfläche bei einer Weibullverteilung ( $A$ ) von rund 7 m/s. In der norddeutschen Tiefebene kommen davon mit ca. 5,5 m/s ( $A$ ) nur noch  $170 \text{ W/m}^2$  an (Heier, 2009). Hieraus ist erkennbar, dass sich bei einer geringen Reduzierung der Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s der Energieinhalt nahezu halbieren kann.

Zum Verständnis unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Nabenhöhen werden nachfolgend die beiden bestimmenden Teile der bodennahen Luftschicht, der sog. Planetary Boundary Layer (PBL) erläutert.

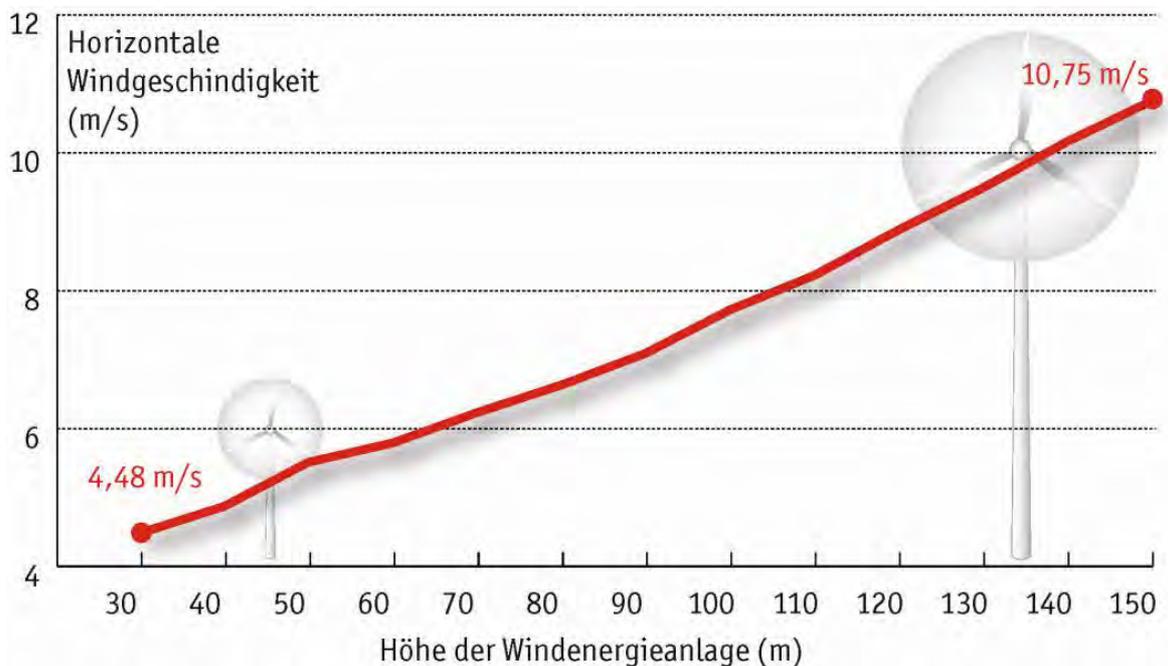


**Abbildung 13 - Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht**  
Quelle: Freie Universität Berlin, 2009

Die Prandtl- und die Ekman-Schicht sind deren Bestandteil, wobei sich die Prandtl-Schicht witterungsabhängig meist in Höhen bis 100 m erstreckt. In ihr mindern tieferliegende, durch Bewuchs, geologische Gegebenheiten oder Bebauung gebremste langsamere Windströmungen die darüber liegenden schnelleren (Windscherung) (Kaltschmitt, 2006). Diejenige Schicht, die für WEA Betreiber interessanter ist, ist daher die Ekman-Schicht: Sie befindet sich oberhalb der Prandtl-Schicht und dehnt sich bis in 2 km Höhe aus. Die Reibung durch Turbulenzen nimmt aufgrund geringerer Hindernisse mit der Höhenausdehnung ab, sodass den

stetigeren Winden hier ein vergleichsweise höheres Potential innewohnt (Freie Universität Berlin, 2009). Abbildung 14 zeigt, dass mit der Höhe auch die horizontale Windgeschwindigkeit zunimmt und so höhere WEA einen höheren Ertrag erreichen können.

Tauchen WEA mit einer Nabenhöhe von über 100 m (Abbildung 13) demnach in die Ekman-Schicht ein, so ist der Stromertrag um 20% steigerbar (Geitmann, 2010). Ferner ist bei einer doppelten Windgeschwindigkeit Faktor acht in der Leistung möglich (AEE, 2011).



**Abbildung 14 - Abhängigkeit Turmhöhe und Windgeschwindigkeiten**  
Quelle: BWE, 2009

### 3.2.2. Funktion und Aufbau von WEA

In der folgenden Beschreibung von WEA wird von folgenden Gegebenheiten des Aufbaus ausgegangen: Der Rotor besteht aus drei Blättern, die an einer horizontalen Achse hängen, dabei variiert die Rotordrehzahl prinzipiell entsprechend der Windgeschwindigkeit. Grundsätzlich besteht der Aufbau einer WEA aus einem Turm, welcher in einem Fundament im Boden verankert ist, einer am Turmkopf aufsitzenden Gondel mit Maschinenhaus und i. d. R. einem Getriebe, sowie einer Nabe, an der die zumeist drei Rotorblätter montiert sind. Die Steuerung befindet sich in der zugänglichen Turmbasis (Kaltschmitt et al., 2006). Der Aufbau einer Gondel soll mit Hilfe von Abbildung 15 und Abbildung 16 näher erläutert werden. Dargestellt sind zwei unterschiedlichen Gondeltypen, eine mit und eine ohne Getriebe. Das Modell NEG Micon 52/900 arbeitet mit Getriebe. Es passt die geringere Rotordrehzahl an die schnellere Generatorzahl an. Bei WEA ohne Getriebe, wie das Modell Enercon E-66, entspricht die

Generatordrehzahl der der Rotoren, wobei der Generator einen höheren Umfang aufweist. Beide Typen haben sich am Markt etabliert (Quaschnig, 2010).

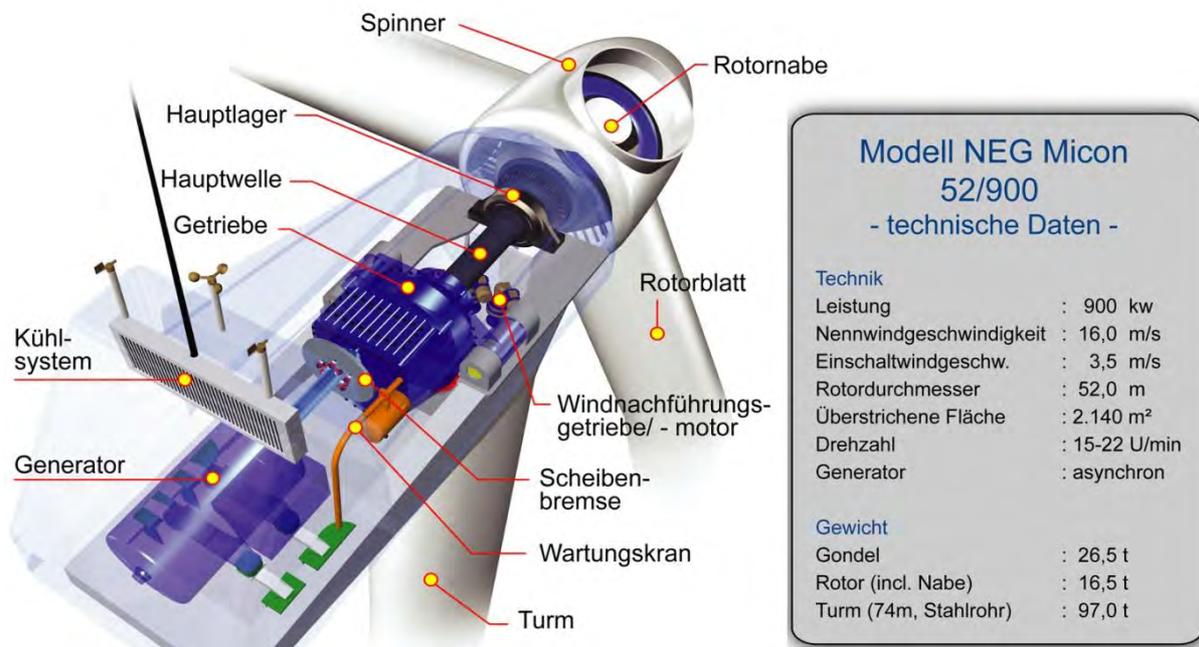


Abbildung 15 - Aufbau einer Gondel mit Getriebe  
Quelle: BVW, 2009

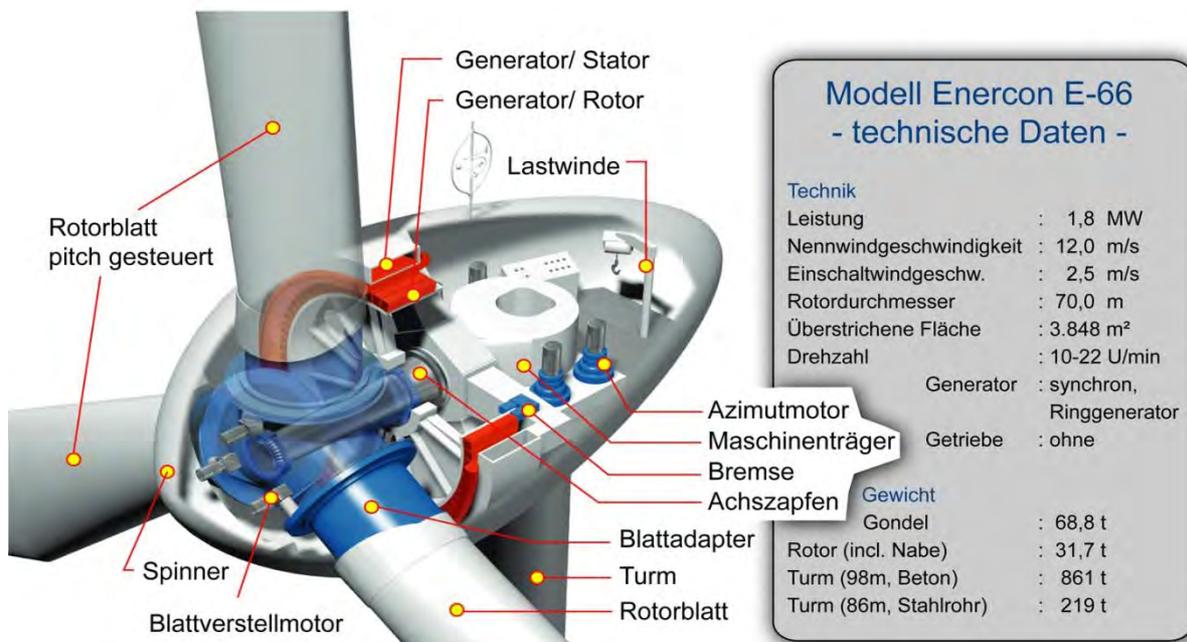


Abbildung 16 - Aufbau einer Gondel ohne Getriebe  
Quelle: BVW, 2009

Ähnlich der Funktionsweise eines Fahrraddynamos erfolgt die Übertragung der Energie der sich drehenden Nabe in Strom. Bis zur Netzkoppelstelle erfolgt die Übertragung meist über Spannungsleitungen und einen Transformator, der die vom Netzbetreiber geforderte Spannung -zumeist Mittelspannung (Geitmann, 2010)- und Frequenz einstellt (Kaltschmitt et al., 2006).

Nach Berechnungen von Betz und Glauert liegt der optimale Wirkungsgrad von WEA bei 59,3%. Dieser (theoretische) Wert wird erreicht, wenn der Wind auf 1/3 seiner ursprünglichen Geschwindigkeit abgebremst wird. Praktisch treten noch weitere Verluste auf z.B. durch Reibung und bei der Energieumformung, d.h. der tatsächliche optimale Wirkungsgrad von modernen Anlagen liegt bei ca. 50%. (Keppler, 2008; Kaltschmitt et al., 2006).

Dreiblattrotoren haben sich in der Vergangenheit als die geräuschlosesten Einheiten erwiesen. Sie bieten, was Unwuchteffekte angeht, eine höhere Stabilität als Ein- und Zweiflügler. Zudem ergibt sich bei dieser Bauform ein physikalisch-ökonomisches Optimum (Kaltschmitt et al., 2006; Quaschnig, 2007). Daher ist die dreiflügelige Bauform in der Multimegawattklasse am Häufigsten vertreten und soll hier Grundlage der Betrachtung werden. WEA fangen bei Windgeschwindigkeiten ab ca. 11 km/h an zu drehen und erreichen ab ca. 50 km/h ihre volle Leistungskraft (Geitmann, 2010) „alles was darüber hinausgeht, wird bis zur Abschaltgeschwindigkeit auf die Nennleistung abgeregelt“ (ebd.) durch pitchen oder bei kleineren WEA durch ein gewolltes Abreißen der Strömung am Rotorprofil (Stall) (Watter, 2011).

Die Rotoren gängigerer WEA sind luv, also windzugewandt ausgerichtet; der Rotor befindet sich vor dem Turm. In dieser Arbeit wird ausschließlich dieser Typ der WEA betrachtet, da die Leistungsausbeute der Lee-Variante unter Abschattungseffekten durch den vorstehenden Turm gestört wird. Deren Folge sind Druckschwankungen die auf den Rotor wirken und diesen suboptimal laufen lassen. Zusätzliche negative Auswirkungen waren schwankende Auslastung und Geräuschentwicklung (Quaschnig, 2007; Geitmann, 2010).

Als Sicherheitsmerkmal sind an WEA Notabschaltsysteme obligatorisch, die mit dem Verdrehen der Rotorblätter von 90 Grad in den Wind einen weiteren Auftrieb verhindern, und so die Anlagenleistung auf null drosseln. Dies kommt besonders bei Netzüberlastung des Betreibers und drohender Überlast durch Stürme zum Tragen, wenn die maximale Leistungsauslegung der WEA überschritten würde (Kaltschmitt et al., 2006). Hierzu kann zusätzlich der Rotor per Azimutregelung aus dem Wind gedreht werden (Watter, 2011). Um unnötige netzseitige Abschaltungen zu vermeiden, sind bei der Planung des Repowerings möglichst

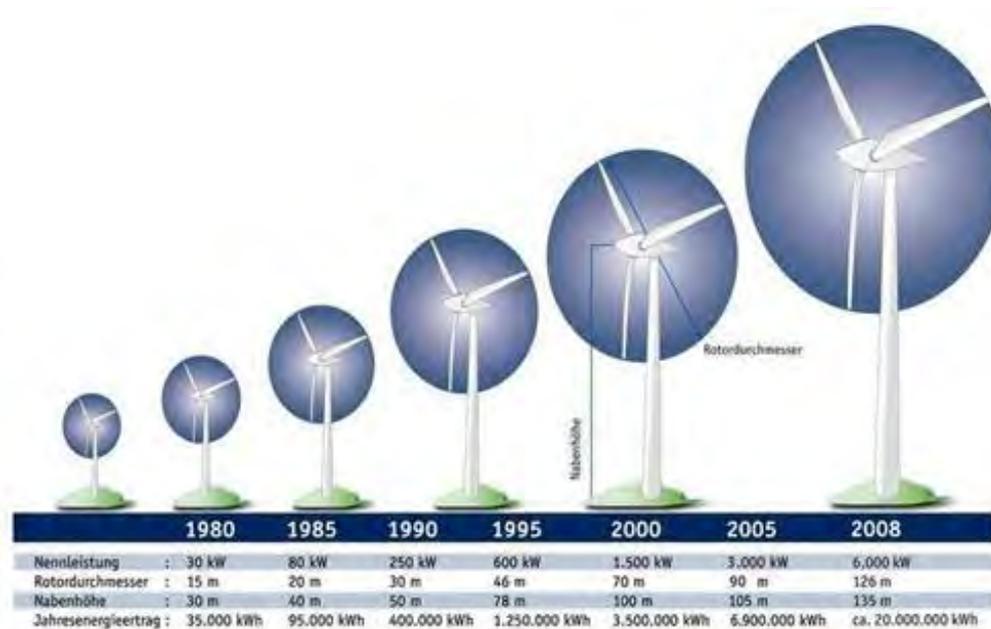
Vorüberlegungen anzustellen, inwieweit das jeweilige Netz der nun erhöhten Einspeisung gewachsen sein wird.

Auf das Verdrehen der Rotorblattwinkel und damit die Blattlastverteilung, das sog. „Pitchen“ soll hier nur in der Grundfunktion eingegangen werden, da hier diverse physikalische Momente berücksichtigt werden müssen (Quaschnig, 2007). Durch Veränderung dieses Winkels bei Windgeschwindigkeiten an der Leistungsgrenze kann trotzdem noch die maximale Leistung aus dem Wind bezogen werden, was bei Anlagen ohne diese Einstellmöglichkeit anderenfalls zum Abschalten führen könnte.

### 3.2.3. Stand der Technik

Im Zeitraum von ca. 28 Jahren technischer Entwicklung wurde mit einer 200-fach gesteigerten Leistung ein um das über 550-fache (571) gesteigerter Ertrag erreicht (Abbildung 17).

2008 lag die Nabenhöhe gebauter Anlagen mit einer Nennleistung bis 2,5 MW bei etwa 100 m inkl. Rotor (Keppler, 2008).



**Abbildung 17 - Größenwachstum WEA seit 1980**  
Quelle: BWE, <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik>

Bestimmend für die Auswahl einer WEA wird die Leistungskennlinie, die die generatorabhängige Leistung in Relation zur mittleren Windgeschwindigkeit innerhalb einer bestimmten Zeitspanne angibt (Kaltschmitt et al., 2006). Anhand dieser kann einem Windgutachten entsprechend die passende Anlage ausgewählt werden.

Die nach eigenen Angaben derzeit größte WEA im Onshorebereich (Stand Januar 2011) der Fa. Enercon steht in Magdeburg Rothensee. Ihr Rotordurchmesser beträgt 127 m, die überstrichene Fläche 12.668 m<sup>2</sup>, die Nabenhöhe 135 m, und die Nennleistung 7,5 MW (Enercon, 2011). Diese WEA käme auf eine Gesamthöhe von 198,5 m. Bisher wurde diese Anlage mit einer Nennleistung von 6 MW dimensioniert (Enercon, 2010). Der Hersteller rechnet an einem sehr windreichen Standort in Rheinland-Pfalz mit der höheren Leistungsauslegung mit 18 GWh. Aufgrund ihrer Dimensionierung sei sie jedoch nur an sehr windstarken Orten einzusetzen.

Geforscht wird an Anlagen mit einer Nennleistung von bis zu 10 MW (Keppler, 2008; EWEA, 2011). Tendenziell werden, ebenso durch die Tendenz zu mehr Repowering, höhere Anlagen gebaut; einerseits durch technischen Fortschritt, andererseits durch die Motivation, mit jedem Meter Bauhöhe (und entsprechend geringerer Rauigkeit) 1% mehr Energieausbeute zu erzielen.

Das Material der Rotorblätter besteht zumeist aus glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) (Kaltschmitt et al., 2006).

Repowering lohnt sich zumeist bei veralteten Anlagen an guten Standorten. Je älter eine WEA, desto höher wird im Zuge der technischen Entwicklung der zu erwartende Ertrag ausfallen. In der Vergangenheit wurden verschiedene Repowering-Projekte in Schleswig-Holstein durchgeführt. Dabei konnte bei halbiertem Anlagenbestand die Leistung um mehr als das Doppelte gesteigert werden. Ersetzt wurden WEA mit einer Nennleistung um ca. 500 kW durch Anlagen von 2 bis 3,6 MW (BWE, 2009b).

#### **3.2.4. Wind im Wald**

Innerhalb dieser Arbeit soll ergänzend die Alternative von WEA im Wald betrachtet werden. Mit Nutzung dieser Möglichkeit würde sich das Windpotential des LK LG noch einmal vergrößern. Nach derzeitiger Landesgesetzgebung ist der Aufbau von WEA im Wald noch nicht möglich, obwohl sich Vorteile gegenüber der WEA außerhalb des Waldes ergeben. Die Beeinträchtigung durch Schall und Schattenwürfe auf den Menschen entfällt im Wald fast komplett, zusätzlich werden mit steigender Nabenhöhe auch die Auswirkungen auf Flora und Fauna minimiert. Trotzdem stellt die Abwägung der Windenergienutzung gegenüber dem Naturschutz eine anhaltende Debatte dar. Vor- und Nachteile sind im Einzelfall abzuschätzen.

In Kapitel 4 werden die möglichen Potentialflächen im LK LG analysiert und dargestellt. Von einer Potentialberechnung wird auf Grund der erwarteten Technikvorsprünge und der derzeitigen Unsicherheiten zur Nutzung von WEA im Wald abgesehen. Die Erfahrungen zeigen trotzdem, dass man diese Alternative als zukünftiges Potential im Auge behalten sollte.

### 3.3. Solarthermie

Die Solarthermie nutzt wie die Photovoltaik ebenfalls die Energie der Sonne, jedoch um Wärme und nicht Strom zu produzieren. Solarthermieanlagen oder -kollektoren erwärmen so Wasser und andere Wärmeträgermedien für den täglichen Warmwasser- oder Heizbedarf. Solarkollektoren eignen sich sowohl für den Einsatz bei industriellen Prozessen als auch für den Privathaushalt. Für eine dezentrale Warmwasserbereitung benötigt man bspw. eine Kollektorfläche von 4-8 m<sup>2</sup> und ein Speichervolumen von 300-500 l.

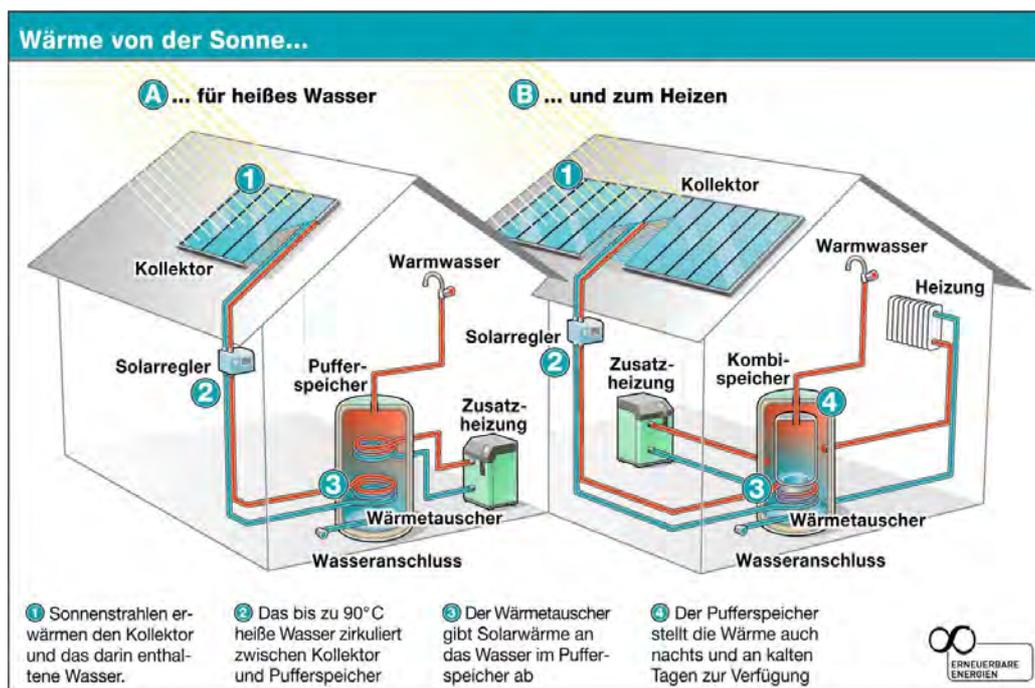


Abbildung 18 - Funktionsweise einer Solarthermieanlage Warmwasser- und Heizbedarf

Solarthermieanlagen bestehen zumeist aus einzelnen Modulen. Die Kollektoreinheiten umfassen dabei 2,5-10 m<sup>2</sup> Fläche, wenn nicht eine Indachlösung gewählt wurde (Eicker, 2012).

Alle Solarthermieanlagen beinhalten einen Absorber, der die kurzwellige Strahlung in Wärme umwandelt. Dabei ist vor allem wichtig, ein Material zu wählen, welches ein hohes Absorpti-

onsniveau im Wellenbereich des sichtbaren Lichts aufweist. Diese Ansprüche erfüllen Metalle wie Aluminium oder Kupfer (Eicker, 2012). Die Metalle müssen schwarz beschichtet werden, um Energie besser aufnehmen zu können. Dafür eignet sich eine selektive Beschichtung, die einerseits Strahlung absorbiert, andererseits aber wenig Wärme wieder zurückstrahlt. Der Absorber überträgt die Wärme an ein Wärmeträgermedium, das ihn in Röhren durchfließt und zwischen Kollektor und Wärmespeicher zirkuliert. Das Wärmeträgermedium muss zunächst eine hohe spezifische Wärmekapazität aufweisen und darf bei niedrigen Temperaturen nicht einfrieren. Es hat sich eine Wasser-Frostschutz-Mischung durchgesetzt, aber auch Luft oder Öl stellen eine mögliche Alternative dar (Quaschnig, 2010).

Ausgegangen vom einfachen Absorber, der sich für die Beheizung von Freibädern eignet, lassen sich nach Kaltschmitt et al. (2006) vier weitere Kollektortypen innerhalb der Gruppe der Flüssigkeitskollektoren unterscheiden: Flachkollektoren, Vakuumflachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren und Speicherkollektoren. Vakuumflachkollektoren und Speicherkollektoren werden bei der Betrachtung nur am Rande beleuchtet.

Flachkollektoren funktionieren ebenfalls nach dem Absorberprinzip, sind jedoch um eine Abdeckung ergänzt. Die auftreffende kurzwellige Strahlung trifft wie beim einfachen Absorber auf, mit dem Vorteil, dass langwellige vom Absorber abgestrahlte Strahlung in Form von Wärme zurückhalten wird. Dieses Prinzip führt zu weniger direkten Wärmeverlusten. Als Material hat sich Glas, in vielen Fällen auch Sicherheitsglas durchgesetzt, das durch eine infrarotreflektierende Schicht an der Unterseite noch mehr Wärme im Inneren halten kann.

Vakuumröhrenkollektoren bestehen aus von einem Vakuum umschlossenen Glasröhren. Der Absorber ist entweder als Metallstreifen in die Glasröhre eingelassen und wird vom Wärmeträgermedium direkt durchströmt oder dient als Beschichtung der Glasröhre (Wärmerohr). Beim Wärmerohr wird ein zusätzlicher Wärmetauscher benötigt, zu dem Wärme über ein Kältemittel transportiert wird. Dieses Kältemittel bspw. Methanol verdampft bei Wärmeaufnahme, steigt auf und kondensiert bei Abgabe der Wärme an das vorbeiströmende Wärmeträgermedium (Eicker, 2012; Quaschnig, 2010). Das Vakuumprinzip wirkt dämmend und so erreicht diese Art von Kollektor höhere Wirkungsgrade als Flachkollektoren. Allerdings sind sie in der Anschaffung, auf Grund der höheren Herstellungskosten, teurer. Speicherkollektoren ähneln den Flachkollektoren und vereinen Kollektor und Wärmespeicher. Es wird also direkt auf dem Dach Wasser erwärmt, was hohe Wärmeverluste zur Folge hat und eine zusätzliche Last auf dem Dach darstellt.

Den Flüssigkeitskollektoren stehen die Luftkollektoren gegenüber, die als Wärmeträgermedium Luft nutzen. Sie sind in Deutschland wenig verbreitet, da die Wärmegewinnung haupt-

sächlich auf das Medium Wasser ausgelegt ist. Sie kommen bspw. bei Niedrigenergiehäusern mit Abluftwärmerückgewinnung zum Einsatz.

Die Effizienz von Solarkollektoren kann durch zusätzliche Spiegel, die die Strahlung auf der Absorberoberfläche konzentrieren, und auch die elektrische Nachführung (ein- oder zweiachsig) erhöht werden. Der Wirkungsgrad selbst hängt vor allem von der Art der Abdeckung, deren Beschichtung und weiteren Wärmedämmungsmaßnahmen ab, also von der Intensität der Einstrahlung und den Verlusten. Dies führt dazu, dass sich je nach Höhe der Temperaturdifferenz ein anderer Wirkungsgrad und sich somit eine Wirkungsgradkennlinie ergibt. Nach Quaschnig (2010) lässt sich die Kollektorstückwirkungsgradkennlinie wie folgt berechnen:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot \Delta \vartheta + k_2 \cdot \Delta \vartheta^2}{E}$$

$\eta_0$  beschreibt den optischen Wirkungsgrad, also die Strahlungsmenge, die es bis zum Absorber schafft ohne reflektiert zu werden. Typischerweise entstehen so Werte zwischen 0,7 und 0,9. Der Wärmeverlust wird über die beiden Verlustkoeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  angegeben.  $\Delta \vartheta$  gibt die Temperaturdifferenz von Kollektor zur Umgebung und  $E$  die auftreffende Globalstrahlung. So kann ein bspw. ca. 5 m<sup>2</sup> großer Kollektor eine Leistung von 2500 Watt abgeben, welche ausreicht, um 100 l 33,5°C warmes Wasser in einer Stunde auf 55°C zu erwärmen (Quaschnig, 2010).

Die einzelnen Kollektoren können in Reihe oder parallel geschaltet werden. Die serielle Verschaltung hat zum Vorteil, dass höhere Temperaturen erreicht werden können, die jedoch auch zu höheren Temperaturunterschieden im Gegensatz zur Außenluft und somit zu größeren Wärmeverlusten führen. Trotzdem sind diese zu empfehlen, da sie eine gleichmäßige Durchströmung der Kollektoren gewährleisten (Kaltschmitt et al. 2006).

Ein wichtiger Punkt im Bereich der Solarthermie ist die Speicherung der erzeugten Wärme. Innerhalb eines Speicherkollektors kann die Wärme im integrierten Wasserspeicher über mehrere Stunden gehalten werden (Kurzzeitspeicher). Tagesspeicher haben ein höheres Fassungsvermögen wie bspw. Wasserkessel und speichern die Wärme von einem bis über mehrere Tage. Saisonspeicher können bei sehr großen Anlagen bspw. mit einem Aquiferspeichersystem realisiert werden (Kaltschmitt et al. 2006; BMU, 2011).

### 3.4. Biomasse

Generell werden alle Stoffe organischer Herkunft als Biomasse bezeichnet. Dazu zählen die Phyto- und Zoomasse, sowie daraus resultierende Abfallstoffe. Die Abgrenzung von Biomasse zu fossilen Energieträgern beginnt bereits mit dem Torf, der nicht mehr als Biomasse angesehen wird. Phytomasse oder auch Pflanzenmasse wird überwiegend von Organismen gebildet, die im Stande sind sich selbst durch Photosynthese mit Energie zu versorgen. Bei der Photosynthese werden mithilfe von Chlorophyll und Licht aus  $\text{CO}_2$  und Wasser Kohlenhydrate und Sauerstoff gebildet. Kohlenhydrate dienen der Pflanze einerseits zur Energiegewinnung, andererseits als Material zum Pflanzenaufbau, wodurch indirekt  $\text{CO}_2$  in die Pflanzensubstanz eingearbeitet wird. Die Zoomasse wiederum gewinnt Energie durch den Abbau anderer organischer Substanzen, diese wird jedoch nicht weiter betrachtet (Kaltschmitt; Lewandowski, 2002).

Biomasse kann weiter in Primär- und Sekundärprodukte eingeteilt werden. Primärprodukte entstehen durch die direkte Nutzung der Sonnenenergie. In Bezug auf die energetische Nutzung von Biomasse zählen hierzu alle land- und forstwirtschaftlichen Produkte, sowie deren Rückstände und Abfälle, ebenso auch Abfälle aus Industrie und Haushalt. Sekundärprodukte sind die Abbau- bzw. Umbauprodukte organischer Substanz durch höhere Organismen, wie z.B. Gülle, die bei der Verdauung von Tieren entsteht (Kaltschmitt/Radtke, 1997). Biomasse unterschiedlicher Herkunft kann als fester, flüssiger oder gasförmiger Brennstoff aufbereitet werden. Flüssige Brennstoffe werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, da keine Anlagen in der betrachteten Region mit flüssigen Brennstoffen aus Biomasse arbeiten.

#### 3.4.1. Feste Bioenergieträger

Die Brennstoffe aus fester Biomasse, sogenannte biogene Festbrennstoffe, werden durch Halmgüter oder holzartige Biomasse bereitgestellt. Zu der holzartigen Biomasse gehören Durchforstungs- und Waldrestholz, schwache Rohholzsortimente, Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUPs), industrielle Holznebenprodukte, sowie Holzabfälle aus der Garten- und Landschaftspflege. In dieser Arbeit werden vornehmlich Durchforstungs- und Waldrestholz, sowie schwache Rohholzsortimente betrachtet und als feste Biomasse verstanden (Hartmann, 2002).

Für die Energieerzeugung stehen verschiedene Holzbrennstoffe zur Verfügung. Neben dem Scheitholz sind stärker mechanisch aufbereitete Sortimente wie Hackgut und Pellets zu nennen. Die Bereitstellungskette für alle Sortimente kann in die Abschnitte Biomasseproduktion

bzw. -verfügbarmachung, Bereitstellung, Nutzung, sowie Verwertung bzw. Entsorgung der anfallenden Rückstände eingeteilt werden (Kaltschmitt, 2009). Im Folgenden soll hauptsächlich die forstliche Bereitstellung der verschiedenen Holzbrennstoffe aufgezeigt werden.

Bei der Bereitstellung von Biomasse als Brennstoff muss eine hohe Homogenität und Handhabbarkeit gewährleistet sein. Weiter müssen die Qualitätsanforderungen (z.B. Wassergehalt, Stückigkeit) der jeweiligen Feuerungsanlage erfüllt werden. Letztendlich muss der Brennstoff auch bei schwankendem Bedarf ständig verfügbar sein. Die Aufbereitung kann entweder in Stückgutbrennstoffe (Scheitholz) oder in Schüttgutbrennstoffe (Hackgut, Pellets) erfolgen (Becher/Kaltschmitt, 1997). Dies lässt unterschiedliche logistische Lösungen zu. Die Arbeitsschritte bei der Bereitstellung von Scheitholz und Hackgut können wie folgt dargestellt werden: Fällen, Rücken (Sammeln), Trocknen, Lagern des Rohholzes, Zerkleinern (mit Sägen, Spaltern oder Hackern), Transport ins End- oder Zwischenlager und Lagern des fertigen Brennstoffs. Jedoch kann die Reihenfolge der Arbeitsschritte je nach Verfahren variieren (Hartmann/Höldrich, 2007). Die Sortimente zur energetischen Verwertung sind wie bereits erwähnt, schwache Sortimente und Abfälle, die bei Durchforstungsarbeiten und der Ernte anfallen und sich nichtstofflich absetzen lassen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Wassergehalt des Holzes. Dieser ist jahreszeitabhängig und zwischen Januar und März mit 50% am geringsten, weswegen zu dieser Zeit die Ernte am sinnvollsten ist (Becher/Kaltschmitt, 1997). Um bei größeren Holzmengen einen Käferbefall während der Trocknung zu vermeiden, sollte jedoch bereits im Herbst das Holz geschlagen werden. Somit ist im Frühling der Befall auf Grund der fortgeschrittenen Trocknung nicht mehr möglich (Kaltschmitt/Hartmann, 2009). Für die Holzernte und Pflegemaßnahmen ist eine Generalerschließung über Waldstraßen und eine Feinerschließung über sogenannte Rückegassen erforderlich. Feinerschließungen werden nur vorübergehend angelegt und dienen dem Transport von Holz vom Hiebort zur Abfuhrstraße, was als Rücken bezeichnet wird. Doch soll diese Erschließung zur Schonung des Waldbogens auf ein Minimum reduziert werden (Handstanger et al., 2006). Im Folgenden werden Scheitholz, Hackgut und Pellets vorgestellt.

### **Scheitholz**

Für die Bereitstellung des Scheitholzes (auch Stückholz oder Brennholz genannt) werden generell alle beschriebenen Sortimente zur Energieholzherstellung genutzt. Die Bereitstellung kann im Detail sehr unterschiedlich geschehen. Im Arbeitsablauf ist jedoch das Rücken ein besonderer Kostenfaktor. Einerseits kann bei größeren Rückentfernungen das potentielle Scheitholz am Baum verbleibend vom Hiebort gerückt werden und erst später getrennt werden. Andererseits kann eine Trennung von Brennholz und Nutzholz auch direkt am Hiebort

erfolgen. In diesem Fall wird das Scheitholz auch vor Ort grob aufgearbeitet und anschließend gerückt. Das Rücken kann händisch oder mit Seilwinden geschehen, teilweise auch noch mit dem Pferd. Ebenso kommen Erntemaschinen (Harvester) neben der Industrieholzernte, auch hier zum Einsatz. Wenn das Holz bei späteren Durchforstungen ein zu hohes Gewicht erreicht, kann nur noch maschinell oder mit dem Pferd gerückt werden (Kaltschmitt/Hartmann, 2009). Die Bereitstellung kann entweder vom Forstbetrieb selbst, Lohnunternehmen oder aber auch von sogenannten „Selbstwerbern“ vorgenommen werden. Selbstwerber sind private Personen die gleichzeitig auch Endnutzer sein können. Entweder bekommen sie ein „Flächenlos“ mit bereits markierten erntereifen Bäumen vom Förster zugewiesen, auf dem sie das Fällen, Aufarbeiten, Ablängen, Rücken, Spalten, Sägen und Transportieren in Eigenregie durchführen. Ebenso können auch Flächen zugewiesen werden, auf denen aufarbeitungsfähiger Schlagabraum auf der Fläche verblieben ist. Die Aufarbeitung geschieht bis zu einer im Vorfeld festgelegten Aufarbeitungsgrenze, die meist bei der Derbholzgrenze von 7cm liegt. Äste mit einem geringeren Durchmesser müssen im Wald verbleiben. Neben der Selbstwerbung werden auch für Selbstabholer Scheitholz an der Waldstraße, meist in Meter- und Zwei-Meterholz, angeboten, die noch weiter in übliche Brennstofflängen (25, 33, 50 und 100 cm) gesägt und gespalten werden müssen. Am häufigsten ist Scheitholz mit 33 cm Länge (Hartmann/Höldrich, 2007). Die Trocknung und Lagerung von Scheitholz kann entweder kostengünstig im Wald oder aber aufbereitet beim Endnutzer geschehen. Ofenfertiges Scheitholz hat einen Wassergehalt von 20% (Kaltschmitt/Hartmann, 2009).

### Hackgut

Die Bereitstellung von Hackgut (oder Hackschnitzeln) hängt besonders vom Mechanisierungsgrad ab. Nach der Ernte sollte das Holz zur Trocknung noch einige Monate im Wald verbleiben, damit Blätter und Nadeln abfallen können. Durch den Abfall wird ein vermehrter Nährstoffaustrag verhindert, der Wassergehalt verringert und eine Pilzsporenbildung bei der Lagerung vermieden. Es können generell entweder bestimmte Sortimenten (z.B. Schlagabraum oder Stammabschnitte) oder nach Entfernung des Reisholzes Vollbäume aus Durchforstungsmaßnahmen in Holzhackmaschinen zerkleinert werden. Als Hackgut wird vermehrt jedoch hauptsächlich Durchforstungsrestholz oder Schwachholz genutzt (Kaltschmitt/Hartmann, 2009). Es wird unterschieden in motormanuelle, teilmechanisierte und vollmechanisierte Verfahren. Wird bei den beiden ersten Verfahren das Fällen noch mit der Motorsäge durchgeführt, erledigen dies bei dem vollmechanisierten Verfahren spezielle Erntemaschinen (Harvester). Das Hacken kann entweder noch in der Rückegasse durch mobile

Hacker oder an der Waldstraße durchgeführt werden, sollte jedoch nicht im Bestand durchgeführt werden, da hierbei der Boden durch die Hackmaschinen verdichtet wird (Hartmann, 2002). Das Hacken kann aber auch erst beim Zwischenlager oder Endnutzer geschehen, wobei der Durchsatz, die Größe und Leistung der Hackmaschine steigt, je weiter entfernt das Hacken vom Hiebort geschieht (Becher/Kaltschmitt, 1997). Je nach Trocknung weist Hackgut einen Wassergehalt von 20-65% auf (Hartmann/Reisinger, 2007).

### **Pellets**

Da die Bereitstellung von Pellets im Vergleich zu den anderen Brennstoffen wesentlich aufwändiger ist und einen höheren Mechanisierungsgrad erfordert, fällt sie nicht unter eine forstliche Bereitstellung. Ebenfalls wird kaum frisches Rohholz für die Herstellung genutzt, da durch Rinde und den hohen Wassergehalt der Produktionsprozess aufwändiger wäre (Döring, 2011). Generell sind Pellets ein körniges, verdichtetes Schüttgut mit genormten Abmaßen, welches durch die Pressung trockener und feiner fester Biomasse entsteht. Die weitere Verarbeitung hat den Vorteil, dass der Brennstoff eine höhere Energiedichte, einen geringeren Wassergehalt von unter 10%, eine hohe Homogenität und eine gute Dosierbarkeit aufweist. Doch sind die Produktionskosten wesentlich höher (Hartmann/Höldrich, 2007).

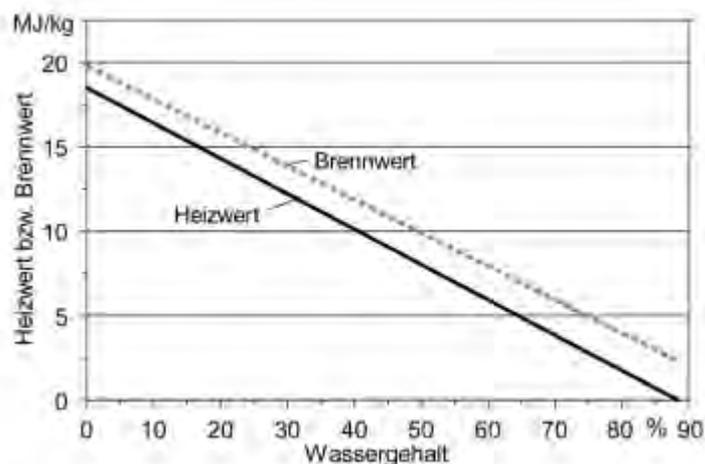
Die Energieholzmenge wird für die verschiedenen Sortimente in unterschiedlichen Volumeneinheiten angegeben. So wird Scheitholz in Raummeter (Rm) beziffert, wobei geschichtete 33-cm-Scheite betrachtet werden. Durch die Schichtung entstehen Luftzwischenräumen, dadurch entspricht ein Raummeter Buche nur etwa 0,62 Festmetern (Fm). Ein Festmeter ist ein Kubikmeter Massivholz ohne Luftzwischenräume. Ein Fm kann mit einem Erntefestmeter gleichgesetzt werden. Bei Kiefer liegt der Umrechnungsfaktor auf Grund der geringeren Dichte bei 0,65. Hackgut wird in Schüttraummeter [ $\text{m}^3$  oder Srm] angegeben. Hier ist ein noch größerer Lufteinschluss zu berücksichtigen, wonach 1  $\text{m}^3$  nur etwa 0,41 Fm entspricht. Hier ist keine Unterscheidung zwischen den Baumarten nötig (Hartmann/Reisinger, 2007).

### **Heizwert und Wirkungsgrade**

Um letztlich die aus der Biomasse erzeugbare Energiemenge ermitteln zu können, müssen die jeweiligen Energieinhalte und deren beeinflussende Faktoren bekannt sein. Hierzu wird der Heizwert der einzelnen Sortimente erörtert. Abschließend sind die Wahl der Feuerungsanlage und dessen jeweiliger Wirkungsgrad entscheidend, der die tatsächlich nutzbare Energie vorgibt.

Der Heizwert bezeichnet die Wärmemenge, die bei einer vollständigen Oxidation bereitgestellt wird, ohne die Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfes zu berücksichtigen. Der Brennwert hingegen berücksichtigt diese Verdampfungswärme und ist dementsprechend höher als der Heizwert. Daher wird der Brennwert als oberer Heizwert  $H_o$  bezeichnet, wohingegen der Heizwert den unteren Heizwert  $H_u$  beschreibt. Allgemein wird jedoch noch meist der Heizwert als Bezugsgröße für die chemisch gebundene Energiemenge im Brennstoff angegeben, da in den meisten Feuerungsanlagen die Kondensationswärme nicht nutzbar gemacht wird. Um diese nutzen zu können müssen die Abgase so abgekühlt werden, dass der Wasserdampf kondensieren kann. Sogenannte Konversionsanlagen („Brennwertkessel“) sind hier zu in der Lage und können bezogen auf den Heizwert Wirkungsgrade von über 100% erzielen. Doch sind diese Anlagen technisch aufwendig und werden bisher wenig genutzt (Hartmann, 2009).

Der Heizwert von Energieholz wird wesentlich stärker vom Wassergehalt, als von der Baumart bestimmt (Hartmann/Reisinger, 2007). Abbildung 19 stellt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem Heizwert, sowie dem Brennwert dar:



**Abbildung 19 - Differenz zwischen Heiz- und Brennwert bei unterschiedlichen Wassergehalten**  
Quelle: Hartmann, 2009

Da sich der Heizwert unterschiedlicher Laubbäume bzw. Nadelbäume nicht unterscheidet, wird zur Vereinfachung nur nach Laub- und Nadelholz differenziert. Der Heizwert von Nadelholz ist etwa 2% höher als der von Laubholz, was an dem höheren an Ligningehalt und Gehalt an Holzextraktstoffen (Harze, Fette) liegt. Weiteren Einfluss auf die Energiemenge hat neben dem Wassergehalt besonders die Dichte des Holzes in der Trockenmasse. So besitzt zwar Nadelholz pro Kilogramm einen höheren Heizwert, doch weisen Laubhölzer auf Grund

ihrer höheren Dichte eine größere Energiemenge pro Volumen auf (Hartmann/Reisinger, 2007).

Abbildung 20 zeigt die Energiegehalte von verschiedenen Buchen- und Kiefern- Sortimenten, bei unterschiedlichen Wassergehalten:

Wassergehalt [%]		0	15	20	30	50	Dichte <sup>1</sup>	
Baumart	Maßeinheit	Heizwert						
Buche	kWh/kg	5,00	4,15	3,86	3,30	2,16	558	
	kWh/Fm	2790	2724	2692	2631	2411		
	kWh/Rm	1953	1907	1885	1841	1687		
	kWh/Srm SH <sup>2</sup>	1395	1362	1346	1315	1205		
	kWh/Srm HS <sup>3</sup>	1116	1090	1077	1052	964		
Kiefer	kWh/kg	5,20	4,32	4,02	3,44	2,26		431
	kWh/Fm	2241	2190	2166	2118	1948		
	kWh/Rm	1569	1533	1516	1483	1364		
	kWh/Srm SH <sup>2</sup>	1018	995	984	962	885		
	kWh/Srm HS <sup>3</sup>	896	876	866	847	779		

<sup>1</sup> Werte in kg Trockenmasse (TM) je Fm ohne Berücksichtigung von Trockenschwund (Raumdichte nach Kollmann 1982)  
<sup>2</sup> Srm SH: Schüttraummeter Scheitholz  
<sup>3</sup> Srm HS: Schüttraummeter Hackschnitzel

**Abbildung 20 - Heizwerte verschiedener Kiefer- und Buchensortimente**  
 Quelle: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2011

Auf Grund der großen Abhängigkeit vom Wassergehalt, sollte Energieholz möglichst trocken genutzt werden, um eine höchst mögliche Energieausbeute zu erhalten. Holz kann durch Lufttrocknung einen Wassergehalt von 12-20% erreichen, wodurch bereits ohne weiteren technischen Aufwand offenfertiger Brennstoff produziert werden kann. In der Praxis gilt die Faustregel das 2,5 kg Holz den gleichen Heizwert wie 1 Liter Heizöl haben (Hartmann/Reisinger, 2007).

Der zu erreichende Wirkungsgrad hängt hauptsächlich von den verwendeten Feuerungsanlagen ab. Nach dem Feuerungssystem richtet sich auch die Wahl der Brennstoffsortimente. Es können vereinfacht drei Anlagentypen unterschieden werden. Einzelraumheizungen und Zentralheizungen dienen der Wärmebereitstellung im häuslichen Bereich und werden meist mit Scheitholz und Presslingen befeuert. Hier werden handbeschickte, sowie vollautomatisierte Anlagen genutzt. Bei einem handbeschicktem Kachelofen mit Scheitholz kann der Wirkungsgrad bei 79% liegen. Ein Beispiel der Nutzung fester Bioenergieträger ist die Holzpellettheizung (Abbildung 21). Holzpellets werden über eine automatische Fördereinrichtung zum Pelletkessel transportiert, der automatisch angefeuert, nachgefüllt und bei Heizbedarfdeckung gestoppt wird. Der Vorteil einer solchen Anlage ist der geringe Zeitaufwand, auf

Grund der Automatisierung, und wenig Asche bei der Verbrennung entsteht. (Quaschnig, 2012). Heizwerke dienen der Beheizung größerer oder mehrerer Gebäude und werden vollautomatisch beschickt.

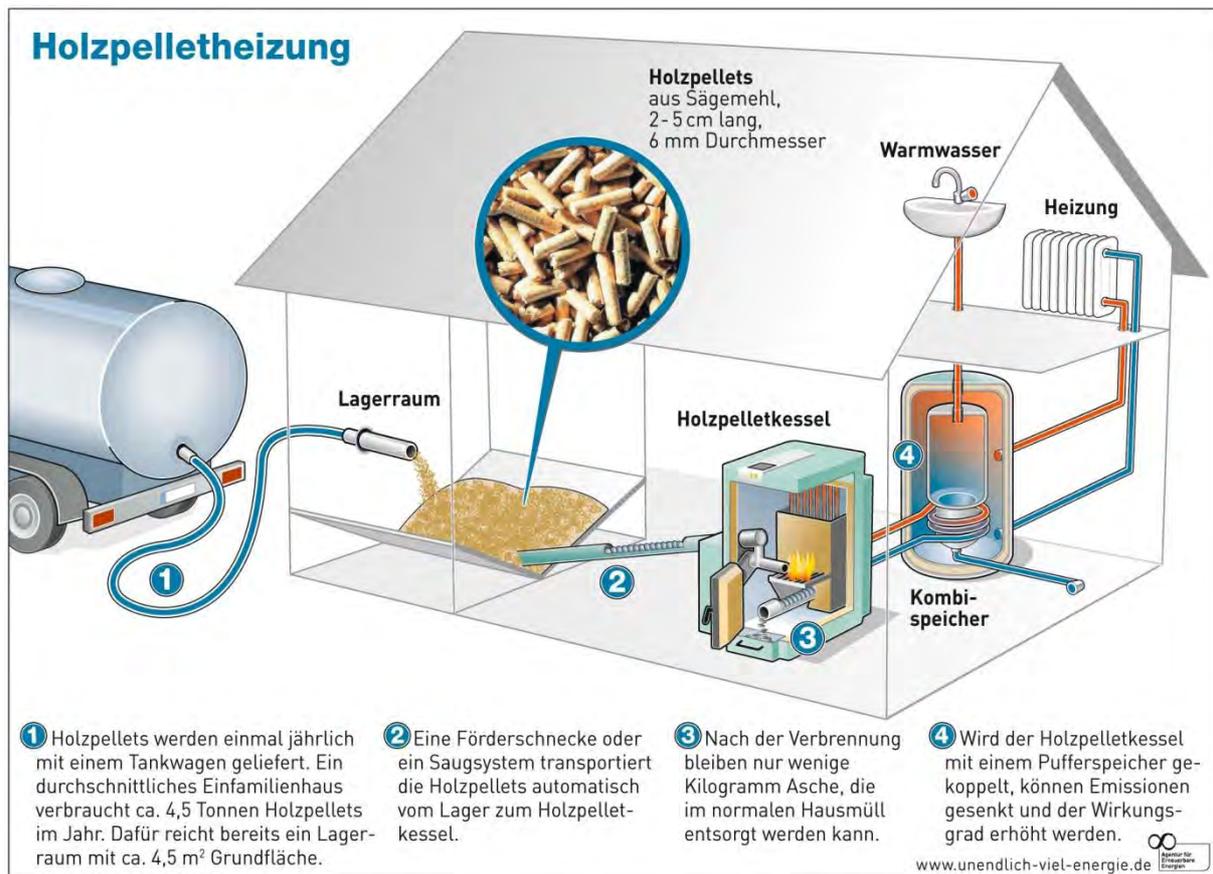


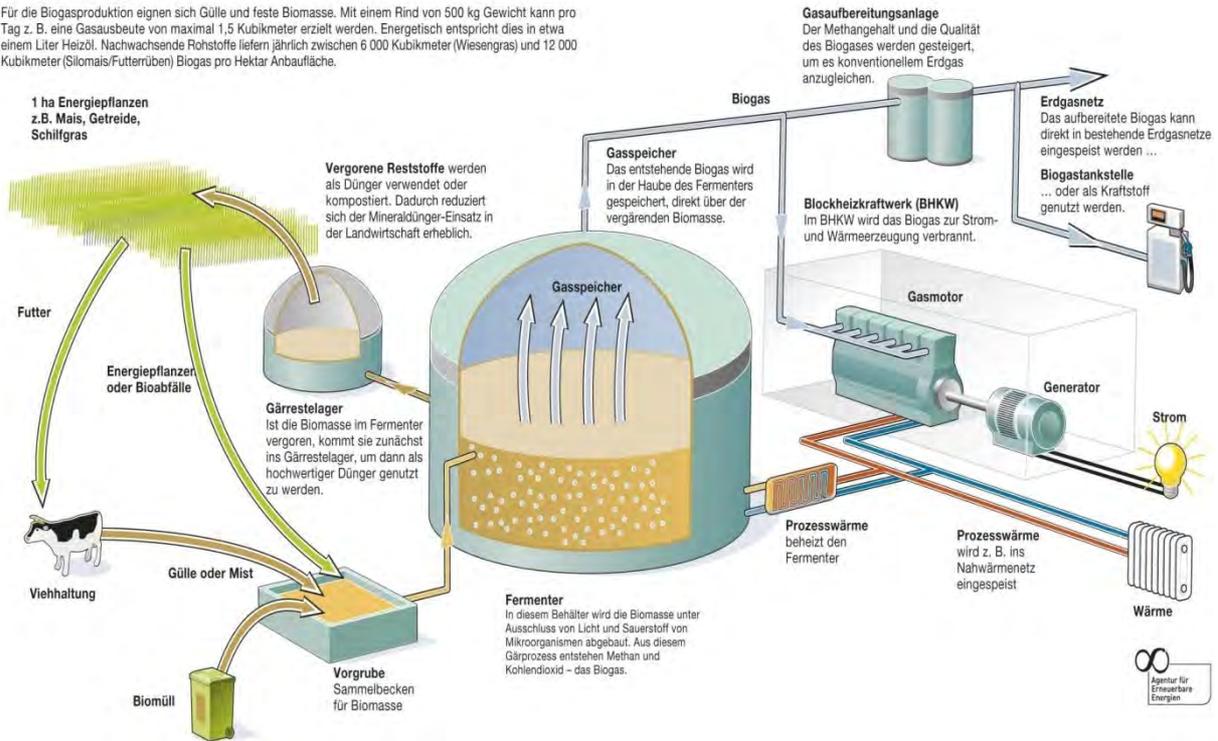
Abbildung 21 - Aufbau und Funktion einer Holzpellettheizung

### 3.4.2. Gasförmige Bioenergieträger

Biogasanlagen werden nach folgendem Schema (Abbildung 22) betrieben: In einem Fermenter werden Substrate, vor allem Gülle aus Viehhaltung und nachwachsenden Rohstoffen, seltener vergärbare Abfälle aus der Nahrungsmittelindustrie sowie der Gastronomie mittels verschiedener Techniken eingebracht.

**Biogas-Anlage**

Für die Biogasproduktion eignen sich Gülle und feste Biomasse. Mit einem Rind von 500 kg Gewicht kann pro Tag z. B. eine Gasausbeute von maximal 1,5 Kubikmeter erzielt werden. Energetisch entspricht dies in etwa einem Liter Heizöl. Nachwachsende Rohstoffe liefern jährlich zwischen 6 000 Kubikmeter (Wiesengras) und 12 000 Kubikmeter (Silomais/Futterrüben) Biogas pro Hektar Anbaufläche.



**Abbildung 22 - Aufbau und Funktion einer Biogasanlage**

Im Fermenter erfolgt nun die Vergärung, die die Stufen Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung und Methanbildung beinhaltet. In der letzten Phase entsteht das Methan, sowie die Abfallprodukte des Biogasprozesses Kohlendioxid, Wasserstoff und je nach eingesetztem Substrat Schwefelwasserstoff. Die Vergärung wird unterstützt durch Beheizung des Fermenters sowie durch Durchmischung des Fermenterinhalt. Das vergorene Material wird in Lagerbehälter überführt, mittlerweile werden auch die Gärrestlager abgedeckt, da immer noch Biogas in geringen Mengen entstehen kann. Das Biogas wird je nach Fermentertyp mit Hilfe von zum Beispiel Folien oberhalb des Fermenters gesammelt und weitergeleitet zur Gasreinigung und Komprimierung, um anschließend in das Erdgasnetz eingespeist zu werden. Der Gärprozess in einem Fermenter verlangt unbedingt ein nasses Milieu, das bedeutet, dass bestimmte Trockensubstanzgehalte nicht überschritten werden sollten. Auch die so genannte Trockenfermentation arbeitet im nassen Milieu, auch wenn die Trockensubstanzgehalte deutlich erhöht sind. Im Batchverfahren wird auf eine Durchmischung der Substrate verzichtet, hier erfolgt eine Impfung und Durchnässung des Materials über den Einsatz von Perkolat.

Die Hydrolyse beschreibt eine enzymatische Tätigkeit hydrolytischer aerober Bakterien. Mit Hilfe extracellulärer Enzyme, den sogenannten Hydrolasen, die sich aufteilen in Cellulasen, Amilasen, Proteasen und Lipasen, werden hochmolekulare Substanzen wie Kohlenhydrate,

Fette, und Eiweiße in die niedermolekularen Substanzen Einfachzucker, Aminosäuren, Fettsäuren und Wasser gespalten (Eder et al., 2006).

Dabei beteiligt sind verschiedene Bakterien, für den Stärke- und Celluloseabbau bspw. Clostridien, Bacillus, Pseudomonas, Micrococcus; für den Eiweißabbau: Peptococcus, Bifidobacterium, Bacillus, Staphylococcus, Clostridien; für den Fettabbau: Alcaligenes, Bacillus, Pseudomonas (Böhnke et al., 1993).

Diese Bakterien leben bei einem optimalen pH Wert von 4,5-6. Sie sind außerdem bei schwerverdaulichen Substraten der bestimmende Faktor für die Prozessdauer.

In der Versäuerungs- bzw. acidogenen Phase werden mit Hilfe säurebildender Bakterien interzellulär kurzkettige ( $C_3$ - $C_6$ ) Fettsäuren wie Propion-, Butter-, und Valeriansäure gebildet (Eder et al., 2006). Diese Bakterien leben fakultativ anaerob und bevorzugen pH-Werte von 6-7,5.

In der acetogenen Phase der Essigsäurebildung werden die  $C_3$ - $C_6$  Säuren von acetogenen Bakterien, wie Synthrophobacter walonii oder Desulforibrio (Böhnke et al., 1993), zu Essigsäure, Ameisensäure, Kohlendioxid und Wasserstoff umgebaut (Graf, 2002). Acetogene Bakterien sind extrem temperaturempfindlich. Die Essigsäurebildung bestimmt die Prozessdauer bei leicht verdaulichen Substraten.

Die methanogene Phase ist entscheidend für den Prozess der Methanbildung. Zwei Arten von den streng anaerob lebenden methanogenen Archaeobakterien (Böhnke et al., 1993) bilden in dieser Phase Methan. Hydrogenotrophe Archaea bilden Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid, acetogene Archaea bilden aus Essigsäure Methan. 90% des gebildeten Methans entstammen dieser Phase, 70% des Methans werden aus Essigsäure gebildet. Archaeobakterien leben bei einem optimalen pH-Wert 7, das Temperaturoptimum liegt bei 30-40°C (Eder et al., 2006).

Wichtig ist, dass alle vier Prozessphasen nicht direkt trennbar sind, sie laufen parallel ab, auch bei zweistufigen Biogasanlagen. Bis heute sind nicht alle beteiligten Bakterienarten bekannt. Auch differieren die Populationen in den einzelnen Anlagen, was durch die verwendeten Substrate bedingt ist. Bakterien bilden Microenvironments, sie haben räumlichen Kontakt und es entstehen gegenseitige Wechselwirkungen (Böhnke et al., 1993). Zugaben von Tonmineralien oder Silikaten, sowie kleingehäckselte Substrate erhöhen die Besiedlungsfläche für die Bakterien und sollen höhere Abbaugrade erzielen. Enge Vergesellschaftungen bilden die acetogenen Bakterien und die methanogenen Archaeobakterien. Hier findet ein sogenannter Interspecies Hydrogen Transfer (Böhnke et al., 1993) statt, dabei geht die

anaerobe Umsetzung von Fettsäuren und Alkoholen energetisch zu Lasten der Methanbakterien, die methanogene Archaeobakterien erhalten im Austausch die für ihr Wachstum benötigten Substrate wie Wasserstoff, Kohlendioxid und Essigsäure.

### 3.4.3. Energiegewinnung aus Biomasse

Die hergestellten Bioenergieträger können wie fossile Brennstoffe in Heizwerken verbrannt werden. Mit dieser Technik lassen sich allerdings nur 35% der enthaltenen Primärenergie in Strom umwandeln, Ein Großteil geht als Wärme verloren. Die Nutzung der Biomasse in Heizkraftwerken erzeugt neben Strom auch noch Wärme, die genutzt werden kann. Diese kombinierte Nutzungsform nennt sich Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Die KWK hat zum Vorteil, dass auf Grund der Abwärmenutzung höhere Wirkungsgrade bis 80% erreicht werden und keine Kühlprozesse stattfinden müssen. Die Wärme wird je nach Größe des Heizkraftwerks ins Fernwärmenetz eingespeist oder Industriegebäuden wie auch Ein- und Mehrfamilienhäusern bereitgestellt. Die kleineren Heizkraftwerke nennen sich Blockheizkraftwerke (BHKW) (um 500 kW Leistung) und erreichen nicht ganz so hohe Wirkungsgrade (Quaschnig, 2010; Erneuerbare Energien Agentur).

KWK-Anlagen lassen sich mit unterschiedlichen Technologien betreiben. Man unterscheidet „Dampfturbinen, Dampfmaschinen, Gasturbinen, Gas- und Dampfturbinen (gekoppelt), verschiedene Motorenkonzepte (Otto, Diesel, Stirling) sowie Brennstoffzellen“. In der folgenden Abbildung sind die zugehörigen Stromkennzahlen und Wirkungsgrade (elektrisch und thermisch) dargestellt. Die Stromkennzahl stellt dabei den Quotient aus Nettostromerzeugung und Nettowärmeerzeugung dar (UBA, 2012a).

KWK-Anlage	Stromkennzahl	$\eta_{el}$	$\eta_{ges}$
<b>Blockheizkraftwerk</b>			
Gasmotor	0,30 - 0,80	0,25 - 0,35	0,80 - 0,95
Dieselmotor	0,60 - 1,2	0,40 - 0,45	0,85 - 0,98
<b>Gasturbine mit Abhitzenutzung</b>	0,30 - 0,70	0,15 - 0,33	0,70 - 0,85
<b>Dampfkraftwerk</b>			
Gegendruckturbine	0,30 - 0,60	0,20 - 0,33	0,82 - 0,90
Entnahme-Kondensationsturbine	0,80 - 2,50	0,32 - 0,36	0,55 - 0,65
<b>GuD - Kraftwerk</b>			
Gegendruckturbine	0,70 - 0,85	0,35 - 0,40	0,80 - 0,89
Entnahme-Kondensationsturbine	1,50 - 2,70	0,35 - 0,42	0,60 - 0,75
<b>Brennstoffzelle</b>	1,50 - 6,00	0,40 - 0,60	0,75 - 0,83

Quelle: Dielmann, Kuperjans (2008): Prof. Dr. Dielman, Dr. Kuperjans: Kraft-Wärme-Kopplung I, Skript WS 2008/2009, FH Aachen, Abteilung Jülich

Abbildung 23 - Kennzahlen typischer KWK-Anlagen

### 3.4.4. Energiegewinnung aus Abfall

In diesem Kapitel werden einige Verfahren zur Energiegewinnung aus Abfall näher beschrieben. Die Sortierung erfolgt nach der Abfallart, da teilweise mehrere Optionen für eine Abfallart existieren. Diese Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll lediglich einige wichtige Aspekte aufgreifen und einen Überblick ermöglichen.

#### Hausmüll

Im Einklang mit der im Jahr 1999 beschlossenen europäischen Deponierichtlinie dürfen in Deutschland seit dem 1. Juni 2005 nur noch vorbehandelte hausmüllartige Abfälle auf Deponien abgeladen werden. Zudem müssen alle bestehenden Deponien vorgegeben technischen Ansprüchen entsprechen (UBA, 2011b). Nach diesem Verbot gibt es nun im Grunde zwei Alternativen den Hausmüll zu behandeln, wobei beide die in dem Abfall gebundene Energie (teilweise) wiedergewinnen.

#### Müllverbrennungsanlage

Das wohl bekannteste Beispiel zur Gewinnung von Energie aus Abfall sind die sogenannten Müllverbrennungsanlagen (MVA). Seit Ende des 19. Jahrhunderts wird Abfall bereits in Anlagen verbrannt, vorrangiger Grund ist die Volumenreduktion. So kann das Volumen bei einer Verwertung der entstehenden Schlacke um bis zu 95% gesenkt werden, das Gewicht bis zu 70% (Förstner, 2012). Des Weiteren kann die bei der Verbrennung entstehende Energie in Form von Strom und Wärme genutzt werden. Grundsätzlich kann zwischen direkten und indirekten Verbrennungsverfahren unterschieden werden. Bei direkten Verfahren erfolgen Zersetzung und Oxidation des Abfalls (auch Sonderabfall) bei sehr hohen Temperaturen, in den meisten Fällen durch eine Rostfeuerung, oft mit nachgeschalteten Drehöfen, oder einer Wirbelschichtverbrennung. Bei indirekten Verfahren werden meist Zwischenprodukte geschaffen; so entstehen bspw. bei der Pyrolyse unter anaeroben Verhältnissen Brenn- und Synthesegas, kondensierte Komponenten und feste Produkte. Mithilfe von Vergasungsmitteln wird bei der Vergasung der Kohlenstoffanteil in Kohlenstoffmonoxid, -dioxid und Wasserstoff umgewandelt (Förstner, 2012). Die aus dem Abfall gewonnene Energie kann nur für Wärme, nur für Strom und in Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden. In Form von Dampf oder heißem Wasser kann Wärme an Fernwärme- und Kühlungsnetze sowie Industrieanlagen geliefert werden. Mithilfe einer Turbine kann der Dampf aber auch in Strom umgewandelt werden. Bei einer effizienten Kraft-Wärme-Kopplung, die einen flexiblen Umgang mit einer sich ständig ändernden Nachfrage ermöglicht, wird der Niederdruckdampf zum Beispiel in ein Fernwärmenetz eingeleitet, während für die Stromerzeugung der Dampf mit dem höhe-

ren Druck zur Verfügung steht. Die gewonnene Energie hängt maßgeblich vom Heizwert des verwendeten Abfalls ab; dieser beträgt bei unbehandelten Siedlungsabfällen zwischen acht und zwölf MJ/kg. Somit lassen sich im Durchschnitt aus einer Tonne Siedlungsabfällen 0,3 bis 0,7 MWh Strom und, bei Kraft-Wärme-Kopplung zusätzlich, 1,25 bis 1,5 MWh Wärme (teilweise mit Einbußen beim Strom) erzeugen. Die Kraft-Wärme-Kopplung erlaubt somit eine Maximierung der verfügbaren Energie (UBA, 2005).

#### Mechanisch-biologische Behandlung/Stabilisierung von Abfällen

Als Alternative zur MVA wurde in der Abfallablagereungsverordnung (AbfAbIV) von 2001 die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) genehmigt. Deren Hauptziel ist es, ein Deponiegut zu schaffen, das den Ablagerungskriterien entspricht, das heißt möglichst geringe Gasemissionen (hier ist vor allem Methan hervorzuheben) und allgemein verringerte Umweltbelastungen (Kranert/Cord-Landwehr, 2010). Hierzu wird durch ein Zusammenspiel von mechanischen Prozessen und biologischer Behandlung das Volumen und die Masse reduziert, verwertbare Materialien und eine heizwertreiche Fraktion abgetrennt und bei einigen Verfahren während des Prozesses und aus produzierten Sekundärbrennstoffen Energie gewonnen (INTECUS, o.A.). Im Gegensatz zur MVA handelt es sich hier allerdings um kein abgeschlossenes Entsorgungsverfahren, da die gewonnenen Fraktionen weiteren Verwertungs- und Entsorgungsverfahren zugeführt werden (Förstner, 2012). Generell lassen sich zwei Arten von mechanisch-biologischer Behandlung durch die Anordnung der Prozessschritte unterscheiden:

- Beim Splitting (INTECUS, o.A.) (entspricht der klassischen MBA) erfolgt zuerst eine mechanische Aufteilung des Abfalls in verschiedene Fraktionen und dann die biologische Behandlung – durch anaerobe Vergärung und/oder aerobe Kompostierung – der heizwertärmeren Fraktion (Förstner, 2012), die anschließend deponiert wird (41% des Output-Materials (SRU, 2008)). Erfolgt die biologische Behandlung durch eine Vergärung kann während des Prozesses Energie gewonnen werden.
- Im Gegensatz zum Splitting wird bei der Stabilisierung (INTECUS, o.A.) (mechanisch-biologische Stabilisierung (MBS) und mechanisch-physikalische Stabilisierung (MPS)) der gesamte Abfall zuerst biologisch bzw. thermisch getrocknet, um anschließend mechanisch in verwertbare Stoffe, Sekundärbrennstoff (Hauptziel) und eine Deponiefraction (maximal zehn Prozent des Output-Materials) aufgeteilt zu werden (SRU, 2008).

Der sowohl beim Splitting als auch bei der Stabilisierung entstehende Ersatzbrennstoff (EBS) kann in Kraftwerken mit Stein- oder Braunkohleeinsatz, in Zement- und Kalkwerken, in Hochofen- und Pyrolyseanlagen sowie in MVA mitverbrannt werden oder in eigens dafür konzipierten Monoverbrennungsanlagen für EBS (INTECUS, o.A.). Der durchschnittliche Heizwert des EBS beträgt 16 MJ/kg (SRU, 2008). Je nach weiterem Verwertungsweg muss der EBS bestimmte Kriterien erfüllen; für eine Mitverbrennung in Kraftwerken einen Heizwert von 16-19 MJ/kg und für eine Mitverbrennung in Zementwerken einen Heizwert von 14-22 MJ/kg (INTECUS, o.A.). Die Netto-Energieerträge der Anlagen und der anschließenden Verwertung der EBS liegen pro Tonne Abfall bei einer MBA ohne Vergärung bei durchschnittlich 0,3 MWh Strom oder 1,2 MWh Wärme. Wird eine MBA mit Vergärung betrieben, erhöhen sich die Erträge aufgrund der Nutzung des Biogases um je circa 0,1 MWh an Strom und Wärme. Bei einer MBS liegen die Netto-Erträge im Durchschnitt bei 0,3 MWh Strom oder 1,5 MWh Wärme pro Tonne (Kranert/Cord-Landwehr, 2010).

### Deponiegas

In den Jahren 1999 bis 2005 wurden jedes Jahr circa 110 Mio. t Abfälle, das entspricht mehr als einem Viertel des Gesamtaufkommens, auf deutschen Deponien abgeladen. Dabei wurden von 1999 bis 2001 jährlich etwa 13 Mio. t Siedlungsabfälle deponiert; 2002 bis 2004 nahm diese Menge kontinuierlich bis acht Millionen Tonnen ab, 2005 waren es noch knapp vier Millionen Tonnen. Seit Juni 2005 gilt ein Verbot der Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle und somit sank die Menge 2006 auf 307.000 t (UBA, o.A.). Durch aerobe und anaerobe Abbauprozesse wurden die organischen Anteile der Abfälle zersetzt; bei diesen Prozessen entsteht sogenanntes Deponiegas – ein Gasgemisch bestehend aus 30-60% Methan, 30-50% Kohlenstoffdioxid und zwei Prozent, die sich aus Schwefelwasserstoff, Kohlenmonoxid, Stickstoff und vielen anderen Spurengasen zusammensetzen. Dieses Gas kann zur Energiegewinnung genutzt werden (Förstner, 2012). 2,5 Kubikmeter Deponiegas haben ungefähr den gleichen Heizwert wie ein Liter Heizöl; etwa 10 kWh (IWO, o.A.). Die Umwandlung kann durch Blockheizkraftwerke (BHKWs), auch in Kraft-Wärme-Kopplung, oder Mikrogasturbinen erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass die Menge an verfügbarem Gas durch den andauernden Abbau und das Deponierungsverbot abnimmt; so halbieren sich die Deponiegasmengen innerhalb von sieben bis zehn Jahren nach Ende der Ablagerung (Thomas et al., 2009). Strom aus Deponiegas wird zudem nach §24 des neuen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das am 01. April 2012 in Kraft getreten ist, bis zu einer Bemessungsleistung von 500 kW mit 8,60 Cent/kWh vergütet und bis fünf MW mit 5,89 Cent/kWh (EEG 2012, 28).

### Altholz

Altholz wird durch die Altholzverordnung (AltholzV) in vier Klassen, von A I (naturbelassenes Holz) bis A IV (mit Holzschutzmittel behandeltes Holz), aufgeteilt. A I, A II und A III (die beiden letzteren nach einer Aufarbeitung) kommen rechtlich für eine stoffliche Verwertung in Frage; für eine energetische Verwertung können grundsätzlich alle Klassen in dafür genehmigten Anlagen verwendet werden (AltholzV, 2 ff.). Zur energetischen Verwertung wird das Altholz meist zerkleinert und in Feuerungsanlagen zur Strom- und/oder Wärmeenergieerzeugung eingesetzt (Müller-Langer et al., 2006). Des Weiteren ist eine Mitverbrennung in bspw. Kohlekraftwerken möglich (Kaltschmitt et al., 2009). Hierbei ist der Heizwert von Altholz, der 13 MJ/kg beträgt, zu beachten (Müller-Langer et al., 2006). Bisher konnte Strom der aus Altholz gewonnen wird, durch das EEG vergütet werden; dies ist nun bei Neuanlagen nicht mehr möglich. Im EEG 2012 und der dazugehörigen Biomassenverordnung 2012 wird Altholz nicht mehr als Biomasse deklariert. Der Grund hierfür ist laut BMU die „Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen“ (BMU, 2011b).

### Bio- und Grünabfall

Der Begriff „Bio- und Grünabfall“ umfasst alle in Küche und Garten anfallenden kompostierbaren Abfälle, wie Essensreste, Grasschnitt und Zweige. Biomüll wird, soweit er getrennt erfasst wird, in der Regel kompostiert. Es ist allerdings möglich vor der Kompostierung eine Vergärungsstufe einzubauen, wie schon bei der MBA erwähnt wurde, wodurch die biologische Aktivität und das Reaktionspotential des Abfalls reduziert werden (INTECUS, o.A.). Bei der Vergärung werden unter anaeroben Verhältnissen organische Stoffe von Bakterien abgebaut, wodurch die enthaltene Energie in Form der entstehenden Gase abgegeben wird und der produzierte Gärrest als Dünger (beim Biomüll) verwendet werden kann (Kranert/Cord-Landwehr, 2010). Das entstehende Biogas, besteht zu 50-75% aus Methan, zu 25-50% aus Kohlenstoffdioxid, aus unter drei Prozent Stickstoff und aus Spuren von Sauerstoff, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Ammoniak (Kern et al., 2010). Das erzeugte Gas, dessen Heizwert vom Methangehalt abhängig ist und zwischen 21 und 23 MJ/Nm<sup>3</sup> bzw. 234 und 256 MJ/kg beträgt (Bischofsberger et al., 2005), kann entweder in bspw. einem BHKW oder Mikrogasturbinen zu Strom und/oder Wärme umgewandelt werden, oder auf Erdgasqualität aufbereitet werden und in das Erdgasnetz eingespeist werden oder zum Antrieb von Fahrzeugen verwendet werden (Kern et al., 2010).

Wird aus dem Biogas Strom erzeugt, kann dieser nach §27a des EEG 2012 bis zu einer Bemessungsleistung von 500 kW mit 16 Cent/kWh und bis zu einer Bemessungsleistung von 20 MW (ab dem 1.1.2014 in Betrieb genommene Anlagen nur noch bis 750 kW) mit 14 Cent/kWh vergütet werden. Hierzu muss der verwendete Abfall zu mindestens 90 Massen-

prozent den Abfallschlüsseln 200201, 200301 und 200302 der Bioabfallverordnung zugeordnet werden können (EEG 2012, 33). Das sind biologisch abbaubare Abfälle im Sinne von Garten-, Park- und Landschaftspflegeabfällen, gemischte Siedlungsabfälle im Sinne von getrennt erfassten Bioabfällen, sowie Marktabfälle (BioAbfV, 13). Die Werte für die aus einer Tonne Biomüll gewonnene Menge an Biogas variieren in der Literatur; so geben Kern et al. (2010) und Funda et al. (2009) gewonnene Mengen von 80 bis 130 bzw. 140 Nm<sup>3</sup> an, während Bischofsberger et al. (2005) gar von 100 bis 180 Nm<sup>3</sup> spricht. Einig sind sie sich darin, dass die erzeugte Menge von der Qualität des Materials und dem gewählten Verfahren abhängt (Kern et al., 2010). Es gibt verschiedene Verfahren, die grob nach Betriebstemperatur, Trockensubstanzgehalt des Materials und der Kontinuität der Beladung gegliedert werden können.

- Zwischen 50 und 65°C arbeiten thermophile Anlagen, mesophile zwischen 20 und 45°C. Tendenziell erzeugen thermophile Anlagen mehr Biogas, haben aber auch einen höheren Energiebedarf.
- Bei einer Trockenvergärung beträgt der Trockensubstanzgehalt zwischen 20-40%, während er bei einer Nassvergärung nur fünf bis 20% beträgt. Das Verfahren wird hier nach dem zu behandelnden Material ausgewählt (INTECUS, o.A.).
- Technisch einfacher sind diskontinuierliche Verfahren, bei denen der Materialeintrag nicht kontinuierlich erfolgt. Besser zu automatisieren sind allerdings kontinuierliche Verfahren (Funda et al., 2009).

Insgesamt können durch eine zwischengeschaltete Vergärungsstufe vor der Kompostierung Stromerträge von 0,1 bis 0,3 MWh und Wärmeerträge von 0,3 bis 0,6 MWh/t Biomüll generiert werden (Bischofsberger et al., 2005).

### Klärschlamm

Bei der Behandlung von Abwasser fallen ein bis zwei Prozent der behandelten Menge als sogenannter Klärschlamm an; Schlamm mit zwei bis fünf Prozent Trockensubstanzgehalt, der die aus dem Abwasser gelösten Schmutzstoffe beinhaltet. In ihm befinden sich unter anderem Keime, Schwermetalle und organische Substanzen. Pro Tag entstehen zwei bis drei Liter Schlamm pro Einwohner in deutschen Kläranlagen, der unterschiedlich genutzt werden kann. Zum Einen wird er durch die Landwirtschaft auf Böden aufgebracht. Eine andere Möglichkeit ist die Deponierung, in Zukunft allerdings nur noch in Form von Verbrennungssasche. Des Weiteren kann Klärschlamm in bestehenden Anlagen, wie zum Beispiel MVA, Kohlekraftwerken oder in der Zementindustrie, mitverbrannt werden. Hierfür eignet er

sich durch seine homogene Zusammensetzung sogar meist besser als andere Abfälle. Zudem kann das Kraftwerk für den biogenen Anteil des Klärschlammes eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift zugeschrieben bekommen (Förstner, 2012). Der Heizwert von Klärschlamm beträgt elf MJ/kg (ausgefäult) bzw. 17 MJ/kg (nicht ausgefäult) bezogen auf die Trockensubstanz (Land Steiermark, 2012). Um den Klärschlamm nutzen zu können, muss er jedoch erst hygienisiert und stabilisiert werden. Dies kann rein aerob oder unter Einbindung einer anaeroben Stufe („Ausfaulen“) passieren (Förstner, 2012). Die anaerobe Stabilisierung findet bei 30-40° C in Faultürmen statt, wobei die organischen Stoffe durch Bakterien abgebaut werden und sich dadurch das Volumen verringert. Das bei diesem Prozess entstehende Klärgas weist eine ähnliche Zusammensetzung wie Deponie- und Biogas auf, wobei es grundsätzlich, mit 60-70%, etwas mehr Methan beinhaltet. 30-40% sind Kohlenstoffdioxid, weniger als vier Prozent Stickstoff, weniger als ein Prozent Sauerstoff und Schwefelwasserstoff, Chlor und Fluor sind nur in Spuren vorhanden. Im Durchschnitt beträgt der Heizwert von Klärgas 23 MJ/Nm<sup>3</sup> bzw. 256 MJ/kg. Das gewonnene Klärgas kann ähnlich wie Biogas verwendet werden; entweder wird es energetisch in einem BHKW oder einem Heizkessel genutzt, oder es wird aufbereitet und dann ins Erdgasnetz eingespeist oder als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt (Thomas et al., 2009). Der aus Klärgas gewonnene Strom kann nach § 25 des EEG 2012 bis zu einer Bemessungsleistung von 500 kW mit 6,79 Cent/kWh, und bis zu einer Bemessungsleistung von fünf MW mit 5,89 Cent/kWh vergütet werden (EEG 2012, 29).

### **3.5. Geothermie**

In den geologischen Schichten unterhalb der Erdoberfläche ist ein großes Wärmepotential vorhanden, welches mit Hilfe von geothermischen Verfahren für den Menschen nutzbar gemacht werden kann. Die geothermische Energie eignet sich sowohl zur Bereitstellung von Wärme als auch zur Produktion von Strom (Thomsen et al., 2004). Das besondere dieser regenerativen Energieform gegenüber anderen regenerativen Energieträgern ist die Grundlastfähigkeit. Erdwärme ist unabhängig von Witterungsbedingungen und Tageszeiten vorhanden und hat somit im Gegensatz zu anderen regenerativen Energieformen das Potential konventionelle großtechnische Kraftwerke zu ersetzen (Paschen et al., 2003). Die Nutzungsmöglichkeiten einer geothermischen Energieförderung lassen sich differenzieren in die Untergruppen oberflächennahe Geothermie und Tiefengeothermie.

#### **3.5.1. Oberflächennahe Geothermie**

Die oberflächennahe Geothermie beschreibt die Nutzung der gespeicherten Erdwärme in dem oberflächennahen Untergrund bis in ca. 100-150 m Tiefe. Die Wärme in diesem Tiefen-

bereich wird im Wesentlichen durch die Sonneneinstrahlung sowie durch versickerndes Niederschlagswasser geliefert. Der Wärmefluss aus dem Erdinneren spielt in dieser Tiefe eine nur untergeordnete Rolle (Thomsen et al., 2006).

Ab einer Tiefe von etwa 15 m ergibt sich eine nahezu konstante Temperatur von 10°C. Mit einer Zunahme der Tiefe steigt die Temperatur im Durchschnitt um 3°C pro 100 m an. Im Winter dient die oberflächennahe Schicht somit als Wärmespeicher, im Sommer hingegen als Kältespeicher (Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, 2001). Grundsätzlich ist die oberflächennahe Erdwärmenutzung nahezu überall möglich solange gewährleistet ist, dass eine Beeinträchtigung des Grundwassers in Trinkwassereinzugsgebieten ausgeschlossen werden kann (Thomsen et al., 2006).

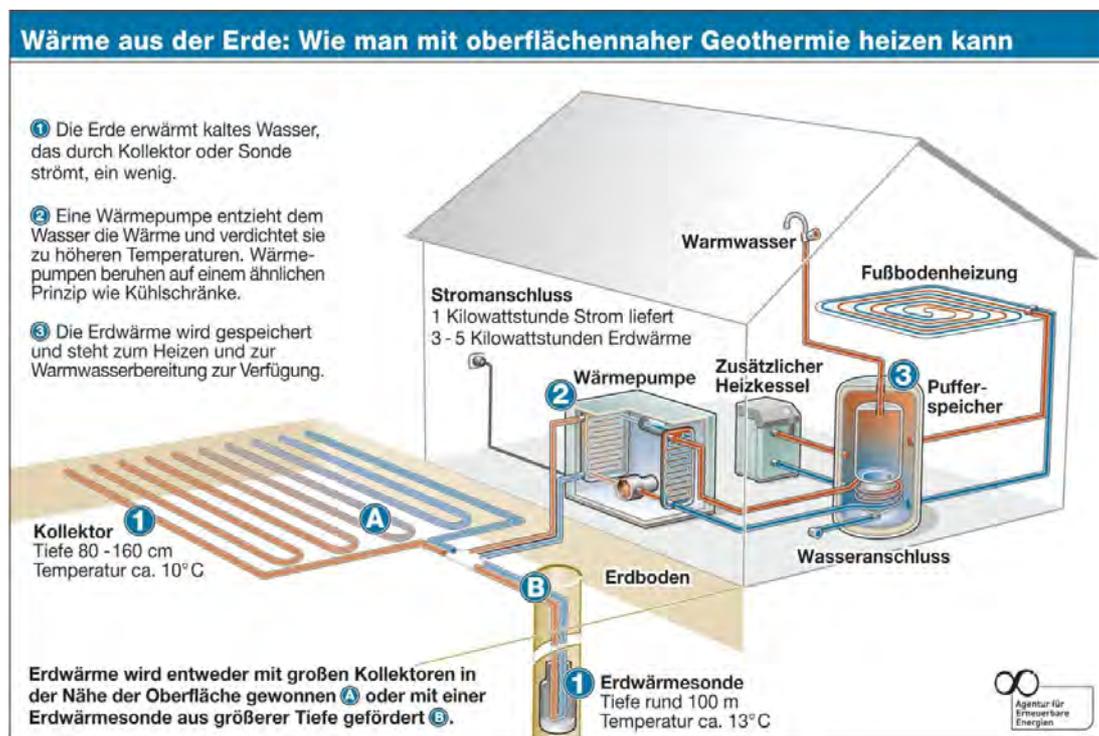


Abbildung 24 - Nutzung oberflächennaher Geothermie

Die Erdwärme in dem oberflächennahen Untergrund kann mit erdgekoppelten Wärmepumpen über Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Grundwasserbrunnen oder Energiepfählen genutzt werden. Das Leistungsspektrum der oberflächennahen Geothermie umfasst sowohl die Förderung als auch die Speicherung von Wärme und Kälte (Becker, 2004).

Die Technik der oberflächennahen Geothermie wird vor allem in dezentralen Heizanlagen genutzt. Jeder Bauherr kann diese Techniken individuell in sein Bauprojekt integrieren. Auf diese Weise entstehen für ihn erhöhte Investitionskosten die sich jedoch mit großer Wahr-

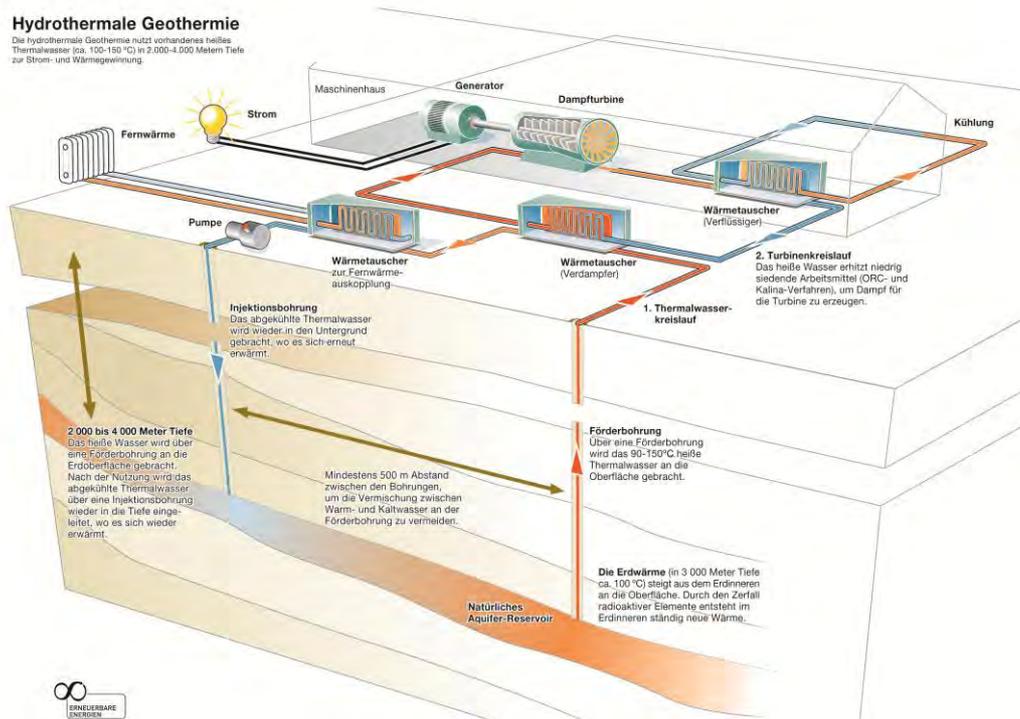
scheinlichkeit im Laufe der Lebensdauer der Anlage durch die Einsparung von Brennstoffen wie Gas und Öl amortisieren werden (Thomsen et al., 2006). Abbildung 24 zeigt die Funktionsweise eines dezentralen Heizsystems über eine Erdwärmesonde oder einen Kollektor. Beide erwärmen kaltes Wasser auf 10 oder 13°C und fördern es zur Wärmepumpe. Diese entzieht die Wärme, verdichtet und überträgt sie auf bspw. einen Pufferspeicher.

### **3.5.2. Tiefengeothermie**

Bei der Tiefengeothermie handelt es sich um die Förderung geothermischer Energie aus tieferen Schichten. Die Energie wird dabei über Tiefbohrungen mit Hilfe verschiedenster Technik an die Erdoberfläche befördert und kann dort in der Regel ohne Niveauanhebung genutzt werden. Die Tiefengeothermie beginnt ab einer Tiefe von 400 m und einer Temperatur von 20°C (Stober et al., 2009).

### **3.5.3. Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie**

Bei der hydrothermalen Geothermie werden mit Hilfe von hydrothermalen Tiefbrunnensystemen die erwärmten Wässer im Porenraum des Gesteinsverbandes genutzt. Für diese Technik benötigt man eine Förder- und eine Injektionsbohrung. Über die Förderbohrung wird warmes Wasser an die Erdoberfläche gepumpt (Abbildung 25). Diesem Wasser wird durch einen Wärmetauscher die Wärme entzogen, bevor es über die Injektionsbohrung in einer bestimmten Entfernung zur Förderbohrung in dasselbe Aquifer zurückgepumpt wird. Die untertägige Entsorgung des Wassers ist aufgrund der hohen Mineralisation aus Umweltschutzgründen notwendig (Thomsen et al., 2004). Der Abstand von Förder- und Injektionsbohrung sollte so groß gewählt werden, dass voraussichtlich während der Nutzungsdauer (ca. 30 Jahre) keine Temperaturniedrigung infolge der Einleitung des abgekühlten Wassers entstehen kann (Stober et al., 2009). Die Anordnung der Dublette kann variiert werden. Entweder man errichtet zwei Vertikalbohrungen mit entsprechender Entfernung oder man nutzt lediglich einen Bohrplatz und lenkt eine der beiden Bohrungen oder beide Bohrungen unterirdisch voneinander ab, so dass untertägig die benötigte Entfernung erreicht wird (Schulz et al., 1992).



**Abbildung 25 - Nutzung hydrothermaler Geothermie**

Eine effiziente Nutzung von Tiefbrunnensystemen im Dublettbetrieb erfordert spezielle geologische Voraussetzungen der Schichten. Erstens benötigt man eine wasserführende Sandschicht mit Nutzporositäten von mehr als 20% bzw. Permeabilitäten von mehr als 500 m. Zweitens sollte die geeignete Sandschicht mindestens eine Mächtigkeit von 20 m besitzen. Drittens muss das Thermalwasser einen Volumenstrom von 50 bis über 100 m<sup>3</sup>/h erreichen. Viertens muss der Chemismus des Wassers hinsichtlich Korrosion und Ausfällung beherrschbar sein. Darüber hinaus ist es essentiell, dass die geeignete Schicht ein ausreichendes Temperaturniveau hat um wirtschaftlich Strom oder Wärme zu erzeugen. (Thomsen et al., 2004).

In Deutschland ist die Dublettentechnik weitestgehend ausgereift und wird seit Jahrzehnten erfolgreich verwendet (Stober et al., 2009). Die positiven Erfahrungen mit der hydrothermalen Geothermie machen sie für eine Anwendung in dem Landkreis Lüneburg besonders attraktiv, sofern die geologischen Anforderungen erfüllt sind.

### Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie: Störungen

Störungen kann man als Bruchzonen beschreiben, die sowohl in Sedimentgesteinen, wie auch in kristallinen Gesteinen auftreten können. Sie entstehen in der oberen Erdkruste, wenn

die Gesteine auf einwirkende tektonische Kräfte reagieren. Sind Störungen in einem Gebiet vorhanden erhöht sich das hydraulische Leitvermögen der Gesteinsschichten. Die Störungszonen durchziehen das gesamte Bundesgebiet, was ein sehr großes geothermisches Potential hervorruft (Paschen et al., 2003).

Die hohen Investitionskosten für die Exploration und die aufwendige Technik, die für eine energetische Nutzung notwendig ist, tragen dazu bei, dass in der geothermischen Nutzung von Störungszonen bisher noch wenig Erfahrung besteht (Stober et al., 2009).

### **Petrothermale Systeme: Hot Dry Rock (HDR)- Technik**

Die petrothermalen Systeme arbeiten im Gegensatz zu den hydrothermalen Systemen unabhängig von wasserführenden Horizonten.

Bei der HDR-Technik wird die im geringdurchlässigen Gestein gespeicherte Wärme genutzt. Um diese Nutzung zu ermöglichen muss eine Bohrung bis in das kristalline Gestein hinein erfolgen. Das kristalline Gestein enthält viele Klüfte, die meist geöffnet und mit mineralisiertem Wasser gefüllt sind, was eine Wasserzirkulation ermöglicht. Nach erfolgreichem Abteufen der Bohrung wird das natürliche Kluftsystem durch das Einpressen von Wasser erweitert. Damit dauerhaft die nötigen Durchflussraten und Temperaturen erzielt werden können, muss das Riss-System eine bestimmte Mindestgröße als Wärmetauschfläche aufweisen. Eine zweite Bohrung ist notwendig, damit das erhitzte Wasser an die Erdoberfläche gefördert werden kann. Der stimulierte Bereich zwischen Injektions- und Förderbohrung wirkt somit als „Durchlauferhitzer“ (Stober et al., 2009).

Um die HDR-Technik effizient nutzen zu können, müssen spezifische geologische Voraussetzungen erfüllt sein. Die Temperatur in diesem Gebiet sollte ca. 200°C betragen, das Gebirge sollte eine möglichst hohe Standfestigkeit aufweisen und die Wasserverluste dürfen nicht höher als 10% sein. Darüber hinaus muss auch die Kluftdichte und Größe der Wärmetauschfläche beachtet werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen (Stober et al., 2009).

Zum jetzigen Zeitpunkt steht die Technik zur Nutzbarmachung der Energie in den tiefen Gesteinsschichten noch nicht großtechnisch zur Verfügung. Wenn in der Zukunft die Forschungs- und Entwicklungsphase abgeschlossen sein werden, könnte man sich große Potentiale von dieser Technik erhoffen (Kaltschmitt et al., 2003).

Die Anwendung der HDR-Technik trägt durch den Druck der Verpressung ein Erdbebenrisiko in sich. Ende 2006 kam es bspw. zu kleineren Beben in Basel, nachdem Wasser in eine Tiefe von 5.000 m verpresst wurde. Die Folge solcher Beben können Risse an Gebäuden sein, was zu unerwarteten Kosten führen kann (Quaschnig, 2008).

### **Petrothermale Systeme: Tiefe Erdwärmesonden**

Tiefe Erdwärmesonden kommen meist dann zur Anwendung, wenn in einem Gebiet kein Thermalwasservorkommen erschlossen werden kann. Anders als die hydrothermalen Systeme arbeiten die tiefen Erdwärmesonden in einem geschlossenen System. Für diese Technik nutzt man eine verrohrte Tiefbohrung, die mit einer doppelten, coaxialen Verrohrung ausgestattet werden muss. Um die Wärme des Gesteins nutzbar machen zu können, wird ein Wärmeträgermedium (z.B. Wasser) über die Vorrohrung in die Tiefe gepumpt. Dieses Wärmeträgermedium erwärmt sich auf dem Weg in die Tiefe und entzieht dabei dem Gebirge die Energie. Über den Tubingstrang (Steigleitung), der über die gesamte Länge wärmeisoliert ist, wird das Wärmeträgermedium an die Erdoberfläche gefördert. Übertägig wird die Energie mit Hilfe eines Wärmetauschers und einer Wärmepumpe nutzbar gemacht (Kaltschmitt et al., 2003). Tiefe Erdwärmesonden werden in einer Tiefe von 400-3.000 m installiert und arbeiten besonders effizient, wenn eine positive Temperaturanomalie vorliegt. Darüber hinaus sind die thermischen Eigenschaften des Untergrundes, z.B. die Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturgradient, aber auch die Bauart der Sonde entscheidende Faktoren für die Wirtschaftlichkeit dieser Technik. Wenn die Wirtschaftlichkeit weiter gesteigert werden soll ist es sinnvoll eine bereits vorhandene, aber ungenutzte Tiefbohrung zu nutzen. Bisher betrug die Leistung von tiefen Erdwärmesonden nur wenige hundert Kilowatt und ist damit wesentlich geringer als die Leistung von hydrothermalen Systemen (Stober et al., 2009).

## **3.6. Speichertechnologien**

Im Zuge des Ausbaus Erneuerbarer Energien tritt vermehrt die Frage der Speicherung in den Mittelpunkt. Besonders Wind- und Solarenergie unterliegen stark witterungsbedingten und tageszeitlichen Schwankungen, die derzeit kaum durch Speicherung ausgeglichen werden können. Bei der Umstellung auf Erneuerbare Energien und der weiteren Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist von neuen Speichertechnologien nicht mehr wegzudenken.

Innerhalb des Energiekonzepts der Bundesregierung (2012: 25ff.) wurden vier zentrale Handlungsfelder formuliert:

- (...) „mittelfristig die verfügbaren deutschen Potentiale für Pumpspeicherkraftwerke im Rahmen der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten erschließen“
- Langfristiger Ausbau der Nutzung ausländischer Pumpspeicher (Norwegen oder Alpen)
- (...) „Investitionsanreize prüfen, damit Strom aus Biomasse gezielt zum Ausgleich der Fluktuationen von Wind und Sonne erzeugt und eingespeist wird“
- (...) „Forschung in neue Speichertechnologien deutlich intensivieren und zur Marktreife führen“ (bspw. Druckluft- oder Wasserstoffspeicher)

Als nächste Schritte sieht die Bundesregierung:

- Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes und längerfristige Befreiung der Speicherkraftwerke von Entgelten zum Netzzugang
- Innerhalb der EEG-Novelle Anreize für Biogasanlagen, das Biogas zwischen zu speichern oder ins Erdgasnetz einzuspeisen, schaffen (bei Starkwindzeiten) und bestehende Anlagen mit zusätzlichen Speichern fördern
- Zulassung von Energiespeichern für den Regelenergiemarkt

### 3.6.1. Stromspeichersysteme

Stromspeichersysteme sind solche Energiespeicher, in die elektrische Energie eingeladen wird. Dabei lässt sich die direkte Speicherung elektrischer Energie von der indirekten Speicherung in mechanische oder der indirekten Speicherung in elektrochemische Energie unterscheiden.

#### Direkte Speicherung

##### *Kondensatoren/Super Caps*

Kondensatoren speichern direkt die elektrische Energie in Form von Strom und können diese schnell aufnehmen und wieder abgeben. Die Speicherfähigkeit über einen längeren Zeitraum ist jedoch gering. Die Weiterentwicklung zu Doppelschichtkondensatoren (Super Caps) oder Electrochemical Double Layer Capacitor (EDLC) brachte eine Erhöhung der Speicherkapazität bei gleichem Volumen. Diese finden bspw. in Linienbussen oder netzfernen Photovoltaikanlagen Einsatz.

### *Spulen*

Supraleitende Spulen (SMES) eignen sich ebenfalls für die Stromspeicherung. Diese können Strom, unterhalb einer vom Material abhängigen kritischen Temperatur, ohne messbaren Widerstand leiten. Ein breiter Einsatz ist jedoch nicht möglich, da zum Erreichen dieser Temperatur eine energieintensive Kühlung nötig ist. Anwendung findet diese Technik vor allem als Kurzschlussstromquelle. Sie wäre aber auch zur Glättung der Leistungskurven von Photovoltaik- und Windenergieanlagen denkbar.

## **Mechanische Speicherung**

### *Pumpspeicherkraftwerke*

In Pumpspeicherkraftwerken wird der Höhenunterschied zwischen zwei großen Speicherseen genutzt. Diese Methode eignet sich besonders zur Zwischenspeicherung in Schwachlastzeiten.

### *Druckluftspeicher*

Druckluftspeicher komprimieren Luft und speichern diese in unterirdischen Kavernen (bspw. ehemalige Salzlagerstätten). Auf Grund der vielen alten Salzspeicher, sind Druckluftspeichersysteme besonders für Norddeutschland interessant. Dies steht jedoch in Konkurrenz mit der Nutzung der Salzspeicher für Erdgas oder CO<sub>2</sub>-Endlager.

### *Schwungmassespeicher*

Im Schwungmassespeicher wird Energie als Rotationsenergie gespeichert. Dabei wird ein Rotor mittels Elektromotor auf eine hohe Drehzahl beschleunigt. Die gespeicherte Energie wird über den Motor, der dann als Generator fungiert, wieder verfügbar gemacht. Ein Schwungmassespeicher eignet sich auf Grund der schnellen Regelbarkeit vorzugsweise als Überbrückungsspeicher für Netzschwankungen.

## **Elektrochemische Speicherung**

### *Akkumulatoren*

Akkumulatoren speichern die Energie in elektrochemischer Form. Es lassen sich Systeme mit internen und externen Speichern unterscheiden. Zu den verbreitetsten Akkumulatoren gehören Blei-Säure-Akkumulatoren, die sich bspw. in Startbatterien von Verbrennungsmotoren befinden. Hinsichtlich der Speicherung Erneuerbarer Energien werden auch Lithium-

Ionen- und Redox-Flow-Batterien eine große Rolle spielen. Diese Art der Speicherung wird besonders im Bereich Elektromobilität interessant.

### *Wasserstoffspeicher*

Wasserstoffspeicher nutzen die überschüssige Energie, um Wasserstoff und Sauerstoff mittels Elektrolyse aus Wasser zu gewinnen. Sauerstoff dient dabei der industriellen Verwertung. Wasserstoff kann als Gas oder in flüssiger Form transportiert und genutzt werden. Dabei speichert ein m<sup>3</sup> Wasserstoff 30mal mehr Energie als Druckluft und kann ebenfalls in Salzkavernen gelagert werden. Einen enormen Vorteil verschafft die Flexibilität in der Nutzung des Wasserstoffs. Er kann als Energiespeicher, Puffer, Transportmittel für Strom und als Brenn- und Kraftstoff eingesetzt werden.

### **3.6.2. Wärmespeichersysteme**

Physikalisch lassen sich drei unterschiedliche Möglichkeiten der Wärmespeicherung unterscheiden: die Speicherung als fühlbare Wärme, latente Wärme oder chemische Energie.

Die Speicherung als fühlbare Wärme funktioniert über ein Speichermedium (bspw. Wasser) dem Wärme zugeführt wird und das sich folglich erwärmt.

Bei der Speicherung als latente Wärme ändert sich in Folge der Wärmeübertragung der Aggregatzustand des Speichermediums, ohne dass sich dieses erwärmt.

Die Speicherung als chemische Energie funktioniert über die Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Speichermediums. Fossile Energieträger gehören somit zu den chemischen Speichern.

Innerhalb der Wärmespeicher lassen sich verschiedene thermische Systeme unterscheiden, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

*Latentwärmespeicher* nutzen die in Baustoffen, Wänden, Decken, Fußböden und Fassadenelementen überschüssige Wärme und geben diese bei sinkenden Temperaturen wieder ab.

*Hochtemperaturspeicher* finden bspw. in solarthermischen Kraftwerken Anwendung. Die überschüssige Solarwärme wird dabei in einem Hochtemperaturspeicher genutzt und nachts zur Stromerzeugung verwendet. Als Speichermedien agieren Luft oder metallische Verbindungen.

*Thermochemische Wärmespeicher* nutzen den Wärmeumsatz chemischer Reaktionen. Mit diesem Prinzip ist bspw. eine saisonale Speicherung mit hohen Energiedichten möglich.

*Wärmespeicher für Heizungen* finden in Heizungs- oder Solarthermieanlagen Anwendung. Dabei wird ein kombinierter Speicher beheizt, der dann einen Teil des Wärmebedarfs eines Gebäudes deckt.

*Große Wärmespeicher* weisen ein geringeres Außenfläche-Volumen-Verhältnis auf und eignen sich deshalb noch besser für die effiziente Wärmespeicherung. Als Möglichkeiten erweisen sich Hochbehälter, aber auch Grundwasseraquifere.

*Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeitspeicher* funktioniert mit Hilfe von Solarkollektorfeldern, die in den Sommermonaten die geerntete Energie in heißem Wasser speichern und in eine Heizzentrale transportieren. Von hier aus wird die benötigte Wärme über ein Nahwärmenetz in die Haushalte verteilt. Die überschüssige Wärme wird einem saisonalen Speicher zugeführt, der die Energie in den Wintermonaten wieder zur Verfügung stellt.

Je nach Größe des Speichers und den regionalen geographischen Bedingungen lassen sich der Behälter-Wärmespeicher, Erdbecken-Wärmespeicher, Erdsonden-Wärmespeicher und der Aquifer-Wärmespeicher voneinander unterscheiden.

## 4. Erneuerbare Energien - Potentiale

### 4.1. Photovoltaik

Nach vorliegender Datenlage sind im LK LG 21.072,842 kW Leistung installiert, was einem durchschnittlichen jährlichen Ertrag von 16.858 MWh entspricht.

#### 4.1.1. Rechtliche Grundlagen

Vor der Installation einer Photovoltaikanlage muss sichergestellt werden, dass diese der aktuellen Bauordnung entspricht und ob diese einer Genehmigung bedarf.

Nach der Niedersächsischen Bauordnung (Anbaue) fallen Photovoltaikanlagen in der Gruppe der *Feuerungs- und andere Energieerzeugungsanlagen* unter die genehmigungsfreien Bauvorhaben (Anbaue, 2003: §69, 1), sind demnach also ohne besondere Voraussetzungen zu installieren.

Diese Genehmigungsfreiheit setzt bei denkmalgeschützten Gebäuden aus. Hierfür gilt eine Sonderregelung, die im Niedersächsischen Denkmalschutzgesetz (Nasch, 1978) festgehalten ist. Demnach dürfen denkmalgeschützte Gebäude nicht verändert, verschoben oder abgerissen werden. Dies gilt jedoch nicht, wenn die Veränderung einem öffentlichen Zweck unterliegt (Nasch, 1978: §6,7). Die energetische Neuorientierung des Landkreises Lüneburg könnte unter diese Ausnahme fallen. In jedem Fall bedarf die Installation von Photovoltaikanlagen einer Genehmigung (Nasch, 1978: §10). Sie wird nach Betrachtung des Einzelfalls erteilt.

Einige Gemeinden agieren als Vorreiter bei der Nutzung denkmalgeschützter Gebäude mit Photovoltaik. Innerhalb der Förderinitiative *Kirchengemeinden für die Sonnenenergie* vom 01.01.1999-31.12.2001 haben sich viele für die Stromerzeugung mit Solaranlagen entschieden (DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2003). Das Besondere ist, dass hier sehr hohe Anforderungen an die Ästhetik der Photovoltaikanlagen gefordert werden. Sie müssen sich in die äußere Struktur der Gebäude eingliedern und dürfen das Erscheinungsbild nicht wesentlich verändern. Es handelt sich dabei um ein Konstruktionsanliegen, das im Bereich des Möglichen liegt, aber wahrscheinlich mit Zusatzkosten verbunden ist.

Die Altstadt Lüneburg sowie der Bereich des Klosters Lüner unterliegen besonderen Vorschriften, die in der *Örtlichen Bauvorschrift der Stadt Lüneburg über die Gestaltung der Altstadt Lüneburg* (1978) festgehalten sind. Demnach sind Dächer nur mit einheitlichen roten

bis rotbraun gebrannten Hohlpfannen zulässig. Laut Frau Slowek-Klaus (2011) bedeutet das gleichzeitig, dass die Installation von Photovoltaikanlagen ausgeschlossen ist. Allerdings befindet sich der Plan für die *Örtliche Bauvorschrift der Stadt Lüneburg über die Gestaltung der Altstadt Lüneburg* gerade in einer Überarbeitungsphase. Zu hoffen ist, dass sich gegenüber energetischen Neuerungen nicht verschlossen wird, da gerade in den nächsten Jahren mit Sicherheit neue ästhetische Lösungen für den Aufbau von Photovoltaikanlagen geschaffen werden.

Auf Grund der derzeitigen Vorschrift werden die Dächer der Altstadt sowie die Gebäude des Klosters Lüner nicht in der Analyse berücksichtigt. Sie sind trotzdem zum Ende der Potentialtabelle (Anhang) aufgeführt und auf Satellitenfotos markiert.

Alle anderen öffentlichen Gebäude wurden auf Basis der erhaltenen Daten zum Denkmalschutz kontrolliert und denkmalgeschützte Gebäude zunächst ausgeschlossen.

#### **4.1.2. Methodik**

Um den höchstmöglichen Stromertrag zu erzielen, gibt es verschiedene Voraussetzungen in Bezug auf Dach- und Modulausrichtung, sowie die Auswahl der Photovoltaikmodule, die kombiniert und analysiert werden müssen.

Ob eine Dachfläche geeignet ist, hängt von ihrer Ausrichtung und Form ab. Zunächst werden hierbei geneigte und Flachdächer unterschieden, die sich beide für die Montage von Photovoltaikmodulen eignen. Flachdächer haben den Vorteil, dass man Module auf diesen immer genau nach Süden ausrichten kann und man im Aufstellwinkel, auf Grund der fehlenden Dachneigung, flexibel ist. Es ist von Vorteil, wenn diese eine Ausrichtung von +/- 30° Süd haben, da man dann die ganze Fläche nutzen kann und die Module unter Flächenverlust nicht schräg auf das Dach aufbringen muss. Für die Ermittlung des Potentials auf öffentlichen Gebäuden und Industriegebäuden wurden grundsätzlich alle Dachflächen mit einer Ausrichtung Süd +/- 90° ausgewählt, also auch reine Ost und reine Westausrichtungen. Weiter wurden Dächer mit einer Dachneigung von <70°, sowie Flachdächer ausgewählt. Weiter wurden die Aspekte Verschattung und Verbauung in die Auswahl mit aufgenommen. Ebenfalls wurden Kriterien wie die Dachkonstruktion soweit möglich mit aufgenommen.

#### **Berechnung**

Das Photovoltaikpotential eines Daches ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Zusam-

menzuführen sind zunächst Globalstrahlung, Fläche der Photovoltaikanlage und deren Wirkungsgrad. So erhält man das theoretische Potential. Bei der Ertragsprognose muss jedoch berücksichtigt werden, dass der reale Energieertrag nicht dem theoretischen entspricht. Diese Abweichung bezeichnet man als Performance Ratio (PR), die als Prozentsatz mit dem theoretischen Ertrag verrechnet wird. Des Weiteren wird ein vom Optimum abweichender Aufstell- und Azimutwinkel eingerechnet (Haselhuhn, 2005).

Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{Ertrag} = & \text{Globalstrahlung} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] \times \text{Wirkungsgrad} [\%] \times A[\text{m}^2] \\ & \times \text{PR}[\%] \times \text{Faktor (Aufstellung)}[\%] \end{aligned}$$

Die Globalstrahlung in Lüneburg unterliegt wie in ganz Deutschland jahresbedingten Schwankungen. Grundsätzlich ist in Lüneburg eine durchschnittliche Globalstrahlung von rund 940-960 kWh/m<sup>2</sup>\*a (2010) zu erwarten (Solarertrag Nord, 2011). Um auch schlechte Strahlungsjahre mit einzukalkulieren, erfolgt die Berechnung mit einer Globalstrahlung von 850 kWh/m<sup>2</sup>\*a für den Raum Lüneburg einheitlich.

Laut Lödl et al. (2010) gilt für den Flächeninhalt geneigter Dächer:

$$A_{\text{Nutz}} = A_{\text{Dach}} = a \times s$$

$$s = b \div 2 \cos \alpha$$

Die Variable *a* beschreibt hierbei die Dachkante, die der einen Gebäudeseite entspricht, *s* beschreibt die Länge der Dachschrägen und *b* die Luftlinie von Dachkante bis Dachfirst, die über die Draufsicht vermessen werden kann. Bei Flachdächern lässt sich die Dachfläche am besten durch Aufständigung der Photovoltaikmodule nutzen. Um dabei die Eigenverschattung der Module untereinander zu vermeiden, muss Abstand gehalten werden. Folglich ist nicht die komplette Fläche nutzbar sondern ca. die Hälfte. Laut Lödl et al. (2010) gilt:

$$A_{\text{Nutz}} = 0,5 \times A_{\text{Dach}}$$

Die abweichende Berechnung ist in der Potentialtabelle mit dem Faktor 0,5 für die Flachdachkalkulation festgehalten.

Grundsätzlich sind rund 30 cm zu den Seiten des Daches und 30 cm nach unten hin freizulassen (Scheer, 2011). Dies gilt nur für geneigte Dächer, Flachdächer werden wie dargestellt, ohne Abzüge, berechnet.

Bei der Vermessung der Gebäude ist zu beachten, dass es sich um Näherungswerte handelt. Teilweise ist durch das Geoportal keine direkte Draufsicht auf die Dächer gewährleistet, dadurch entstehen Abweichungen bedingt durch den Blickwinkel. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Dachflächen per Hand mittels des Maßstabs vermessen und auf eine Stelle nach dem Komma gerundet wurden. Durch Abweichungen nach oben und unten sollte das Ergebnis im Durchschnitt sehr nahe am Realwert liegen, sodass mögliche Abweichungen nicht weiter in die Analyse eingehen. Die Ergebnisse werden für jede Dachfläche einzeln in der Potentialtabelle (Anhang) festgehalten.

Die Performance Ratio ist ein Faktor, der Verluste einer Photovoltaikanlage bei alltäglicher Inbetriebnahme beschreibt. Er wird mit dem theoretischen Potential verrechnet und beinhaltet *Temperatureffekte, Reflexion, Ausfallzeiten und Verluste durch Kabel und Wechselrichter*, die bei der Potentialermittlung nicht außer Acht gelassen werden dürfen. In der gängigen Literatur rechnet man mit ca. 80%, also rund 20% Verlust (Hufnagel, 2010). Dieser Wert wird für die Potentialermittlung übernommen.

#### **4.1.3. Potential öffentliche Gebäude**

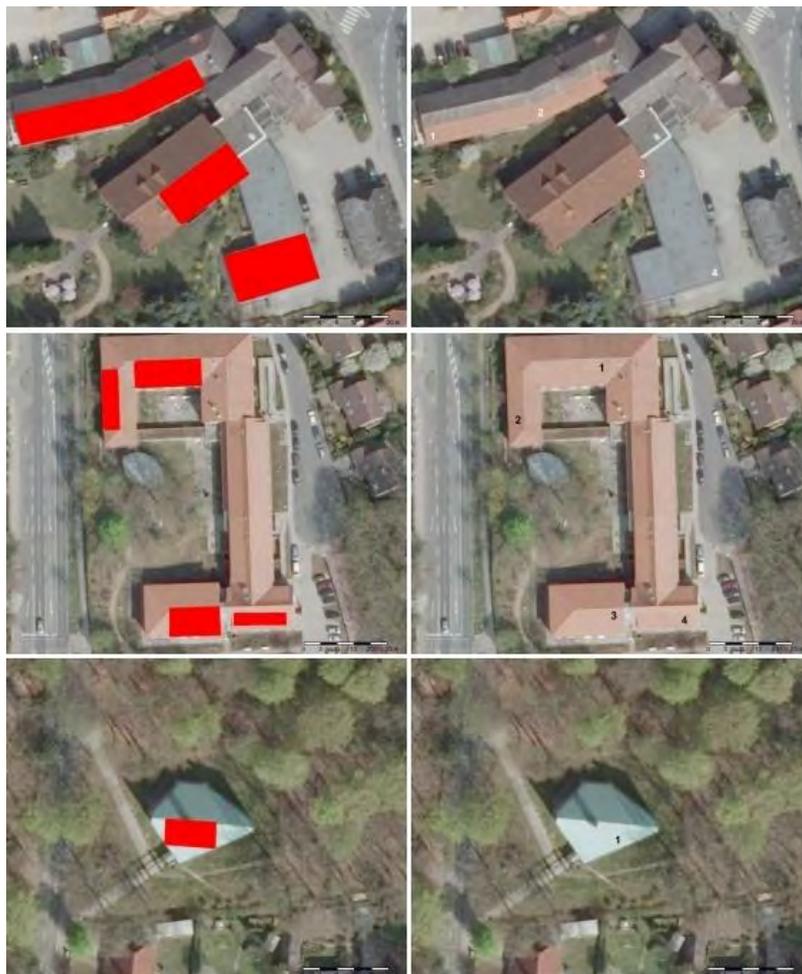
Die öffentlichen Gebäude des Landkreises und der Hansestadt Lüneburg wurden mit Hilfe des Geoportals Lüneburg ermittelt (Hansestadt und Landkreis Lüneburg, 2011). Zu den genutzten Quellen gehören zum einen die Liegenschaftskarte (Stand 2011) und zum anderen die Luftbilder, allerdings aus dem Jahr 2009. Die Liegenschaftskarten werden ständig aktualisiert. Für das Lokalisieren der Gebäude (rund 500) wurden die Liegenschaftskarten mit dem Stand 01.03.2011 genutzt.

Für die Analyse wurde grundsätzlich von einer Installation monokristalliner Module ausgegangen, da diese die höchsten Wirkungsgrade erzielen und eine bessere Qualität aufweisen als andere Modularten. Für die Potentialanalyse der öffentlichen Gebäude und der Industriebauten bedeutet das, dass mit einem Wirkungsgrad von 14% gerechnet wird. Die 14% ergeben sich aus dem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 14-18%. In der Potentialtabelle ist festgehalten, welche Gebäude zeitweise verschattet sind. Für teilverschattete Gebäude wird die Nutzung von Dünnschichtmodulen in Betracht gezogen. Diese erreichen einen Wirkungsgrad von 6-8% (Mittelwert 7%), der individuell und anstatt der 14% in das Potential der

ausgewählten Dächer eingerechnet wurde. Allerdings wurde nur für sehr große, teilverschattete Dachflächen ab 50 m<sup>2</sup> Fläche das Potential mit Dünnschichtmodulen berechnet.

In dieser Analyse wurden auf Grund des großen Datenumfanges immer die größtmöglichen rechteckigen Flächen auf den Dächern berücksichtigt (>25 m<sup>2</sup>), die ausreichend Platz aufweisen, Gauben teilweise zusätzlich. Welche Fläche des Daches geeignet ist, ist auf den Satellitenaufnahmen, die sich im Anhang (CD) befinden, durch Nummerierung gekennzeichnet (Abbildung 26). So werden die Potentiale verschiedener Dachflächen innerhalb eines oder mehrerer Gebäude voneinander unterschieden und auch ungeeignete Gebäude markiert.

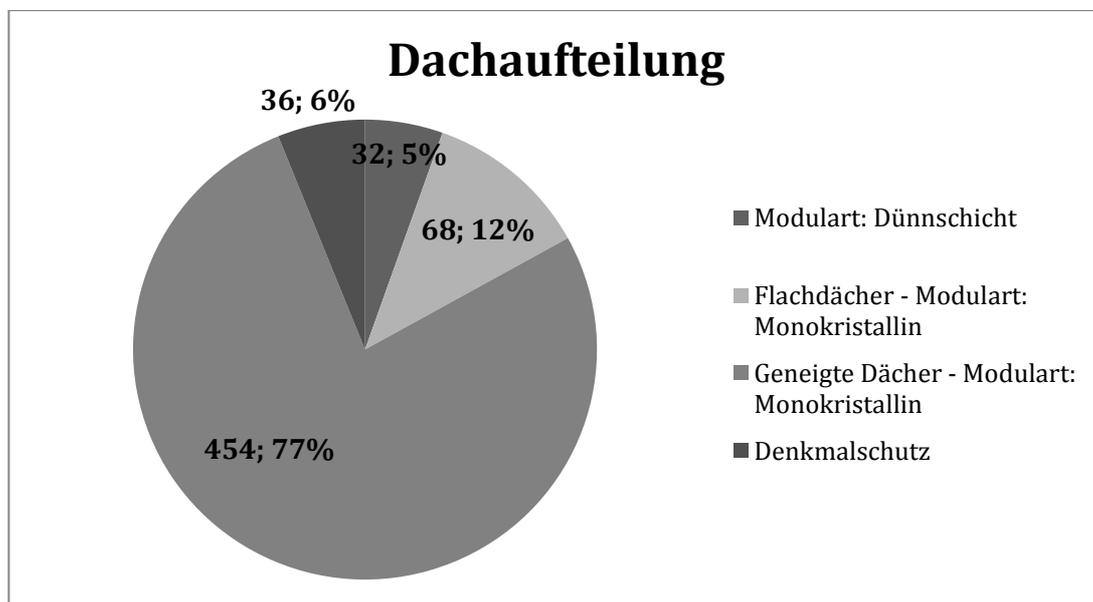
Die Abbildung 26 zeigt außerdem die Markierung aller Dächer und beispielhaft wie die größtmögliche rechteckige Fläche ermittelt wird, die nicht zusätzlich auf den Satellitenbildern markiert ist.



**Abbildung 26 - Beispiel: Auswahl und Markierung geeigneter Dachflächen**  
Quelle: Hansestadt und Landkreis Lüneburg, 2011

Die geeigneten Flächen lassen sich mit Hilfe des Geoportals Lüneburg und der Dachwinkel berechnen. Bei der Draufsicht wurden die Dachkanten abgemessen und mit dem Dachneigungswinkel, der für jedes Dach einzeln bestimmt wird, verrechnet. Die Winkelmessung fand manuell für jedes Gebäude mittels Zollstock als Dachkantenverlängerung und Geodreieck statt. Die Städte Lüneburg, Adendorf und Bardowick konnten über das 3D *Bing Portal* analysiert werden (Bing, 2011).

Von den rund 800 möglichen Dachflächen, die sich auf rund 500 verschiedenen Gebäuden befinden, sind 590 geeignet. Diese teilen sich wie folgt auf:



**Abbildung 27 - Aufteilung der möglichen Dachnutzung der Dachflächen Lüneburgs (Anzahl; Prozentual)**

Zur Verfügung stehen rund 97.000 m<sup>2</sup> Dachfläche. Im Mittel hat jede Dachfläche eine nutzbare Größe von 165 m<sup>2</sup> und ein Potential von rund 15.000 kWh/a.

Auffällig ist, dass der Großteil der Anlagen unter 30 kWp Leistung liegt (517). Das ist ein Vorteil beim Netzanschluss auf Aufwands- und Kostenseite. 70 Anlagen liegen unter 100 kWp, nur drei Anlagen sind in die Kategorie bis 1 MWp einzuordnen und werden dementsprechend geringer vergütet.

Aus der durchgeführten Analyse geht hervor, dass mit der Nutzung der Dächer der öffentlichen Gebäude in Stadt und Landkreis Lüneburg mit Photovoltaikanlagen rund 8,2 GWh Energie generiert werden können. Es ist zu beachten, dass dieser Wert der jährlichen Schwankungen unterliegt und deshalb eine Angabe in Gigawattstunden sinnvoll ist. Diese Energiemenge kann durch eine installierte Leistung von rund 9 MW erzeugt werden.

Es ist zu beachten, dass das Ergebnis von 8 GWh näherungsweise und vorsichtig erarbeitet wurde und mit der Analyse eines jeden Daches unter gegebenen Umständen sowie mit der Auswahl der am besten geeigneten Module noch weitaus mehr Potential ermittelt werden kann.

#### **4.1.4. Potential Industrie- und Gewerbegebäude**

Ebenfalls mit Hilfe des Geoportal Lüneburg wurden alle Gebäude analysiert, die im Themen-Layer als Gewerbe- oder Industriegebäude (Stand 20.07.2011) markiert waren. Bei der Analyse fiel auf, dass Supermärkte nicht in diesem Themen-Layer zu finden sind. Daraufhin wurden sie mit Hilfe von Google Maps lokalisiert und schließlich über das Geoportal analysiert.

Es wurden nur geeignete Gebäude in einer Potentialtabelle (Anhang) und auf Satellitenfotos festgehalten. Geeignete Gebäude fallen unter folgende Kriterien:

- Ausrichtung: +/- 90°
- Wenig oder keine Verschattung
- Kein offensichtliches Blechdach
- Größte rechteckige Fläche >25m<sup>2</sup>

Die Dachflächen wurden über die zur Verfügung stehenden Daten des Geoportals und einem geschätzten Dachwinkel von 20° berechnet. In der Analyse der öffentlichen Gebäude betrug der Dachwinkel im Durchschnitt 26,2°. Da Gewerbe- und Industriegebäude meistens flachere Dächer haben, wurde dieser auf 20° reduziert.

Die Berechnung erfolgte auf dieselbe Art wie für die öffentlichen Gebäude.

Von den analysierten Dachflächen sind 762 geeignet, von diesen sind 110 Flachdächer und 652 geneigte Dächer. Dabei ist jede Dachfläche im Mittel 674 m<sup>2</sup> groß.

Insgesamt ergibt sich hier ein Potential von rund 40 GWh (39,7 GWh), was einer zu installierenden Leistung von ca. 51 MW entspricht.

#### **4.1.5. Potential Privathaushalte**

Da bei einer Anzahl von über 36.000 Gebäuden eine Betrachtung der einzelnen Dachfläche nicht möglich ist, wurde das Potential für den Bereich Gebäude Privathaushalte näherungsweise berechnet.

Mit Hilfe des Geoportals und Frau Andrea Struve vom IT-Service des Geoportals wurden die Gebäudegrundflächen aller im Landkreis Lüneburg befindlichen Wohngebäude ermittelt (Stand: 30.01.2012).

Es ergibt sich eine Gesamtgebäudegrundfläche von 6.714.123 m<sup>2</sup>. Da sich hier verschiedene Dachformen und auch Flachdächer befinden, wurde die zu berechnende Dachfläche mit einem Faktor von 1,3 angenommen. Dies ergibt eine Gesamtdachfläche von 8.728.360 m<sup>2</sup>. Es wird mit einem Anteil von 3% Flachdächern kalkuliert. Weiter wird angenommen, dass von der berechneten Fläche 75% eine geeignete Ausrichtung +/-90° Süd besitzen. Für Dachaufbauten werden 40% bei sonstigen Dächern und 20% bei Flachdächern abgezogen, sowie bei beiden Dachformen 20% für verschattete Flächen.

Insgesamt verbleibt eine angenommene nutzbare Fläche von ca. 2.750.000 m<sup>2</sup>. Von dieser Fläche werden weitere 20% für die solarthermische Nutzung abgezogen, so dass letztendlich für die Potentialberechnung PV eine Fläche von 2.200.000 m<sup>2</sup> verbleibt.

Aufgrund der kleineren Flächen und der verschiedenen zur Verfügung stehenden Modularten wird von einem Wirkungsgrad von 0,14 ausgegangen.

Bei Nutzung der gesamten ermittelten Fläche ergibt sich ein Ertrag von 189 GWh/a dies entspricht einer zu installierenden Leistung von 220 MWp.

#### **4.1.6. Konversionsflächennutzung**

Laut EEG 2012 ist die Installation von Photovoltaikanlagen auf Konversionsflächen aus wirtschaftlicher, verkehrlicher, wohnungsbaulicher oder militärischer Nutzung möglich. Dazu zählen bspw., versiegelte Flächen, Randstreifen an Bundesautobahnen und anderes.

Die Feststellung von Konversionsflächen für die Stadt und den Landkreis ist sehr schwierig. Bspw. wurde die Nutzung des Lärmschutzwalles der A39 für die Nutzung von PV berechnet. Hiermit soll das große Potential, welches in der Nutzung solcher Flächen besteht aufgezeigt werden.

Mit Hilfe von Google Maps wurde die Länge der Autobahn A39 im Landkreis Lüneburg ermittelt, an der sich Lärmschutzwälle befinden.

Die Strecke von Goseburg bis nördlich von Radbruch ist ca. 20 km lang. Die nordöstliche Seite der Autobahn mit Lärmschutzwällen eignet sich für die Installation von Photovoltaikmodulen, es ergibt sich eine Süd-/ Südwestausrichtung.

Bei einer durchschnittlichen Modulgröße von 1,5 m ergibt sich so eine mögliche Fläche von 30.000 m<sup>2</sup>. Dabei wurden für die Globalstrahlung 850 kWh/m<sup>2</sup>\*a, für den Wirkungsgrad 0,14 (ausschließlich Monokristalline Anlagen), für die Performance Ratio 0,8 und für den Faktor (Aufstellung) 0,9 angenommen.

Mit der Installation von PV-Modulen an Lärmschutzwällen der A39 könnten pro Jahr rund 2,5 GWh erzeugt werden.

#### 4.1.7. Zusammenfassung Potentiale PV

Die Ermittlung der Potentiale von Photovoltaik im Landkreis Lüneburg ergab folgendes Ergebnis:

**Tabelle 1 - Zusammenfassung der PV-Potentiale**

	Ermittelte Fläche in m <sup>2</sup>	Ertrag in GWh/a	Zu installierende Leistung in MW
Öffentliche Gebäude	97.000	8,2	9,1
Industrie und Gewerbe	514.000	39,7	51
Privathaushalte	2.200.000	188,5	220
<b>Gesamt</b>	<b>2.811.000</b>	<b>236,4</b>	<b>280,1</b>

In die Berechnung des Gesamtpotentials PV wurden nur die Dachflächen in Landkreis und Hansestadt Lüneburg berücksichtigt.

Die Ermittlung der Potentiale erfolgte unter bestimmten Bedingungen, die in den jeweiligen Abschnitten erläutert worden sind. Die Annahmen und Berechnungen wurden sehr vorsichtig getroffen. Unter bestmöglicher Ausnutzung der vorhandenen Flächen kann diese real höher sein, als die hier berechnete Fläche. Eine Kombination von verschiedenen Modularten kann zum Beispiel auch Flächen, die hier ausgeschlossen worden sind, für die PV nutzbar ma-

chen. Die Berechnung der Energieerträge erfolgt nach derzeitigem Stand der Technik sowie aus Erfahrungswerten in der Region aus den letzten Jahren.

Alleine mit der Nutzung von Photovoltaik auf Dachflächen könnten in Lüneburg ungefähr 47.300 Vier-Personen-Haushalte mit Strom versorgt werden, beziehungsweise in Jahressumme ca. 30% des Gesamtstrombedarfs von Landkreis und Hansestadt Lüneburg gedeckt werden.

Unter der Annahme, dass der herkömmliche Strommix CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 566 g/kWh (geschätzte Daten für 2011 (UM, 2012)) verursacht, kann durch die Nutzung von Strom aus PV pro Jahr die Freisetzung von 133.859 t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

## **4.2. Wind**

Die installierte Leistung von WEA nach vorliegender Datenlage im Landkreis Lüneburg beträgt 116,5 MW, dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichem Ertrag von 198.086 MWh.

### **4.2.1. Rechtliche Grundlagen**

Das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien bildet nach § 2 Nr.2 EEG die Grundlage für die vorrangige Abnahme, Übertragung, Verteilung und Vergütung des Stroms durch die Netzbetreiber.

Zweck des Gesetzes nach § 1 EEG ist eine nachhaltige Energieversorgung und technologische Förderung der Erzeugung klimaschützenden regenerativen Stroms. Hiermit sollen volkswirtschaftliche Schäden vermieden, und fossile Ressourcen geschont werden. Ziel ist die Integration von mindestens 35% bis 2020, anschließend 80% bis 2050. der EE am Stromanteil nach § 1 II EEG.

Für Netzbetreiber besteht nach § 5 I EEG ein Anschlusszwang der in § 3 Nr. 1 EEG beschriebenen Anlagen; sie müssen den EE-Strom vorrangig nach § 8 I EEG abnehmen und dafür ggf. nach § 9 I EEG ihre Netze optimieren.

Nach § 30 EEG wird Repowering als endgültiges Ersetzen durch Anlagen der doppelten, oder maximal 5-fachen Leistung definiert, wobei die Altanlagen mindestens zehn Jahre in Betrieb gewesen sein müssen. Diese Arbeit betrachtet jedoch ausschließlich die WEA im LK LG. Im Übrigen gelten für Repowering-WEA die Regelungen des § 29 EEG.

Das EEG stellt eine gesetzlich vorgeschriebene Umlagefinanzierung der Förderung erneuerbar erzeugten Stroms dar. Energieversorgungsunternehmen (EVU) müssen die von den WEA-Betreibern erzeugten kWh abnehmen und vergüten, und legen diese Ausgaben anschließend auf die Endkunden um. Für die Betreiber von EE-Anlagen gelten die Vergütungsansprüche grundsätzlich nach § 16 EEG. Die Grundvergütung für Windenergiestrom beträgt nach § 29 II EEG 4,87 ct/kWh. Bis 5 Jahre nach Inbetriebnahme gilt die Anfangsvergütung von 8,93 ct/kWh. Anlagen, die vor dem 01.01.2015 in Betrieb genommen werden, erhalten einen Zuschuss von 0,47 ct/kWh. Die anfänglich erhöhte Grundvergütung verlängert sich in Abhängigkeit des tatsächlichen Ertrages zum ermittelten Referenzertrag aus § 29 II EEG, der nach Anlage 5 des EEG zu 60% erreicht werden muss. Betreiber der Repoweringanlagen erhalten darüber hinaus nach § 30 EEG eine um 0,5 ct/kWh erhöhte Anfangsvergütung, also 9,42 ct/kWh als Anreiz zum Austausch der Altanlagen. Sie brauchen jedoch nach § 30 S. 2 EEG nicht den Nachweis des Referenzertrages erbringen, sofern die neue Anlage am selben Standort errichtet wird.

Sollten Netzabschaltungen nach § 11 I EEG (Einspeisemanagement, sog. „Einsman“) erfolgt sein, so ist der Netzbetreiber nach § 12 I EEG entschädigungspflichtig.

Grundsätzlich werden Vergütungen und Boni nach § 21 II EEG 20 Jahre lang gezahlt. Demensprechend sind WEA wirtschaftlich i. d. R. auf eben diese Betriebsdauer ausgelegt. Für Onshore-WEA, die ab 1. Januar 2010 in Betrieb genommen wurden, ist gemäß § 20 II Nr. 7 b) EEG eine jährliche Degression der Vergütungen und Boni um 1 Prozent vorgesehen.

Seit einer Änderung im Baugesetzbuch von 1997 sind nach § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB Vorhaben im Außenbereich privilegiert, wenn sie der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung der Windenergie dienen. Damit sind WEA grundsätzlich zulässig und sogar bevorrechtigt, wenn öffentliche Belange nicht entgegenstehen (§ 35 Abs. 1 Nr. 1 BauGB) und sie der öffentlichen Stromversorgung dienen (Gatz, 2009a) (§ 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB).

Durch diese Privilegierung wird eine räumliche Steuerung von Einzelanlagen und Windparks notwendig (Thom, 2000). Aus diesem Grund (der räumlichen Steuerung) wurde dem § 35 Abs. 3 ein so genannter Planvorbehalt hinzugefügt. Dieser besagt, dass öffentliche Belange beeinträchtigt sind, wenn im Flächennutzungsplan oder als Ziel der regionalen Raumordnung im RROP andere Flächen für die Windenergienutzung ausgeschrieben sind. So steht den Gemeinden und der Regionalplanung durch die planerische Steuerung ein Instrument zur Verfügung, um Standortzuweisungen durchzuführen und im übrigen Planungsraum den Bau von an sich privilegierten Anlagen zu verhindern. Damit sind Gemeinden und

Raumordnung zur Erstellung eines Konzeptes für Konzentrationszonen für WEA angehalten, sofern sie denn einen Einfluss auf die Standortwahl haben wollen.

Damit es nicht zu einer Verhinderungsplanung kommt, fordert das Bundesverwaltungsgericht jedoch die Entwicklung eines schlüssigen Gesamtkonzeptes (Gnatz, 2009a; BVerwG, Urteil vom 17.12.2002). Der Windenergienutzung muss in substantieller Weise Raum geschaffen werden und ausgeschriebene Konzentrationszonen müssen geeignete Standorte sein, die dem Anspruch der sonstigen Privilegierung gerecht werden (Gnatz, 2009a). So müssen die Planer abwägen, welche Kriterien und öffentliche Belange einer Ausweisung der Potentialflächen als Konzentrationszonen entgegenstehen könnten. Dabei spielen z. B. die Rentabilität oder auch die Schutzwürdigkeit eines Gebietes (wie z. B. bei Wasserschutzgebieten) eine Rolle (Gnatz, 2009a).

Hierzu müssen im Abwägungsverfahren „harte“ und „weiche“ Ausschlusskriterien festgelegt werden. Harte Ausschlusskriterien sind alle Flächen im Außenbereich, die sich aus tatsächlichen Gründen (z. B. zu geringe Windhöffigkeit) oder aus rechtlichen Gründen (z. B. FFH-Gebiete oder militärische Schutzbereiche) nicht für die Windenergienutzung eignen. Nach Abzug dieser Flächen erhält man Flächen, die für die Windenergienutzung grundsätzlich in Betracht kommen, so genannten Potentialflächen (Gatz, 2009a).

Hier gelten u. a. nationales und europäisches Naturschutzrecht als öffentliche Belange, die dem Bau von WEA entgegenstehen können, darunter fällt z. B. der Gebietsschutz. Dabei muss nach § 34 Abs. 1 und 2 BNatSchG die Verträglichkeit eines Projektes mit den Erhaltungszielen des FFH-Gebietes oder des europäischen Vogelschutzgebietes überprüft werden. Weiche Ausschlusskriterien hingegen sind Flächen, die aus städtebaulichen und gestalterischen Gründen nicht zur Windenergienutzung zur Verfügung gestellt werden sollen. Des Weiteren müssen zum Schutz der Bewohner vor Immissionen, die durch die Windenergienutzung entstehen, vorgegebene Abstände zu Siedlungsgebieten eingehalten werden (Gatz, 2009a). Dabei ist vor allem § 3 Abs. 1 BImSchG heranzuziehen, dieser bestimmt, was nach BImSchG schädliche Umwelteinflüsse, also Immissionen in diesem Sinne sind. Im Gesetz finden sich jedoch keine eindeutigen Regelungen, wie mit diesen Immissionen umzugehen ist. Der Gesetzgeber hat hierbei bislang noch keine klare Regelung getroffen, um den Behörden Handlungsspielraum zu lassen. Zum Umgang mit dieser Vorschrift kann man z. B. das Urteil des OVG Lüneburg vom 24.06.2004 heranziehen. Dieses schlägt vor, die Erfahrungswerte so zu wählen, dass man vom planerischen Standpunkt aus *„auf der sicheren Seite“* liegt (Gatz, 2009a).

Durch die Raumordnung lassen sich WEA aber nur steuern, wenn es sich um raumbedeutsame Anlagen handelt. WEA sind in der Regel raumbedeutsam, wenn sie eine Gesamthöhe von 100 m oder eine Nabenhöhe von 50 m übersteigen oder mehr als fünf Anlagen in einem Park stehen (Thom, 2000; Gatz 2009). So stellt die Raumbedeutsamkeit immer eine Einzelfallentscheidung dar, denn die Gerichte haben bisher keine verbindliche Angabe vorgenommen (Thom, 2000). Im Sinne der Raumordnung kann also jede geplante Anlage als raumbedeutsam angesehen werden, wenn z. B. die Anlagenhöhe oberhalb der Baumkronen liegt und somit aus dem natürlichen Landschaftsbild hervortritt (Gatz, 2009a).

Um die gewünschten Rechtsfolgen des § 35 Abs. 3 Satz 3 herbeizuführen, müssen nach § 8 Abs. 7 Satz 1 ROG die Konzentrationszonen als Vorranggebiete ausgeschrieben und dieses Vorranggebiet gleichzeitig nach § 8 Abs. 7 Satz 2 als Eignungsgebiet festgelegt werden, damit die Errichtung von WEA außerhalb dieser Konzentrationszonen unzulässig wird (Siehe hierzu auch LROP 1994, S.32 C 3.5 Nr. 0522).

„Um der grundsätzlichen Privilegierung von WEA begegnen zu können, ist also im Rahmen eines ganzheitlichen Abwägungsprozesses zu prüfen, ob deren Zulässigkeit öffentliche Belange entgegenstehen“ (Thom, 2000). Dieses geschieht durch die Aufstellung eines RROP (Thom, 2000). Wenn Flächen, in denen der Bau von WEA öffentlichen Belangen entgegensteht, ausgegrenzt wurden, steht immer noch eine Vielzahl von Flächen zur Verfügung, deren Eignung weiter zu prüfen ist (Suchräume). „Im Sinne eines sparsamen Umgangs mit dem Boden und dessen optimaler Nutzung ist die Windhöffigkeit ein entscheidendes Kriterium für die Bestimmung von Vorrangstandorten“ (Thom, 2000). So sind im Rahmen des Abwägungsprozesses vor allem folgende Aspekte zu berücksichtigen:

1. Das Gebot der nachbarschaftlichen Rücksichtnahme und Rücksichtnahme auf das Orts- und Landschaftsbild (Gatz, 2009b)
2. Der Schutz der vielfältigen Erholungsfunktionen
3. Die Belange des Naturschutzes, des Umweltschutzes und der Landschaftspflege, welche alle im Abs. 3 des § 35 BauGB verankert sind
4. Die Erfüllung der windklimatologischen Bedingungen (Windhöffigkeit)

Notwendige Planungsschritte bei der Ermittlung von Eignungsgebieten sind also vor allem:

1. Die Ermittlung von Suchräumen für WEA (Abgrenzung von Ausschlussflächen, Berück-

sichtigung von Abstandsempfehlungen zu Ortslagen und Erholungsgebieten)

2. Die Bewertung des Schutzgutes Natur sowie des Landschaftsbildes

3. Die Windpotentialanalyse

4. Raumordnerische Abwägung und Abstimmung von Nutzungsansprüchen (Thom, 2000).

#### **4.2.2. Abstandsregelungen**

Da die Niedersächsische Bauordnung keine speziellen Abstandsvorschriften für WEA beinhaltet (Gatz, 2009b), beziehen sich die angewandten Abstände auf Rechtsurteile und Empfehlungen verschiedener Behörden, auf den Bundesverwaltungsrichter Dr. Gatz, den RROP Hannover und eigenen, begründeten Einschätzungen.

Um eventuelle Schatten- und Schalleffekte durch den Betrieb von WEA weitestgehend auszuschließen, wird sich an die allgemeine Empfehlung des Niedersächsischen (Nds.) Ministeriums für den Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz gehalten, welche einen Abstand von 1.000 m zu Gebieten mit Wohnbebauung vorsieht (vgl. Der Präsident Hannover, des Nds. Landtages, 2003; sowie die Umsetzung: Vgl. Nds. Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2004). Für Dorf- und Mischgebiete gelten andere Regelungen (BauNVO), auch ist hier die erlaubte Schallimmission nach TA Lärm höher. Diese Regelung ist für Wohnnutzungen im Außenbereich anzuwenden. Auch im Außenbereich angesiedelte Einzelhäuser sind weniger schutzwürdig als reine Wohngebiete, da der Bauherr von einer Änderung der Bebauung ausgehen muss; trotzdem soll hier ein Mindestabstand die Sicherheit und die Minimierung negativer Beeinträchtigung gewährleisten. Der Mindestabstand wird auf 500 m festgelegt (Gatz, 2009b). Eine Prüfung nach BImSchG ist Grundlage für die Errichtung von WEA (IWR, 2010), d.h. auch, dass die Richtwerte der TA Lärm bei jedem Bauverfahren im Einzelfall geprüft und eingehalten werden müssen (Landesumweltamt Essen, 1998). Die Einhaltung der Richtwerte ist bei den getroffenen Abstandsregelungen der Fall, trotzdem sollen exemplarisch die Bestimmungen der TA Lärm aufgeführt werden, die in vielen Fällen zu geringeren aber ausreichenden Abständen führen würden. Im Rahmen einer solchen Standortprüfung könnten die Richtwerte dann geprüft und die Vorranggebiete ggf. erweitert werden. Somit würde sich das Windpotential letztendlich sogar noch vergrößern.

Die durch das Niedersächsische, das Bundesweite und das Europäische Naturschutzgesetz als Schutzgebiete festgelegten Flächen sowie Fledermaus- und Vogelschutzgebiete (z.B.

Natura 2000), FFH-Gebiete und Landschaftsschutzgebiete werden ebenfalls als Tabuzonen gewertet und mit entsprechenden Abständen belegt. Auch hierbei werden die Abstandsempfehlungen des Nds. Landkreistages eingehalten. Auch Vorranggebiete für Natur, Landschaft und Erholung sind aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für die Erholung, der Berücksichtigung der Vielfalt und dem Erhalt der Landschaft auszuschließen. Für diese Gebiete sind laut der Empfehlung des Landkreistages Mindestabstände von 200 m.

Die Kreis-, Landes- und Bundesstraßen sowie Bahnlinien sollten als Verkehrsverbindungen des Landkreises nicht unterbrochen oder durch WEA beeinflusst werden. Um eine Gefahr für den Verkehr, z. B. durch ein Kippen der Anlage oder Eiswurf zu vermeiden und eine Beeinträchtigung durch WEA auszuschließen, wird ein Mindestabstand von 150 m festgelegt. Auch der Abstand zu Hochspannungsleitungen beträgt 150 m, um eine Unfallgefahr durch ein Umkippen oder sonstige Beschädigungen durch die WEA weitestgehend auszuschließen (vgl. hierzu RROP Hannover, 2005). An Gewässern I. Ordnung gilt in Brandenburg ein Bauverbot für WEA von 50 m zur Uferlinie (BbgNatSchG §48 Abs. 1), dies ist aus Naturschutz-, aber auch Bausicherheitsgründen sinnvoll und findet deshalb auch hier Anwendung. Außerdem gilt ein Bauverbot an Fließgewässern innerhalb von 5 m zur Uferlinie (BauGB Art. 4a Abs. 3). Als weitere Tabuzone gelten Überschwemmungsgebiete. Aufgrund der Abstandregelungen (aus Kapitel 3) und der Einbeziehung von Tabuzonen konnten 32 Konzentrationszonen im Landkreis Lüneburg ermittelt werden. Waldpotentialflächen in Wald werden gesondert in nachfolgendem Kapitel betrachtet.

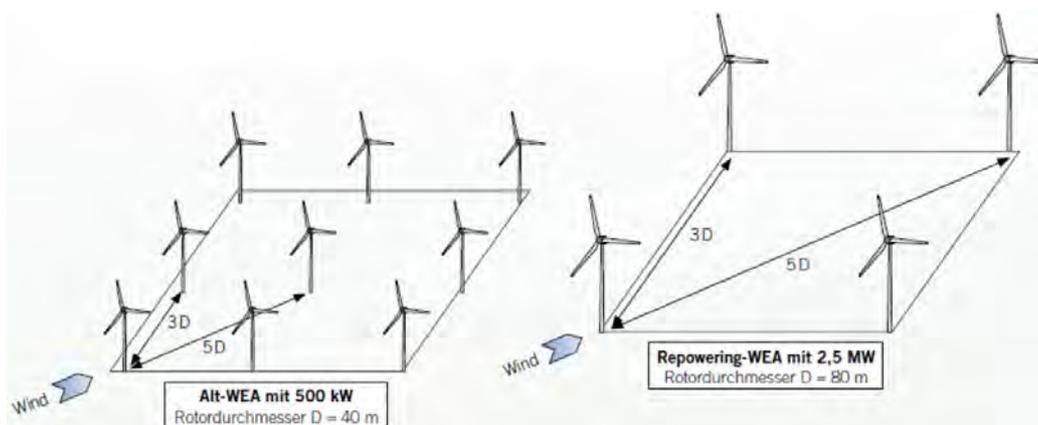


Abbildung 28 - Abstände vor und nach dem Repowering  
Quelle: Kommunale Umwelt-Aktion, 2011

### 4.2.3. Windpotential

#### Neue Konzentrationsgebiete Windenergie

Um die Daten der verwendeten Windstatistik bezüglich ihrer Repräsentativität für den Landkreis Lüneburg beurteilen zu können, werden diese mit in einen Langzeitbezug gesetzten Erträgen bestehender Windenergieanlagen abgeglichen. Dazu werden die Langzeiterträge der Vergleichsstandorte herangezogen und mit den auf Basis des Modells berechneten Werten verglichen. Die monatlichen Erträge der Referenzstandorte sollten nur genutzt werden, wenn diese über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr in mindestens monatlicher Auflösung zur Verfügung stehen (FGW, 2007) und die Erträge repräsentativ für die geplanten Anlagen sind. Denn nur dann können die Ertragsdaten der Vergleichsanlagen in Bezug zum langjährigen mittleren Ertrag an dem geplanten Standort gesetzt werden.

Repräsentativität beinhaltet u. a. Vergleichbarkeit des umgebenden Geländes, Vergleichbarkeit der Anlagentypen und Nabenhöhen, ähnliche Höhe über NN (Normal Null). Zur Berechnung der Langzeiterträge werden zwei unterschiedliche Methoden herangezogen, bei denen die Erträge in Bezug zu verschiedenen Indizes gesetzt werden. Jeder Index beschreibt dabei den monatlichen Ertragswert im Verhältnis zu dem so genannten 100%-Niveau, also dem Ertrag, den die Anlage im langjährigen Mittel erbringt. Das 100%-Niveau ändert sich also mit der Länge und Lage des betrachteten „Referenzzeitraumes“. Ein Zeitraum von 30 Jahren gilt klimatologisch stabil, laut den geltenden Vorschriften (TR6) muss ein Langzeitraum mindestens 10 Jahre umfassen.

Zur Bestimmung des Langzeitertrages mithilfe des Keiler/Häuser Index (IWET Index, Windindex Version 2006), wird der 100%-Wert der linearen Regression zwischen den monatlichen verfügbarkeitskorrigierten Erträgen, die auf ein Jahr hochgerechnet wurden und dem Windindex bestimmt.

Der mit Hilfe des anemos Windatlas für Deutschland berechnete Langzeitertrag ergibt sich aus der linearen Regression zwischen den monatlichen verfügbarkeitskorrigierten Erträgen und den monatlichen Indizes. Durch die Funktion der Ausgleichsgraden wird die Zeitreihe des anemos Windatlas Deutschland (verwendete Daten: 1980-2009) auf die monatlichen Erträge der Anlage (Messzeitreihe) angepasst und daraus der mittlere Jahresertrag berechnet. Auch hier wird dann der Ertrag bei einem Indexwert von 100% berechnet. Um den Langzeitertrag der Vergleichs-Windenergieanlagen zu erhalten, werden die Langzeiterträge der IWET Methode und des anemos Windatlas Deutschland zu jeweils 50% gewichtet.

Die z. T. großen Unterschiede beider Methoden ergeben sich aus den unterschiedlichen Basisdaten, den verschiedenen Referenzzeiträumen und anderen methodischen Unterschieden. So ergibt sich schließlich aus dem Mittelwert der beiden Methoden der gewichtete Langzeitertrag.

Die Windmap wird mithilfe von WASP erstellt. Dazu werden die Orografie- und die Rauigkeitskarte sowie die zuvor bestimmte Windstatistik geladen. Die zu berechnende Höhe wird mit 100 m festgelegt. Für den gesamten Landkreis, bzw. einer Karte von 100 x 100 km, wird nun auf Basis der Windstatistik (.lib-File), unter Berücksichtigung der spezifischen Orografie- und Rauigkeitsdaten, eine Windmap mit einer Auflösung von 500 m erstellt. Diese gibt Aufschluss über die regionalen Windverhältnisse auf einer Höhe von 100 m.

Die zuvor bestimmten, für Windenergienutzung zur Verfügung stehenden Flächen, wurden in GIS manuell herausgearbeitet und mit den Daten aus der Windmap übereinander gelegt. So erhält man eine relativ detaillierte Darstellung der einzelnen Windgeschwindigkeiten im Bereich der Potentialflächen.

Insgesamt konnten 30 Konzentrationszonen ermittelt werden, die sich sowohl von der Größe als auch von den Windverhältnissen als geeignet erweisen können. Bodengeologische Gutachten zur Standortüberprüfungen sind nicht Teil dieser Untersuchung gewesen.

An den identifizierten Standorten (Anhang) werden Potentiale anhand folgender Annahmen berechnet.

Die nach derzeitigem Stand der Technik für die Berechnung verwendeten WEA-Typen entsprechen einer Nennleistung von 3,2 MW mit einer Nabenhöhe bis 140 m. Die Nennleistung wurde mit Blick auf die genannten Windgeschwindigkeiten gewählt, womit der Landkreis mit 7,3 m/s auf 100 m Höhe, bzw. 8,07 m/s auf 200 m Höhe an der Station Fassberg im mittleren Bereich der Windzonen steht (Storck, 2010). Dennoch müssten hier Vor-Ort-Messungen in Form eines Windgutachtens zur genaueren Berechnung vorgenommen werden. Für diese Standorte kann insgesamt eine Anlagenzahl von ca. 130 WEA angenommen werden. Die Anzahl ergibt sich aus den Abständen der einzelnen WEA zueinander.

**Tabelle 2 - WEA Typ 3,2 MW**

WEA Typ	3,2 MW
Nennleistung (kW)	3200
Gesamthöhe	200
Rotordurchmesser D (m)	114
WEA-Abstand 3D nach BImSchG (m)	342
Volllaststunden Literatur (h/a)	2278
Volllaststunden Durchschnitt WEA LK LG	1613
Volllaststunden Annahme	2000
Ertrag je WEA (kWh)	6.400.000

Die Volllaststunden der bestehenden Windparks betragen durchschnittlich 1613 h/a. Dies resultiert aus der Anlagengröße von 2 MW und kleiner. Die berechneten Anlagentypen erreichen aber aufgrund ihrer Naben- und Gesamthöhe andere Luftschichten mit einer höheren Windgeschwindigkeit, in der Literatur schwanken die Angaben zu Volllaststunden im vergleichbaren Raum zwischen 2145 und 2600 h/a. Es wird bei den weiteren Berechnungen der Erträge von einem Mittelwert von 2000 h/a ausgegangen, da für den Raum Lüneburg bisher keine Daten für WEA mit der Nabhöhe vorliegen. Die reduzierte Anlagenverfügbarkeit ist mit einem Faktor von 0,985 eingerechnet.

Bei Neubau von 130 WEA nach technischem Stand 3,2 MW in 30 Konzentrationszonen kann demnach ein Gesamtjahresertrag von ca. 820 GWh erreicht werden. Dies entspricht 104% des Gesamtstrombedarfs von Landkreis und Hansestadt Lüneburg.

### Repowering

Die Windenergie stellt mit einem großen Anteil der regenerativen Stromversorgung im LK LG dar. Die 69 WEA (eine weitere mit dem Standort Bardowick 1 ist eine echte Windmühle und kann für das Repowering nicht betrachtet werden) haben eine Gesamtleistung von 116,5 MW, speisten 193.571 MWh 2008 in die Netze der EVU ein, und erbrachten so 24,2 % des Strombedarfs (799.410 MWh) von Landkreis und Hansestadt Lüneburg im Jahre 2010 (Landkreis Lüneburg 2011). Die von 1997 bis 2001 erbauten WEA könnten bereits jetzt nach § 30 EEG erneuert werden.

**Tabelle 3 - WEA-Standorte im Landkreis Lüneburg**  
**Quelle: Morgenroth, 2011 nach LK LG 2011**

Standort / Windpark	WEA	Gesamtleistung [kW]	Baujahr	Einzelanlage [kW]	Anlagenalter [Jahre]
(Bardowick 1 Windmühle)	0/1	0/21	1994	0/21	0/17
Volkstorf	1	500	<b>1997</b>	500	14
Rehlingen 1	2	1000	<b>1999</b>	500	12
Dahlem 1	1	1000	<b>2000</b>	1000	11
Südergellersen 1	2	3000	<b>2001</b>	1500	10
Südergellersen 2	2	3000	<b>2001</b>	1500	10
Südergellersen 3	1	1500	<b>2001</b>	1500	10
Artlenburg	5	7500	2002	1500	9
Dahlenburg Windpark	18	36000	2002	2000	9
Rehlingen 2	1	600	2002	600	9
Wendhausen	4	6000	2002	1500	9
Dahlem 2	1	1000	2002	1000	9
Melbeck 1 (Embsen)	4	7200	2003	1800	8
Südergellersen 4	1	1500	2003	1500	8
Barnstedt	4	7200	2004	1800	7
Melbeck 2	4	7200	2004	1800	7
Dahlenburg 2 (WP D-M)	3	6000	2004	2000	7
Gemeinde Neetze	3	6000	2004	2000	7
Gem. Nahrendorf 2 (WP D-M)	3	6000	2004	2000	7
Bardowick 2 (GfA-Gelände)	1	800	2005	800	6
Barendorf 1	2	3000	2005	1500	6
Barendorf 2	2	3000	2005	1500	6
Boitze 1	1	1500	2006	1500	5
Bleckede	3	6000	2007	2000	4
<b>Summe /arithm. Mittel</b>	<b>69</b>	<b>116500</b>	<b>2003</b>	<b>1688</b>	<b>8,3</b>

Hierfür werden passende Repoweringanlagen für die spezifischen Standorte ausgewählt. Dies geschieht unter zwei Gesichtspunkten:

- a) Sofern gemäß LROP keine Begrenzungen vorgegeben sind, und der Standort im Rahmen des EEG frei planbar ist, soll mit der Auswahl der Anlage ein möglichst hohes Potential ausgeschöpft werden.

- b) Im Falle bestehender Limitierungen ist möglichst deren Maß auszufüllen und eine adäquate Höchstnennleistung zugrunde zu legen.

### **Bekannte Besonderheiten und mögliche Einschränkungen**

Nach derzeitiger Datenlage [Stand Sept. 2011] kommen im Landkreis Lüneburg 69 WEA für ein Repowering in Frage. Entgegen den Angaben des LROP existieren für manche Standorte im LK LG dennoch Höhenbeschränkungen. Folgende Standorte sind betroffen: Rehlingen 1 und 2, Artlenburg und sämtliche Standorte in der Samtgemeinde (SG) Dahlenburg: Dahlen, Boitze 1, beide Windparks „Dormann-Michaelis“ in Dahlenburg 2 und der Gemeinde Nahrendorf. Darüber hinaus sollen den Angaben des Bauamtes des LK LG zufolge in Volksdorf keine weiteren WEA aufgrund von Bürgerprotesten gebaut werden. Dies schränkt bei 36 WEA die Auswahl der den Vorschriften konformen Anlagen stark ein. In der SG Dahlenburg sind die Gesamthöhen auf maximal 140 m begrenzt. Für 24 WEA ist dort das Repowering im Sinne der geforderten Minimalleistung des EEG 2009 und EEG 2012 ausgeschlossen, da keine entsprechenden Anlagen auf dem Markt zu finden sind, die die Einhaltung dieser Gesamthöhen ermöglichen. Diese WEA weisen eine Nennleistung von 2 MW auf. Dementsprechend müsste sie durch Anlagen mit mindestens 4 MW ausgetauscht werden und dabei die gesetzte Maximalhöhe einhalten.

Zwei WEA des 2003 in Betrieb genommenen Windparks in Melbeck 1 (Embsen) laufen als Lärmschutzmaßnahme nachts acht Stunden drehzahlreduziert (Storck, 2010) und somit wahrscheinlich mit auf die Hälfte abgeriegelter Drehzahl. Es wird daher angenommen, dass bei diesen beiden WEA nur 5/6 der Leistung, entsprechend 83,33% erbracht werden. Hier wäre zu überprüfen, inwieweit die technische Entwicklung zum Zeitpunkt des Repowerings in 2013 im Hinblick auf produktionsseitige Schallreduktionsmaßnahmen an WEA vorangeschritten ist. Aufgrund bisheriger Innovationen im Rotorblattdesign konnten niedrigere Strömungswiderstandskoeffizienten mit Auswirkungen auf den Schallschutz erzielt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass ein Immissionsschutz konformes Repowering möglich ist. Prinzipiell müssten für die jeweiligen Standorte entsprechend ihrer Windgeschwindigkeit die passende WEA anhand der Leistungskennlinien ausgewählt werden, da die jeweilige Leistung den Windklassen entsprechend ausgelegt ist. Die Windgeschwindigkeiten weichen im Mittel relativ gering von einander ab, so dass hier auf eine Differenzierung in der Auswahl der WEA verzichtet wird. Zusätzlich vom Ergebnis abgezogen werden müssten bei konzentrierten Windparks jeweils die Abschattungseffekte der WEA untereinander, welche eine verminderte Anlagenzahl zur Folge hat.

Durch eine Repoweringmaßnahme aller Anlagen die älter als 2002 sind, können pro Jahr ca. 132 GWh produziert werden, wobei in dieser Berechnung die Reduzierung der Anlagenzahl pauschal vorgenommen wurde. Wenn, wie im EEG mindestens verlangt lediglich die doppelte Anlagengröße installiert wird und ein Repowering konsequent erfolgt, dann wären Erträge ab 2012 von 132 GWh aus den bestehenden Windanlagen und Windparks möglich, in 2017 wären 257 GWh/a generierbar. Allerdings wurde bei der Berechnung von einem Repowering der Altanlagen durch 3,2 MW WEA Typen ausgegangen. Zum Vergleich dazu produzieren die bestehenden Anlagentypen derzeit ca. 195 GWh/a.

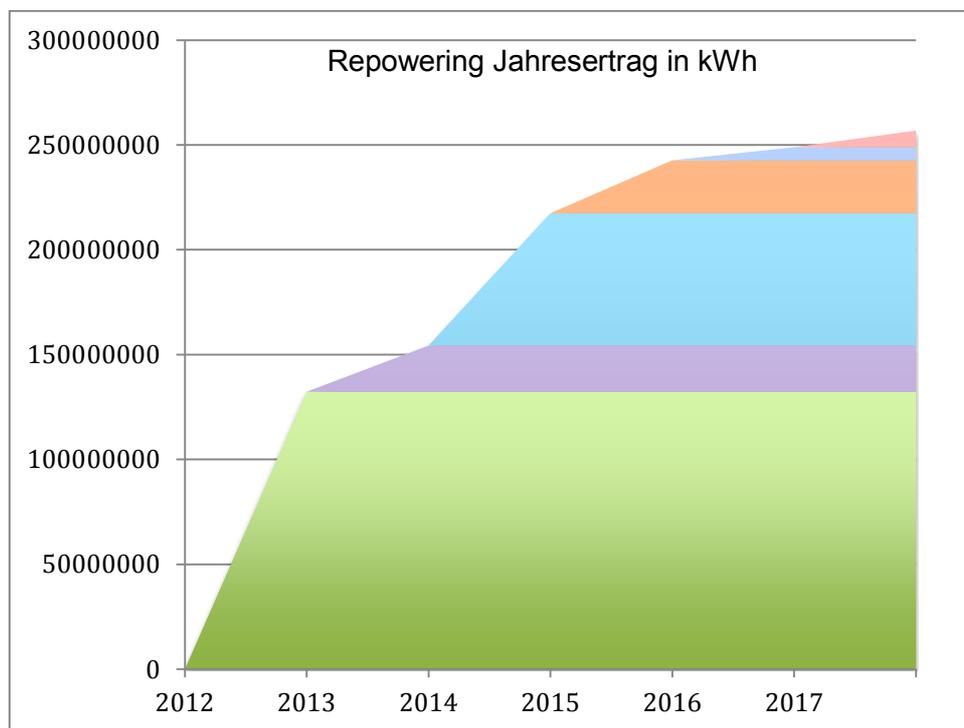


Abbildung 29 - Repowering Jahresertrag in kWh

### Gesamtpotential Wind

Unter Berücksichtigung des heutigen Stands der Technik ergibt sich demnach ein Windpotential auf den oben angeführten neu identifizierten Flächen von 819,5 GWh/a, was einer zu installierenden Leistung von 416 MW entspricht. Berechnet man die möglichen Erträge durch ein konsequentes Repowering dazu, so sind hier bis 2017 257 GWh/a zusätzlich zu erzielen.

Die Nutzung von Waldflächen als potentielle Windanlagenstandorte sind in dieser Potentialberechnung nicht enthalten.

Insgesamt bedeutet dies ein potentieller Ertrag durch Wind von 1.075 GWh/a.

Alleine mit der Nutzung Windenergie könnten in Lüneburg in Jahressumme ca. 135% des Gesamtstrombedarfs von Landkreis und Hansestadt Lüneburg gedeckt werden.

Unter der Annahme, dass der herkömmliche Strommix CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 566 g/kWh (geschätzte Daten für 2011(UM, 2012)) verursacht, kann durch die Nutzung von Strom aus Wind pro Jahr die Freisetzung von 609.247t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

### **4.3. Wind im Wald**

#### **4.3.1. Rechtliche Ausschlusskriterien**

Gerade im Hinblick auf den Schutz von Tier- und Pflanzenarten die das Ökosystem Wald bietet und rechtlich durch seine Schutzfunktionen verankert ist, muss geprüft werden, ob diese Belange der Errichtung von WEA entgegenstehen.

Vor schädlichen Einflüssen durch WEA ist § 44 BNatSchG von besonderer Bedeutung. Entscheidend ist die Frage, ob am geplanten Standort ein erhöhtes Tötungsrisiko durch WEA vorhanden ist. Besteht ein solches Risiko, welches die Errichtung einer WEA verhindern würde, kommen wiederum vielfältige Betriebsmodifikationen der WEA in Betracht um das Tötungsrisiko „auf ein nicht signifikantes Maß“ zu reduzieren (Hinsch, 2011). Gängige Betriebsmodifikationen in der Praxis sind unter anderem die Abschaltung der Anlage zu Zeiten einer besonders hohen Aktivität der zu schützenden Art (z.B. Fledermäusen). In der Vergangenheit hat sich jedoch gezeigt, dass für die Raumordnungsplanung die artenschutzrechtlichen Konflikte nur bedingt zu lösen sind. Eine abschließende Bewertung der Zulässigkeit hinsichtlich des Artenschutzes muss daher im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren erfolgen (Hinsch, 2011).

Auf Grundlage des BNatSchG können aber bestimmte naturschutzrechtlich festgesetzte Schutzgebiete nicht durch Vorrangflächen für die Windenergienutzung „überplant“ werden. Um den Schutz von besonders schützenswerten Natur- und Landschaftsteilen gegenüber sozialen und wirtschaftlichen Belangen in den planerischen Abwägungen zu gewährleisten, regeln die §§ 20 bis 36 BNatSchG den sogenannten Akt der Unterschutzstellung. Dieser Schutz muss in der Bauleitplanung strikt beachtet werden und gilt auch für ansonsten privilegierte Vorhaben im Außenbereich und somit für die Errichtung von Windkraftanlagen, die in solchen Gebieten nicht zulässig sind. Zu beachten ist hierbei, dass für die nach § 20 Abs. 2 BNatSchG verschiedenen Schutzgebietstypen unterschiedlich „strenge“ Unterschutzstellungen gelten. Ob die verschiedenen Unterschutzstellungen für diese Gebiete eine Nutzung für

Windenergieanlagen im Landkreis Lüneburg ausschließen, soll im Folgenden analysiert werden:

### **Naturschutzgebiete und Nationalparke**

Die strengste Form gilt für Naturschutzgebiete und Nationalparke. Diese Gebiete unterliegen nach § 23 Abs. 2 BNatSchG einem generellen Veränderungsgebot. Da dieses Veränderungsgebot bereits die Änderung des äußeren Erscheinungsbildes umfasst, und Windenergieanlagen dieses maßgeblich beeinflussen würden, ist die Errichtung von WEA somit ausgeschlossen (Scheidler, 2011). Dies gilt auch in der planerischen Abwägung für die Ausweisung von Konzentrationszonen, da sich die gemeindliche Planungshoheit nicht über die entsprechenden Schutzverordnungen hinwegsetzen kann (Scheidler, 2011).

### **Landschaftsschutzgebiete**

Für Landschaftsschutzgebiete gelten weniger strenge Unterschutzstellungen. Nach §26 Abs. 2 BNatSchG sind „nach Maßgabe näherer Bestimmungen alle Handlungen verboten, die den Charakter des Gebiets verändern oder dem besonderen Schutzzweck zuwiderlaufen.“ Im Gegensatz zu dem generellen Veränderungsverbot des § 23 Abs. 2 Nr.1 BNatSchG sind die Verbotsbestimmungen für Landschaftsschutzgebiete relativ. Es kommt somit auf die genaueren Verbote in den jeweiligen Schutzgebietsausweisungen an (Scheidler, 2011) Nach § 1 Abs.4 der Verordnung über das Landschaftsschutzgebiet des Landkreises Lüneburg gilt unter anderem der Schutzzweck des Erhalts „der Schönheit des Landschaftsbildes“. In § 2 Abs. 1 werden in den näheren Schutzbestimmungen Handlungen untersagt, die den Charakter des Landschaftsschutzgebietes verändern. Zudem ist es nach § 2 Abs.1 Nr.1 verboten, Wald in eine andere Nutzungsart zu überführen oder zu beseitigen. Da jedoch zum einen die Überführung von Wald in eine andere Nutzungsart durch eine Waldumwandlungsgenehmigung für die Errichtung von WEA nötig ist, und zum anderen das Landschaftsbild maßgeblich beeinträchtigt wird, ist die Möglichkeit zur Errichtung von WEA in Wäldern, die in Landschaftsschutzgebieten liegen, aus diesen rechtlichen Restriktionen im Landkreis Lüneburg nicht möglich.

### **Biosphärenreservate**

Biosphärenreservate sind nach § 25 Abs.3 BNatSchG „wie Naturschutzgebiete oder Landschaftsschutzgebiete zu schützen“. Es ist jedoch nicht unmöglich, die rechtlichen Hindernisse für WEA zu überwinden. Jedoch kommt es auch auf die verschiedenen Gebietsteile an.

Das hier betroffene Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalaue ist in die Gebietsteile A bis C eingeteilt. Nach § 10 NEIbtBRG sind im Gebietsteil C alle Handlungen verboten die den Gebietsteil verändern. Für die Gebietsteile A und B ist die untere Naturschutzbehörde nach § 9 NEIbtBRG ermächtigt Handlungsverbote auszusprechen. Für den Gebietsteil B gilt jedoch nach § 6 NEIbtBRG der Schutzzweck der Erhaltung der „Eigenart oder Schönheit des Landschaftsbildes“ wodurch Windenergieanlagen wie in den vorangegangenen Erläuterungen diesem Schutzzweck zuwiderlaufen. Für den Gebietsteil A gilt nach § 2 Abs.1 Nr.1 der Verordnung des Landkreises Lüneburg zur Ergänzung der Schutzbestimmungen für den im Kreisgebiet liegenden Gebietsteil A des Biosphärenreservats „Niedersächsische Elbtalaue“ ein Verbot über die „Errichtung von Windenergieanlagen über 25 m Gesamthöhe über der ursprünglichen Geländeoberkante“. Die Nutzung der Windenergie ist somit praktisch ausgeschlossen.

### **Natura 2000-Gebiete**

Für Natura 2000-Gebiete (FFH- und EU-Vogelschutzgebiete) muss nach § 34 Abs.1 BNatSchG die Verträglichkeit von Projekten in Bezug auf die Erhaltungsziele dieser Gebiete überprüft werden. Entscheidend ist hier eine erhebliche Beeinträchtigung „die zu einer Verschlechterung der zu schützenden Lebensraumtypen oder Arten führt“ (Scheidler, 2011). Ab wann die Erhaltungsziele für FFH-Gebiete gefährdet sind, ist allerdings streitig. Eindeutig ist nur, dass „innerhalb der natürlichen Lebensräume und Habitate eines Schutzgebietes“ jeder Flächenverlust durch Projekte erheblich ist (Gatz, 2009b). Somit also nicht für WEA zulässig ist. Außerhalb der Lebensräume und Habitate, aber innerhalb eines Schutzgebietes lässt sich dieses jedoch nicht eindeutig beantworten. Ähnlich ist der Sachverhalt in Bezug auf EU-Vogelschutzgebiete. Ob eine erhebliche Beeinträchtigung vorhanden ist, muss durch eine Vorprüfung abgeschätzt werden (Gatz, 2009b). Es ist also nicht generell auszuschließen, dass die Errichtung von WEA durch rechtliche Restriktionen verhindert wird.

### **Naturparke**

Nach § 27 Abs.1 Nr.1 BNatSchG sind Naturparke überwiegend Landschaftsschutz- und Naturschutzgebiete. Sind Naturparke also mit solchen überlagert, gelten die beschriebenen Verbote für diese Gebiete (Scheidler, 2011). Für die Gebiete die nicht unter den Schutz dieser fallen, gelten zunächst keine Verbote. Die Errichtung von WEA in diesen Bereichen ist somit nicht ausgeschlossen.

### **4.3.2. Waldumwandlung**

Zu den rechtlichen Besonderheiten für die Windenergienutzung im Wald gegenüber der Nutzung in freier Flur, gehört außerdem das Waldrecht. Denn für die Errichtung und weiteren baulichen Maßnahmen die für den Betrieb Voraussetzung sind, wie die Verlegung von Kabeltrassen oder der Ausbau von Zuwegungen, ist oft eine Rodung nötig.

Doch selbst wenn nicht gerodet werden muss, ist es nach § 8 Abs. 1 NWaldLG notwendig, eine sogenannte Umwandlungsgenehmigung einzuholen. Denn für die Errichtung und den weiteren baulichen Maßnahmen muss die Nutzungsart Wald in eine andere Nutzungsart überführt werden. Zu den baulichen Maßnahmen, die eine Waldumwandlungsgenehmigung notwendig machen könnten, gehören Zuwegungen, Kranstellflächen, Baustelleneinrichtungen, Nebenanlagen wie Trafos, und Kabeltrassen (Geßner, 2011). Gerade Kranstellflächen können hierbei ein Hindernis darstellen, denn für eine 2-MW-Anlage kann bereits eine 70 m lange baumfreie Fläche erforderlich werden, um die Montage des Krans zu bewerkstelligen (Lietz, 2010). Sind bereits ausreichend befestigte Waldwege für Holztransporte angelegt, oder können Waldbrandschutzstreifen für Kabeltrassen verwendet werden, bedarf es meist keiner Waldumwandlung. Für die Genehmigung einer Waldumwandlung sind zudem Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen notwendig. Außerdem bedarf es für die Genehmigung der Waldumwandlung in Niedersachsen einer Ersatzaufforstung. Ob eine Waldumwandlungsgenehmigung erteilt wird, muss wie im Falle des Artenschutzes abschließend im immissionschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren geklärt werden (Geßner, 2011; Lietz, 2010)

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass seit einer Gesetzesänderung 2009 des NWaldLG, eine Waldumwandlung zugunsten des Waldbesitzers wesentlich vereinfacht wurde. Dieses ergibt sich aus der Änderung der Formulierung „beachtliche wirtschaftliche Interessen“ in „erhebliche wirtschaftliche Interessen“ des Waldbesitzers des § 8 Abs. 3 Satz 1 NWaldLG. Der Gesetzeswortlaut „erheblich“ schwächt den vorherigen Wortlaut in Bezug auf die Abwägung gegenüber den Belangen der Öffentlichkeit Allgemeinheit deutlich ab. Musste vorher die Waldumwandlung existentiell über die Wirtschaftlichkeit des land- oder forstwirtschaftlichen Betriebes des Waldbesitzers entscheiden um Belange der Allgemeinheit zu überwiegen, könnte nach neuer Gesetzeslage eine „erhebliche Verbesserung der wirtschaftlichen Situation des Waldbesitzers“ auf Grund der Waldumwandlung genügen. Des Weiteren können durch die neue Formulierung auch Gebietskörperschaften Aussicht auf eine Waldumwandlung für kommunalen Wald oder Landesforsten haben, wenn sich diese bspw. durch Verpachtung von Wald für WEA auf eine erhebliche Weise auf die wirtschaftliche Lage auswirkt (Lietz, 2010).

Eine Abwägung der wirtschaftlichen Interessen einzelner Waldbesitzer gegenüber Belangen der Allgemeinheit kann in dieser Arbeit jedoch nicht vorgenommen werden. Für die Festlegung der Ausschlusskriterien des nächsten Kapitels ergeben sich keine Auswirkungen.

#### **4.3.3. Abwägungskriterien**

Nach Abzug der Flächen die auf Grund der harten Ausschlusskriterien nicht für die Windenergienutzung im Wald in Frage kommen, also den Tabuzonen, erhält man die potentiellen Flächen, die prinzipiell als Konzentrationszonen geeignet sind. Für diese Flächen muss dann abgewogen werden, ob öffentliche Belange einer Ausweisung dieser Gebiete den Interessen der Windenergienutzung überwiegen (Hinsch, 2011). Hierzu müssen sogenannte „weiche“ Ausschlusskriterien, wie gestalterische oder städtebauliche Aspekte, festgelegt werden (Storck, 2010). Ausweisungen von Wasserschutzgebieten oder freizuhalten Sicherungsbereiche der Erholung fallen ebenfalls unter diese Kategorie (Gatz, 2009b). Auch sogenannte Pufferzonen, die um die Tabubereiche gelegt werden, gelten als weiche Ausschlusskriterien (Gatz, 2009b). Diese Pufferzonen sowie weitere Tabubereiche welche im vorigen Abschnitt nicht erläutert wurden, werden im nächsten Kapitel zusammen mit den bereits festgelegten Tabuzonen beschrieben. Im Anschluss wird die Planung mit dem Programm ArcGIS durchgeführt.

#### **4.3.4. Durchführung**

Die Potentialflächen werden ermittelt, indem die zuvor genannten Ausschlussgebiete von allen Waldgebieten im Landkreis Lüneburg subtrahiert werden. Für dieses Vorgehen wird das GIS-Programm ArcGIS der Firma ESRI verwendet.

Nach der Subtraktion aller Ausschlussgebiete, deren Schutzabständen sowie Freiflächen, wurden 42 Waldgebiete als Potentialflächen identifiziert. Insgesamt sind das 4752 ha Waldflächen. Den größten Anteil stellen dabei Waldflächen mit Nadelhölzern. Laub- und Mischwälder machen nur einen sehr geringen Anteil dieser Fläche aus. Die Potentialflächen machen relativ einen Anteil von 10.86% der Waldfläche des Landkreises Lüneburg aus und 3.58% des gesamten Gebiets des Landkreis Lüneburg (Abbildung 30).

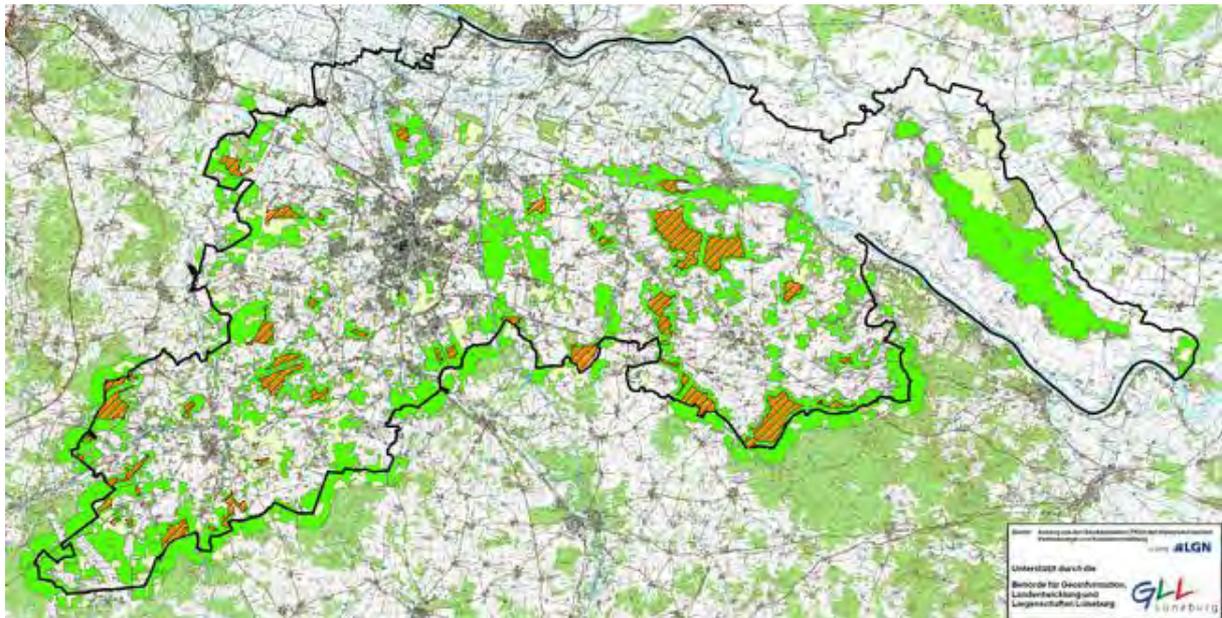


Abbildung 30 - Potentialflächen für WEA im Wald

#### 4.4. Solarthermie

Das berechnete thermische Potential des LK LG leitet sich aus der verfügbaren Fläche für Photovoltaik und -thermie ab, die für die Privathaushalte 2.750.000 m<sup>2</sup> beträgt. 20% davon werden solarthermisch berechnet, es bleibt eine Fläche von 550.000 m<sup>2</sup>. Geht man von einem Ertrag von 1071 kWh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup> aus, so ergibt sich ein Potential von 589.050 MWh<sub>th</sub>.

#### 4.5. Biomassepotentiale

Nach vorliegender Datenlage sind im LK LG 25.100 kW Gesamtleistung installiert. Diese ergibt sich aus holzartiger Biomasse und Strom aus Klär- und Deponiegas, was einem durchschnittlichen jährlichem Ertrag von 150.133 MWh entspricht.

Im Jahr 2010 wurden im Landkreis Lüneburg insgesamt 47.614 ha Ackerland bestellt.

<b>Fruchtart</b>	<b>ha</b>	<b>% der Ackerfläche</b>
<b>Getreide mit Körnermais</b>	19.424	40,8
<b>Raps</b>	4.619	9,7
<b>Kartoffeln</b>	5.257	11
<b>Zuckerrüben</b>	2.138	4,5
<b>Leguminosen</b>	105	0,2
<b>Gras</b>	1.221	2,6

<b>Sonstiges, Obst- und Gemüsebau</b>	6.341	13.3
<b>Futterbau:</b>		
<b>Silomais</b>	8.509	17,9
<b>Dauergrünland</b>	15.692	

Weiter werden im Landkreis Lüneburg 29.215 Rinder auf 243 Betrieben gehalten, was einem Durchschnitt von 120 Tieren pro Betrieb bedeutet. 88 Betriebe halten 49.140 Schweine mit einem durchschnittlichen Tierbestand von 558 Schweinen pro Betrieb. Weiter halten 100 Betriebe derzeit 29.844 Hühner, das entspricht einer Anzahl von knapp 300 Tieren pro Betrieb.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Gesamtaufkommen von Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung im Landkreis pro Jahr:

	<i>Rinder</i>	<i>Schweine</i>	<i>Geflügel</i>
<i>Gülle (m<sup>3</sup>/a)</i>	<b>207.427</b>	<b>86.000</b>	
<i>Festmist (t/a)</i>	<b>93.488</b>	<b>15.185</b>	<b>597</b>

Insgesamt werden im Landkreis Lüneburg 3.033 ha für Verkehrswege genutzt. Bundesstraßen haben eine Gesamtlänge von 107 km, Landesstraßen sind 105 km lang. Unter der Annahme einer durchschnittlichen Breite der Bundesstraßen von 25 m und der Landesstraßen von 15 m, ergibt sich eine berechnete Gesamtlänge der sonstigen Straßen von 26 km bei einer Breite von 10 m.

#### 4.6. Biogaspotentiale

Nach vorliegender Datenlage sind im LK LG 20.237 kW installierte Leistung durch BHKW erreicht, was einem durchschnittlichen jährlichem Ertrag von 141.659 MWh entspricht. Zusätzlich werden innerhalb des Biogas-Contractings 5050 kW Leistung genutzt, welche einen jährlichen Ertrag von 35.350 MWh erbringen. Damit ergibt sich eine Gesamtleistung von 25.287 kW und einen Gesamtertrag von 177.009 MWh.

Für die Berechnung der energetischen Potentiale aus Biomasse wurden verschiedene Annahmen getroffen:

- 20% der Ackerfläche und 20% des Dauergrünlandes werden für die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen genutzt. Es stehen 9.523 ha Ackerfläche und 3.138 ha Grünland zur Verfügung.
- 30% der Ackerfläche und 30% des Dauergrünlandes werden für die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen genutzt. Es stehen 14.283 ha Ackerfläche und 4.707 ha Grünland zur Verfügung.

Weiter wird angenommen, dass Ackerland mit verschiedenen Energiepflanzen für die Biogaserzeugung bebaut wird. Angenommen wird eine Kombination folgender Kulturen:

Wintergetreideganzpflanzensilage, Maissilage mit je 30% Anteil und Zuckerrüben und Sudangras mit je 15% Anteil an der genutzten Ackerfläche.

<b>Modell A</b>	<b>ha</b>	<b>Ertrag t/ha</b>	<b>Ertrag t/a</b>	<b>Biogas Nm<sup>3</sup>/t</b>	<b>Methan Nm<sup>3</sup>/t</b>	<b>MWh/a Gesamt</b>	<b>MWh<sub>e</sub>/a</b>	<b>MWh<sub>ther</sub>/a</b>
<b>GGPS</b>	3175	30	95.250	190	105	99.712	31.908	49.856
<b>SMais</b>	3175	41	130.175	200	106	137.572	44.023	68.786
<b>ZRüben</b>	1587	55	87.285	130	72	62.657	20.050	31.329
<b>Sudangras</b>	1587	45	71.415	128	70	49.841	15.949	24.920
<b>GrasSil.</b>	3138	22	69.036	180	98	67.452	21.585	33.726
<b>Gesamt</b>	<b>12662</b>					<b>417.234</b>	<b>133.515</b>	<b>208.617</b>

In Szenario A könnten über die Stromnutzung aus Biogas insgesamt 75.570 t/ CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart werden.

<b>Modell B</b>	<b>ha</b>	<b>Ertrag t/ha</b>	<b>Ertrag t/a</b>	<b>Biogas Nm<sup>3</sup>/t</b>	<b>Methan Nm<sup>3</sup>/t</b>	<b>MWh/a Gesamt</b>	<b>MWh<sub>e</sub>/a</b>	<b>MWh<sub>tr</sub>/a</b>
<b>GGPS</b>	4761	30	142.830	190	105	149.522	47.847	74.761
<b>SMais</b>	4761	41	195.201	200	106	206.292	66.013	103.146
<b>ZRüben</b>	2380	55	130.900	130	72	93.965	30.069	46.983
<b>Sudangras</b>	2380	45	107.100	128	70	74.745	23.918	37.372
<b>GrasSil.</b>	4707	22	103.554	180	98	101.178	32.377	50.589
<b>Gesamt</b>	<b>18989</b>					<b>625.702</b>	<b>200.225</b>	<b>312.851</b>

In Szenario B könnten über die Stromnutzung insgesamt 113.327 t/ CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart werden.

#### 4.6.1. Wirtschaftsdünger

Der gesamte anfallende Wirtschaftsdünger wird vor der Ausbringung energetisch in einer Biogasanlage verwendet.

<i>Wirtschaftsdünger</i>	<i>Methanerträge (m<sup>3</sup>/a)</i>	<i>KWh<sub>gesamt</sub>/a</i>	<i>KWh<sub>therm</sub>/a</i>	<i>KWh<sub>el</sub>/a</i>
<i>Rindergülle</i>	2.903.971	28.952.591	14.476.295	8.338.346
<i>Rinderfestmist</i>	4.113.472	41.011.316	20.505.658	11.811.258
<i>Schweinegülle</i>	1.462.004	14.576.182	7.328.591	4.197.940
<i>Schweinefestmist</i>	546.666	5.450.267	2.725.134	1.569.677
<i>Geflügel festmist</i>	53.730	535.688	267.844	154.278
<b>Gesamt</b>	<b>16.067.401</b>	<b>90.526.045</b>	<b>45.303.522</b>	<b>26.071.500</b>

Berechnet wurden für diese Potentiale die Biogasnutzung im BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 32%. Nur aus Wirtschaftsdüngernutzung können demnach knapp 29 GWh/a Strom und fast 45 GWh/a Wärme gewonnen werden. Für den Bereich Strom bedeutet dies eine Einsparung von 16.396 t CO<sub>2</sub> pro Jahr unter der Annahme, dass der herkömmliche Strommix CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 566 g/kWh (geschätzte Daten für 2011 (UM, 2012)) verursacht.

Die energetische Nutzung von Wirtschaftsdünger hat nicht nur durch die Verrechnung des eingesparten CO<sub>2</sub> aus Nichtverwendung fossilen Stroms einen günstigen Klimaeffekt, sondern auch durch die Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch ein verbessertes Wirtschaftsdüngermanagement.

Pauschal gerechnet werden im Landkreis Lüneburg nur durch das Wirtschaftsdüngermanagement pro Jahr etwa 575 t CH<sub>4</sub> und ca. 16 t N<sub>2</sub>O freigesetzt. Umgerechnet in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ist diese Menge gleichbedeutend mit 17.900 t CO<sub>2</sub>. Eine vollständige Nutzung der Wirtschaftsdünger kann diese Emissionen klimaschädlicher Gase deutlich reduzieren.

#### 4.6.2. Holzartige Biomasse

Nach vorliegender Datenlage sind im LK LG 187,25 kW installierte Leistung durch BHKW erreicht, was einem durchschnittlichen jährlichem Ertrag von 655,38 MWh entspricht.

Die Einteilung des Rohholzes in verschiedene Klassen wird in der Literatur sehr unterschiedlich vorgenommen. Ebenso ist dies ein Problem der Praxis, da seit 2009 die veraltete gesetzliche Festlegung der Rohholzhandelsklassen aufgehoben wurde und derzeit keine einheitliche Regelung herrscht (Verhoff et al., 2009): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland. 30-33). Nichtsdestotrotz ist die Dicke des Holzes maßgeblich für die spätere Verwendung verantwortlich. Nach Kaltschmitt et al. (2009) wird eine Einteilung nach dem mittleren Brusthöhendurchmesser des herrschenden Bestandes (BHD) in starke (über 50 cm), mittlere (20 – 50 cm) und schwache (unter 20 cm) Sortimente vorgenommen. Stärkere und über 3 m langen Sortimente werden zu Stammholz verarbeitet und an die Sägeindustrie verkauft, welche daraus weiter Schnittholz produziert. Die schwächeren und kürzeren Sortimente fallen neben der Holzernte auch bei Durchforstungsmaßnahmen an und werden als Schichtholz, Industrieholz oder Energieholz verwendet. Industrieholz wird in der Weiterverarbeitung weiter zerkleinert und für die Herstellung von Zellstoff, Holzwolle oder Faser- und Spanplatten verwendet (Englert, 2009).

Für die Bereitstellung von Energieholz werden prinzipiell nur sogenanntes Durchforstungs- und Waldrestholz verwendet, welches bei Ernte- und Pflegearbeiten anfällt, dies sind Kronenmaterial, Äste, Stammabschnitte. Sowie minderwertige und schwache Sortimente, die aus qualitativen oder ökonomischen Gründen keiner stofflichen Nutzung zugeführt werden können. Das nährstoffreiche Reisholz (Nadeln, Feinäste, Wipfel) soll im Wald belassen werden, um dem Kreislaufsystem nicht zu viele Nährstoffe zu entziehen (Flaig, 1998). Von dem bei der Ernte anfallenden Schlagabraum können das Kronenmaterial oder Stammabschnitte aufgearbeitet werden. Bei der Durchforstung fällt Schwachholz mit einem BHD von 7 bis 20 cm an (Hartmann, 2002).

Die Nutzung des Schwachholzes hängt maßgeblich vom Preis ab. Doch können diese schwachen Sortimente als Industrieholz meist nicht genug Ertrag bringen. Die Grenze zwischen stofflicher und energetischer Nutzung ist nicht eindeutig zu klären und beginnt sich auf Grund der steigenden Energiepreise zu überlappen (Hepperle, 2010; Radkau, 2007).

Bei der Darstellung der Ergebnisse ist zuerst auf die Eigentumsverhältnisse der erfassten Fläche einzugehen (Tabelle 4). Der Privatwald stellt im LK LG, wie auch in Deutschland, den höchsten Flächenanteil dar. Jedoch ist davon auszugehen, dass dieser Anteil noch etwas höher liegt, da wie bereits erwähnt, dieses Besitzverhältnis nicht komplett erfasst werden konnte. Ebenfalls sind 73% der Fläche PEFC zertifiziert. Dieser Wert liegt über dem deutschen Schnitt und kann als Indikator für eine nachhaltige Bewirtschaftung gesehen werden. Der nicht zertifizierte Wald liegt in der Betreuungsfläche der LWK Rehlingen. Doch wurde

darauf hingewiesen, dass die notwendigen Kriterien erfüllt werden könnten, die Zertifizierung jedoch zu teuer und nicht erwünscht ist.

Tabelle 4 - Eigentumsverhältnisse der Wälder im LK LG

	in%
<b>Privatwald</b>	61,3
<b>Staatswald (Bund)</b>	1,4
<b>Staatswald (Länder)</b>	34,0
<b>Kommunalwald</b>	3,3

In Tabelle 5 sind die weiteren Ergebnisse für die erfasste Fläche und die Gesamforstfläche abgebildet:

Tabelle 5 - Ergebnisse der Ist-Analyse

	Hochrechnung auf Gesamforstfläche	Erfasste Fläche
<b>Waldfläche in LG [in ha]</b>	41.424	34.814
<b>Laubbaumanteil [in %]</b>	23,8	23,8
<b>Nadelbaumanteil [in%]</b>	76,2	76,2
<b>Vorratsfestmeter [Vfm]</b>	9.275.646	7.795.582
<b>Vorratsfestmeter pro ha [in Vfm]</b>	223,9	223,9
<b>Zuwachs [in Efm]</b>	295.312	248.191
<b>Zuwachs pro ha [in Efm]</b>	7,1	7,1
<b>Nutzung [in Efm]</b>	202.443	170.140
<b>Nutzung pro ha [in Efm]</b>	4,9	4,9
<b>Nutzung des Zuwachses [in %]</b>	68,6	68,6
<b>energetische Nutzung [in %]</b>	12,5	12,5
<b>energetische Nutzung [in Fm]</b>	25.311	21.272
<b>Nadelholz [in m<sup>3</sup>]</b>	7.642	5.548
<b>Laubholz [in m<sup>3</sup>]</b>	2.714	1.970
<b>Nadelholz [in Rm]</b>	9.230	6.701
<b>Laubholz [in Rm]</b>	24.301	17.643
<b>Energiemenge Nadel [in kWh ]</b>	20.610.907	14.963.539
<b>Energiemenge Laub [in kWh]</b>	48.730.705	35.378.540
<b>Energiemenge gesamt [in kWh]</b>	69.341.612	50.342.078
<b>Energiemenge gesamt [in GWh]</b>	69,34	50,34

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Wälder des LK LG über einen geringeren Holzvorrat gegenüber den deutschen Wäldern verfügen. Der Nadelbaumanteil hingegen ist höher als im bundesweiten Durchschnitt und geht zu Lasten des Laubbaumanteils. Ebenso sind die Zuwachsraten recht gering. Auffällig jedoch ist die geringe Nutzungsintensität des Zuwachses von nur 68,6%. Auch wird nur ein sehr kleiner Teil der Holzernte einer energetischen Nutzung zugeführt, wobei wesentlich mehr Scheitholz als Hackgut (oder Hackschnitzel) produziert wird wie die Sortimentsverteilung verdeutlicht:

- 83,2% Scheitholz (mit 72% Laub, 28% Nadel)
- 16,8% Hackschnitzel (mit 26% Laub, 74% Nadel)
- Insgesamt 64% Laub, 36% Nadel

Im Bereich des Scheitholzes wird wesentlich mehr Laub- als Nadelholz genutzt, wohingegen im Bereich der Hackschnitzel die Verteilung genau umgekehrt ist. Auch wird deutlich, dass insgesamt wesentlich mehr Laubholz als Energieholz bereitgestellt wird. Dies ist wahrscheinlich auf die höhere Energiedichte pro Volumen, sowie auf die geringe Nutzung von Hackschnitzeln, zurückzuführen. Die gesamte Energiemenge des geschlagenen Holzes beläuft sich auf 69,34 GWh. Diese Energiemenge entspricht jedoch nicht der sogenannten Nutzenergie, die dem Verbraucher zur Verfügung steht. Nähme man für die Verfeuerung des Hackguts eine Anlage mit einem Wirkungsgrad von 90% und für die Verfeuerung des Scheitholzes einen Anlagenwirkungsgrad von 79% an, würden sich lediglich nur noch 56,04 GWh ergeben.

### Szenarien

Nach der Diskussion der Maßnahmen wurden zum einen das „Referenz“- Szenario mit den Parametern der gesamtdeutschen Nutzung berechnet. Zum anderen das „Umwelt“- Szenario mit weniger intensiven Werten, um einem ganzheitlichen nachhaltigen Anspruch gerecht zu werden. Bei der Berechnung der Energiemenge wird von derselben Verteilung der Sortimentsstruktur wie bei der derzeitigen Nutzung ausgegangen. Demnach wird angenommen, dass die energetische Holzmenge zu 64% aus Laubholz und zu 36% aus Nadelholz besteht.

Tabelle 6 - Referenz- und Umwelt-Szenario

	„Referenz“- Szenario	„Umwelt“- Szenario
<b>Waldfläche in LG [in ha]</b>	41.424	41.424
<b>Laubbaumanteil [in %]</b>	22,5	22,5
<b>Nadelbaumanteil [in%]</b>	77,5	77,5
<b>Vorratsfestmeter [Vfm]</b>	9.288.765	9.288.765
<b>Vorratsfestmeter pro ha [in Vfm]</b>	227,8	227,8
<b>Zuwachs [in Efm]</b>	269.626	269.626
<b>Zuwachs pro ha [in Efm]</b>	7,2	7,2
<b>Nutzung [in Efm]</b>	277.375	253.515
<b>Nutzung pro ha [in Efm]</b>	6,7	6,1
<b>Nutzung des Zuwachses [in %]</b>	93	85
<b>energetische Nutzung [in %]</b>	24	18
<b>energetische Nutzung [in Fm]</b>	66.570	45.633
<b>Energiemenge Nadel [in kWh ]</b>	51.908.643	35.582.537
<b>Energiemenge Laub [in kWh]</b>	114.692.165	78.619.629
<b>Energiemenge gesamt [in kWh]</b>	166.600.807	114.202.166
<b>Energiemenge gesamt [in Gwh]</b>	166,60	114,20

Bei der Berücksichtigung der Wirkungsgrade möglicher Feuerungsanlagen unter der Annahme, dass auch die Sortimentsverhältnisse von Hackgut und Scheitholz gleichbleibend sind, steht im „Referenz“- Szenarios 134,64 GWh und „Umwelt“- Szenario 92,29 GWh Nutzenergie zur Verfügung. Die Ergebnisse des „Referenz“- Szenarios zeigen, dass bei einer intensiven Mobilisierung der Biomassepotentiale für eine energetische Verwendung, die Energiemenge gegenüber dem Ist-Zustand mit 56,04 GWh mehr als verdoppelt werden konnte. Doch geht eine derart intensive Nutzung zu Lasten der qualitativen Nachhaltigkeit in der Forstwirtschaft, sowie einer höheren Ressourcen- und Treibhausbelastung. Das „Umwelt“- Szenario weist ebenfalls einen Anstieg der Energiemenge um 64,7% gegenüber dem Ist- Zustand auf.

#### 4.6.3. Abfall

Nach vorliegender Datenlage sind im LK LG 1.625 kW installierte Leistung durch BHKW erreicht, was einem durchschnittlichen jährlichem Ertrag von 9.750 MWh durch Klär und Depo-niegas entspricht.

1981 gründeten der Landkreis und die Hansestadt Lüneburg die Gesellschaft für Abfallwirtschaft Lüneburg mbH (GfA), wodurch sie ihre Abfallentsorgung zusammenschlossen. Seitdem sammelt die GfA Abfälle ein, bzw. nimmt sie entgegen und führt sie den entsprechenden Behandlungen zu. Ab 1986 wurden neue Abschnitte der Zentraldeponie angelegt, seit 1995 betreibt die GfA eine Anlage zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung (MBV), seit 1997 ein Kompostwerk. 1996 wurde zuerst die Müllabfuhr in der Hansestadt übernommen, 2008 im gesamten Landkreis. 2012 wurde die GfA mbH in eine gemeinsame kommunale Anstalt des öffentlichen Rechts (gkAöR) umgewandelt (GfA).

Nach den Abfallsatzungen von Hansestadt und Landkreis werden folgende Abfälle getrennt eingesammelt und entsorgt:

- Hausmüll und hausmüllähnlicher Abfall aus anderen Herkunftsbereichen
- kompostierbare Abfälle und sperrige Grünabfälle
- Altpapier und Pappe
- Sperrmüll
- Haushaltselektro(-nik)geräte
- Altmetall
- Altglas
- Problemabfallkleinstmengen aus Haushaltungen und Kleinmengen an Sonderabfall
- Altholz

Die Erfassung erfolgt entweder im Hol- oder im Bringsystem. Beim Holsystem werden die Abfallarten direkt beim Bürger abgeholt. Dies passiert grundsätzlich alle zwei Wochen beim Hausmüll und bei kompostierbaren Abfällen, alle vier Wochen beim Altpapier und einmal im Monat (Landkreis) bzw. alle zwei Monate (Hansestadt) beim Sperrmüll, den Haushaltselektro(-nik)geräten und dem Altmetall (Abfallsatzung Hansestadt, 2 ff.; Abfallsatzung Landkreis, 3 ff.). Nach §15 Absatz 3 der Abfallsatzung der Hansestadt und nach §5 Absatz 1 der Abfallsatzung des Landkreises besteht ein Anschluss- und Benutzungszwang der Restabfallbehälter sowie der Biotonne (außer bei Eigenkompostierung) für jeden Eigentümer eines privat genutzten Grundstücks, sowie für die Restabfallbehälter bei gewerblich genutzten Grundstücken (Abfallsatzung Hansestadt, 4; Abfallsatzung Landkreis, 6 f.). Zusätzlich kann gebührenfrei eine blaue Tonne für Altpapier in Anspruch genommen werden (GfA Service Center, 2012a; GfA Service Center, 2012b). Im Gegensatz zum Holsystem bringt der Bürger beim Bringsystem seine Abfälle zu bereitgestellten Wertstoffcontainern (Altglas – extern vergeben), zur mobilen Sammlung (Problem- und Sonderabfall) oder direkt zur Zentraldeponie

(Altholz und Sonstige) (Abfallsatzung Hansestadt, 2 ff.; Abfallsatzung Landkreis, 3 ff.). Ergänzt wird das Angebot durch drei Recyclinghöfe im Landkreis; je einer in Amelinghausen, Zeetze und Bleckede-Nindorf. Hier können ebenfalls Wertstoffe abgegeben werden (GfA, o.A.b).

Bei den kompostierbaren Abfällen besteht eine Dreiteilung in der Sammlung; zum einen können Küchen- und Gartenabfälle in der Biotonne entsorgt werden. Des Weiteren können Grün- und Gartenabfälle in zugelassenen Grünabfallsäcken zu den Leerungszeiten an den Straßenrand gestellt werden. Sperrige Zweige und Äste können außerdem gebündelt abgegeben werden (GfA, o.A.e).

Die GfA hatte im Jahr 2011 insgesamt einen Zugang von 358.864,15 t Abfällen. Davon waren 97.988,79 t Siedlungsabfälle, von denen wiederum 71.264,79 t im Landkreis und der Hansestadt Lüneburg generiert wurden. Somit produzierte 2011 jeder Einwohner durchschnittlich 401 kg Abfall. Tabelle 1 stellt ausgewählte Abfallarten, ihr Aufkommen und ihre Behandlung dar:

**Tabelle 7 - Ausgewählte Abfallarten, ihr Aufkommen in Tonnen für je die Hansestadt, den Landkreis LG und für beide zusammen, sowie ihr Verbleib**

Abfallart	Zugang Stadt	Zugang LK	Gesamt	Verbleib
Hausmüll u.ä.	13.704,5	19.961,5	<b>33.666</b>	MBV, Deponie
Kompostierbare Abfälle	13.318	13.636	<b>26.954</b>	Kompostierung
Altpapier	7.512,71	8.824,68	<b>16.337,39</b>	Recyclingfirmen
Sperrmüll	1.868,5	4.418,5	<b>6.287</b>	Verwertungsfirma
Altmittel	520,2	604,2	<b>1.124,4</b>	Recyclingfirmen
Altholz	2.671	1.798	<b>4.469</b>	AI stoffliche, AII-IV energetische Verwertung

Pro Einwohner ergibt das 189,6 kg Hausmüll, 152 kg kompostierbare Abfälle (61 kg Bioabfälle und 91 kg Grünabfälle) und 25 kg Altholz. Der Bundesdurchschnitt lag 2010 bei 168 kg Hausmüll, 107 kg kompostierbaren Abfällen (51 kg Bioabfälle und 56 kg Grünabfälle) sowie 12 kg Holz pro Einwohner (Statistisches Bundesamt, 2012).

Der Hausmüll (und hausmüllähnliche Abfälle aus anderen Herkunftsgebieten) gelangt zusammen mit Abfallarten wie Straßenkehrsicht und Rechen-/Sandfanggut in die MBV, wo zuerst durch eine mechanische Stufe (zerkleinern und sieben), Metalle, eine heizwertreiche

Fraktion und eine EBS-Leichtfraktion abgetrennt werden. Die verbliebene Fraktion, deren Bestandteile kleiner als 80 Millimeter und meist organisch sind, wird in Container gefüllt und einer zweiwöchigen Intensivrotte, sowie einer anschließenden neunwöchigen Nachrotte unterzogen. Das Rotte-Endprodukt wird daraufhin auf der Deponie abgelagert. 2011 durchliefen 73.500 t Abfälle die MBV; dabei wurden 509,78 t Metalle, 12.870,55 t heizwertreiche Fraktion sowie 1.059,26 t EBS-Leichtfraktion abgetrennt. 37.485,54 t Rotte-Endprodukt wurden auf der Deponie abgelagert. 2009 gelangten 12.537 t heizwertreiche Fraktion zur TEV Neumünster (Thermische Ersatzbrennstoff-Verwertungsanlage), die daraus 6.295 MWh Strom und 27.727 MWh Fernwärme produzierte. Des Weiteren wurden 55 t Störstoffe in der MVA Buschhaus verbrannt, wodurch 27 MWh Strom generiert wurden. Zudem wird das auf der circa 18,5 ha großen Deponie entstehende Deponiegas in einem BHKW in Kraft-Wärme-Kopplung genutzt (GfA, o.A.c); 2010 wurden aus 1.074.303,88 m<sup>3</sup> Deponiegas mit einem Methan-Gehalt von 40,1% 1.190 MWh Strom gewonnen, die an den örtlichen Energieversorger verkauft wurden. Die bei dem Prozess wird entstehende Wärme im Winter zur Heizung des Betriebsgeländes genutzt und im Sommer zur Warmwasseraufbereitung für betriebseigene Duschen, wodurch die Wärme annähernd vollständig genutzt wird (Grothusmann, 2012). Die Deponiegasmenge nimmt allerdings in den nächsten Jahren ab, da nur noch vorbehandelte oder inerte Fraktionen auf der Deponie abgelagert werden dürfen.

Altholz wird getrennt gelagert und je nach Klasse einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt. Ungefähr 30.000 m<sup>3</sup> A II bis A IV Holz werden pro Jahr an Holzkraftwerke geliefert (GfA Lüneburg, o.A.d). Im Durchschnitt können daraus circa 2.600 MWh Strom und 34.000 MWh Wärme erzeugt werden (Jungbluth et al., 2002).

Der Bioabfall wird bisher in einem Kompostwerk eingehaust verarbeitet ohne aus dem Vorgang Energie zu gewinnen. Davon abgetrennt erfolgt die offene Kompostierung von Grünabfällen. Die anfallenden Komposte werden allein oder bereits als Blumenerde gemischt vermarktet (GfA, o.A.c).

## Hausmüll

Die MBV Lüneburg verbrauchte 2008 durchschnittlich viel Strom, allerdings bedeutend weniger als technisch anspruchsvolle Anlagen, wie eine Anlage mit Vergärung oder einer Tunnelrotte mit Kühlung. Der Erdgasverbrauch lag 60-75% unter den Werten anderer MBA. Des Weiteren lagen sowohl der Wärme- als auch der Dieselbedarf deutlich unter dem Durchschnitt. Diese Werte zeigen, dass es keine nennenswerten Potentiale im Bezug auf die Be-

triebsführung der MBV gibt; es gibt sie allerdings noch in der Nutzung des Energiegehalts der deponierten Fraktion.

Dies wäre zum Beispiel der Einbau einer Vergärungsstufe, deren Technik mit der zur Bioabfallvergärung übereinstimmt. Das dabei entstehende Biogas hat mit 65-69% einen höheren Methangehalt als Biogas aus Bioabfall (Bischofsberger et al., 2005). Je nach Verfahrenstechnik können pro Tonne mechanisch aufbereitetem Restmüll 60-110 Nm<sup>3</sup> Biogas entstehen (deutlich weniger als aus der gleichen Menge Bioabfall) (Bischofsberger et al. 2005, 638). Nach Bischofsberger et al. (2005) ergeben sich aus dem Biogas Netto-Stromerträge von 40-170 kWh/t Input und Netto-Wärmeerträge von 180-380 kWh/t. Bei Kranert/Cord-Landwehr (2010) ergeben sich Netto- Stromerträge bis 88 kWh/t Input und Netto-Wärmeerträge von 14-137 kWh/t. Für Lüneburg ergibt sich somit im Mittel mit den Daten von 2011 ein Potential an Netto-Stromerträgen von 2.300-5.000 MWh und Netto-Wärmeerträge von 8.000-10.400 MWh (bei einem Input von 57.800 t zur Vergärung).

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der verbliebenen Energie wäre eine Umrüstung der Anlage von einer MBA zu einer MBS. Hier wird das Material, nach einer Abscheidung von Metallen, bei der zuerst durchgeführten biologischen Behandlung stabilisiert, indem es durch die beim Rotteprozess entstehende Wärme auf zehn bis 15% Restfeuchte getrocknet wird (Trockenstabilat). Erst anschließend werden Inertstoffe mechanisch abgetrennt (Fehrenbach et al., 2007). Somit werden lediglich maximal zehn Prozent der Materialien deponiert (im Gegensatz zu zehn bis 50% bei der MBA), zehn bis 15% sind Verluste, bis zu fünf Prozent separierte Metalle und der größte Anteil, 60-80%, wird als Brennstoff weiterverwendet (20-70% MBA) (Kranert/Cord-Landwehr, 2010). Bisher werden in Lüneburg 51% des Inputmaterials deponiert, lediglich 22% werden als Brennstoff weitergegeben. Nach einer Umwandlung in eine MBS müssten nur noch maximal 7.350 t Material deponiert werden und 44.100-58.800 t könnten als Ersatzbrennstoff an die entsprechenden Kraftwerke geliefert werden. Würde die gesamte Menge wie bisher an die TEV Neumünster geliefert werden, würden daraus zwischen 22.000 und 29.500 MWh Strom und zwischen 97.500 und 130.000 MWh Fernwärme erzeugt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Energiegewinnung könnte in der Nutzung der Abwärme durch die verschiedenen bestehenden Rotteprozesse liegen. Diese Variante wird hier allerdings nicht weiter betrachtet.

Abschließend ist noch zu bedenken, dass die Restmüllmengen in den kommenden Jahren aufgrund von Verbraucherverhalten und besserer Getrenntsammlung zurück gehen könnten.

## Bio- und Grünabfall

Potentiale beim Bio- und Grünabfall ergeben sich grundsätzlich durch eine Verbesserung und eventuelle Erweiterung der bestehenden Verwertung. Dies wird ergänzt durch eine optimierte Getrenntsammlung und damit Erhöhung der erfassten Menge an Bio- und Grünabfällen.

Im Hinterkopf sollte allerdings behalten werden, dass circa 47% der Lebensmittelabfälle aus Haushalten vermeidbar wären (Kranert et al., 2012); das heißt es kann (und sollte) zukünftig auch zu einer Reduktion des Bioabfallaufkommens durch Konsumveränderungen in Haushalten kommen.

Bei der Verwertung von Bio- und Grünabfällen ist sich die Literatur einig, dass zukünftig die Erweiterung bestehender Kompostwerke um eine Vergärungsstufe in Betracht gezogen werden sollte. Besonders geeignet ist die Erweiterung, wenn Umbau- und Erneuerungsarbeiten anstehen, bei Anlagen, die mindestens 10.000 t im Jahr umsetzen (Funda et al., 2009; UM, o.A.; Vogt et al., 2010). In Lüneburg wurden 2011 10.802 t Bioabfälle und 16.843 t Grünabfälle von der GfA erfasst und im Kompostwerk verwertet. Der gesamte anfallende Bioabfall könnte einer Vergärung zugeführt werden, da davon ausgegangen werden kann, dass der Holzanteil im Bioabfall durch das vorhandene Grünabfallsammelsystem vernachlässigt werden kann. Holz und andere Stoffe wie bspw. Stroh sind aufgrund ihres hohen Ligningehalts nicht für eine Vergärung geeignet; sie können nur schlecht durch die Bakterien abgebaut werden (Funda et al., 2009). Generell weist Grünabfall sehr unterschiedliche Strukturen auf, weswegen er grob in „krautig“ und „holzig“ eingeteilt wird. Krautiges Material kann vergoren werden und ist zum Beispiel Gras, Pflanzenreste und Heckenschnitt. Ast- und Strauchwerk wird hingegen als holzig bezeichnet und eignet sich eher zur rein energetischen Verwertung in bspw. einem Holzkraftwerk (UM, o.A.). Das Verhältnis von krautigem und holzigem Material variiert saisonal bedingt. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur sollte eine gezielte Stoffstromtrennung erfolgen (Vogt et al., 2010). Dadurch lassen sich circa 30% (UM, o.A.) bzw. 25-30% (Vogt et al., 2010) nach geeigneter Behandlung als Brennstoff mit einem Heizwert bis zu 15 MJ/kg (Vogt et al., 2010) abtrennen. Ungefähr 25-50% (in den Sommermonaten, UM, o.A.) bzw. 15-30% (Vogt et al., 2010) eignen sich für eine Vergärung. Der Rest kann als holziges Strukturmaterial für die Produktion von Kompost eingesetzt werden (UM, o.A.).

Insgesamt könnten in Lüneburg somit ungefähr 13.000 bis 19.000 t Bio- und Grünabfälle jährlich vergärt werden und weitere 5.000 t als Brennstoff vermarktet oder stofflich zu Grün-

abfallkompost verwertet werden. Es ergeben sich folgende mittlere Strom- und Wärmepotentiale pro Jahr in Lüneburg:

- Bei einer diskontinuierlichen Trockenfermentation: 2.990 bis 4.370 MWh Strom und 2.860 bis 4.180 MWh Wärme.
- Bei einer kontinuierlichen Trockenfermentation: 3.250 bis 4.750 MWh Strom und 3.380 bis 4.940 MWh Wärme.
- Bei einer Nassfermentation: 3.055 bis 4.465 MWh Strom und 2.860 bis 4.180 MWh Wärme.

Ungefähr 5.000 t Grünabfälle könnten aufbereitet und als Brennstoff eingesetzt werden. Daraus könnten bspw. in einem Biomasse-Kraftwerk mit Kraftwärmekopplung circa 10.000 MWh Wärme und 2.000 MWh Strom produziert werden (Kern et al., 2008).

2011 sammelte und kompostierte die GfA 152 kg kompostierbare Abfälle pro Person, die sich in 61 kg Bioabfälle und 91 kg Grünabfälle aufteilen. Im Landkreis wurden 2.689 t Bio- und 10.947 t Grünabfälle gesammelt, das entspricht 25,7 kg Bio- und 104,7 kg Grünabfälle, also zusammen 130 kg pro Person. In der Hansestadt wurden hingegen 8.037 t Bio- und 5.281 Tonnen Grünabfälle entgegengenommen. Dies entspricht 110 kg Bio- und 72 kg Grünabfällen; insgesamt 182 kg pro Person. Somit wurden in der Hansestadt mehr als viermal so viele Bioabfälle, ungefähr ein Drittel weniger Grünabfälle und insgesamt 1,4 mal so viele Bio- und Grünabfälle pro Kopf wie im Landkreis eingesammelt. Dies ist entgegengesetzt zur normalen Korrelation zwischen der Gebietsstruktur und der Menge und Qualität an kompostierbaren Abfällen. Normalerweise nehmen die Qualität und die Menge ab, je städtischer die Gegend und je höher die Bevölkerungsdichte ist (Kern et al., 2010). Die Zahlen sprechen für eine hohe Quote an Eigenkompostierung im Landkreis und eventuell eine nicht rein private, sondern auch gewerbliche Bioabfallsammlungen oder hohe Fehlwurfquoten in der Hansestadt.

In Lüneburg können wahrscheinlich noch ungefähr 40 kg Bio- und 30 kg Grünabfall pro Person mehr erfasst werden. Von dieser Mehrerfassung könnten ungefähr 5.000 t (angenommen 30 % des Grünabfalls sind zur Vergärung geeignet) in einer Erweiterung des Kompostwerks zusätzlich vergoren werden. Die insgesamt mögliche Menge zur Vergärung liegt dementsprechend zwischen 18.000 und 24.000 t Bio- und Grünabfall. Damit könnten folgende Energieerträge mit den unterschiedlichen Anlagen erreicht werden:

- Bei einer diskontinuierlichen Trockenfermentation: 4.140 bis 5.520 MWh Strom und 3.960 bis 5.280 MWh Wärme
- Bei einer kontinuierlichen Trockenfermentation: 4.500 bis 6000 MWh Strom und 4.680 bis 6.240 MWh Wärme
- Bei einer Nassfermentation: 4.230 bis 5.640 MWh Strom und 3.960 bis 5.280 MWh Wärme

Die Grünabfallmenge, die auf-bereitet und in einem Biomasse-Kraftwerk eingesetzt werden könnte, könnte sich durch eine verbesserte Erfassung von 5.000 auf circa 6.000 Tonnen erhöhen. Somit könnten ungefähr 12.000 MWh Wärme und 2.500 MWh Strom erzeugt werden.

### **Gewerbliche Lebensmittelabfälle**

Die Abfälle privater Haushalte sowie hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sind laut §17 Absatz 1 des KrWG den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger zu überlassen (KrWG, 221). Gewerbliche Lebensmittelabfälle hingegen können auch von privaten Unternehmen eingesammelt und verwertet werden. Beispiele sind für den Verzehr oder die Verarbeitung ungeeignete Stoffe wie überlagerte Nahrungs-, Lebens- und Genussmittel und biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle. Abweichend vom restlichen Aufbau wird dieses Aufkommen hier nochmals speziell betrachtet, da die Entsorgung ähnlich den Bioabfällen aus privaten Haushalten in einer kombinierten energetischen (typischerweise Nassfermentation) und stofflichen Verwertung stattfinden kann. Eine Abschätzung für Lüneburg ergab eine Menge an Lebensmittelabfällen für Lüneburg von 14.800 t/a, das entspricht 83 kg pro Einwohner.

### **Biomüll**

Bei der Verwertung von Bio- und Grünabfällen in Lüneburg wird dazu geraten, eine Vergärungsstufe vor das Kompostwerk zu schalten, das entstehende Biogas bestmöglich zu nutzen und weitere Anstrengungen zu unternehmen um die Erfassung zu steigern. Abbildung 31 zeigt verschiedene Komponenten einer Bio- und Grünabfallverwertung auf, die Schritt für Schritt optimiert werden können. Der erste Schritt befasst sich mit der Kompostvermarktung: hier muss ein Konzept vorliegen, bzw. müssen Abnehmer für die Gärreste vorhanden sein. Der zweite Schritt bezieht sich auf die Biogasnutzung: dies soll möglichst effektiv passieren. Schritt 3 besagt, dass sowohl die Vergärung als auch die Kompostierung optimiert werden können. Und der letzte Schritt endet in einer höheren Erfassungsquote für Bio- und Grünabfälle, sowie ein gezieltes Stoffstrommanagement.

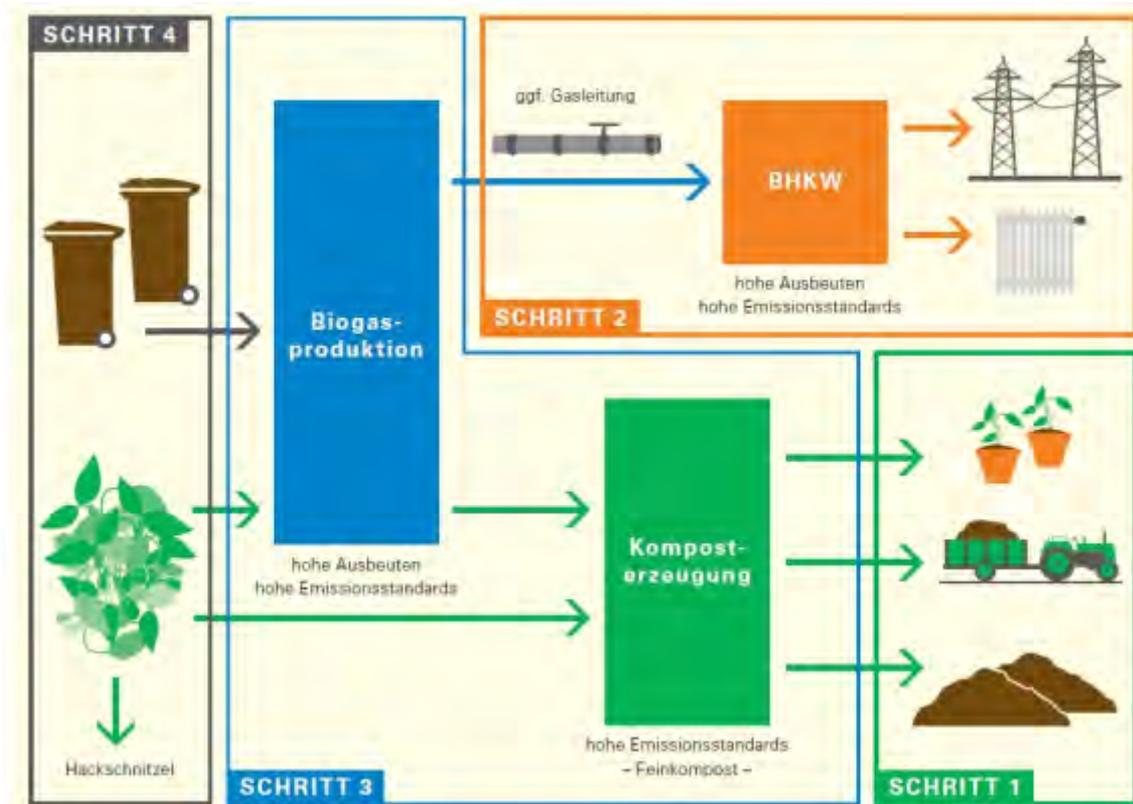


Abbildung 31 - Vier Schritte zur Optimierung der Bio- und Grünabfallverwertung  
Quelle: UM, o.A.

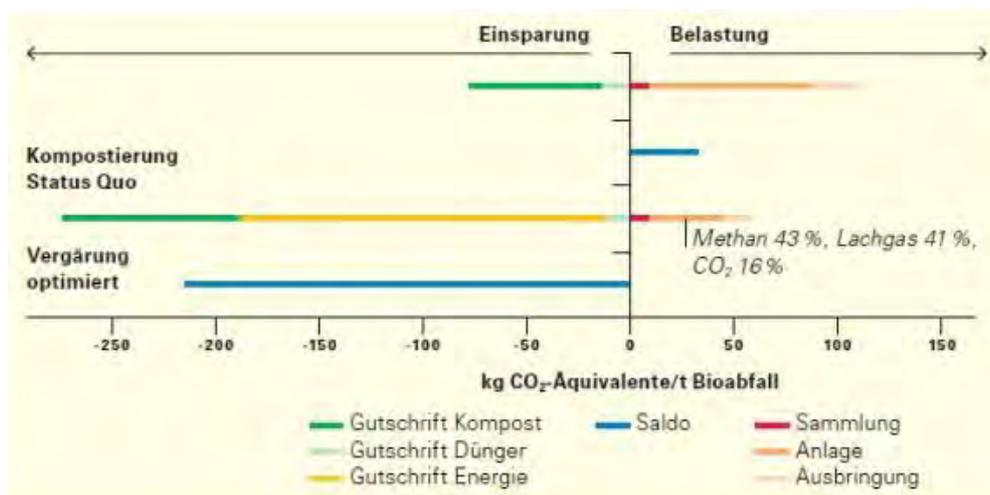


Abbildung 32 - Klimabilanz für die Kompostierung und eine optimierte Vergärung  
in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten  
Quelle: UM, o.A.

Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, belastet die reine Kompostierung das Klima im Durchschnitt um 36,8 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro t Bioabfall. In Lüneburg entstand somit 2011 eine Belastung von ungefähr 1.017 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Im Gegensatz dazu wird das Klima durch den Einbau einer Vergärungsstufe nach heutigem Stand um 64,3 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro

Tonne Bioabfall entlastet, bzw. bei einer optimierten Vergärung (die Methanemissionen werden auf maximal zehn Prozent beschränkt und 80% der Überschusswärme können genutzt werden) um 231,4 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Vogt et al., 2010). Das entspräche in Lüneburg für 2011 einer Entlastung des Klimas von 297 bis 904 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente bzw. 2.470 bis 4.078 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (bei einer vergärten Menge von 13.000 bis 19.000 t und einer Kompostierung des Rests).

Eine Umstrukturierung der bestehenden mechanisch-biologischen Vorbehandlungsanlage zu einer mechanisch-biologisch Stabilisierungsanlage wäre für Kosten von 1,5 €/t möglich und aufgrund des geringeren Anteils von Deponiegut an der Inputmenge und der höheren Energieerträge wünschenswert. Eine Erweiterung des Kompostwerks für die Bioabfälle durch eine vor-geschaltete anaerobe Vergärungsanlage (die entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich mit einer Trockenfermentation läuft) wäre mit mehr Investitionen verbunden (bis zu 30 €/t), wird allerdings von vielen Fachleuten als Zukunftstechnologie angesehen.

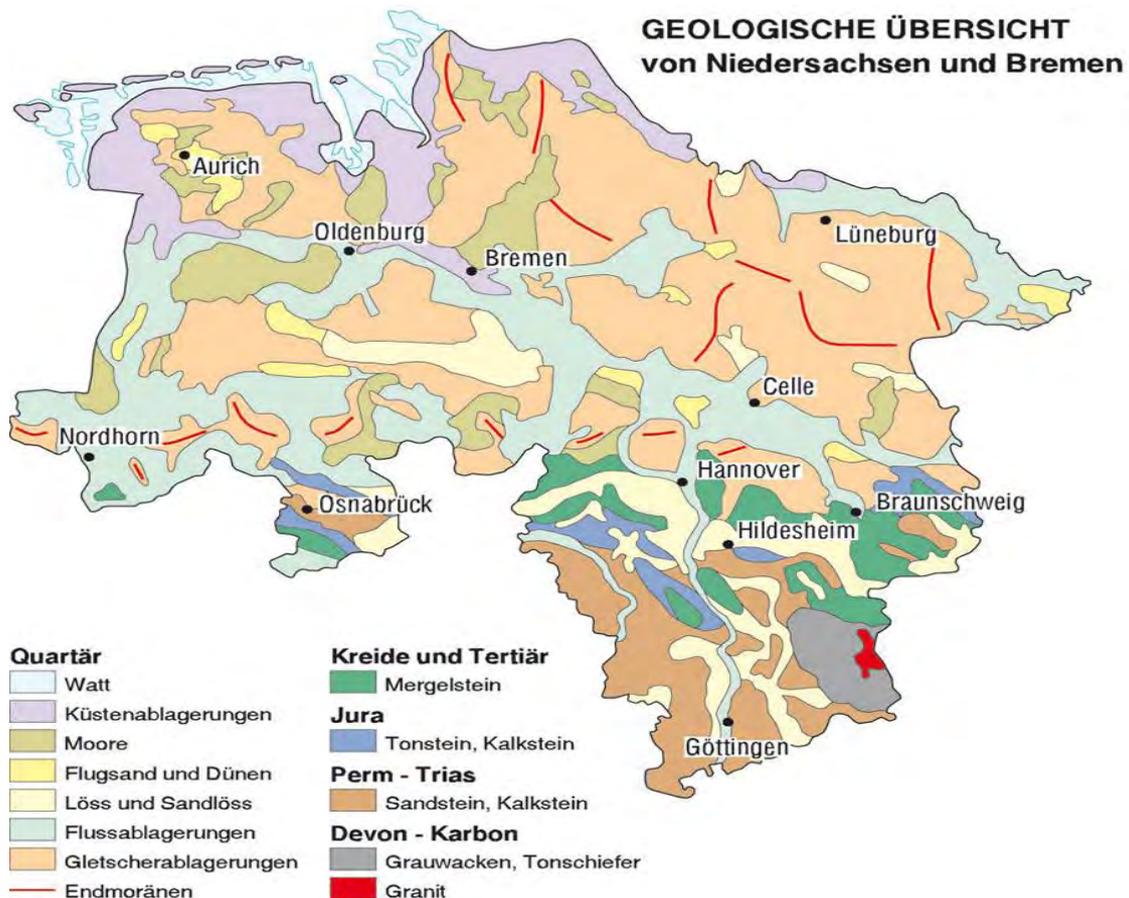
Mit diesen beiden Maßnahmen, und einer gleichzeitigen Erhöhung der Sammelquote von Bio- und Grünabfällen, könnten im Durchschnitt 26.000 MWh Strom und 100.000 MWh Wärme zusätzlich erzeugt werden. Entsprechend könnten 5.260 weitere Haushalte mit Strom versorgt werden, wodurch insgesamt etwa 7.300 Vier-Personenhaushalte, das heißt 29.200 Menschen durch die GfA und ihre Verwerter mit Strom beliefert werden könnten. Dies entspricht immerhin 16% der Bevölkerung.

#### **4.7. Geothermie**

Niedersachsen ist mit ca. 47.620 km<sup>2</sup> das zweitgrößte Bundesland in der Bundesrepublik Deutschland. Es liegt im Norden und erstreckt sich von der Nordsee bis ins Mittelgebirge und ist somit vielfältig geologisch geschaffen. Im Süden lässt sich das Land dem Bergland zuordnen, während im Norden bereits Tiefland vorherrscht. Das Bergland ist zum einen geprägt durch Festgestein des Erdmittelalters und des Erdaltertums, zum anderen ist es durch kaltzeitliche Ablagerungen gekennzeichnet. Der Norden hat eine flachkuppig-hügelige Landschaft und ist größtenteils durch eiszeitliche Ablagerungen (50-500 m Tiefe) geprägt. Gesteinsschichten des Tertiärs und des Mesozoikums sind größtenteils darunter zu finden (LBEG, 2011).

In der Abbildung 33 kann man deutlich erkennen, dass Lüneburg hauptsächlich durch die Gletscherablagerungen aus der Eiszeit gekennzeichnet ist. Somit liegt Lüneburg am Rande des Gletschergebietes und damit auch des Norddeutschen Beckens.

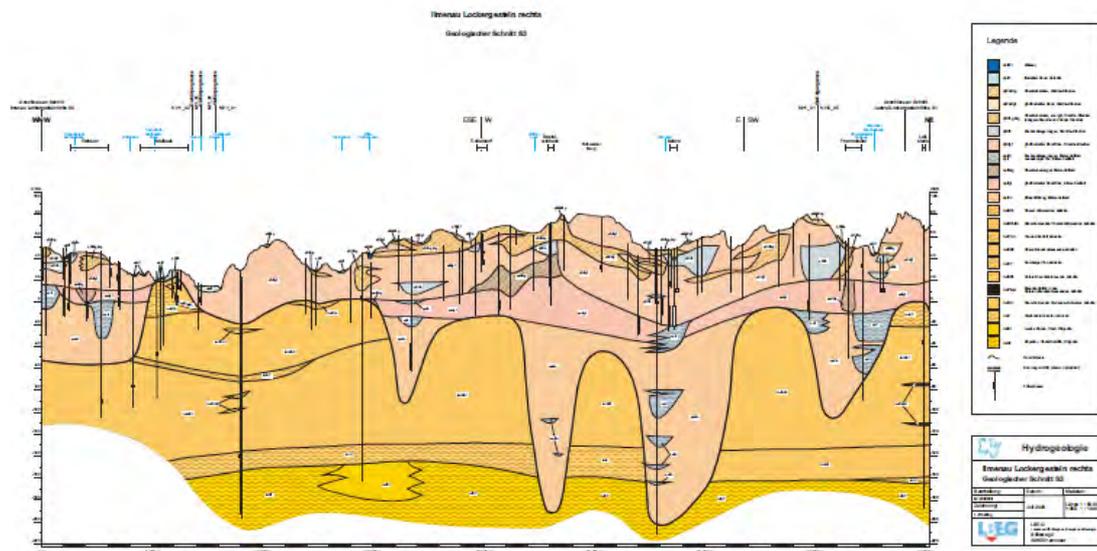
Das Norddeutsche Becken ist eines der drei deutschen Gebiete, die ein grundlegendes hohes geothermisches Potential aufweisen und sich somit als Standort für ein Geothermiekraftwerk anbieten (Geotis, 2011).



**Abbildung 33 - Geologische Übersicht von Niedersachsen und Bremen**  
Quelle: LBEG, 2007

Der Landkreis ist grundsätzlich in seiner geographischen Lage durch die eiszeitlichen Aktivitäten gekennzeichnet. Man findet im Untergrund größtenteils Sand, Kies, sowie Schmelz- bzw. Flussablagerungen (LBEG, 2011).

Aus oberflächlichen Bohrungen, die bis etwa 1000 m in die Tiefe gehen, lassen sich die obersten Schichten des Landkreises darstellen.



**Abbildung 34 - Gesteinsschichten Ilmenau – Rechts**  
Quelle: Geodatenzentrum Hannover

Der Untergrund in den oberen Tiefen ist im Landkreis Lüneburg, wie aus der oberen Abbildung deutlich wird, geprägt durch eiszeitliche Ablagerungen und Sandgestein aus dem Miozän. Vereinzelt sind Beckenablagerungen, teils aus Gletscherablagerungen, aufzufinden. Die Verteilung der unterschiedlichen Gesteinstypen variiert in den oberen Schichten deutlich und wird mit der Tiefe regelmäßiger.

Eine Besonderheit im Landkreis Lüneburg stellt der Salzstock unterhalb der Lüneburger Altstadt dar. Bereits zehn Meter unter der Erdoberfläche ließ sich eine vom Wasser umspülte Sole finden, welche durch besondere Reinheit gekennzeichnet war. Somit stellt der Salzstock eine besondere geologische Gegebenheit im Landkreis dar (Sell, 2011). Für eine geothermische Nutzung stellt der Salzstock keine Probleme dar. Da er sich unterhalb der Altstadt Lüneburgs befindet, in deren Gebiet ohnehin aufgrund der Bebauung keine geothermische Anlage verwirklichen lässt, stellt der Salzstock kein Risiko bei der weiteren Betrachtung dar.

Die geologischen Voraussetzungen für Aquifere und ihre potenzielle Nutzung liegt vorrangig an großen Thermalwasservorkommen und Volumenströmen. Ein Thermalwasservorkommen ist in Lüneburg durchaus gegeben. Bohrungen beweisen, dass wasserführende Gesteinsschichten im Untergrund bei etwa 2000 m vorhanden sind (Siehe Anhang). Daher können Aquifere zur Nutzung der Geothermie in Betracht gezogen werden. Allerdings müssen im Folgenden weitere geologische Gegebenheiten für eine Nutzung geklärt werden. Hierzu gehören ergiebige wasserführende Schichten, welche vertikal und lateral so gut verbreitet sind,

dass diese eine langfristige Nutzung des Reservoirs ermöglichen. Weiterhin sollte das Wasservorkommen auch ein wirtschaftlich profitables Temperaturniveau und eine generelle Verträglichkeit für die technischen Maßnahmen, wie Material- und Systemverträglichkeit, aufweisen (Hoth et al., 1997).

Des Weiteren kommen in Deutschland lediglich zwei Gesteinstypen in Frage, welche sich für eine Nutzung von Aquiferen eignen. Das sind zum einen primär poröse und mit Schichtwasser gefüllte Gesteine und zum anderen sekundäre geklüftete und kavernöse Gesteine. Diese stellen im Grunde die Voraussetzungen für Poren-Wasserleiter bzw. Kluft-Wasserleiter dar (Hoth et al., 1997).

Bei einer genaueren Analyse von Bohrungen im Landkreis Lüneburg kann man durchaus davon ausgehen, dass ein großzügiges Wasserreservoir im Untergrund vorhanden ist. Die Bohrung Winsen-Bardowick 1 beispielweise zeigt ein deutliches Aquiferpotential im Untergrund bei 1500 m-2000 m. Generell zeigen die Bohrungen verwässerte Gesteinsformationen in diesen Tiefen an, welche der Nutzung von Aquiferen förderlich sind. Im Landkreis Lüneburg ist dabei von Poren-Wasserleiter auszugehen. Dies ist auch charakteristisch für das Norddeutsche Becken (Hoth et al., 1997).

Auch die Verbreitung einer solchen wasserführenden Schicht spricht für eine gute Nutzbarkeit eines solchen Vorkommens. Allerdings entspricht das Temperaturnutzungslevel nicht der notwendigen Norm von über 100°C, welche für eine wirtschaftlich optimale Stromerzeugung von Bedeutung sind. Es ist bereits deutlich geworden, dass hier im Landkreis Lüneburg lediglich mit einer Temperatur von etwa 60-70°C zu rechnen ist.

Das Temperaturniveau lässt allerdings durchaus eine Wärmeerzeugung durch eine solche Aquiferverbreitung zu.

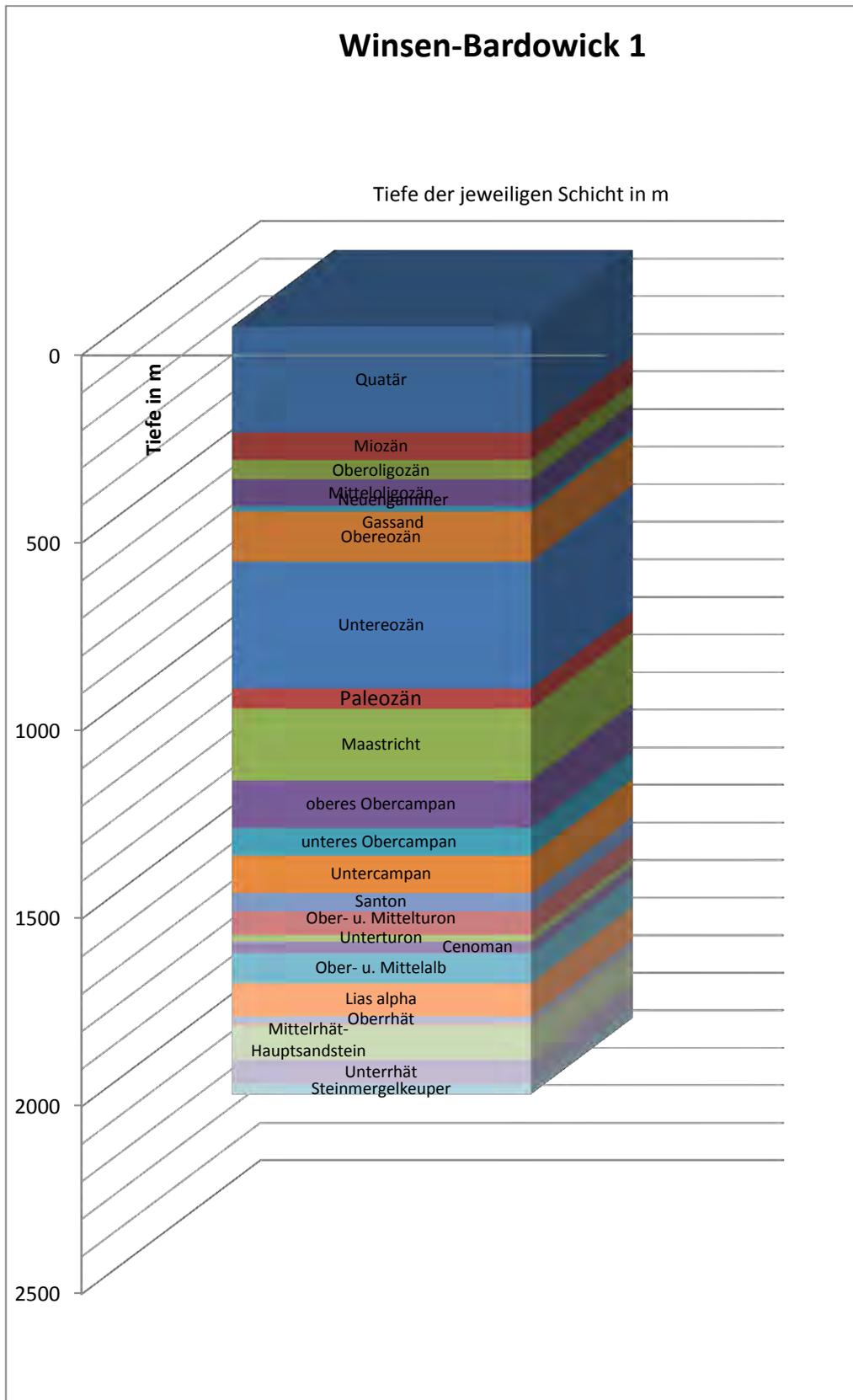


Abbildung 35 - Geologisches Profil  
Quelle: nach Bohrung Winsen-Bardowick 1

Die obere Abbildung zeigt den Gesteinsaufbau im Untergrund des Landkreises Lüneburg beispielhaft. Hier kann anhand der Bohrungsdaten der Bohrung Winsen-Bardowick 1, die wie der Name verdeutlicht in der Nähe des Ortes Bardowick getätigt wurde, eine Analyse des Untergrundes stattfinden. Es wird grundlegend festgestellt, dass im Untergrund bis 2000 m vorwiegend verwässerte Sandsteine zu finden sind. Dies ist positiv und unterstützt das theoretische Aquiferpotential, das im Norddeutschen Becken vorhanden sein soll. Positiv zu bewerten ist zudem, dass weder Gips noch sonstige Gesteine, die eine Bohrung erschweren, gefunden wurden.

Als am vielversprechendsten stellt sich die Schicht des Rhäts heraus. Diese Schicht befindet sich laut des Geotektonischen Atlas von NW Deutschland in einer Tiefe von ca. 3.000 m mit einer Mächtigkeit von ca. 100 m und erfüllt damit die Anforderungen, die für eine hydrothermale Nutzung notwendig sind.

Der Mittelhät-Hauptsandstein befindet in einer Tiefe von ca. 2.200 m mit einer Mächtigkeit von etwa 100 m. Diese Informationen werden für weitere Berechnungen im Verlauf dieser Arbeit herangezogen.

Aufgrund der Unsicherheiten in Bezug auf die Porositäts- und Permeabilitätswerte ist es schwierig Prognosen über den Volumenstrom des Thermalwassers abzuleiten. Ein Vergleich mit der hydrothermalen Geothermieanlage in Neustadt-Glewe, Mecklenburg- Vorpommern, zeigt allerdings, dass man mit Förderraten von bis zu 110 m<sup>3</sup>/h rechnen kann (Bartels, 2009). Die Bohrung in Neustadt-Glewe eignet sich für einen realistischen Vergleich da sie ebenfalls die Thermalwässer der Rhätschicht im oberen Keuper in etwa 2.300 m Tiefe nutzt. Dennoch besteht ein Risiko nicht die erhofften Volumenströme zu finden, wie es in dem Bohrprojekt Allermöhe 1 im Südosten Hamburgs der Fall war. Trotz ausgezeichnetem Temperaturgradienten ließ sich die Wärmeförderung aufgrund eines zu geringen Volumenströmen nicht wirtschaftlich durchführen. Die geringen Permeabilitäten in diesem Gebiet sind auf eine Zementation des ehemaligen Porenraums mit Anhydrit zurückzuführen (Baermann et al., 2000).

Die Unsicherheiten bei der Erschließung von Aquiferen werden als Fündigkeitsrisiko bezeichnet. Erst nach einer Bohrung lassen sich sowohl die Aquifertemperatur als auch die Porositäts- und Permeabilitätswerte zweifelsfrei ermitteln (Paschen et al., 2003). Für die folgenden Berechnungen wird aufgrund der Ähnlichkeit der geologischen Voraussetzungen ein Volumenstrom des Thermalwassers wie in der Bohrung in Neustadt-Glewe (40-110 m<sup>3</sup>/h) angenommen.

Für eine wirtschaftliche Nutzung der Erdwärme ist nicht nur die Beschaffenheit des Untergrundes, sondern auch die Temperaturverteilung im tiefen Untergrund essentiell. Im Norddeutschen Becken findet man an den meisten Stellen einen normalen Temperaturgradienten vor. Die durchschnittliche Temperaturzunahme beträgt hier rund 3°C pro 100 m (Thomsen et al., 2004). Ausgehend von einer mittleren Jahrestemperatur von 10°C ergäbe sich in dem Rhäthorizont in 2.000 m Tiefe eine Temperatur von rund 76°C.

Aufgrund der hohen Mineralisation im Norddeutschen Becken kann an einigen Stellen ein positiver Temperaturgradient entstehen. Die Bohrung Allermöhe 1 weist bspw. einen Temperaturgradienten von 3,6°C pro 100 m auf (Baermann, 2000). Ausgehend von einer mittleren Jahrestemperatur von 10°C ergäbe sich so eine Temperatur von rund 89,2°C.

In den weiteren Potentialberechnungen wird von der Installation einer hydrothermalen Geothermieanlage zur Wärmeförderung in der Rhätsandschicht ausgegangen. Diese Rhätschicht befindet sich nach den oben erhaltenen Ergebnissen in einer Tiefe von 1.900 m, mit einer Mächtigkeit von 60 m, einer Porosität von etwa 22% und einem erhöhten Temperaturgradienten von 76°C.

Nach Hänel et al. (1984) lässt sich die vorhandene Energie  $H_0$  (Heat in Place) wie folgt ermitteln:

$$H_0 = A \times \Delta z \times ((1-\varnothing)p_m \times c_m + \varnothing \times p_w \times c_w) \times (T_T - T_0)$$

mit:	A	=	Grundfläche der Aquifers in m <sup>2</sup>
	$\Delta z$	=	Aquifermächtigkeit in m
	$\varnothing$	=	Porosität
	$p_m$	=	Dichte der Gesteinsmatrix in kg x m <sup>3</sup>
	$p_w$	=	Dichte des Wassers in kg x m <sup>3</sup>
	$c_m$	=	spezifische Wärmekapazität der Gesteinsmatrix in J / (kg °C)
	$c_w$	=	spezifische Wärmekapazität des Wassers in J / (kg °C)
	$T_T$	=	Temperatur am Top des Aquifers in °C
	$T_0$	=	mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche in °C

Sowohl die Dichte als auch die Wärmekapazität der Gesteinsmatrix und des Wassers werden als Materialkonstanten nach Hänel et al. (1984) übernommen. Alle weiteren Parameter wurden aufgrund der vorherigen Analyse der geologischen Schichten ermittelt.

Für das Rhätsandsteinaquifer unterhalb des Landkreises Lüneburg ergibt sich nach diesen Annahmen eine Ressource von 10,76 GJ/m<sup>2</sup>.

Von der gesamten vorhandenen Wärmemenge  $H_0$  im Aquifer kann nach heutigem Stand der Technik nur ein bestimmter Teil ( $H_1$ ) extrahiert werden. Dieser nutzbare Bruchteil kann nach Hänel et al. (1984) mit Hilfe des Recovery-Faktors ( $R_1$ ) berechnet werden.

$$H_1 = H_0 \times R_1$$

Der Recovery-Faktor kann nicht exakt angegeben werden, da er von verschiedenen Gegebenheiten beeinflusst wird. Die EG-Arbeitsgruppe „Geothermisches Energiepotential“ hat in Frankreich eine Gleichung empirisch ermittelt, die sie zur Berechnung von  $R_1$  empfiehlt. Für die Ermittlung der Gleichung wurde von einem Dublettenbetrieb ausgegangen (Hänel et al., 1984). Ist es möglich das Wasser auf 25 °C auszukühlen, so ergibt sich folgende Gleichung für den Recovery-Faktor:

$$R_1 = 0,33 \left( \frac{T_1 - 25 \text{ °C}}{T_1 - 10 \text{ °C}} \right)$$

Daraus ergibt sich für den Landkreis ein Recovery Faktor von 0,255 was bedeutet, das ca. 25% des  $H_0$  aus dem Aquifer gewonnen werden können.

Die Fläche des Landkreises beträgt 1.323,43 km<sup>2</sup>. Somit beträgt das theoretische Potential für den Landkreis Lüneburg aus der geothermalen Nutzung des Aquifer 3.632 TJ thermisch.

Mit der tiefegeothermalen Wärmenutzung können vor allem in urbanen Bereichen mikro- und mittlere Fernwärmenetze geschaffen werden. Damit lässt sich langfristig der Verbrauch von Biomasse zur Wärmeherzeugung ersetzen.

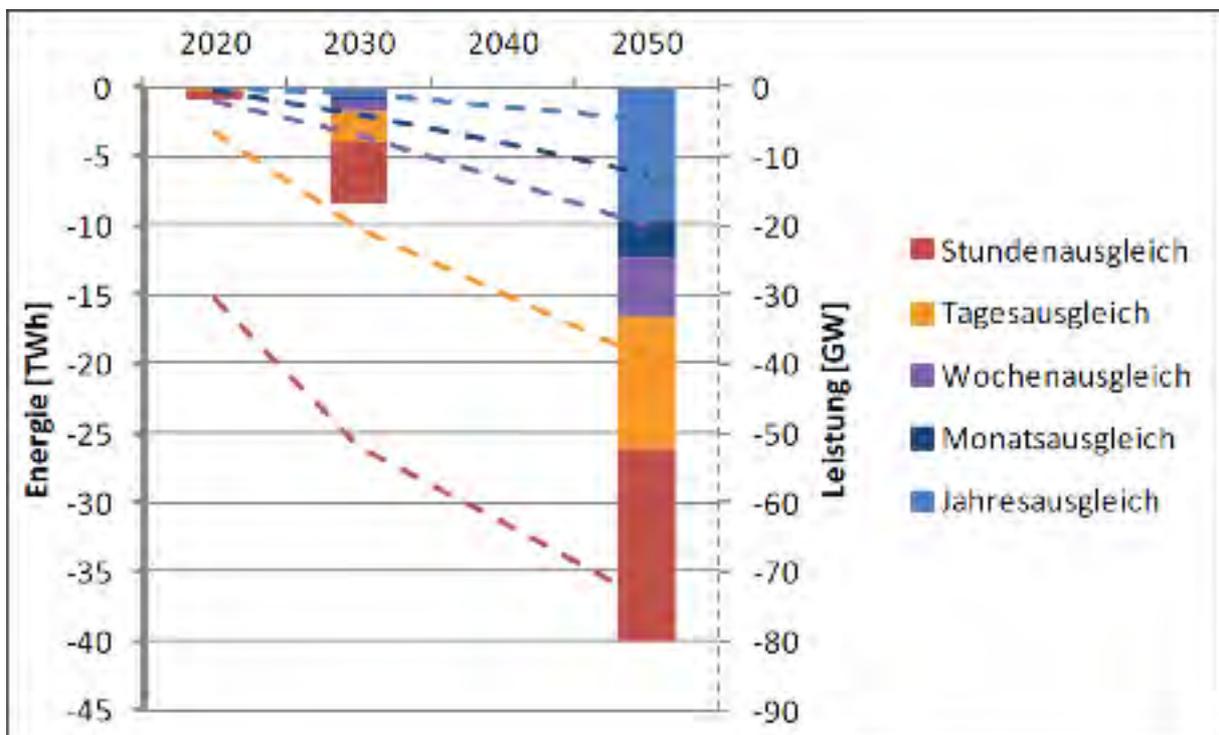
Das Potential der oberflächennahen Geothermie zur Wärmenutzung ist ebenfalls größer als der Bedarf des Landkreises. Er ist vor allem für Ein- und Zweifamilienhäuser interessant und kann in beiden Formen, der Erdwärmesonde und Fläche einfach in Kombination mit einer Wärmepumpe genutzt werden.

#### 4.8. Speicher

Das BMU hat in seiner Leitstudie 2010 den Bedarf an Energiespeicherung grafisch für die Jahre 2020 bis 2050 dargestellt, zu sehen in Abbildung 36. Hier ist zu erkennen, dass ab

dem Jahr 2030 Langzeitspeicher für den Wochen-, Monats- und Jahresausgleich signifikant notwendig werden. Im Jahr 2050 wird der Langzeitspeicherbedarf deutlich 30 TWh<sub>el</sub> im Jahr übersteigen (vgl. IWES, ZSW 2011).

Das Fraunhofer IWES Institut führt in seiner Grafik „Roadmap Energiewende Systemtransformation Strom“ (Abbildung 37) die Langzeit-Energiespeichertechnologie eE- Methan als eine Zukunftstechnologie ab ca. 2030 auf. Mit einher geht die Netzkopplung des Strom- und Gasnetzes (vgl. IWES; ZSW, 2011).



**Abbildung 36 - Entwicklung der Strom-Überschussmengen für Energiespeicher**

Der Bedarf an Speicherung ist nicht einfach zu ermitteln – ergeben sich doch viele Faktoren, die einen genauen Bedarf determinieren. Neben steigend oder limitierend wirkenden Faktoren wie bspw. der Erzeugungsstruktur, Lastschwankungen oder der Wirtschaftlichkeit, spielen aber auch nutzbare Technologien und deren Potentiale eine wesentliche Rolle. Einstimmig anerkannt ist jedoch, dass die Dienstleistungen der Energiespeicherung mit einem höheren EE-Anteil in der Stromerzeugung zunehmend nachgefragt werden (SRU, 2011; Sterner et al., 2010; Scheer, 1999; UM, 2010; Popp, 2010).

Im Folgenden erfolgt eine kurze Begründung des Speicherbedarfs an Hand der Veränderung des bisherigen Systems und der Funktionen die Speicher erfüllen können.

Die Qualität des Stromnetzes besteht darin, zu jedem Zeitpunkt das Stromangebot an die aktuelle Nachfrage exakt anzupassen (Versorgungssicherheit). Technisch gesehen bedeutet dies, dass innerhalb des Stromnetzes möglichst konstant eine Frequenz von 50 Hz zu gewährleisten ist (Netzstabilität), um ein reibungsloses Funktionieren elektrischer Geräte sicherzustellen. Die Nachfrage kann allerdings nicht vorhergesagt werden, sondern lässt sich nur an Hand von Lastgängen aus der Vergangenheit prognostizieren. Die Regelung des Stromangebots erfolgt bisher über das Zu- oder Abschalten von Kraftwerken. Diese Kraftwerke können unterschiedlich schnell und flexibel die nachgefragte Leistung erbringen. Das eingespielte Zusammenspiel dieses Systems gewährleistet jederzeit eine wetterunabhängige und bedarfsgesteuerte Sicherung der Netzqualität und der Versorgung. Zeitgleich wird das Netz durch den Wegfall von Grundlasttechnologien, wie der Atomkraft, und der zunehmenden Einspeisung von volatilen Energien, wie Wind- oder Solarkraft, schon heute neuen Herausforderungen ausgesetzt. Im Falle einer 100% EE-Versorgung würde der heute gängige Kraftwerkspark gänzlich vom Netz gehen (müssen) und an dessen Stelle stünde eine erheblich wetterabhängige und leistungsschwankende Stromversorgung durch EE. Erzeugungsarten wie Laufwasserkraft tragen dabei geringer zum Steigen des Speicherbedarfs bei. Auch Biomasse und Geothermie kann auf Grund grundlastartiger Erzeugung kein Speicherbedarf angerechnet werden. Als wesentliche Determinanten der Volatilität im Stromsektor sind somit Wind- und Solarenergie anzusehen. Wobei Popp (2010) davon ausgeht ist, dass ein hoher Photovoltaikanteil an der Erzeugung einen höheren Speicherbedarf nach sich zieht, als diese einem hohem Windkraftanteil der Fall wäre (Neupert et al., 2009; Popp, 2010).

Die Dezentralität und Vielfältigkeit einer EE-Erzeugung führt zwar zu einer Glättung der Erzeugungskurve, allerdings verursacht die geringe Flächengröße bei der Betrachtungsebene einer Region eine Homogenität bei der Verteilung des Energieangebotes (Boll, 2008). Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Schwankung des Wind- und Sonnendangebotes sich auf den gesamten Landkreis auswirken wird. Diese regionale oftmals kurzfristige Fluktuation führt verstärkt zu Leistungsspitzen und –schwächen (SRU, 2011). Die durch die EE-Einspeisung nicht zu deckende Stromnachfrage ist die Residuallast. Diese und die erhöhte Fluktuation der Energieverfügbarkeit müssen, im Sinne der Versorgungssicherheit und Netzstabilität, durch Speicher, Reservekraftwerke, Lastmanagement oder Stromimporte ausgeglichen werden können. Laut der Studie „Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen“ des UM wird bei einer 100% EE-Erzeugung deutlich häufiger Überschuss an Energie (negative Residuallast) bestehen als Energiedefizite (positive Residuallast) (UM, 2010). Somit kann in mehr Fällen Energie gespeichert oder gar exportiert werden, und der Bedarf an Reservekraftwerken sinkt. Im energetisch und wirtschaftlich ungünstigsten Fall verfällt die

überschüssige Energie durch Abschaltung von WEA- oder PV-Anlagen, als Konsequenz des Einspeisemanagements und zu Gunsten der Netzqualität.

Nur Speicher bieten die Möglichkeit, sowohl Erzeugungsspitzen als auch -schwächen ausgleichen zu können, in dem sie die Erzeugung und den Verbrauch der Energie zeitlich entkoppeln. Im Falle einer höheren Erzeugung durch EE als die Nachfrage abnimmt, kann negative Residuallast gespeichert werden. Bei einem höheren Energiebedarf als die EE-Erzeugung bereitstellen kann, ist das Ausspeichern zur Deckung der positiven Residuallast möglich. Angebotsreiche Zeiten sichern so energiearme ab. Vor allem in einem Energiesystem einer 100% Region mit fluktuierenden Energien und einer kleinen räumlichen Fläche sind Speicher ein unerlässlicher Baustein. Erst sie ermöglichen eine Glättung der Lastgänge und gewährleisten einen Import unabhängigen, autarken Status (UM, 2010).

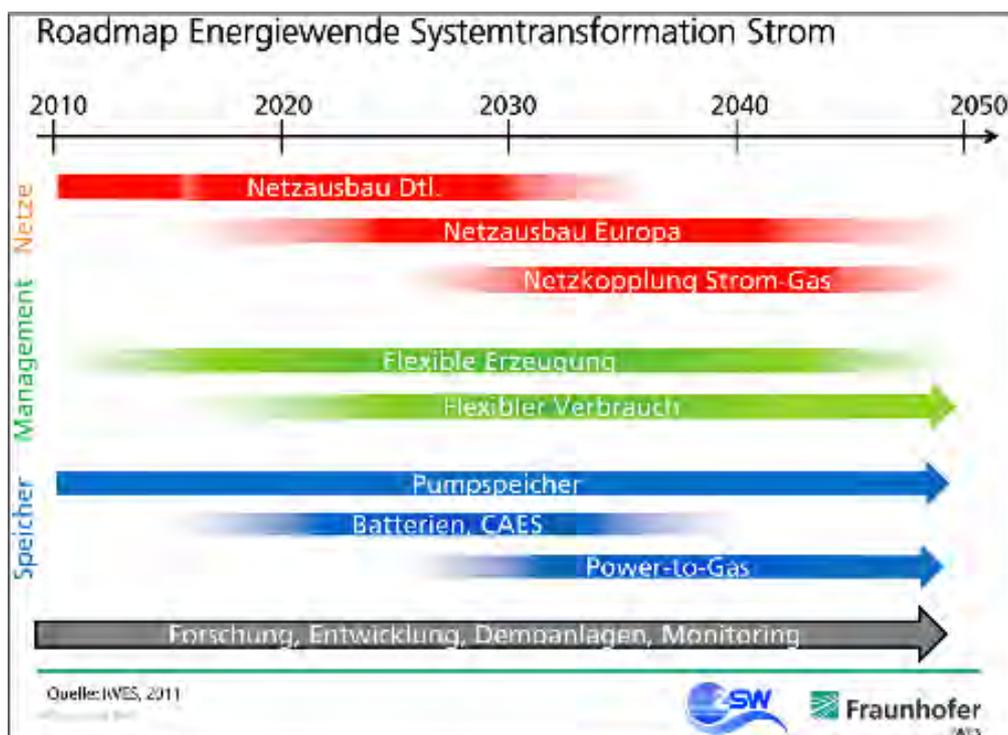


Abbildung 37 - Zukunftstechnologie eE-Methan

#### 4.8.1. Wasserkanäle

Nach vorliegender Datenlage sind im LK LG 787 kW Leistung in Wasserkraftwerken installiert, was einem durchschnittlichen jährlichem Ertrag von 3.698,9 MWh entspricht.

Das Doppel-Senkrecht-Hebewerk mit Gegengewichten in Scharnebeck wurde 1974 fertiggestellt. Es war damals das weltgrößte Schiffshebwerk. Mit ihm werden Schiffe in einem mit Wasser gefüllten Trog senkrecht auf- und abwärts befördert. Transportiert mit Hilfe zweier

Trögen können Schiffe auf dem Kilometer 106,1 des Elbe-Seitenkanals einen Höhenunterschied von 38 m wie in einem Fahrstuhl überwinden. Das durch Wasserverdrängung weitestgehend konstant bleibende Gewicht der Tröge wird durch Gegengewichte ausgeglichen. Für die Ingangsetzung der Beförderung entsteht ein geringer Energieaufwand, vorrangig bei der Überwindung des Trägheitsmoments, denn der einmal in Bewegung gesetzte Trog bedarf nur wenig weiterer Energiezufuhr (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 1976).

Das Schiffshebewerk besteht aus zwei Stahltrögen mit beidseitigen Toren. Diese ruhen je auf zwei Stützrahmen, an denen sich die Antriebe befinden und die Gegengewichtsseile befestigt sind. Die Gegengewichte befinden sich in den vier Türmen. An der dem Trog zugewandten Seite der Türme befinden sich des Weiteren die Führungs- und Antriebsbahnen, sowie je eine mit dem Trog verbundene Spindel, die zur Sicherung des Troges vor einem Abrutschen dient. Vor und Hinter dem Hebewerk befinden sich die Ober- und Unterhaltung mit jeweiliger Sperreinrichtung und Kais mit Liegeplätzen für Wartezeiten. Am Standort sind mehrere Pumpen- und Leitungssysteme zum Wasserausgleich installiert (ebd.).

Anders als bei Schleusen ist der Wasserverlust durch die Hebevorgänge eher gering. Die Pumpen dienen vornehmlich zum Ausgleichen von Hochwässern und Wasserverlusten durch Verdunstung, Versickerung, betriebs- und landwirtschaftlichen Wasserverbrauch (ebd.).

Die Erweiterung von Scharnebeck zu einem PSW ist ein Vorhaben innerhalb des Forschungsprojektes „Speicherung regenerativer Energie in nordwestdeutschen Bundeswasserstraßen“ bei dem es darum geht, die Wasservolumina und die Höhenunterschiede der nordwestdeutschen Kanäle für energetische Zwecke zu nutzen. Die Erweiterung von Schiffshebewerk Scharnebecks ist dabei eine von zahlreichen solcher Möglichkeit entlang des nordwestdeutschen Kanalnetzes. Viele Querbauwerke, wie Schleusen und der Kanäle eignen sich prinzipiell für eine Speichernutzung.

Im konkreten Fall von Scharnebeck würde das Schiffshebewerk als Pumpspeicher umgerüstet werden, die Kanalhaltung des ESK zwischen Scharnebeck und Uelzen dienen als Oberbecken und die Elbe als Unterbecken.

Das Potential von Scharnebeck gibt an, welche Energiemengen das PSW speichern und wieder zur Verfügung stellen kann. Relevant für diese Betrachtung sind die zuvor berechneten Leistungen der Szenarien und die Wasservolumina.

Beginnend mit dem theoretischen Potential von Scharnebeck lassen sich Annahmen über die hypothetische Speicherkapazität treffen, die allein auf der Wassermenge des Oberbeckens basieren. Sie beinhalten dementsprechend nicht die technischen Rahmenbedingungen. Als Berechnungsgrundlage dient die folgende Formel. So ist bei der Betrachtung des Oberbeckens zwischen Scharnebeck und Uelzen bei einem Wasservolumen von 10.203.825 m<sup>3</sup> eine Speicherkapazität von

$$W = \frac{1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10\,203\,825 \text{ m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 38 \text{ m}}{3\,600} [\text{Wh}]$$

$$W \approx 1\,056 \text{ MWh}$$

theoretisch möglich.

Augenscheinlich ergibt sich durch die energetische Nutzung des ESK-Abschnitts ein erhebliches Potential für die Energiespeicherung. Dieses ist jedoch in der technischen Umsetzung, durch Gewährleistung der Schifffahrt und die Anlagentechnik, erheblich eingeschränkt.

Unter Einbezug des Wirkungsgrades und der nutzbaren Wassermenge ergibt sich aus dem theoretischen Potential das technische Potential. Dazu werden die prozentualen Verluste der Speicherung in Form des Wirkungsgrads abgezogen und die nutzbaren Wasservolumina als V eingesetzt. Somit ergibt sich für das Oberbecken zwischen Scharnebeck und Uelzen eine technisch nutzbare Speicherkapazität von:

$$W_{\text{tech}} = \frac{1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 480\,180 \text{ m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 38 \text{ m} * 0,7}{3\,600} [\text{Wh}]$$

$$W_{\text{tech}} \approx 35 \text{ MWh}$$

35 MWh als technisches Potential bedeuten eine Nutzung von 3,3 % des theoretischen Potentials. Wird die jährliche Nutzungsdauer von 780 h/a mit einbezogen, würde dies bedeuten, dass in Scharnebeck mit einer jährlichen Stromerzeugung oder Turbinenarbeit für das Szenario C von:

$$P \approx 8,9 \text{ MW} * 780 \frac{\text{h}}{\text{a}}$$

$$P \approx 6\,942 \text{ MWh/a}$$

zu rechnen ist.

Auf Basis der Begrifflichkeit des Potentials wurde in diesem Kapitel das Potential eines PSW in Scharnebeck untersucht. Als Ergebnis der Potentialanalyse wurde das technische Potential angesehen. An dieser Stelle soll ein Versuch erfolgen, dieses Ergebnis zu bewerten.

Die Bewertung erfolgt dabei im Vergleich mit der derzeitigen Nutzung von PSW-Anlagen in Deutschland.

Das PSW Scharnebeck wird mit technischen Daten von 35 MWh und einer Nennleistung von 8,9 MW (im wahrscheinlichsten Szenario C) aufwarten können. Damit würde sich Scharnebeck in den aktuell 6.600 MW (UM, 2010; Sterner, 2010) leistenden und ca. 40 GWh (UM, 2010) speichernden Park von 31 PSW in Deutschland einreihen. Im Vergleich zu den anderen PSW würde eine Position im untersten Leistungsbereich erfolgen, da Scharnebeck weit unter der durchschnittlichen Nennleistung von 200 MW und der durchschnittlichen Speicherkapazität von ca. 1.290 MWh liegt.

Dies ist aber gerade in Anbetracht der Integration in eine 100% Region ein Vorteil, da dort eine Dimensionierung der gängigen Leistungsklasse nicht verwendbar erscheint.

Im Vergleich zu den sich in der Planung befindlichen Speichern von 1.645 MW (ebd.) Nennleistung bis 2020 und dem vom UM erwarteten Zubau bis 2050 an Pumpspeichern von ca. 1.975,5 MW Nennleistung, würde ein PSW in Scharnebeck eine Steigerung von 0,5% bis 2020 und 0,4% bis 2050 bedeuten. Für den Landkreis würde sich jedoch eine Steigerung um 100% ergeben, da zu diesem Zeitpunkt keinerlei Pumpspeicher zum Gebrauch bereitstehen. Auch befinden sich keine bekannten anderen Energiespeicher in der Nutzung.

Bezugnehmend auf das Erzeugungs- und Speichervermögen pro Jahr im Szenario C würde Scharnebeck sich in eine Erzeugung von 4,042 TWh und eine Speicherung von 5,829 TWh der deutschen PSW im Jahr 1996 einreihen (Quaschnig, 2009).

#### 4.8.2. Windmethan

Das Prinzip von PTG beruht auf der Kopplung von Strom- und Gasnetz. Wie in Abbildung 38 zu sehen, wird überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energiequellen (z.B. Wind, Solar) in Elektrolyse- und Methanisierungsprozessen zu eE-Methan umgewandelt. Dieses wird in das Gasnetz (inkl. Gasspeichern) eingespeichert. Hier kann es dann sowohl bei Strombedarf rückverstromt werden (mit KWK), als auch für Erdgas-Mobilität oder für die „klassische“ Verwendung als Wärme genutzt werden. Der Prozess ist CO<sub>2</sub>-neutral, d.h. bei der Rückverstromung freigesetztes CO<sub>2</sub> wurde vorher bei der Methanisierung in den Prozess gegeben. Es wird, im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern, nicht aus einer CO<sub>2</sub>-Senke freigesetzt.

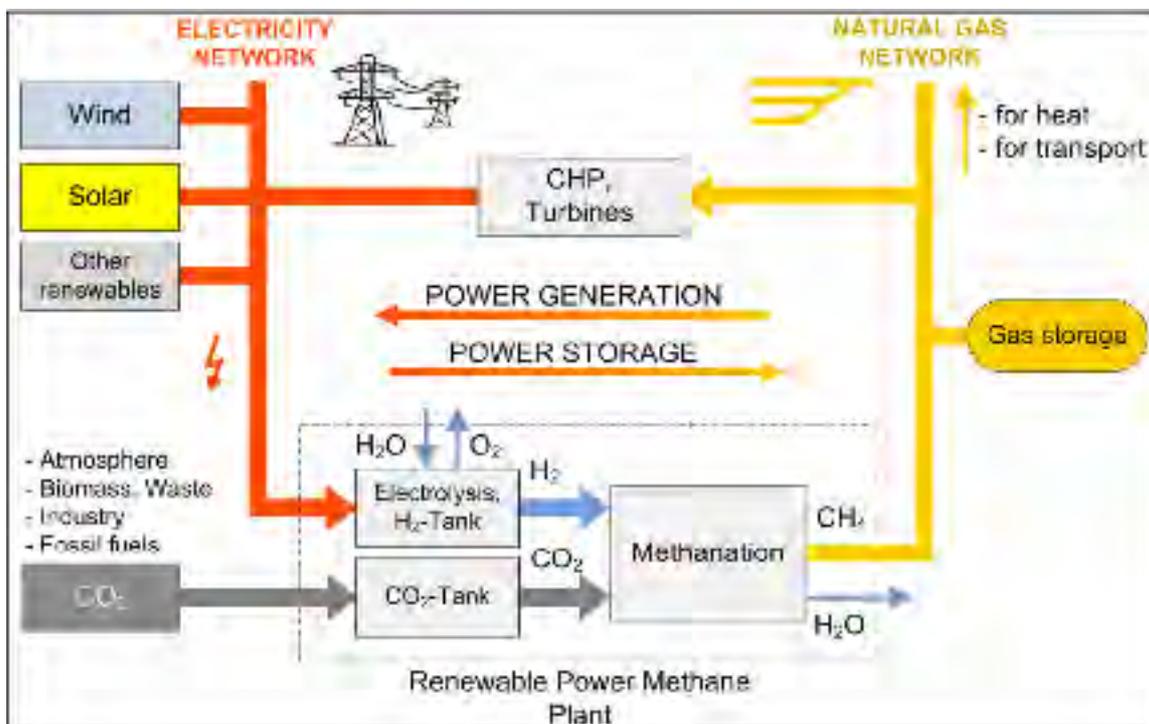


Abbildung 38 - Prinzip von Power-to-Gas  
 Quelle: Sterner, 2009

In Abbildung 39 ist zu sehen, dass ab dem Punkt der Stromerzeugung hin zur Energiespeicherung in Form von Methangas (CH<sub>4</sub>) ein Systemwirkungsgrad von 60% erzielt werden kann. Für die gesamte Kette bis hin zur Rückverstromung kann ein Wirkungsgrad von 36% realisiert werden.

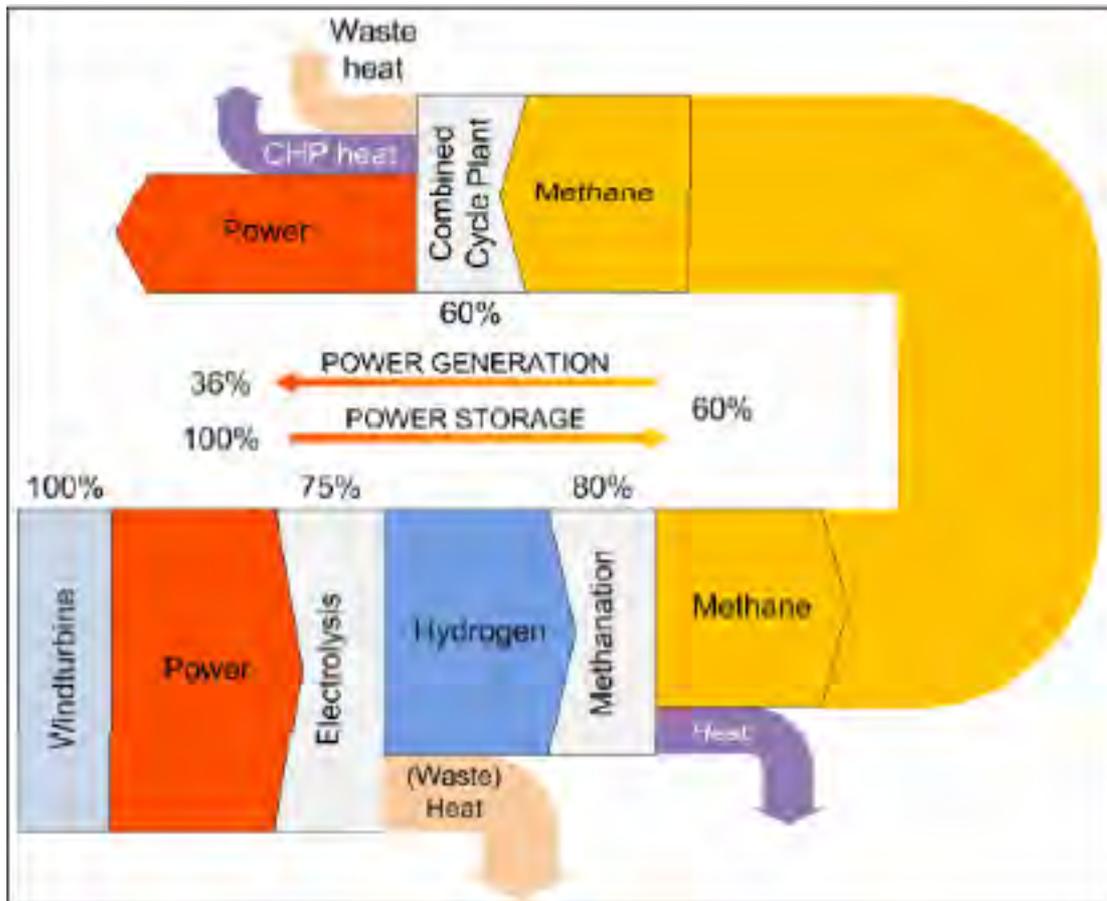


Abbildung 39 - Systemwirkungsgrad von eE-Methan  
Quelle: Sterner, 2009

### Herstellung von eE-Methan

Im Gegensatz zu Erdgas ist eE-Methan ein synthetisch hergestelltes Gas, welches sich qualitativ und von der Zusammensetzung nicht bzw. nur geringfügig von Erdgas unterscheidet. Die Erzeugung von eE-Methan geschieht in zwei Hauptschritten, bei der Elektrolyse und der Methanisierung. Beide Prozesse sind nicht neu, sondern seit längerem bekannt und sollen im Folgenden erläutert werden.

### Wasserstoff-Erzeugung und Speicherung

Der z.B. durch WEA gewonnene elektrische Strom wird zur Spaltung von Wasser-Molekülen in einem Elektrolyseur verwendet. Prinzipiell werden mithilfe einer Kathode und einer Anode die geladenen Wasserstoff- und Sauerstoff-Teilchen separiert und getrennt nutzbar gemacht (Bockhorst).

Derzeit ist die alkalische Elektrolyse das Standard-Elektrolyse-Verfahren. Hierbei wird eine Kaliumhydroxid-Lösung (KOH) bei Temperaturen von 70-140°C und einem Druck zwischen

1-200 bar eingesetzt. Im Gegensatz zu anderen Verfahren kann dieser Typ von Elektrolyseur mehr als  $100 \text{ kW}_{\text{el}}$  leisten (Sterner, 2009).

Bereits Wasserstoff kann zu Energiespeicherungszwecken in kleinen Mengen in Erdgasnetze eingespeist werden. Aufgrund von Materialverschleiß und der den daraus resultierenden Umrüstungen wird jedoch von einer Beimischung über 5 vol% abgesehen (IWES, 2011).

### **Methanisierung**

Um eine unproblematische Einspeisung in die vorhandene Gasnetzinfrastruktur zu gewährleisten, kann synthetisches Erdgas durch Methanisierung erzeugt werden. Der durch die Elektrolyse gewonnene Wasserstoff reagiert hierbei endotherm in einer umgekehrten Wassergas-Shift-Reaktion mit Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) zu Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Im zweiten Teil reagiert Kohlenstoffmonoxid mit Wasserstoff exotherm in einer CO-Methanisierung zu Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Man nennt die Gesamtreaktion „Sabatier-Prozess“.

### **Windstromnutzung im Lüneburg**

Nach Angaben des regionalen Strom- und Gasnetzbetreibers E.ON Avacon wird zurzeit im LK LG kein Windstrom aufgrund von mangelnder Netzinfrastruktur oder fehlender Abnahmemöglichkeit abgeregelt. Dies lässt sich auch aus den Einträgen der Internetseite „E.ON Netz Einspeisemanagement - Abgeschlossene Einsätze“ nachlesen. Hiernach sind v.a. die Landkreise Nordfriesland, Schleswig-Flensburg und Dithmarschen betroffen (E.ON Netz, 2012). Der Betreiber des Hochspannungsnetzes, TenneT TSO GmbH, verweist auf seiner Internetseite auf die Daten von E.ON Netz (TenneT, 2012).

### **Gasnetzinfrastruktur im Landkreis Lüneburg**

Das Gasnetz im LK LG wird von der Firma E.ON Avacon betrieben (E.ON, 2011). Unterteilt ist es in eine Transportnetzebene (Hochdruck, ca. 16 bar), eine Verteilnetzebene (Mitteldruck, max. 1 bar) und eine Niederdruckebene (Druck unter 1 bar), die die Haushalte versorgt. Soll bei der Einspeisung von Gas der ganze LK LG erreicht werden, so muss, bei vorheriger Verdichtung auf 16 bar, in das Transportnetz eingespeist werden. Würde die Einspeisung auf Mitteldruckebene geschehen, so könnte nicht der ganze LK abgedeckt werden, da es sich um mehrere „Inseln“ handelt und Gas nur von hohen Druckebenen in niedrigere Druckebenen geleitet wird (und nicht anders herum). Um den Druck in den Gasleitungen aufrecht zu erhalten, kann im Prinzip nur so viel ausgespeist werden, wie im selben Moment

eingespeist wird. Unterstützend fungieren hier Verdichtungsstationen, in denen Gas komprimiert wird (E.ON, 2012).

Das komplette Gasnetz im LK LG beinhaltet Erdgas der Qualität H (Brennwert über 10,5: „H-Gas“) (vgl. E.ON). Das für die Speicherung von eE-Methan relevante Transportnetz umfasst ein Volumen von 13.500 m<sup>3</sup> mit Abzug von ca. 10% (zum LK Harburg gehörend), also 12.150 m<sup>3</sup> (E.ON, 2012). Der Jahresdurchsatz an Energie liegt bei 1.800 GWh<sub>th</sub>. Es gibt Biogasanlagen-Einspeisungen, auch sind weitere Biogasprojekte laut E.ON Avacon in Planung (ebd.).

Auch wenn eine tagesgenaue Simulation nicht Bestandteil dieser Zukunftsmodellierung ist, so macht die Betrachtung eines typischen Leistungswerts im sogenannten „Sommertal“ und an einem sehr kalten Wintertag Sinn. Sie zeigen rechnerisch die minimal und die maximal mögliche Einspeiseleistung der PTG-Anlage in das Gasnetz auf. Die Werte beziehen sich auf das Jahr 2012, stellen also den Ist-Zustand im LK LG dar.

Das „Sommertal“ bezeichnet eine sehr geringe Gasausspeisung im Sommer aufgrund niedrigen Heizbedarfs bei einer Tagesmitteltemperatur von ca. 21°C. Für das Gas-Transportnetz im LK LG beträgt die Grundlast hier 4.500 m<sup>3</sup>/h als Tagesmittelwert. Da es feste Einspeiseanlagen mit einer Gesamtleistung von 1.100 m<sup>3</sup>/h gibt, ist eine maximale Einspeiseleistung von 3.400 m<sup>3</sup>/h möglich (E.ON, 2012).

Bei einem Heizwert von ~10 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup> entspricht dies 34 MW<sub>el</sub> (Cerbe, 2008).

Die Spitzenlast im Gasnetz Lüneburg wiederum liegt bei 68.000 m<sup>3</sup>/h (kältester Tag, angenommene Tagesmitteltemperatur von -15°C), das entspricht bei einem Heizwert von ~10 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup> 680 MW<sub>el</sub> (E.ON, 2012).

Zwischen dem Spitzenlastwert im Winter und dem Sommertal (bei einer Tagesmitteltemperatur von 21°C) kann ein etwa linearer Verlauf angenommen werden (E.ON, 2012). Grundsätzlich ist überall im Transportnetz der E.ON Avacon im LK LG eine PTG-Einspeisung möglich. Die volle Einspeiseleistung kann aber nur angesetzt werden, wenn die Einspeisepunkte in der Nähe der Absatzschwerpunkte liegen. Um den optimalen Standort für eine PTG-Anlage zu ermitteln, ist eine Netzverträglichkeitsprüfung nach Angaben von E.ON Avacon unerlässlich (E.ON, 2012; E.ON, 2012b).

Zu beachten ist des Weiteren, dass das eE-Methan aus dem PTG Prozess noch auf max. 16 bar verdichtet werden muss, um ins Transportnetz eingespeist werden zu können (E.ON,

2012). Hier ist mit einem Energieverlust von max. 1,5% zu rechnen (DVGW; DBI GUT, 2011).

### **Systemdienstleistungen von eE-Methan im Landkreis Lüneburg**

Eine Hauptanwendung der Technologie eE-Methan im LK LG wäre die Residuallastdeckung. Die Residuallast bezeichnet die positive oder negative Differenz zwischen der momentanen Erzeugung von erneuerbarer Energie und der momentanen Last. Die positive Residuallast ist ein Stromdefizit, die negative stellt einen Überschuss an Strom dar. Im LK LG stehen rechnerisch jährlich 798 GWh<sub>el</sub> an Überschussstrom zur Deckung der negativen Residuallast zur Verfügung. Zur Deckung der positiven Residuallast sind rechnerisch 272 GWh<sub>el</sub> aus der Rückverstromung des eE-Methans abrufbar. Eine genaue, hochauflösende Betrachtung der Residuallastdeckung ist mit dieser Jahressummen-Rechnung jedoch nicht möglich (UM, 2010). Die Hauptaufgabe des eE-Methans wäre im LK LG zukünftig diese Residuallast zu decken. Dies ist sowohl durch eine Lastaufstockung durch Elektrolyse bei Überschüssen (bei negativer Residuallast), als auch durch eine Rückverstromung bei Defiziten (bei positiver Residuallast) möglich.

Ein häufig diskutiertes Thema, wenn es um die Energiewende geht, ist die Versorgungssicherheit. Sie ist im EnWG in § 1 festgelegt und wird durch das BMWi und die Bundesnetzagentur kontrolliert (EnWG, 2012). Um die Versorgungssicherheit in einem Energiesystem mit hohem Anteil an fluktuierenden, erneuerbaren Energien zu gewährleisten, muss die Frequenz von 50 Hz im Stromnetz mit erhöhter Aufmerksamkeit stabil gehalten werden (UM, 2010). Anderenfalls kann es zu großflächigen automatischen Abschaltungen von Anlagen und Netzinfrastruktur kommen, ein sogenannter Blackout wäre die Folge (CONSENTEC, 2008). Die Netzbetreiber müssen für diesen Fall schnell abrufbare Stromerzeuger bereithalten. „Unterschieden wird positive Regelleistung (zusätzliche Erzeugungsleistung bzw. Abschalten von Verbrauchern) und negative Regelleistung (Reduzierung der Erzeugung bzw. Erhöhung der Nachfrage).“ (UM, 2010).

### **Integration des eE-Methan-Potentials in eine “100% Erneuerbare-Energie-Region Landkreis und Hansestadt Lüneburg”**

Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung muss nach 30 Sek., 5 min. bzw. 15 min. verfügbar sein. Diese Leistungsarten lösen sich nach den jeweiligen Zeiten ab. Ein höherer Anteil an eingespeistem Strom aus eE erhöht auch den Regelleistungsbedarf aufgrund von schlechter vorhersehbarer Einspeisung (bspw. Windfluktuation) (UM, 2010). „Elektrolysean-

lagen können sowohl negative als auch positive Regelleistung aller drei Arten bereitstellen.“ (UM, 2010). Energetisch am effizientesten sind Elektrolyse-Anlagen im Sinne der Regelleistung, wenn sie ohnehin in Betrieb sind und ihre Leistung nur erhöht wird. Dies ist in Situationen mit sehr hoher Einspeisung aus erneuerbaren Energien der Fall (UM, 2010).

Ressourceneffizient ist die Technologie, da die Auslastung der eingesetzten Ressourcen z.B. bei einer WEA mit Energiespeichernutzung deutlich höher ist als ohne.

Es kann festgestellt werden, dass die Technologie eE-Methan im LK LG die Kernideen einer „100% Erneuerbare-Energie-Region“ abdeckt und eine Integration sinnvoll ist.

Die Energiespeichertechnologie eE-Methan kann prinzipiell im Sinne des „100% Erneuerbare-Energie-Regionen“-Projekts alle Kernkriterien (siehe Kapitel 4.2) erfüllen:

- Die Technologie dient dem Umwelt- und Naturschutz durch die Nutzung des Teils des Stroms aus erneuerbaren Energien, der sonst z.B. durch Abregelung nicht genutzt werden könnte.
- Die Partizipation der Bürger ist prinzipiell möglich. Dies kann z.B. durch „Runde Tische“ oder transparente Projektplanung mit Beteiligungsmöglichkeit geschehen. Wie genau, müsste geprüft werden.
- Die regionale Wertschöpfung kann sowohl beim Bau, als auch bei der Wartung der Anlage gewährleistet werden. Die Energie kann zum einen regional produziert, zum anderen regional ein- und gespeichert werden. Die Wertschöpfung bleibt in der Region.
- Abhängig von der Art und Weise, welche Rechtsform eine solche PTG-Anlage hätte, ist eine finanzielle Bürgerbeteiligung (wie bei Windparks und Solaranlagen) denkbar.
- eE-Methan ist ein umweltfreundliches Instrument, um die energetische Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Der Prozess läuft CO<sub>2</sub>-neutral ab. Inwiefern sich eine Anlage recyceln lässt, müsste geprüft werden. Das Erdgasnetz besteht schon, daher müssten keine größeren zusätzlichen Eingriffe in die Umwelt durch Netzausbau stattfinden.

Des Weiteren verbindet die Technologie eE-Methan durch die Kopplung von Gas- und Stromnetz die drei Energiesektoren Strom, Wärme und Mobilität, welches ein Kern des „100% Erneuerbare-Energie-Regionen“-Projekts ist.

- Die drei „E“s (Energieeinsparung, -effizienz und erneuerbare Energie) werden auch durch eE-Methan abgedeckt:
- Die Anlage wird nur durch Strom aus erneuerbaren Energien gespeist.
- Sie spart Energie ein, indem nicht mehr Kraftwerke gebaut werden müssen um die benötigte Strommenge zu produzieren.
- Effizient macht sie das Energiesystem, indem sie Energie nutzt, die sonst nicht für die Stromerzeugung eingesetzt werden würde (Abregelung). An anderer Stelle muss somit kein Strom erzeugt werden (konventionelle Kraftwerke oder Import-Strom). Ein Systemwirkungsgrad von 36% ist aus Sicht der Energieerzeugungseffizienz sehr niedrig. In Anbetracht dessen, dass die Nicht-Nutzung der Energie einen Wirkungsgrad von 0% aufweist, kann eE-Methan auch als effizient eingestuft werden.

#### **4.8.3. Bedeutung und Potentiale der Wärmespeicherung im Aquifer für eine effiziente Nahwärmeversorgung aus Biomasse/Biogas in Lüneburg**

##### **Einleitung**

Nahwärmesysteme bieten für Quartiere mit hoher Wärmebedarfsdichte große Potentiale für eine effiziente und klimaneutrale Wärmeversorgung aus erneuerbaren Energien. In Lüneburg sind derzeit drei Nahwärmesysteme des Betreibers E.ON-Avacon-Wärme in Betrieb, die bereits größtenteils auf Biogas umgestellt worden sind und bereits große CO<sub>2</sub>-Einsparungen generieren (Ca. 20.000 t/a, geschätzt).

Nahwärmesysteme auf der Basis von Biogas-BHKW bieten eine gute exergetische Brennstoffausnutzung und Wirtschaftlichkeit durch den hohen elektrischen Wirkungsgrad der verwendeten BHKW, bis zu 45% (Neuentwicklungen sollen bis 60% erreichen und damit in den Bereich moderner GuD-Kraftwerke vorstoßen). Im Gegensatz dazu sind dezentrale Klein-BHKW mit maximal 25% elektrischem Wirkungsgrad in der Brennstoffausnutzung deutlich unterlegen.

Für die Gesamt-Brennstoffausnutzung (Exergienutzungsgrad) ist dabei der elektrische Wirkungsgrad besonders bedeutend. Der produzierte Strom kann, im Gegensatz zur Wärme, vielseitig genutzt werden und ersetzt fossilen Strom im Netz, wodurch sich große CO<sub>2</sub>-Einsparungen ergeben, die über die reine Wärmeproduktion aus EE deutlich hinausgehen. Da bei der Erzeugung von Strom aus Brennstoffen immer auch Wärme freigesetzt wird und brennstoffbasierte Stromerzeugung im EE-Mix als regelbare Komponente eine große Bedeutung besitzt gebietet sich die Nutzung dieser Abwärme zur Deckung von Wärmebedarfen.

Besonders gute Voraussetzungen werden hierbei durch die Nutzung von Wärmenetzen geschaffen.

Im Gegensatz zur Wärmenutzung aus KWK ist die reine Wärmeerzeugung aus Biomasse exergetisch ungünstig, da sie nicht zur Deckung des Strombedarfes aus EE beiträgt. Damit entstehen für die Strombedarfsdeckung weitere Biomasse-Bedarfe. Aufgrund der Knappheit von Biomasse-Brennstoffen und der Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion sowie dem Naturschutz verbietet sich aus energiewirtschaftlicher Sichtweise eine Nutzung von Biomasse zur ausschließlichen Wärmeerzeugung. Die exergetischen Wirkungsgrade sind dementsprechend niedrig.

Exergie, im Gegensatz zur Anergie, stellt den zur Verrichtung energetischer Arbeit nutzbaren Teil der eingesetzten Energie an. In der exergetischen Bewertung geht die Stromproduktion mit dem Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_c = 1$  voll ein, während die erzeugte Wärme je nach Temperaturniveau nur mit ca.  $\eta_c = 0,1$  eingeht. In diesem Verhältnis drücken sich die physikalischen-technischen Unterschiede der beiden Energieformen aus. Bspw. kann aus Strom äußerst effizient Wärme gewonnen werden, mit Wirkungsgraden (korrekterweise hier Leistungszahl oder englisch coefficient of performance (COP) genannt) von über 100% bei der Nutzung von Wärmepumpen. Moderne Systeme erreichen COPs von 5 (mit einem Stromeinsatz von 100% kann in diesem Beispiel der fünffache Wärmebedarf gedeckt werden), theoretisch sind Werte bis zu 10 möglich. Umgekehrt kann Strom aber nur sehr begrenzt aus Wärme gewonnen werden, insbesondere Raumwärme auf dem niedrigen Temperaturniveau von ca. 20-22°C, aber auch die in der Nahwärmeversorgung genutzten Temperaturen von 90°C (Vorlauf) und 55°C (Rücklauf) sind nicht in Strom rückwandelbar. Eine ausschließliche Erzeugung von Wärme aus Brennstoffen kommt daher einer Vernichtung von Exergie und einer Vergeudung von energetischem Arbeitspotential gleich, selbst wenn die Wärmewirkungsgrade von Gas- und Biomasseheizkesseln deutlich höher als die elektrischen Wirkungsgrade von BHKW liegen.

Um eine effiziente und klimaneutrale Wärmeversorgung im EE-System der Zukunft zu realisieren sind somit zwei Hauptpunkte zu beachten:

- Nutzung von Abwärme (kein zusätzlicher Brennstoffbedarf)
- Entkopplung der Stromproduktion vom Wärmebedarf (Möglichkeit zur BHKW-Nutzung als Regelenergie)

## Rolle der thermischen Speicherung in KWK-Systemen und Arten von Speichern

Üblicherweise wird bei KWK-Systemen eine Grundlastauslegung durchgeführt und die Spitzenlast-Wärmebedarfe mit einer Kesselanlage abgefahren. In derartigen Systemen sind maximale KWK-Deckungsgrade von 75% üblich, zu 25% wird die Wärmeversorgung durch Heizkessel ohne Kraft-Wärme-Kopplung realisiert.

Solche Systeme sind nicht für eine Produktion von Regelstrom nutzbar: Würden die BHKW zu Zeiten geringen Strombedarfs außer Betrieb gesetzt, ergäbe sich durch die dann notwendige Kesselnutzung zur Deckung des Wärmebedarfs eine insgesamt schlechtere Effizienz. Umgekehrt würde eine Stromproduktion in Zeiten geringen Wärmebedarfs ungenutzte Abwärme produzieren, die durch eine Rückkühlung an die Umgebung abgegeben werden müsste.

Speicher lösen diese Beschränkungen: In Zeiten geringen Wärmebedarfs kann dennoch eine Stromproduktion erfolgen, die entstehende Wärme wird zur Beladung des Speichers genutzt. In der Heizperiode kann dann der Wärmebedarf zu Spitzenlastzeiten zusätzlich aus dem Speicher gedeckt werden und substituiert direkt den Einsatz von Spitzenlastheizkesseln. Auch eine Fortführung der Wärmeversorgung bei abgeschalteten BHKW ist insbesondere in den Übergangszeiten möglich, wenn wenig Strom im Netz benötigt wird und/oder Photovoltaik- und Windstromproduktion die Netzlast bereits abdecken können.

Man unterscheidet generell zwei Arten von Speichern, die sich als Hochtemperatur-Speicher (bis ca. 90°C bei Wasser als Speichermedium) für die direkte Einbindung in Nahwärmesysteme eignen:

- Langzeitspeicher mit großer Kapazität (Aquiferspeicher)
- Kurzzeitspeicher mit geringerer Kapazität (Wasserspeicher, ggf. thermochemische Speicher)

Kurzzeitspeicher eignen sich dabei für den Ausgleich von Schwankungen im Tagesrhythmus und können mit Langzeitspeichern, die insbesondere für Wärmesysteme mit hoher Saisonalität sinnvoll sind, kombiniert werden.

Tabelle 8 gibt die Exergieeffizienz und den Exergieaufwandsfaktor für verschiedene Wärmeversorgungssysteme wieder:

Tabelle 8 - Exergieeffizienz und Exergieaufwandsfaktor für verschiedene Wärmeversorgungssysteme

	<b>Exergieeffizienz</b> $\eta_c$	<b>Exergieaufwand</b>
<i>Kesselanlage</i>	0,14	$0,69 \cdot Q_{\text{Wärme}}$
<i>Grundlast-BHKW</i>	0,49	$0,66 \cdot Q_{\text{Wärme}}$
<i>BHKW stromgeführt</i>	0,63	$0,53 \cdot Q_{\text{Wärme}}$
<i>BHKW mit Aquifer</i>	0,68	$0,52 \cdot Q_{\text{Wärme}}$

Dabei wird von folgenden idealisierten Annahmen ausgegangen:

- Kesselanlage Brennwertkessel, 90% Wärmewirkungsgrad
- Grundlast-BHKW: 60% KWK-Wärme, 40% Kessel, 50 m<sup>3</sup> Speicher
- BHKW stromgeführt: 90% KWK-Wärme, 10% Kessel, 200 m<sup>3</sup> Speicher, Auslegung auf mittlere Last
- BHKW mit Aquifer: 100% KWK, 60% Speicherwirkungsgrad, 33% gespeicherte Wärme
- Bewertung  $\eta_c$  (Biogas) = 0,62 (Entspricht GuD-FW  $\eta_{el.} = 0,59$  und  $\eta_{th.} = 0,3$ ) (Lücking, 2011).

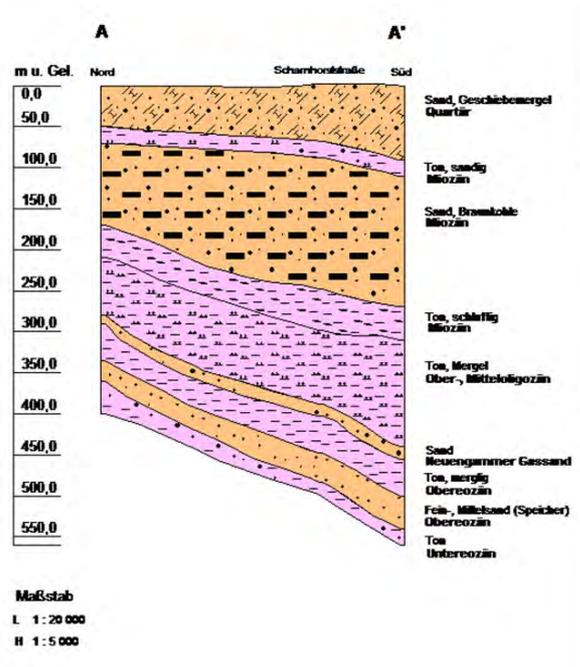
Die größten Effizienzgewinne werden dabei durch den Ersatz von Kesselanlagen erzielt. Die Bewertung der Exergieeffizienz gibt dabei das Verhältnis von eingesetzter Exergie (Brennstoff und Hilfsenergiebedarfe) zum Exergieoutput (Strom und Wärme) wieder. Der Exergieaufwand für die jeweilige Wärmeversorgungsaufgabe gibt hingegen den Brennstoffaufwand für die Versorgungsaufgabe wieder, wobei die Stromeinspeisung, da sie Exergie zur Verfügung stellt, gutgeschrieben wird. Insbesondere bei m Exergieaufwand fließt dabei die Bewertung des Eingangsstoffes (im betrachteten Fall) stark ein. Nach (Lücking, 2011) sollte sich die Bewertung von KWK-Systemen am technisch machbaren Stand ausrichten, der derzeit mit KWK auf der Basis von GuD-Systemen machbar ist. Demzufolge wurde der Biogasinput mit  $\eta_c$  (Biogas) = 0,62 (Entspricht GuD-FW  $\eta_{el.} = 0,59$  und  $\eta_{th.} = 0,3$ ) (Lücking, 2011) angenommen.

### Potentiale im Untersuchungsgebiet

Im Rahmen des BMWi-Projekts „Leuphana Universität Lüneburg - klimaneutraler Campus und Bockelsberg“ wurden die Möglichkeiten eines exergieeffizienten Energiesystems auf der

Basis erneuerbaren Energien untersucht. Zentrale Punkte waren dabei die Einbindung des Zentralgebäudeneubaus und die Aquiferspeicherung.

Die geologischen Voraussetzungen für eine Aquiferspeicherrealisierung am Standort Bockelsberg wurden zunächst in einer geologischen Machbarkeitsanalyse untersucht. Abbildung 40 zeigt die Stratigraphie am Standort Scharnhorststraße/Bockelsberg. Es zeigt sich ein in Richtung Stadtmitte (A) durch den Salzstock aufgeworfenes Schichtenprofil mit nutzbaren Schichten im Oberozän.

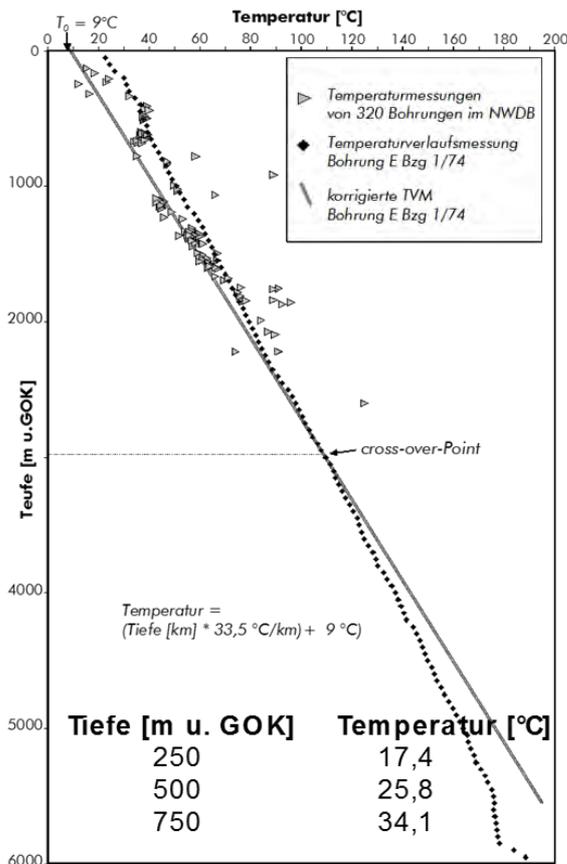


Tiefe (m u. Gel.)	Stratigraphie	Lithologie
0 - 70	Quartär	Sand, Geschiebemergel
90	Miozän	Ton, sandig
250	Miozän	Sand, Braunkohle
300	Miozän	Ton, schluffig
390	Ober-, Mitteloligozän	Ton, Mergel
405	Neuengammer Gassand	Sand
450	O bereozän	Ton, merglig
485	O bereozän	Fein-, Mittelsand
500	Unterozän	Ton

Teufenfehler ± 30 m

Abbildung 40 - Schnitt in Nord-Süd-Richtung durch den Standort Scharnhorststraße. Die Abgebildete Strecke A:A' beträgt ca. 1,5 km  
Quelle: GTN Neubrandenburg

Das Temperaturprofil und die Mineralisierung in Abbildung 41 weisen auf eine gute Nutzbarkeit und recht gutmütige Wasserchemie hin.



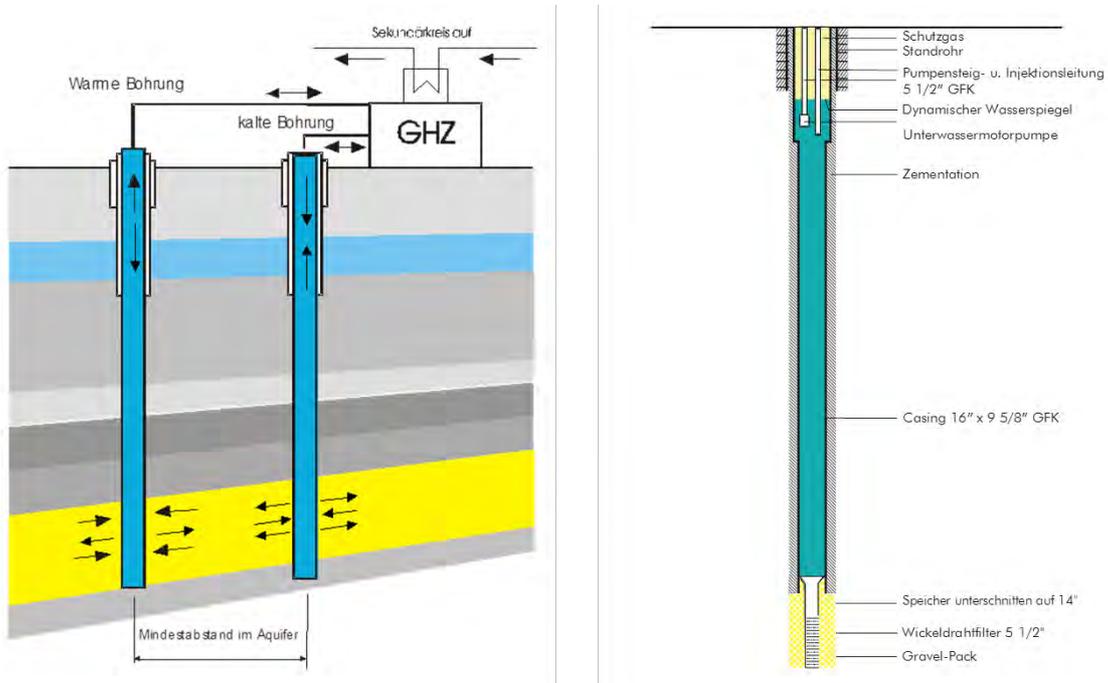
Parameter	Eozän
Tiefe	500 m
Ionen (mg/l)	
K <sup>+</sup>	1046
Na <sup>+</sup>	28492
Ca <sup>2+</sup>	1942
Mg <sup>2+</sup>	774
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	45,4
Fe <sup>2+</sup>	2,0
Mn <sup>2+</sup>	-
Ba <sup>2+</sup>	-
Li <sup>+</sup>	-
Sr <sup>2+</sup>	-
<b>Summe K</b>	<b>32301,4</b>
Cl <sup>-</sup>	43721,2
Br <sup>-</sup>	42,4
I <sup>-</sup>	9,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	122,8
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-
F <sup>-</sup>	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-
SiO <sub>2</sub>	-
CO <sub>2</sub> gelöst	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	76,9
<b>Summe A</b>	<b>11671,2</b>
pH	6
Mineralisation [g/l]	76,3

**Abbildung 41 - Temperaturprofil und Mineralisierung des Speicherwassers**  
 Quelle: GTN Neubrandenburg

Die folgenden Parameter konnten aufgrund der geologischen Studie bestimmt werden:

- Teufe (m u. Gel.): 450 – 485
- Stratigraphie: Obereozän
- Lithologie: Fein-, Mittelsand, kalkig
- effektive Mächtigkeit (m): 30
- Nutzporosität (%): 30
- Permeabilität (mD): 500 (geschätzt)
- Produktivitätsindex (m<sup>3</sup>/h/MPa): 50
- Schichtwassertemperatur (°C): 25
- Schichtwassermineralisation (g/l): 76,3
- Um die SiO<sub>2</sub>-Lösung (warme Seite) und die Ausfällung von SiO<sub>2</sub>-Mineralen (kalte Seite) gering zu halten, ist die maximale Einspeichertemperatur ≤ 90 °C zu wählen.

Damit ergibt sich eine maximale Speicherkapazität von ca. 10 GWh bei einer maximalen Förderleistung von 100 m<sup>3</sup>/h und den sich aus dem Abstand der geplanten Bohrungen ergebenden Volumen des erschlossenen Aquifers (Abbildung 42).



**Abbildung 42 - Schemazeichnung der Speicherkonzeption und Bohrungsplanung**  
Quelle: GTN Neubrandenburg

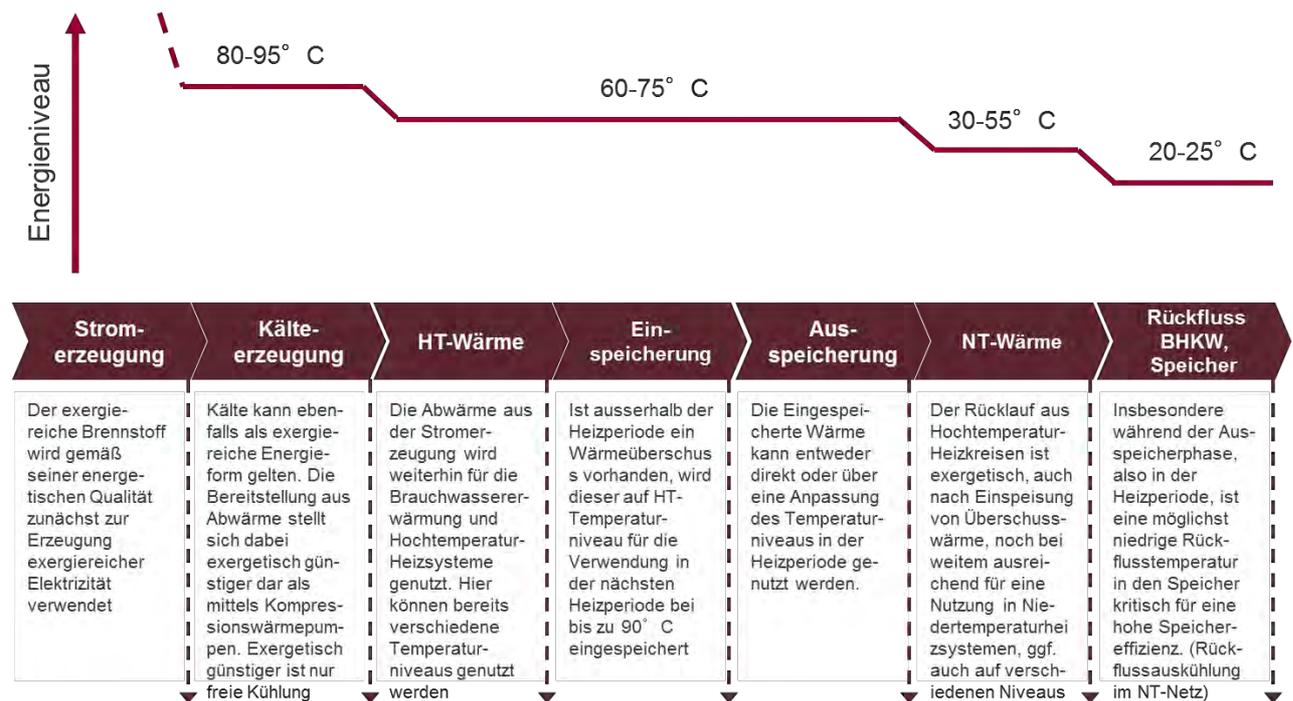
Die Bohrungen sind auf dem Campus wie in Abbildung 43 gezeigt geplant.



**Abbildung 43 - Standorte für die Aquiferspeicherbohrungen auf dem Unicampus**  
Quelle: GTN Neubrandenburg

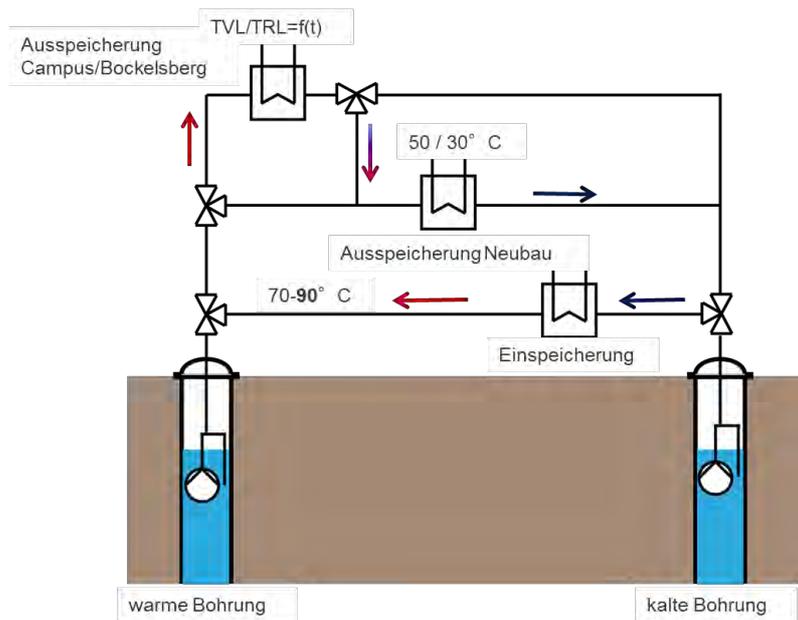
### Einbindung in das Campussystem

Das Zentralgebäude besitzt die Funktion eines Niedrigtemperaturwärmeabnehmers im Energiesystem mit Speicherung. Abbildung 44 zeigt die exergetische Konzeption der kaskadierten Energienutzung sowie die Integration des Speichers in das System am Beispiel des zukünftigen Campussystems, bei dem Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus genutzt werden wird.



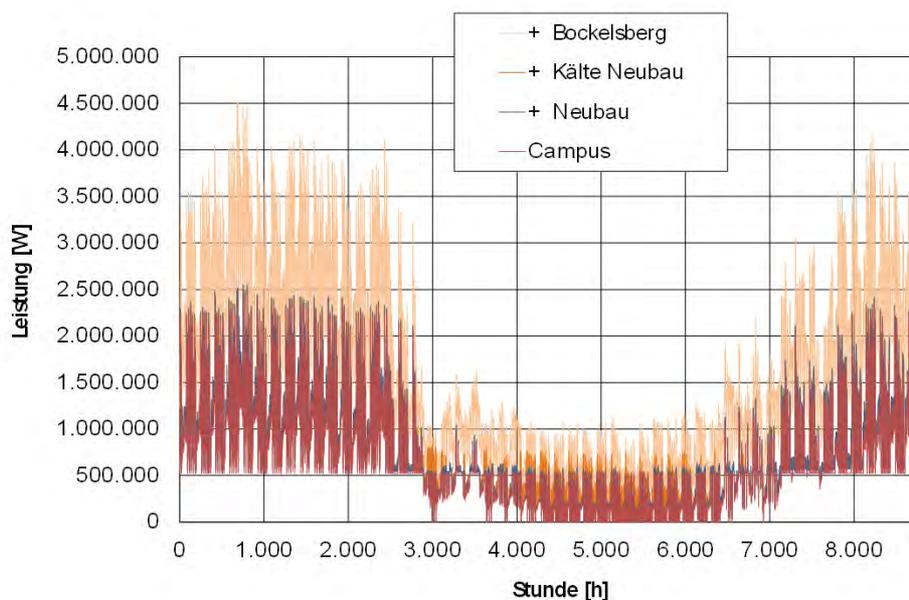
**Abbildung 44 - Exergetisch sinnvolle Energienutzung im Campussystem mit Einbindung eines Aquiferspeichers**

Das Ersatzschaltbild gibt die technische Umsetzung einer kaskadierten Ausspeicherung bei der Einbindung des Speichers in das System wieder (Abbildung 45).

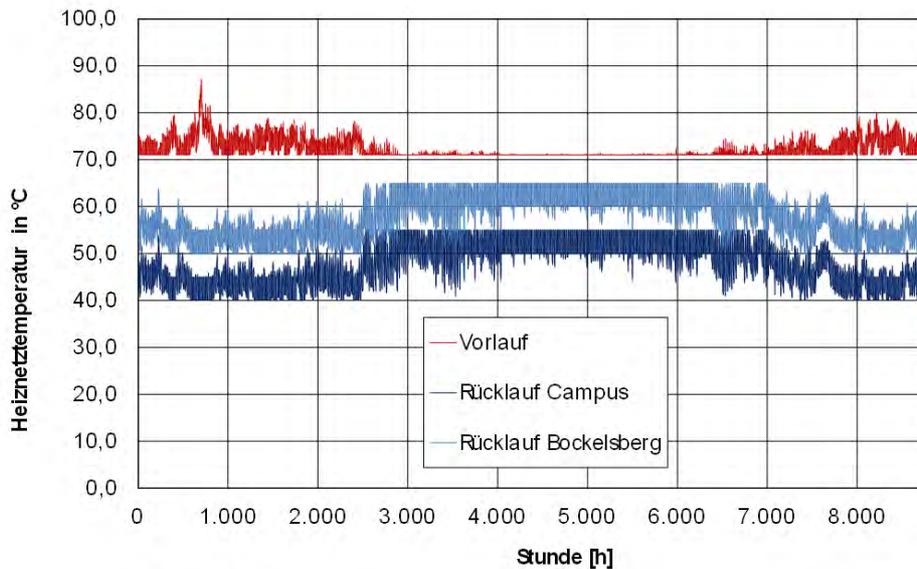


**Abbildung 45 - Einbindung des Aquiferwärmespeichers in das Campusnetz**  
 Quelle: GFZ Potsdam

Die exergetisch optimierte Ausspeicherung kommt direkt der Speichereffizienz entgegen. Unter Annahme des Abnehmersystems Campus und Bockelsberg wurde die passende mindest-BHKW-Größe in Kombination mit der Aquiferwärmespeicherung ermittelt. Abbildung 46 zeigt die modellierten, kombinierten Energiebedarfe des Abnehmersystems. Abbildung 47 zeigt die Heiznetztemperaturen.

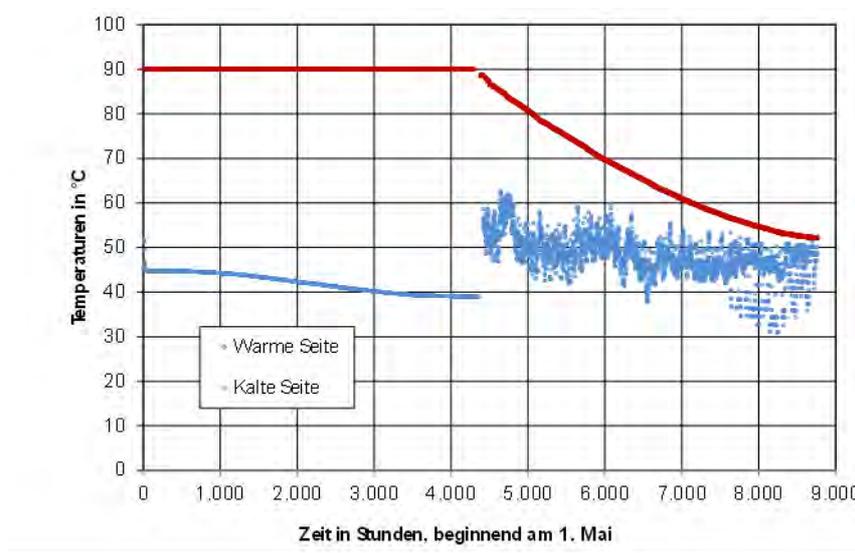


**Abbildung 46 - Bedarfsprofil des Abnehmersystems Campus und Bockelsberg**  
 Quelle: GTN Neubrandenburg, EPA Aachen



**Abbildung 47 - Temperaturen im Heiznetz Campus/Bockelsberg**  
 Quelle: GTN Neubrandenburg

Bei der Wiederausspeicherung des mit 90°C eingespeicherten Wassers verringert sich die Temperatur gegen Ende des Ausspeicherprozesses (Abbildung 48). Daher hängt die Effizienz des Speichers maßgeblich von der möglichen Auskühlung und Wiedereinspeisung in das Netz ab.



**Abbildung 48 - Temperaturen des geothermischen Speicherfluids**  
 Quelle: GTN Neubrandenburg

Abbildung 49 zeigt die sich ergebenden maximalen Rückgewinnungsgrade in Abhängigkeit von den Systemtemperaturen (Kranz & Kabus, 2009).

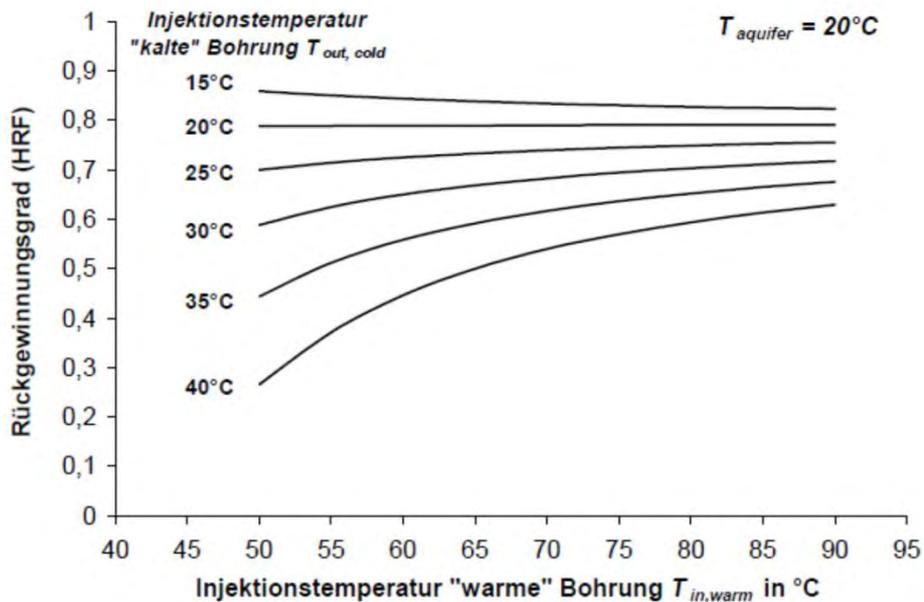


Abbildung 49 - Rückgewinnungsgrade in Abhängigkeit von den Ein- und Ausspeichertemperaturen  
 Quelle: Kranz & Kabus, 2009

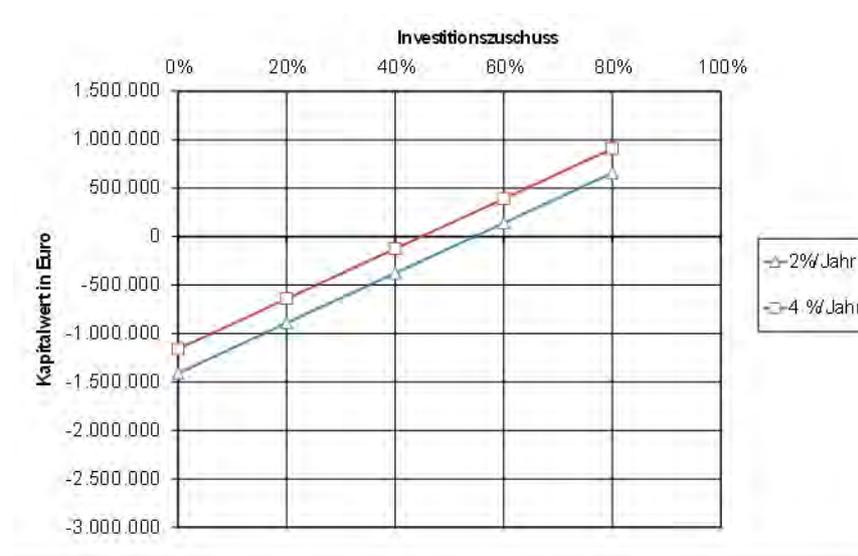
Insgesamt ergibt sich für das betrachtete System das folgende Nutzungsprofil (Tabelle 9):

Tabelle 9 - Nutzungsprofil Aquiferspeichersystem

	<b>Variante</b>	
	<b>1.400 kW<sub>el</sub></b>	
	<b>separat</b>	
<b>Energiedaten</b>		
Wärmeeinspeicherung	3.768	MWh/a
Zusätzliche Stromerzeugung in KWK wegen des Aquiferspeichers (Basis Einspeicherung)	3.517	MWh/a
Wärmeausspeicherung	2.005	MWh/a
Rückgewinnungskoeffizient aus dem Wärmespeicher	53,2 %	
Zusätzliche Stromerzeugung in KWK wegen des	1.871	MWh/a

<i>Aquiferspeichers (Basis Ausspeicherung)</i>		
<i>Benötigte Förderrate</i>	30	<i>m³/h</i>
<b>Brennstoffdaten</b>		
<i>Strombedarf zum Antrieb des Aquiferspeichers</i>	101	<i>MWh/a</i>
<i>Zusätzlicher Bedarf an Biomethan</i>	8.777	<i>MWh/a</i>
<i>Vermiedener Erdgasbezug</i>	2.359	<i>MWh/a</i>

Es ergibt sich für das betrachtete System, dass der Speicher mit einem maximalen Speichervermögen von 10 GWh und einer Produktivität von ca. 100 m³/h nur zu ca. 30% von dem Abnehmersystem genutzt werden kann. Der Rückgewinnungsgrad liegt dadurch mit 53% deutlich unter den erreichbaren ca. 65%. Aufgrund der recht invariablen Investitionskosten von ca. 3,4 Mio. € stellt sich die Wirtschaftlichkeit für das untersuchte System bei einer Förderung von 50% durch das BMWi im Rahmen des genannten Projekts vorläufig (eine detaillierte Modellierung wird unter Einbindung des Bockelsberg-Netzes und mit aktuellen Daten zum Zentralgebäude-Neubau wird noch vorgenommen) erst ab einem Biogaspreis von 7 ct/kWh positiv (Bei der derzeit sehr konservativen Annahme von Energiepreissteigerungen von 2-4% p.a. und Finanzierungskosten von 5% p.a.) dar (Abbildung 50).



**Abbildung 50 - Wirtschaftlichkeit des Aquiferspeicher-Systems für das Abnehmersystem Campus-Bockelsberg bei 7 ct/kWh Biogaspreis und einem Betrachtungszeitraum von 15 Jahren**  
 Quelle: GTN Neubrandenburg

#### 4.8.4. Potentiale für eine Einbindung weiterer Nahwärmesysteme

Für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit sollten möglichst die Potentiale des Speichers komplett ausgenutzt werden. Damit könnten sowohl Rückgewinnungsgrad als auch Wirtschaftlichkeit bedeutend verbessert werden. Der größte Kostenanteil ist durch die Bohrungen gegeben (Tabelle 10), die normalerweise invariabel sind:

Tabelle 10 - Kosten Aquiferspeichersystem

	<i>Variante</i> <i>1.400 kW<sub>e</sub></i> <i>komplett</i>	<i>Variante</i> <i>1.400 kW<sub>e</sub></i> <i>Mehrkosten durch</i> <i>Speicherung</i>
<i>Bohrungen</i>	2.502.000 €	2.502.000 €
<i>Anlagenbau Thermalwas- serkreislauf</i>	453.300 €	453.300 €
<i>Biomethangefeuerte BHKW</i>	630.000 €	
<i>Anlagenbau Einbindung</i>	694.000 €	30.600 €
<i>Wärmeerzeugung</i>		
<i>Elektro/Automatisation</i>	651.100 €	294.000 €
<i>Fernwärme- und</i>	284.200 €	284.200 €
<i>Thermalwassertrassen</i>		
<i>Gebäude</i>	125.000 €	56.500 €
<b><i>Summe (netto)</i></b>	<b>5.339.600 €</b>	<b>3.620.600 €</b>

Aufgrund der besonderen Lage sind die bevorzugten Speicherschichten jedoch in Richtung Stadtmitte in geringerer Tiefe vorhanden. Ein Standort weiter nördlich, der ggf. zu verringerten Bohrkosten führen könnte, ist zu erörtern. Weiterhin wäre mit dem Nahwärmesystem in Lüneburg-Mitte ein räumlich nahegelegenes zweites Netz für eine Einbindung vorhanden. Zusätzlich könnten die Gebiete Alt-Bockelsberg und Rotes Feld mit in die Nahwärmeversorgung einbezogen werden. Diese Punkte und die weitere Detaillierung wird in dem Forschungsprojekt an der Leuphana, in das auch eine Studierendengruppe eingebunden ist, unter Einbeziehung externer Forschungspartner untersucht. Bei positiver Evaluation gemeinsam mit dem Energieversorger soll ein gemeinsamer Förderantrag im Programm „EnEff: Stadt“ geplant werden, der bereits mit dem Projektträger Jülich im für die Umsetzungsphase des aktuellen Projekts vorläufig abgestimmt wurde.

Im Rahmen der Konzeptbetrachtung für eine Versorgung des Lüneburger Stadtkerns mit erneuerbarer Wärme sollten diese Möglichkeiten ebenfalls seitens Hansestadt und Landkreis Lüneburg erörtert werden. Ein Einbezug in das transdisziplinäre Forschungsprojekt wird seitens der Universität angestrebt.

#### **4.8.5. Thermobattery**

Der Landkreis Lüneburg in Verbund mit der Hansestadt Lüneburg zeigt in seiner Struktur von der Stadt bis hin zum schwach besiedelten Raum, Landwirtschaft und Industrie eine große Bandbreite von verschiedenartigen Strom- und Wärmeabnehmern. Damit können im Landkreis Lüneburg und der Hansestadt Lüneburg nachhaltige Konzepte zur Stromerzeugung sowie Wärmenutzung und Wärmebereitstellung zum Einsatz kommen. Der genannte Raum ist aufgrund seiner Nähe zu Hamburg und damit der Mitgliedschaft in der Metropolregion Hamburg interessant für regionenübergreifende Speicher- und Versorgungskonzepte im Bereich Strom und Wärme.

Ein viel versprechendes Konzept ist die Nutzung von dezentraler, regenerativer Stromerzeugung (Wind- und Solarenergie) im ländlichen Raum. Fluktuationen in der Stromerzeugung können durch die bedarfsgerechte Zuschaltung von dezentralen kleinen Blockheizkraftwerken und die Einspeisung der erzeugten Elektrizität in das lokale Stromnetz. Die dabei freiwerdende Wärme kann entweder direkt und lokal genutzt werden oder – falls zum Zeitpunkt der Stromerzeugung kein entsprechender Wärmebedarf besteht – direkt am Ort der Erzeugung zwischengespeichert werden.

Für die Wärmespeicherung gibt es verschiedene Technologien, die zum Einsatz kommen können:

- Speicherung sensibler Wärme (z.B. isolierter Warmwassertank)
- Wärmespeicherung in Phasenwechselmaterialien
- Wärmespeicherung durch thermophysikalische Wechselwirkungen
- Speicherung von Wärme durch thermochemische Reaktionen (Reaktionen mit hoher Reaktionsenthalpie)

Tabelle 11 - Speicherarten nach Freisetzung

Speicherart	Kurzerklärung der Freisetzung	Beispiel
<b>sensibel</b>	fühlbar	Wärmflasche, Heizkessel, Boiler
<b>latent</b>	versteckt (Phasenwechsel)	Eiswürfel in Getränk, Handwärmer
<b>thermophysikalisch</b>	Adsorption auf Oberfläche	Zeolith-Trocknung (Geschirrspüler)
<b>thermochemisch</b>	chemische Reaktion	Thermische Batterie (Wärmefreisetzung durch Hydratation für Heizprozesse)

Die erstgenannte Technologie ist bereits auf dem Markt etabliert und hat seine Vorteile in den geringen Kosten und der konstruktiven Einfachheit. Nachteile sind eine vergleichsweise geringe volumetrische Speicherkapazität, die Notwendigkeit einer exzellenten Isolierung, die mit zunehmender Speicherdauer steigenden Wärmeverluste sowie die mit zunehmender Wärmeabgabe sinkende Wärmeleistung.

Latente Wärmespeicher besitzen eine höhere Energiespeicherdichte als sensible und benötigen im Falle einer gehemmten Spontankristallisation keine Isolierung. Nachteilig sind die oft hohen Materialkosten, der schlechte Wärmetransfer der Feststoffe, die fehlende Steuerbarkeit der freigesetzten Wärmemenge und die häufig schwierige Steuerbarkeit der Kristallisation.

Vorteile der Adsorptions-Wärmespeicherung sind die recht große Energiespeicherdichte, die Steuerbarkeit der Wärmefreisetzung und des Temperaturlevels und die Möglichkeit der Langzeitspeicherung ohne nennenswerte Wärmeverluste. Nachteilig sind die Komplexität der thermophysikalischen Sorptionsspeicher, die Notwendigkeit einer intelligenten Prozesssteuerung und die daraus resultierenden Systemkosten.

Die Vorteile der thermochemischen Wärmespeicherung sind (ähnlich den Adsorptionsspeichern) die sehr hohe Energiespeicherdichte, die Steuerbarkeit der Wärmefreisetzung und des Temperaturlevels und die Möglichkeit der Langzeitspeicherung ohne nennenswerte Wärmeverluste. Nachteilig sind die Komplexität der thermochemischen Speicher, die Notwendigkeit einer intelligenten Prozesssteuerung und die daraus resultierenden Systemkosten.

An der Leuphana Universität wird seit 2011 ein Projekt zur Nutzung thermochemischer Reaktionen zur Wärmespeicherung verfolgt. Das Ziel des EU-geförderten Vorhabens ist die Entwicklung eines kompakten Wärmespeichers mit ca. 1m<sup>3</sup> Volumen als Komponente für effiziente Mikro-Blockheizkraftwerke (BHKW). Diese Mikro-BHKW können durch die Integration eines Wärmespeichers zu einem Verbundkraftwerk zusammengeschlossen werden und damit am lukrativen Regelenergiemarkt (zum Ausgleich nicht vorhersehbarer, schwankender Erzeugung und Verbräuche) teilnehmen. Derzeit ist hierfür ein Wasserspeicher mit 2-3m<sup>3</sup> Volumen notwendig. Mikro-BHKW sind kleine dezentrale Einheiten, die Ein- oder Mehrfamilienhäuser mit Wärme versorgen. Der Bedarf an dieser Technik in den nächsten Jahren ist durch den notwendigen Ersatz von Altanlagen hoch. Zusätzlich zur effizienten Wärmeversorgung wird der produzierte Strom ins Netz eingespeist. Das hinter dieser Ausrichtung stehende Konzept bspw. der Lichtblick AG sieht vor, viele dieser Anlagen zu einem zentral gesteuerten Verbund zusammenzuschließen und Regelenergie für den Strommarkt bereitzustellen. Regelenergie wird vermehrt durch die Integration erneuerbarer Energiequellen (bspw. Wind) am Strommarkt nachgefragt. Der Wärmespeicher sorgt für eine möglichst vom Wärmebedarf entkoppelte Stromproduktion. So wird der aus der Regelenergiebereitstellung gewonnene Nutzen maximiert, da im Regelenergiemarkt nicht nur tatsächlich gelieferte Energie, sondern auch die Bereitschaft, Potentiale für positive und negative Regelenergie vorzuhalten und damit letztlich Erzeugungsflexibilität vergütet wird. Je leistungsfähiger der Wärmespeicher dabei ist, desto flexibler weil unabhängiger von der Wärmebereitstellung ist die Stromproduktion und desto besser kann sie am Regelenergiemarkt platziert werden. Zudem stellt sich bei Verwendung der derzeit notwendigen Wasserspeicher ein Problem mit dem benötigten Platzbedarf dar, der die Einsatzmöglichkeiten des Systems stark limitiert. Kompaktere Wärmespeicher können hier für Abhilfe und eine verbesserte Marktfähigkeit der Mikro-BHKW und damit für verbesserte Absatzchancen sorgen.

Der kompakte Wärmespeicher soll auf der Basis thermochemischer Speichermaterialien entwickelt werden. Diese bieten durch eine gute Leistungscharakteristik und um ein vielfaches höhere Speicherkapazitäten (Faktor 5-10) gegenüber dem Stand der Technik ein großes Potential und werden als eine "enabling technology" gehandelt. Für eine Anwendung ist jedoch die gezielte Entwicklung eines geeigneten Prozesses, der sich zur Anwendung als stationärer Hochleistungswärmespeicher eignet, notwendig.

Verfolgt wird ein neuartiges, im Vorfeld entwickeltes Konzept einer teilweise energetisch geschlossenen thermochemischen Wärmepumpe als Kombination aus thermochemischer und Latentwärmespeicherung ("Thermische Batterie"). Im Latentwärmespeicherteil wird jedoch

nur Hilfsenergie gespeichert. Die Forschung hat die Minimierung des Latentwärmespeicheranteils durch eine optimierte Einbindung in das Mikro-BHKW ("Zuhausekraftwerk")- System, die gezielte Optimierung des Prozesses und der Speichermaterialien und die Verwendung technischer statt hochreiner Materialien zur Kostenreduzierung zum Ziel. Besonderer Vorteil des verfolgten Konzeptes sind die gute Steuerbarkeit sowie die gute Leistung bei kompakten Abmessungen. Ziel ist die Entwicklung und erfolgreiche Testung eines Prototypen mit 80 kWh Speicherkapazität, ca. 1m<sup>3</sup> Volumen, 34 kW Einspeicherleistung und 10 kW Ausspeicherleistung für den anschließenden Beginn einer Serienproduktion.

### Problemstellung

Das Zuhausekraftwerk-Konzept benötigt für die Entkoppelung von Wärmebereitstellung und Stromproduktion einen Wärmespeicher. Als ideale Kapazität wird von 80 kWh thermisch ausgegangen. Derzeit umfasst das Konzept die Installation von Wasserspeichern mit einem Bruttovolumen von 2-3m<sup>3</sup> Wasser zu Kosten von grob 2000 €. Der sich aus dem benötigten Speichervolumen ergebende Raumbedarf führt zu Einschränkungen der Marktfähigkeit des Systems. Es wird daher nach Lösungen gesucht, die eine kompaktere Wärmespeicherung bei vergleichbarer Leistung und Einbindung in das Zuhausekraftwerk-System ermöglichen.

### Zur Verfügung stehende Speichertypen

Grundsätzlich stehen drei Arten der Wärmespeicherung zur Verfügung: sensible, latente und thermochemisch gespeicherte Wärme. Das geeignetste sensible Wärmespeichermaterial ist Wasser mit einer sensiblen spezifischen Wärmespeicherkapazität von 4,19 kJ/kgK, entsprechend 20-40 kWh/m<sup>3</sup> je nach nutzbarem Temperaturhub. Um höhere volumenspezifische Wärmespeicherkapazitäten zu erreichen, stehen grundsätzlich zwei Arten von Wärmespeicherung zur Verfügung:

- Latentwärmespeicher 150-300 kJ/kg, entsprechend 33-125 kWh/m<sup>3</sup>
- Thermochemische Wärmespeicher 500-1500 kJ/kg, entsprechend 138-416 kWh/m<sup>3</sup>

Aus dieser Gegenüberstellung bieten sich die thermochemischen Wärmespeicher besonders für eine kompakte Wärmespeicherung geeignete Systeme an. Diese Systeme arbeiten jedoch im Gegensatz zu Latentwärmespeichern mit Zweistoffsystemen und sind daher komplexer aufgebaut. Latentwärmespeicher besitzen andere problematische Eigenschaften, wie geringe Leistungen und Subcooling, sowie im Falle von Paraffinen hohe Materialkosten.

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines kompakten Wärmespeichers als Komponente für effiziente Mikro-Blockheizkraftwerke (BHKW), welche Strom und Wärme produzieren. Diese Mikro-BHKW können durch die Integration eines Wärmespeichers zu einem Verbundkraftwerk zusammengeschlossen werden und damit am lukrativen Regelenergiemarkt (zum Ausgleich nicht vorhersehbarer, schwankender Erzeugung und Verbräuche) teilnehmen. Der Bedarf an dieser Technik in den nächsten Jahren ist durch den notwendigen Ersatz von Altanlagen hoch. Zusätzlich zur effizienten Wärmeversorgung wird der produzierte Strom ins Netz eingespeist. Das hinter dieser Ausrichtung stehende Konzept bspw. der Lichtblick AG sieht vor, viele dieser Anlagen zu einem zentral gesteuerten Verbund zusammenzuschließen und Regelenergie für den Strommarkt bereitzustellen. Der Wärmespeicher sorgt für eine möglichst vom Wärmebedarf entkoppelte Stromproduktion. So wird der aus der Regelenergiebereitstellung gewonnene Nutzen maximiert. Zudem stellt sich bei Verwendung der derzeit notwendigen Wasserspeicher ein Problem mit dem benötigten Platzbedarf dar, der die Einsatzmöglichkeiten des Systems stark limitiert. Kompaktere Wärmespeicher können hier für Abhilfe und eine verbesserte Marktfähigkeit der Mikro-BHKW und damit für verbesserte Absatzchancen sorgen.

Der kompakte Wärmespeicher soll auf der Basis thermochemischer Speichermaterialien entwickelt werden. Diese bieten durch eine gute Leistungscharakteristik und um ein vielfaches höhere Speicherkapazitäten (Faktor 5-10) gegenüber dem Stand der Technik ein großes Potential und werden als eine "enabling technology" gehandelt. Für eine Anwendung ist jedoch die gezielte Entwicklung eines geeigneten Prozesses, der sich zur Anwendung als stationärer Hochleistungswärmespeicher eignet, notwendig.

Verfolgt wird ein neuartiges, im Vorfeld entwickeltes Konzept einer teilweise energetisch geschlossenen thermochemischen Wärmepumpe als Kombination aus thermochemischer und Latentwärmespeicherung ("Thermische Batterie"). Die Forschung hat die Minimierung des Latentwärmespeicheranteils durch eine optimierte Einbindung in das Mikro-BHKW-System, die gezielte Optimierung des Prozesses und der Speichermaterialien und die Verwendung technischer statt hochreiner Materialien zur Kostenreduzierung zum Ziel. Besonderer Vorteil des verfolgten Konzeptes sind die gute Steuerbarkeit sowie die gute Leistung bei kompakten Abmessungen. Ziel ist die Entwicklung und erfolgreiche Testung eines Prototypen mit 80 kWh Speicherkapazität, ca. 1m<sup>3</sup> Volumen, 34 kW Einspeicherleistung und 10 kW Ausspeicherleistung für den anschließenden Beginn einer Serienproduktion.



**Abbildung 51 – Methodische Darstellung Thermobattery**

Die Ermittlung essentieller Daten zu Wärmebedarf und -erzeugung zeigt, dass bereits der geplante 80 kWh-Wärmespeicher-Prototyp bei einem Niedrigenergiehaus tatsächlich Wärme für etwa eine Woche speichern kann. Allerdings wurde ebenfalls festgestellt, dass dies sehr stark von verschiedenen Randbedingungen abhängt, welche die Bereitstellung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen beeinflussen. Dazu gehören die Stromgewinnung mittels Wind- und Solarenergie, welche zum einen stark wetterabhängig sind, zum anderen aber auch von der Umsetzung des geplanten Ausbaus dieser Energienutzungssysteme abhängen. Je mehr Elektrizität hier bereitgestellt wird, desto seltener werden die Blockheizkraftwerke benötigt, welche im Falle eines zusätzlichen Bedarfs genutzt werden und Abwärme produzieren, die wiederum teilweise in der Thermischen Batterie gespeichert wird.

Unter Annahme von  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  unter Nutzung der Reaktion  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{H}_2\text{O}$  (Umsetzungstemperaturen 70/80°C und 110°C) werden ca. 800 kJ/kg gespeichert. Hieraus ergibt sich eine notwendige Speichermaterialmenge von ca. 350 kg, entsprechend ca. 400 Liter Speichervolumen inkl. Wärmetauscherflächen. Hinzu kommt ein Volumen von ca. 100 Liter für das zu speichernde Wasser und 100 Liter Volumen für die Verroh-

rung, Hilfsantriebe und Wärmetauscher. Für die Verdampfung und Kondensation des Wassers werden ca. 60 kWh benötigt. Diese Wärmemenge wird zur Hälfte in einem anorganischen PCM mit 300 kJ/kg und einer Dichte von 1,5 g/cm<sup>3</sup> gespeichert. Hieraus ergibt sich ein benötigtes Volumen für den PCM-Speicher von ca. 300 Litern inklusive Wärmetauscherflächen. Das benötigte Bruttovolumen summiert sich damit auf ca. 900 l. Es wird daher eine Realisierung in einem ca. 1 m<sup>3</sup> Volumen bietendem Gehäuse als Entwicklungsziel angenommen. Ein solches Gehäuse kann vom Design und den Abmessungen her passend zum Zuhausekraftwerk hergestellt werden, da die Form des Wärmespeichers nicht notwendigerweise zylindrisch sein muss und verhältnismäßig wenig Isolierung benötigt wird.

Wärmespeicherung ist ein ganz wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung, wie eine Marktstudie im Vorfeld des Projektes klar gezeigt hat. Das größte Verwertungspotential ist in der Wärmeversorgung privater Haushalte zu sehen, da hier Konzepte wie das Zuhause-Kraftwerk von LichtBlick eine immer stärkere Rolle spielen. Die zu erwartende immer stärkere Nutzung von kleinen BHKW-Einheiten zum Ausgleich von Schwankungen in der Stromerzeugung in Kombination mit effizienten Wärmespeichern ermöglicht der geplanten Ausgründung einen erfolgreichen Start.

Energiespeichertechnologien sind ein wesentlicher Bestandteil sogenannter 100%-Regionen. Hier gibt es seitens des Landkreises Lüneburg eine Interessensbekundung zur Durchführung einer Studie. Es ist für die nächsten Jahre eine Intensivierung der Zusammenarbeit mit KMUs, weiteren Unternehmen und Behörden aus Konvergenzgebiet geplant.

## 5. Strom

### 5.1. Methodik

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Identifizierung des Stromverbrauchs im Landkreis (LK) und der Hansestadt Lüneburg (HLG) heute und in den Jahren 2030 und 2050 behandelt. Der methodischen Abgrenzung folgt zunächst die Beschreibung des Vorgehens zur Datenerhebung und Datensystematisierung der Sektoren private Haushalte, Gewerbe Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie der Industrie im Untersuchungsraum. In einem ersten Ergebnis wird anschließend der Ist-Verbrauch ermittelt. Hier soll aufgezeigt werden, wie sich der Energieverbrauch sektoral im Landkreis darstellt. Es werden die Stromverbrauchsannahmen für die Jahre 2030 und 2050 in Szenarien entwickelt.

#### 5.1.1. Abgrenzung

Das vorliegende Kapitel bezieht sich ausschließlich auf den Stromverbrauch eines Verbrauchsjahres innerhalb der Grenzen des Landkreises Lüneburg. Ein Verbrauchsjahr bildet den Lieferzeitraum ab. Dieser ist abhängig vom veranschlagten Abrechnungsturnus der EVU und entspricht in der Regel nicht exakt 365 Tagen. Abweichungen werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für räumliche Überschneidungen im Versorgungsgebiet der EVU. So werden bspw. Teileräume der SG Ostheide (Netzgebiet E.ON Avacon) von der EVDB AG versorgt und umgekehrt. Die Datengrundlage der Ist-Verbräuche eines Verbrauchsjahres beruht auf den Angaben der EVU, Bundesdurchschnittswerten und den Angaben der dreizehn Gebietskörperschaften zu den Liegenschaftsverbräuchen.

Die Annahmen zum zukünftigen Stromverbrauch der jeweiligen Sektoren werden anhand von Referenzszenarien der Prognos AG und des Umweltbundesamtes (UBA) ermittelt. Dargestellt werden die zukünftigen Möglichkeitsräume für die Jahre 2030 und 2050 in drei Szenarien:

- Das GOOD CASE (GC) – Szenario, in dem die größtmöglichen Einsparpotentiale nach heutigem Stand der Technik den künftigen Stromverbrauch bestimmen.
- Das BUSINESS AS USUAL (BAU) – Szenario, in dem der Stromverbrauch sich gegenüber heute nicht wesentlich ändert.
- Das 100% 2050 – Szenario, in dem insbesondere auch die Anwendungen eMobilität und Wärmepumpen berücksichtigt werden.

### 5.1.2. Erfassung und Systematisierung der Datengrundlage

In diesem Abschnitt werden die Relevanz, die Systematisierung, die Art der Erhebung und die Annahmen zu künftigen Entwicklungen der Stromverbräuche einzelner Sektoren beschrieben. Für die Entwicklung der Verbrauchsszenarien wurden verschiedene Berechnungsgrundlagen herangezogen. Dies gilt für die Entwicklung der Bevölkerung und der Strukturen der privaten Haushalte, die gesamtwirtschaftliche Entwicklung und den Verbrauch nach Sektoren.

Die Aufgliederung des Hauptversorgers in die Sektoren primär, sekundär und tertiär wird in den weiteren Berechnungen folgendermaßen angewandt: Die Branchengruppen im Primär-Sektor setzen sich aus Land- und Forstwirtschaft, Fischerei und Bergbau zusammen. Aufgrund der allgemeinen Zuordnung des Bergbaus zum Industrie-Sektor (sekundär), der Land- und Forstwirtschaft und Fischerei zum GHD-Sektor (tertiär) (vgl. AGE, 2011; Prognos, 2009; KuK, 2011) wurde die Primärebene den jeweiligen Sektoren zugeteilt.

Der Gesamtverbrauch des Referenzjahres 2009 bildet die Grundlage für die Annahmen zur Verbrauchsentwicklung im Untersuchungsraum.

#### Liegenschaftsverbräuche

In dieser Arbeit werden insbesondere auch die Stromverbräuche der Liegenschaften der GK genauer untersucht. Dazu wurden die Liefermengen der EVU für die jeweilige GK eingeholt. Zur Darstellung der Liegenschaftsverbräuche wurden Energieverbrauchsdaten in den einzelnen Liegenschaften erfasst. Diese wurden in einer Datentabelle nach folgenden Kriterien systematisiert (Tabelle 12):

**Tabelle 12 - Datensystematisierung für die erhobenen Liegenschaftsverbräuche (Strom)**

No.	Code	BWZK	NGF [m <sup>2</sup> ]	Erhebung [kWh]	Bezugs- jahr	Richtwert [kWh/m <sup>2</sup> a]	Effizienz- wert [kWh/a]
-----	------	------	--------------------------	-------------------	-----------------	-------------------------------------	----------------------------

Die laufende Nummer (No.) bezieht sich eindeutig auf eine Datenzeile. Der Code verortet eine Liegenschaft in der zuständigen GK. Der BWZK-Schlüssel wird dem jeweiligen Gebäudetyp zugeordnet. Die Nettogrundfläche (NGF) in Quadratmeter (m<sup>2</sup>) ist nach DIN 277 als Summe der Grundflächen aller Grundrissebenen eines Bauwerks ohne die Konstruktionsflächen (DIN 2005:1) definiert. Die NGF ist ein Teil der Berechnung des Effizienzwertes eines Gebäudes aus den Verbrauchserhebungen in Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a) und dem Richtwert (kWh/m<sup>2</sup>a).

Die Datenerhebung zu den Liegenschaften der 13 GK erfolgte anhand eines formellen Anschreibens vom 30.05.2011. Die Verfügbarkeit der Daten ist in vier GK voll gegeben, in sechs GK nur teilweise und in dreien nicht verfügbar (Tabelle 13).

**Tabelle 13 - Datenrücklauf der GK-Erhebung**

Gebietskörperschaft	Jahr	Strom	NGF	Wärme	Bemerkung
GK (01)	2006-2010	1	1	1	
GK (02)	2006-2010	1	1	0	
GK (03)	2006-2010	1	1	0	
GK (04)	0	0	0	0	nur Liegenschaftsinformationen
GK (05)	2006-2010	1	1	0	Summe aus 2006-2010
GK (06)	2006-2010	1	1	unvollst.	Wärme: 2004-2007
GK (07)	2006-2010	1	1	1	
GK (08)	2006-2010	1	1	1	
GK (09)	2006-2010	1	1	1	
GK (10)	2006-2010	1	1	1	zentrale Liegenschaften fehlen
GK (11)	2010	1	1	0	
GK (12)	0	0	0	0	
GK (13)	0	0	0	0	

Den Berechnungen der Stromverbräuche je Gebietskörperschaft folgt die Erfassung der verfügbaren Verbrauchsdaten ( $E_v$ ) in Kilowattstunden über die Differenz der Lieferdaten der EVU ( $E_{EVU(GK)}$ ) zu den erhobenen Daten ( $E_{GK}$ ):

$$E_{EVU(GK)} - E_{GK} = E_v.$$

Das Ergebnis des Datenvergleichs stellt sich prozentual wie folgt dar:

Die Verfügbarkeit der Verbrauchsdaten (Abbildung 52) ist bei vier GK über 50% gegeben. Vier GK liegen teilweise deutlich unter 50% und bei dreien ist die Verfügbarkeit aufgrund fehlender Daten nicht darstellbar. Die Verfügbarkeit der Verbrauchsdaten von Landes- und Kreisliegenschaften kann nicht festgestellt werden, da von den EVU keine Verbrauchsangaben vorliegen.

Zur Bewertung der Energieverbrauchswerte einzelner ausgewählter Liegenschaftsformen hinsichtlich der Energieeffizienz wurden die Vergleichswerte der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) herangezogen (BMVBS, 2009). Die Vergleichswerte beruhen auf den Vorgaben der EnEV 2009 und sind nach Gebäudetyp einem spezifischen BWZK-Schlüssel zugeordnet (Anhang). Die Er-

mittlung des Energieverbrauchs eines Nichtwohngebäudes erfolgt gemäß § 19 Absatz 3 Satz 1 EnEV aus (BMVBS, 2009):

1. Verbrauchsdaten aus Abrechnungen für das gesamte Gebäude,
2. andere geeignete Verbrauchsdaten, insbesondere Abrechnungen von Energielieferanten oder sachgerecht durchgeführte Verbrauchsmessungen oder
3. eine Kombination von Verbrauchsdaten nach den Nummern 1 und 2

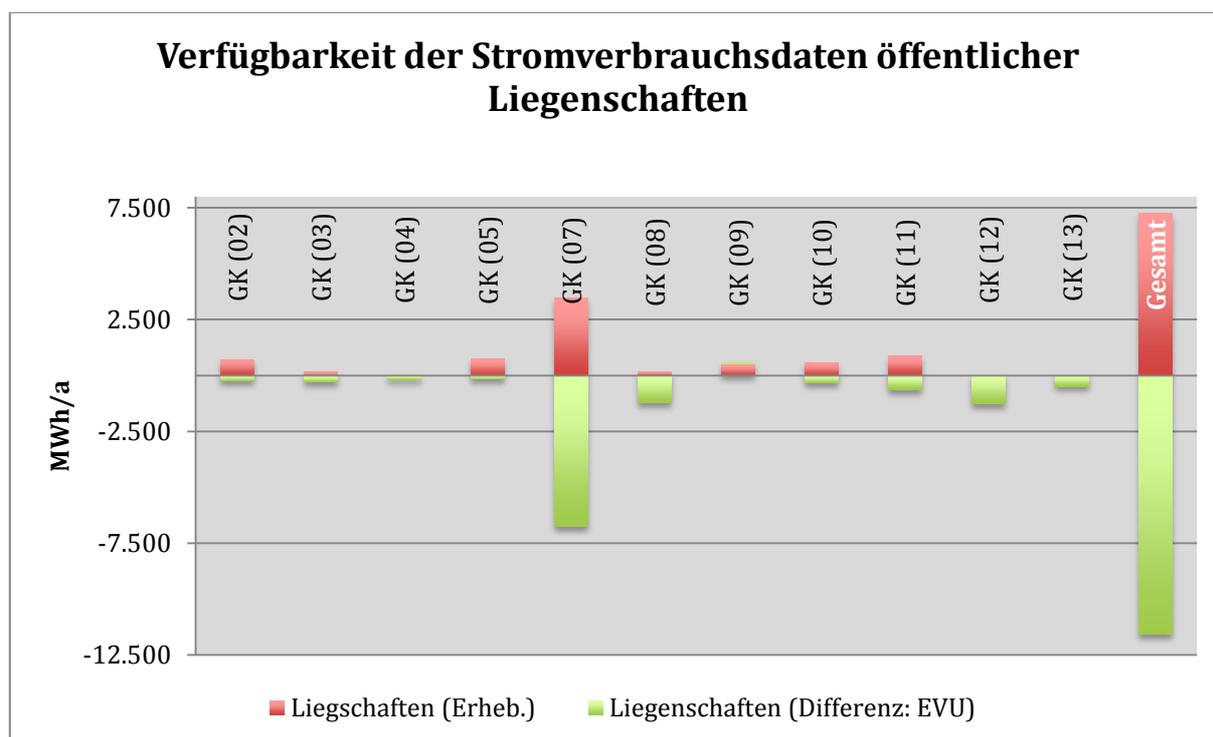


Abbildung 52 - Differenz der erhobenen Stromverbräuche zu den Lieferdaten der EVU in Prozent

### Private Haushaltsverbräuche

Die Datengrundlage der privaten Haushalte im Untersuchungsraum folgt den Verbrauchsangaben der EVU und den Berechnungen der NBank zur Wohnmarktbeobachtung 2010/11 (NBank, 2010). Diese hat im Auftrag Niedersächsischen Institutes für Wirtschaftsforschung (NIW) in ihrer Studie „regionale Kennzahlen der Haushaltsgrößen“ basierend auf dem Untersuchungsjahr 2009 ermittelt (NBank, 2010). Die Daten beruhen auf den Verbundauswertungen des Landesbetriebes für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen sowie Sonderauswertungen im Rahmen der kontrollierten Datenfernverarbeitung des Statistischen Bundesamtes (ebd.). Hinzu kommen die Berechnungen der bundesdurchschnittlichen Stromverbräuche nach Haushaltsgröße der BDEW (BDEW, 2010b).

## Industrie- und GHD

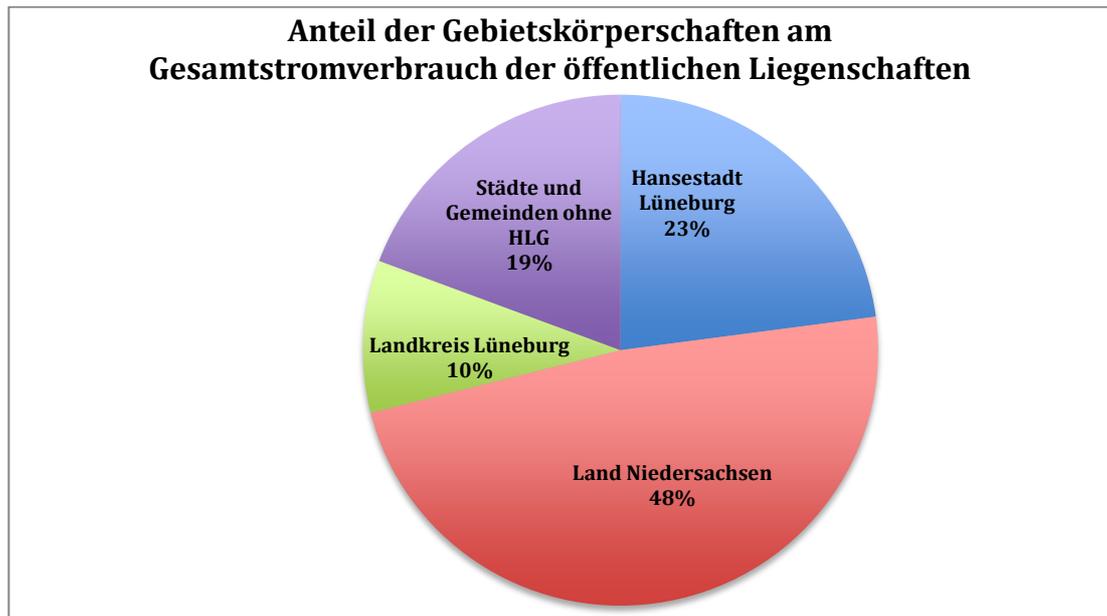
Für die Erhebung von Stromverbrauchsdaten aus Industrie und dem GHD-Sektor werden die Angaben zu netzgebundenen Energieträgern von den EVU und Bundesdurchschnittswerte herangezogen. Maßgeblich basieren die Vergleichswerte auf den Berechnungen der Prognos AG (WWF, 2009).

## 5.2. Stromverbrauch nach Sektoren

Die Ermittlung des sektoralen Ist-Stands von Stromverbräuchen bildet die Grund- und Ausgangslage für die Entwicklung von Verbrauchsszenarien. Die Ist-Verbräuche werden von öffentlichen Liegenschaften, privaten Haushalten, Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen ermittelt. Parallel dazu werden Stärken und Schwächen der gegenwärtigen Verfügbarkeit von Daten sowohl in den einzelnen Sektoren als auch in den GK und den regionalen EVU lokalisiert. Die Darstellung der Ist-Daten erfolgt zunächst getrennt, bevor am Ende dieses Abschnitts daraus der Gesamtstromverbrauch des Untersuchungsraumes ermittelt wird.

### 5.2.1. Liegenschaften

Die Verbräuche der öffentlichen Liegenschaften werden aus dem erhobenen Datenbestand ermittelt. Insgesamt besteht die Tabelle aus 1983 Zeilen (Datensätze) und elf Spalten (Parameter), welches einer Menge von über 33.000 Einzeldaten entspricht. Anhand dieser Daten wird der Gesamtverbrauch öffentlicher Liegenschaften, die Effizienz einzelner Liegenschaftstypen und die allgemeine Verfügbarkeit der Verbrauchsdaten in den GK ermittelt. Für die Darstellung des anteiligen Verbrauchs der GK am Gesamtverbrauch der Liegenschaften im Untersuchungsraum werden zum Großteil die Verbrauchsangaben der EVU verwendet. Da die EVU keine Verbrauchsangaben zu den Landes- und Kreisliegenschaften bereitstellen konnten, fließen hier die dort erhobenen Verbrauchsdaten ein.



**Abbildung 53 - Anteiliger Stromverbrauch der GK 2009 in Prozent**

Der Gesamtstromverbrauch einer Gebietskörperschaft ( $E_{GK}$ ) ist die Summe der Liegenschaftsverbräuche ( $\Sigma E_{Lg.}$ ) eines Bezugsjahres in kWh:

$$E_{GK} = \Sigma E_{Lg.}$$

Abbildung 53 zeigt den anteiligen Verbrauch aller GK im Untersuchungsraum. Den eindeutig größten Anteil am Stromverbrauch nimmt mit 48 Prozent das Land Niedersachsen ein. In der Summe liegt der Verbrauch der Städte und Gemeinden unter dem Verbrauch der Hansestadt Lüneburg und über dem des Landkreises.

Zur Bestimmung der Gebäudeeffizienz wurden ausgewählte Liegenschaften unabhängig von der zuständigen GK anhand des BWZK-Schlüssels für das Bezugsjahr 2009 herausgefiltert und deren Verbrauchswerte mit den „Vergleichswerten zum Stromverbrauch“ der Bekanntmachung des BMVBS verglichen. Die Bekanntmachung setzt einen Verbrauchszeitraum von mindestens 36 Monaten voraus (BMVBS, 2009). Dies kann anhand der begrenzten Datengrundlage nur annähernd erfolgen. Für die Berechnung wird deswegen ein Zeitraum von 12 Monaten angesetzt.

Von den insgesamt 223 Datensätzen können 182 genutzt werden, was einem Anteil von knapp 82% entspricht. Nicht berücksichtigt wurden Parkplatzanlagen, Friedhofsanlagen oder Schulen, die Verbräuche der angegliederten Sporthallen nicht separiert haben. Als Kriterium für die Verwendbarkeit der erhobenen Daten eines Bezugsjahres müssen Flächenangaben (NGF), Stromverbrauch (kWh/a) und die Möglichkeit der „Zuordnung zu einem BWZK-Schlüssel“ einer Liegenschaft vorliegen. Die größten Datenmengen konnten für das Ver-

brauchsjahr 2009 erhoben werden. Aus diesem Grund wurde die Eingrenzung auf das Bezugsjahr 2009 vorgenommen. Die jeweiligen Richtwerte werden den spezifischen Positionen (BWZK-Schlüssel) zugewiesen. Die Effizienz hinsichtlich des Stromverbrauchs wird von folgenden Gebäudetypen bestimmt:

- Verwaltungsgebäude mit normal technischer Ausstattung (BWZK 1300).
- Allgemeinbildende Schulen (BWZK 4100).
- Gebäude für öffentliche Bereitschaftsdienste (BWZK 7700).

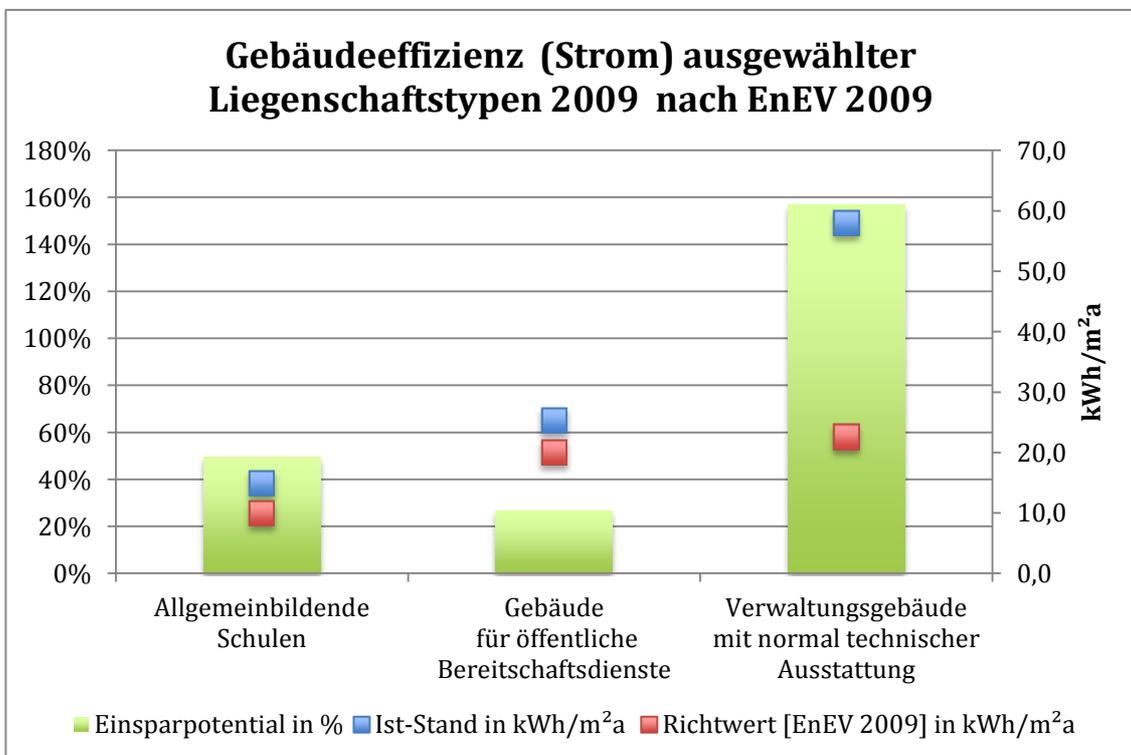
Der Effizienzwert (Abbildung 54) ergibt sich aus der Differenz von Vergleichswert und Ist-Wert:

$$E_{Eff} = \left( \left( \frac{E_{Lg.}}{F_{NGF}} \right) - E_{Vergl,s} \right) \cdot F_{NGF}$$

$E_{Eff}$             Energieeffizienzwert elektrischer Energie in kWh/a

$F_{NGF}$             Nettogrundfläche in m<sup>2</sup>

$E_{Vergl,s}$         Vergleichswert BMVBS 2009 in kWh/m<sup>2</sup>a



**Abbildung 54 - Energieeffizienz (Strom) der Liegenschaften**  
Datengrundlage: BMVBS, 2009

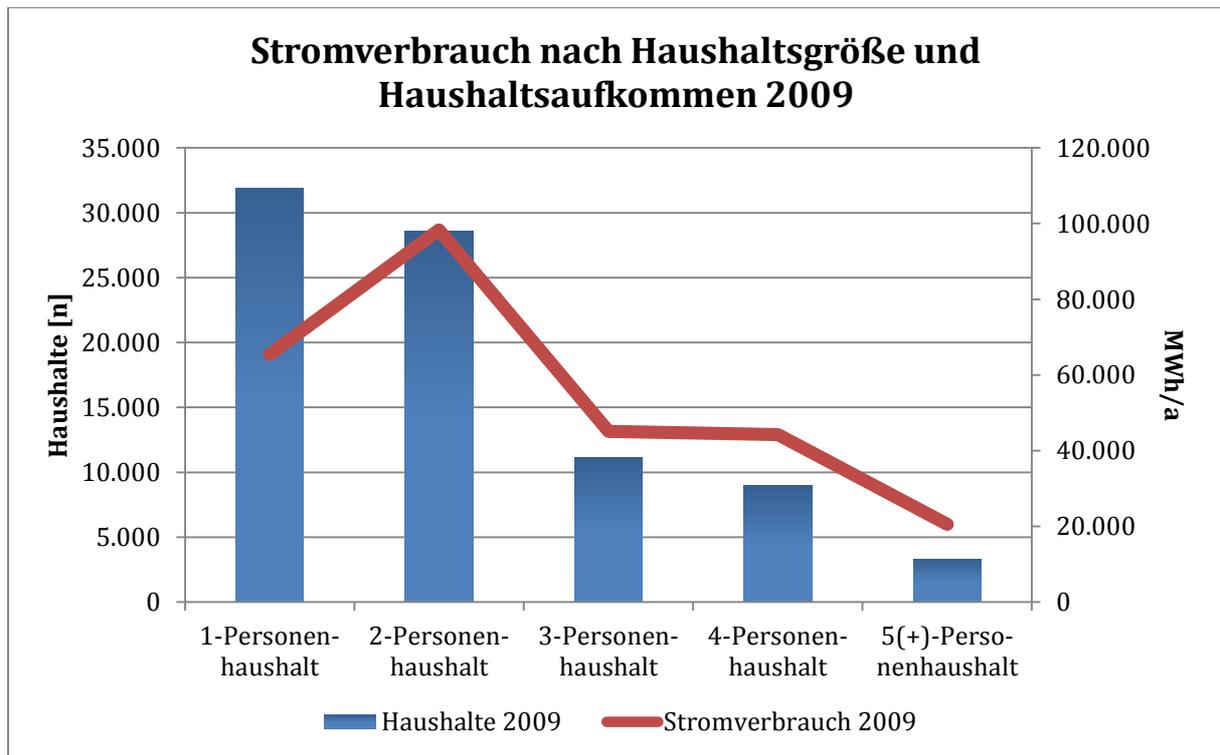
Das Ergebnis der Berechnungen zu den Effizienzwerten stellt sich wie folgt dar:

Die Verbräuche der einzelnen Gebäudetypen liegen mit 27% (Gebäude für öffentliche Bereitschaftsdienste), 50% (Allgemeinbildende Schulen) und 156% (Verwaltungsgebäude mit normal technischer Ausstattung) Abweichung teilweise sehr deutlich über den Richtwerten.

In der Summe beträgt der Verbrauch aller Liegenschaften im Untersuchungsraum 44.569 MWh, das entspricht einem Anteil von sechs Prozent am Gesamtstromverbrauch. Daraus ergibt sich für die öffentlichen Liegenschaften ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 252 kWh/a und Einwohner.

### 5.2.2. Private Haushalte

Die Verbräuche privater Haushalte werden aus Datenquellen der NBank und der BDEW berechnet. Zunächst wird dazu die Anzahl der Haushalte nach Haushaltsgröße erfasst. In Abbildung 55 wird deutlich, dass 1- und 2-Personenhaushalte im Untersuchungsraum dominieren und damit den Landestrend von Niedersachsen widerspiegeln (DESTATIS, 2011).



**Abbildung 55 - Anzahl und Stromverbrauch der Haushalte nach Haushaltsgröße 2009**  
Datengrundlage: NBank, 2010; BDEW, 2010

Der Stromverbrauch nach Haushaltsgröße ( $E_{H;e.B.}$ ) ist das Produkt aus Anzahl der Haushalte je Haushaltsgröße ( $n_{Hg}$ ) multipliziert mit dem bundesdurchschnittlichen Verbrauchswert nach Haushaltsgröße ( $E_{Hg;\phi}$ ):

$$E_{H;e.B.} = n_{Hg} \cdot E_{Hg;\emptyset}$$

Abbildung 55 verdeutlicht, dass der Stromverbrauch der 1- und 2-Personenhaushalte den größten Abschnitt der Haushaltsgrößen einnimmt. Der Gesamtstromverbrauch der privaten Haushalte im Untersuchungsraum beläuft sich auf 259.133 MWh. Das entspricht einem Gesamtanteil von 33%. Umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch im Jahr 2009 von 1.464 kWh pro Einwohner. Der Verbrauch privater Haushalte nach Haushaltsgröße im Untersuchungsraum liegt nach eigenen Berechnungen 5,6% unterhalb des Bundesdurchschnitts (BEDW, 2010).

### 5.2.3. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und Industrie

Die Angaben zu dem Ist-Stand des Stromverbrauchs aus GHD und Industrie stellen sich nach den gesetzten Kriterien anteilig wie folgt dar (Abbildung 56):

73% des gewerblichen Stromverbrauchs deckt die Industrie im Untersuchungsraum ab. Den weitaus größten Anteil an Verbräuchen im Industrie-Sektor verbucht die Hansestadt Lüneburg mit einem Anteil von knapp 80% gegenüber den restlichen Städten und Gemeinden. Der GHD-Anteil der Hansestadt Lüneburg beträgt im Vergleich zu den restlichen Städten und Gemeinden 40%.

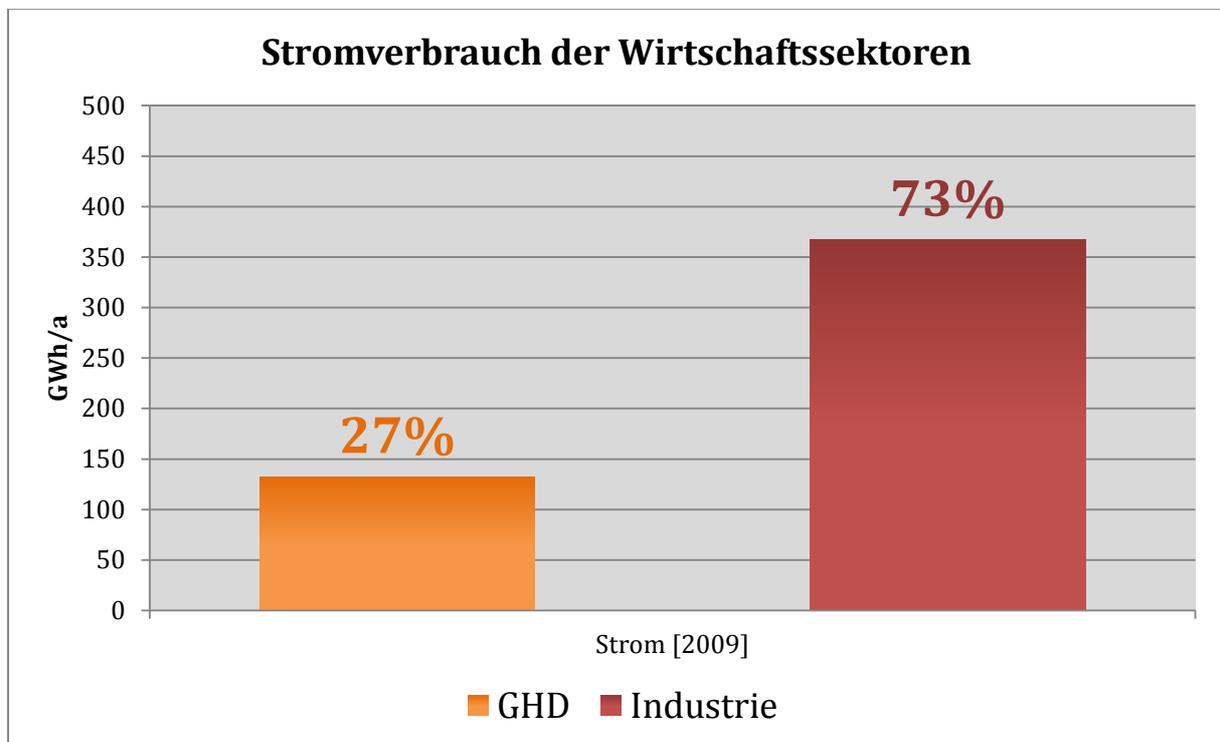


Abbildung 56 - Anteiliger Verbrauch der Wirtschaftssektoren

Der Gesamtstromverbrauch der Sektoren GHD und Industrie beläuft sich im Bezugsjahr 2009 auf knapp 500.000 MWh. Das entspricht einem Gesamtanteil von 67%. Umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von 2.968 kWh pro Einwohner. Wegen der ungenauen Datengrundlage zu den einzelnen Branchen und deren Mitarbeiterzahlen können keine Vergleiche zu branchenspezifischen Durchschnittswerten vorgenommen werden.

### 5.3. Szenarien

#### 5.3.1. Rahmendaten für die Szenarien

Die in dieser Arbeit entwickelten Szenarien beruhen im Wesentlichen auf den Annahmen der Prognos AG und des Umweltbundesamtes. Die Modellierung erfolgt auf der Grundlage gemeinsamer Rahmendaten zur demographischen Entwicklung und wirtschaftlichen Entwicklung (WWF, 2009). Die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen werden sich laut WWF bis 2050 nicht grundlegend ändern. Vielmehr setzen sich Lebensstil und die Konsum- und Verhaltensmuster wie bisher fort und Deutschland bleibt auf dem Niveau eines hochentwickelten Industrielandes (ebd.).

#### Bevölkerungsentwicklung

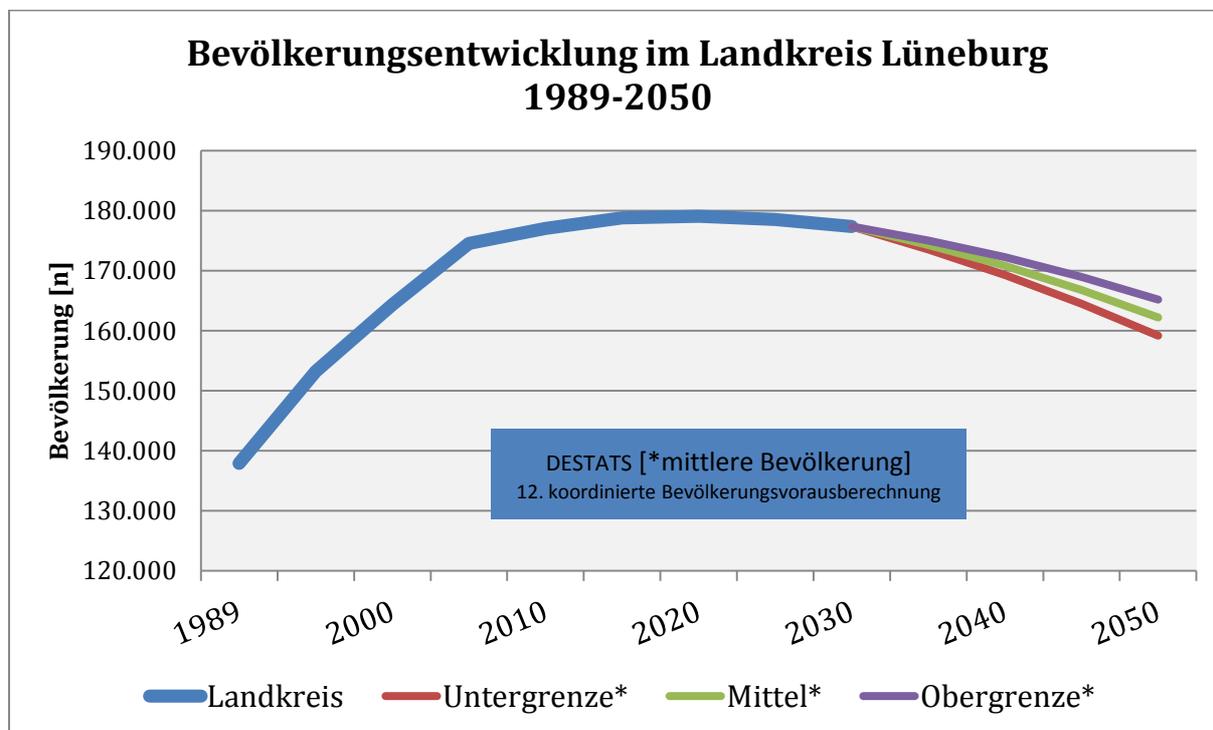


Abbildung 57 - Bevölkerungsentwicklung Landkreis Lüneburg  
 Quelle: NIW, 2011; Destatis, 2009; eigene Berechnung

Aufgrund seiner räumlichen Lage innerhalb der Metropolregion Hamburg ergibt sich für die Sozioökonomie des Untersuchungsraumes entgegen dem Trend vieler Teilräume in Niedersachsen eine positive Entwicklung. Wandern in vielen Regionen die Menschen und damit die Wirtschaftsleistung ab, so hat in den letzten Jahren eine stete Zunahme der Bevölkerung im LK Lüneburg stattgefunden. Dieser Trend bleibt voraussichtlich bis 2020 bestehen, wie die Entwicklung des Landkreises laut NIW zeigt (Abbildung 57).

Ausgehend vom Bezugsjahr 2009 nimmt die Bevölkerung in Niedersachsen zum Jahr 2030 insgesamt um etwa 700.000 Personen ab. Im Landkreis Lüneburg bleibt die Bevölkerung im Zeitraum 2009-2030 trotz vergleichsweise ähnlicher Altersstrukturen nahezu konstant, was sich vor allem durch das Verhältnis der natürlichen Entwicklung zum Wanderungssaldo erklärt. Liegt in vielen Regionen Niedersachsens die Zuwanderungsrate unterhalb der natürlichen Entwicklung, so ergibt sich im Landkreis Lüneburg ein leichter Überhang (NBank, 2010). In den ländlichen Räumen, abseits der Siedlungsentwicklungssachse, ist ein Bevölkerungsrückgang um teilweise 40% zu verzeichnen. Die Gemeinde Adendorf, die SG Bardowick, die SG Gellersen, die SG Ostheide und die Hansestadt Lüneburg (Abbildung 58) hingegen eine teilweise deutliche Bevölkerungszunahme aufweisen (NIW, 2010a).

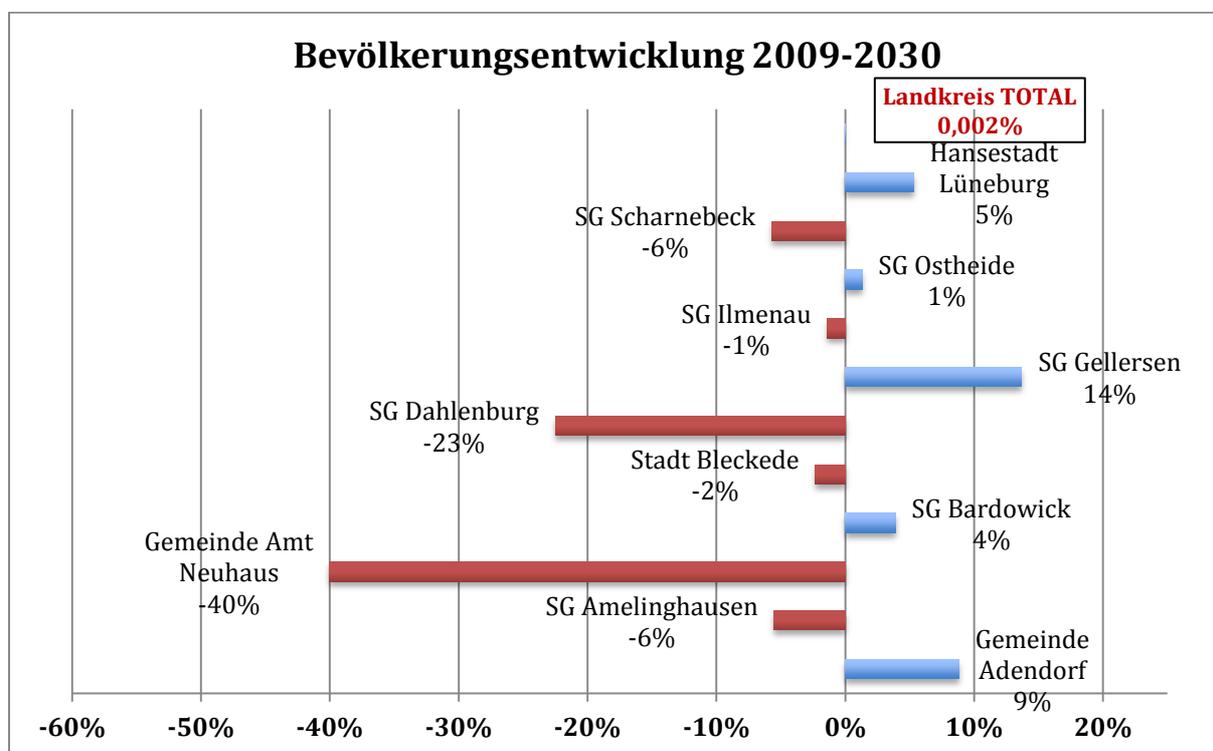
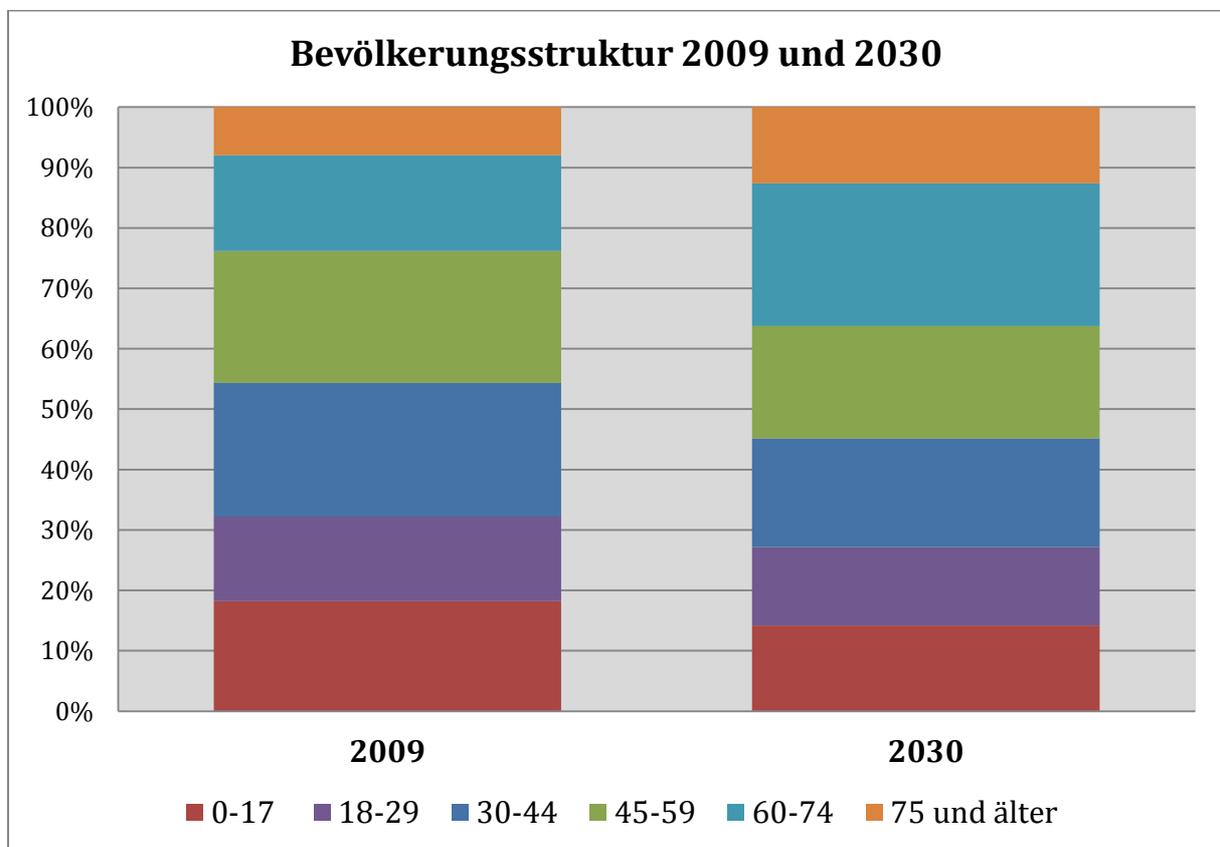


Abbildung 58 - Bevölkerungsentwicklung der Gemeinden und Städte im Landkreis Lüneburg  
 Datengrundlage: NBank, 2010

Für den weiteren Verlauf der demographischen Entwicklung im Untersuchungsraum nach 2030 lagen keine weiteren Daten vor, so dass auf Grundlage der Bevölkerungsstruktur in dieser Arbeit Annahmen für das Jahr 2050 den bundesdurchschnittlichen Berechnungen des Deutschen Statistischen Bundesamtes entnommen werden. Die Bevölkerungsfortschreibung für Deutschland (Vgl. unter anderem destatis, 2006; DIW, 2007; Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung, 2011) identifiziert bis zum Jahr 2050 eine deutliche Überalterung der Gesellschaft. „Insgesamt wird die Zahl der 65-Jährigen und Älteren von 14,9 Millionen im Jahre 2003 auf 23,1 Millionen im Jahre 2050 steigen. Der Anteil dieser Altersgruppe an der Gesamtbevölkerung wird sich von 18% (2003) auf etwa 30% (2050) erhöhen“ (DIW, 2007).

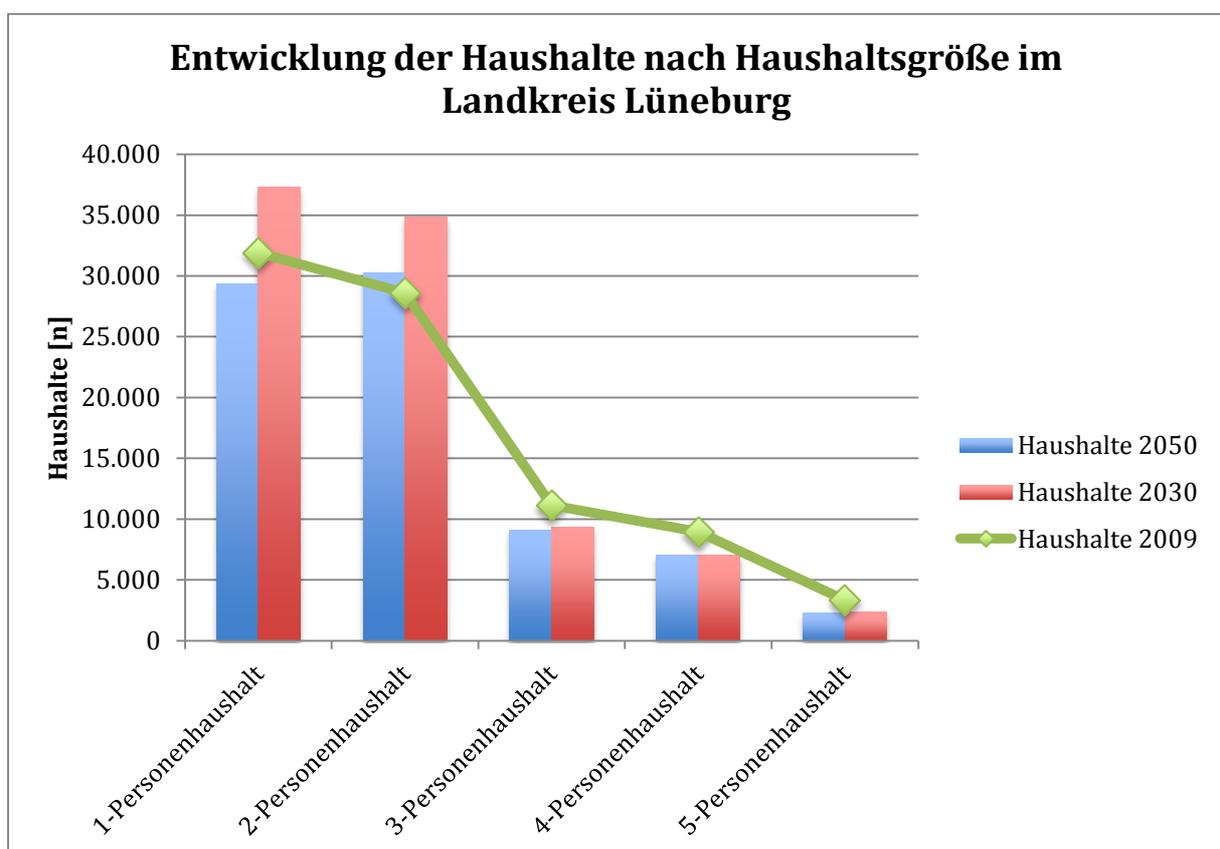


**Abbildung 59 - Bevölkerungsstruktur LK LG 2009, 2030**  
Quelle: NBank, 2010

Maßgeblich sind die seit über 30 Jahren rückläufigen Geburtenraten mit einem heutigen Bundesdurchschnitt von 1,4 Kindern je Frau. Für den Landkreis Lüneburg lag die durchschnittliche Geburtenrate im Zeitraum 1997-2008 zwischen 1,41 und 1,5 (Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung, 2011). Wie sich die Bevölkerung in den Jahren 2009 und 2030 strukturell verteilt, zeigt die Abbildung 59. Liegt das Verhältnis jung zu alt im Jahr 2009 bei einem Anteil der 0 bis 44-jährigen von über 50%, so sinkt dieser Wert im Jahr 2030 für den Landkreis deutlich unter 50% (NBank, 2010). Steigt die Geburtenrate in den nächsten

Jahren nicht deutlich an, und bleibt das Wanderungsniveau auf dem heutigen Stand, so wird sich der Trend in eine negative Bevölkerungsentwicklung umkehren, was unweigerlich auch zu einem negativen Trend für die Anzahl der Haushalte führen wird (DIW, 2007).

Diese Entwicklung hat direkte Auswirkungen auf die Anzahl der Personenhaushalte im Untersuchungsraum. Stützen sich die Angaben der Haushaltsfortschreibung für das Jahr 2030 auf die Berechnungen der NBank, so basieren die Modellierungen für das Jahr 2050 auf den Berechnungen des DIW. Für den Untersuchungsraum werden folgende Entwicklungen im Haushaltssektor angenommen:



**Abbildung 60 - Entwicklung der Haushalte nach Haushaltsgröße LK LG**

Bei 1- und 2-Personenhaushalten wird bis zum Jahr 2030 die Haushaltszahl deutlich ansteigen. Für das Jahr 2050 werden die Einpersonenhaushalte unter das Niveau von 2009 fallen, die 2-Personenhaushalte liegen 2050 geringfügig über dem Niveau 2009. Dagegen stagniert die Abnahme der 3- bis 5-Personenhaushalte ab dem Jahr 2030.

### Wirtschaftliche Entwicklung

Regionaldaten zu der wirtschaftlichen Entwicklung konnten für den Untersuchungsraum nicht herangezogen werden. Aus diesem Grund werden die bundesdurchschnittlichen Annahmen

der WWF-Studie verwendet. Darin wird von einem realen Wirtschaftswachstum von 0,7% ausgegangen (WWF, 2009). Die Studie identifiziert in einzelnen Bereichen, wie z.B. in den Wirtschaftszweigen Gewinnung von Steinen und Erden und dem Baugewerbe ein negatives Wachstum, während in den anderen Bereichen durchweg eine Zunahme der Bruttowertschöpfung zu verzeichnen ist (ebd.). Aufgrund der rückläufigen Bevölkerungszahlen werde laut WWF-Studie auch die Anzahl der Erwerbstätigen bis 2050 deutlich zurückgehen. Das führe einerseits zu einem Rückgang der Arbeitslosenquote, andererseits müsse auch der Qualifikationsgrad gehalten werden, was sich als problematisch darstellen könnte (ebd.).

Die aktuellen Entwicklungen hin zu einer Dienstleistungs- und Wissensgesellschaft werden sich fortsetzen und der Anteil an der Bruttowertschöpfung steigt um vier Prozent bis zum Jahr 2050. „Überdurchschnittliche Zuwachsraten weisen die Wirtschaftszweige Grundstückswesen/Vermietung/Dienstleistungen für Unternehmen (plus 70%), Gesundheits-/Veterinär-/Sozialwesen (plus 65%) und Verkehr/Nachrichtenübermittlung (plus 72%) auf“ (WWF, 2009). Besondere Wachstumsperspektiven sieht die WWF-Studie für die Branchen im Hoch- und Spitzentechnologiebereich. „Dazu zählen der Maschinenbau, die Rundfunk-, Fernseh- und Nachrichtentechnik, die Herstellung von Geräten und Einrichtungen der Elektrizitätserzeugung sowie die Erzeugung von Büromaschinen und EDV-Anlagen“ (ebd. 43).

### **5.3.2. BUSINESS AS USUAL-Szenario**

Das BUSINESS AS USUAL (BAU)-Szenario bezieht sich in weiten Teilen auf die Annahmen des „Referenzszenarios“ der WWF-Studie. Die Kernaussage für die Stromverbrauchsentwicklung im Untersuchungsraum der nächsten Jahrzehnte ist die Fortschreibung der heutigen wirtschaftlichen und industriellen Entwicklung unter weitgehender Ausnutzung der heutigen Effizienzpotentiale (WWF, 2009).

#### **Annahmen für das BUSINESS AS USUAL-Szenario**

Die folgenden Jahre werden keine größeren Technologiesprünge hervorbringen und folgen im Wesentlichen einer angepassten Effizienzsteigerung im Strom- und Wärmeverbrauch. Auch energiepolitisch wird sich der bisherige Trend fortsetzen. Die politische Ausrichtung folgt dabei den landes- und bundespolitischen Entwicklungen in der energetischen Neuausrichtung. Dieser Prozess wird kontinuierlich durch das Intervenieren wirtschaftlicher Interessenvertreter behindert, die sowohl steigende Energiepreise als auch die Vorgaben von Energieeinsparzielen kritisieren und zu verhindern versuchen. Einzelne Maßnahmen, wie diese Teilarbeit zum Energiekonzept, werden in den zuständigen Gremien des Landkreises und der Hansestadt Lüneburg zur Kenntnis genommen. Einzelmaßnahmen zur Gebäudesanie-

rung öffentlicher Liegenschaften werden im Untersuchungsraum sukzessive umgesetzt und bis zum Jahr 2030 entspricht der Gebäudestandard der dann gültigen EnEV.

### 5.3.3. GOOD CASE-Szenario

Auch im GOOD CASE-Szenario gelten die Kernaussagen zur sozioökonomischen Entwicklung im Untersuchungsraum. Die politischen und technologischen Rahmenbedingungen hingegen weisen einen gänzlich anderen und neuen Weg. Anzumerken ist hier, dass in Anlehnung an die WWF-Studie auch im GOOD CASE-Szenario keine Annahmen für Zukunftsräume getroffen werden, die nicht zumindest gesellschaftstheoretisch begründet oder technologisch nachweislich anwendbar sind (WWF, 2009).

Die Weltgesellschaft ändert sich in den Belangen des Klimaschutzes und der energiesystemischen Steuerung massiv. Ein globales verbindliches Abkommen zum Schutz des Klimas wird geschlossen werden. Daraus ergeben sich, im Völkerrecht klar geregelt, Verpflichtungen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Es entstehen internationale Konsortien, die zur Technologieentwicklung beitragen und Deutschland wird aufgrund seines hohen Wissenstandes davon profitieren (WWF, 2009). Für den Landkreis und die Hansestadt Lüneburg ergeben sich daraus neue Handlungsperspektiven. Der Regionalverwaltung kommt aufgrund des Rechts auf Selbstverwaltung, sowohl in der Planung als auch beim Betrieb von Energieerzeugungsanlagen und der Verteilung der erzeugten Energie eine zentrale Aufgabe zur Sicherung des Energiebedarfs in der Region und darüber hinaus zu.

Das europäische Verteilnetz für Strom wird auf ein dezentrales intelligentes Versorgungssystem für regenerative Energieerzeugungsanlagen ausgerichtet. Der effiziente und kontinuierliche Betrieb wird auf der Gemeindeebene sichergestellt. Die Lastenverteilung erfolgt im Regionenverbund, der wiederum die nationale Netzstabilität usw. reguliert. Gleiches gilt auch für die Wärmeversorgung. Flächendeckende Niederenergiestandards im Wohnbestand und Neubau werden massiv gefördert und Wärmespeichertechnologien erobern den Markt. Die Wertschöpfung bleibt in diesem System innerhalb der Regionen, so dass der zunächst höchst kostenintensive Umbau des alten Systems schon bis 2043 (WWF, 2009) mit steigenden Einnahmen und zumindest stabilen Energiepreisen gerechnet werden kann. Diese Entwicklung fordert einen hohen Grad an öffentlicher Akzeptanz, da die Bevölkerung als Verbraucher und Steuerzahler an der Realisierung dieses Systems beteiligt wird. Trotzdem werden die energiepolitischen Entscheidungen aufgrund des hohen Problembewusstseins der Menschen, besonders in Deutschland, getragen. Die Glaubwürdigkeit in die politischen Entscheidungsträger steigt und fördert das Demokratieverständnis. Insgesamt wirkt sich das breite Bündnis zum Schutz des Weltklimas stabilisierend auf ehemalige Krisenherde der Erde aus.

Die Förderung neuer Technologien insbesondere der Schlüsseltechnologien Material und Energieeffizienz ermöglicht Technologiesprünge, die sich auf Basis bereits heute sichtbarer Forschungsergebnisse ausmachen lassen (WWF, 2009). Durch die Lage des Standortes Lüneburg innerhalb der Metropolregion werden sich im Untersuchungsraum Hochtechnologiebranchen ansiedeln. Davon wird auch die Hochschule profitieren.

#### **5.3.4. 2050 100%-Szenario**

In der Studie des UBA 2010 wird untersucht, [...] „wie eine Stromerzeugung im Jahr 2050 aussehen kann, die vollständig auf erneuerbaren Energiequellen beruht“ (UBA, 2010). Hierzu wurden aus der technischen Perspektive drei archetypischen Szenarien einer erneuerbaren Stromversorgung identifiziert. Die Ergebnisse der Studie basieren auf der Modellierung des Szenarios „Regionenverbund“, welches mit Hilfe des SimEE-Modell vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES, 2009) berechnet wurde. Im Ergebnis kam die Studie zu dem Schluss, dass die die Stromversorgung zu 100% aus erneuerbaren Energien technisch und ökologisch vertretbar zu realisieren ist (UBA, 2010).

Die Berechnungen der Sektoren GHD und Industrie basieren auf den Rahmendaten des Referenzszenarios der WWF-Studie (UBA, 2010). Für die Ermittlung des Energieverbrauchs privater Haushalte, des Kälte- und Klimatisierungsbedarf im GHD-Sektor und der Elektromobilität folgt das UBA eigenen Annahmen.

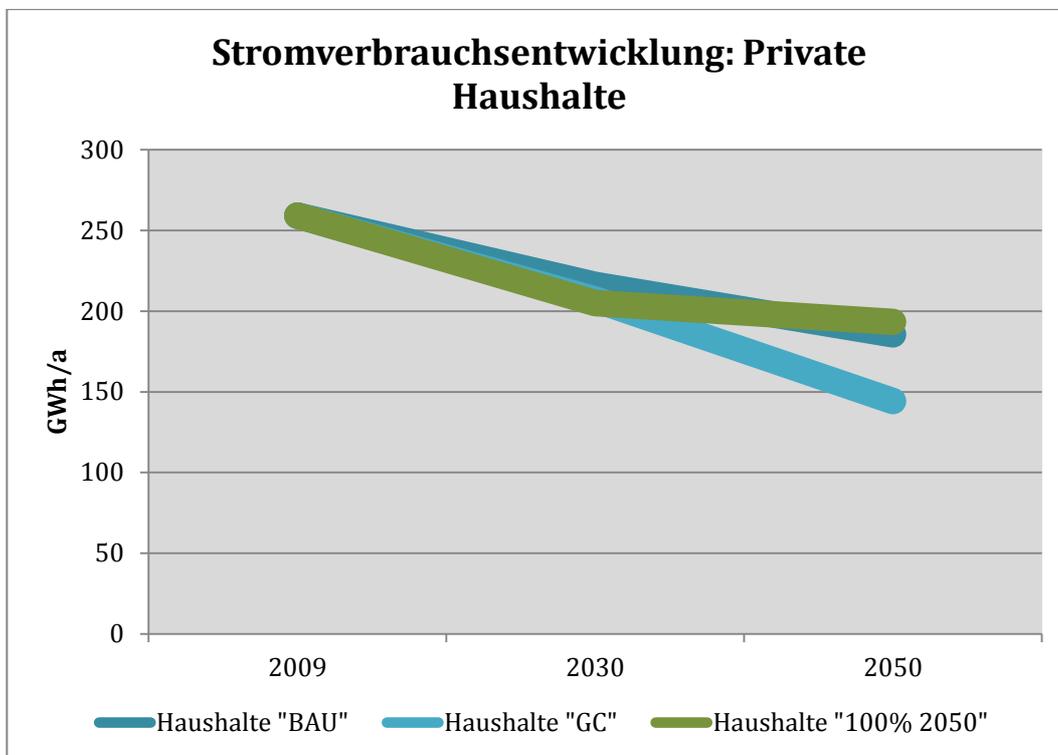
#### **5.3.5. Private Haushalte**

##### **BAU-Szenario**

Mit dem Trend zu mehr 1- und 2-Personenhaushalten ändern sich die Ansprüche der Haushaltsnutzung. Der klassische Herd wird zunehmend durch Elektrogeräte wie Mikrowelle und Kleingrill ersetzt. Auch der Außerhausverzehr der Kleinhaushalte und die Belieferung der zunehmenden Zahl älterer Menschen mit warmen Mahlzeiten werden die klassischen Strukturen mit Kühltruhe, Backofen und Herd (WWF, 2009).

Weiterhin werden die Haushaltsgeräte wie Kühlschränke, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler (Weiße Ware), Unterhaltungs-, Informations- und Kommunikationsgeräte (IKT), Beleuchtung, Klimageräte und Kleingeräte den Haushalt bestimmen. Die Steigerung der Energieeffizienz dieser Geräte wird bis zum Jahr 2050 vorangetrieben. Allerdings wird die zunehmende Ausstattung mit elektronischen Geräten weiter zunehmen. Insbesondere durch die Klimaerwärmung kommt auch der Gebäudekühlung eine immer wichtigere Rolle

zu. Laut WWF-Studie nimmt der Verbrauch von Elektrogeräten trotz steigender Gerätezahl von 18% um 21% ab (WWF, 2009).



**Abbildung 61 - Stromverbrauchsentwicklung privater Haushalte 2009-2050**

Der Stromverbrauch im Untersuchungsraum wird aufgrund der o. g. Faktoren bis zum Jahr 2030 um 16,5% zurückgehen. Bis zum Jahr 2050 werden insgesamt 28,3% Einsparung möglich sein. Die Berechnungen beruhen auf den Daten der Endenergieverbräuche der WWF-Studie vom Ausgangsjahr 2005-2050 (ebd.).

Die „elektrische Energie im Untersuchungsraum für das Szenario-Jahr“ ( $E_{SJ,U}$ ) berechnet sich aus dem Quotienten der „elektrischen Energie des Szenario-Jahres der WWF-Studie“ ( $E_{SJ,Ref}$ ) und der „elektrischen Energie des Ausgangsjahres der WWF-Studie“ ( $E_{aJ,Ref}$ ) multipliziert mit dem „Ausgangswert elektrische Energie im Untersuchungsraum“ ( $E_{aJ,U}$ ):

$$E_{SJ,U} = \left( \frac{E_{SJ,Ref}}{E_{aJ,Ref}} \right) \cdot E_{aJ,U}$$

### GC-Szenario

Im Untersuchungsraum geht der Stromverbrauch bis zum Jahr 2050 um 44% (WWF, 2009) zurück. Maßgeblich sei dies auf den flächendeckenden Einzug von Induktionsherden, und

die Steigerung der technischen Energieeffizienz bei Elektrogeräten zurückzuführen. „Die höhere Effizienzsteigerung wird unter anderem durch eine starke Marktdurchdringung mit wasserfreien Waschmaschinen, die keinen Trockner mehr benötigen und mit Magnet-Stromkühlschränken erreicht“ (ebd.), auch die Umstellung von Geräten wie etwa dem Fernseher auf optische Visoren tragen zur Stromeinsparung bei. Daneben reduzieren die eingeführten Passivhausstandards, auch für den Altbaubestand, den Stromverbrauch von Klimaanlagen erheblich (ebd.).

### **100% 2050-Szenario**

Auch in der Studie des UBA erfährt der private Haushaltssektor einen Rückgang im Stromverbrauch. Allerdings ist die Ersparnis geringer als in der WWF-Studie. Das UBA geht davon aus, dass bis zum Jahr 2050 die Minderungspotentiale elektrischer Geräte und Anlagen vollständig erschlossen sind. Gleichzeitig wird in der Studie allerdings davon ausgegangen, dass durch einen verstärkten Einsatz von Wärmepumpen in Zukunft nur ein vermindertes Stromeinsparpotential erzielt werden kann. Zudem wird der steigende Anteil an Elektromobilität mit eingerechnet (UBA, 2010).

Der Stromverbrauch im Sektor „private Haushalte“ geht dem 100% 2050-Szenario nach um 25% zurück.

### **5.3.6. GHD**

#### **BAU-Szenario**

Der GHD-Sektor erfährt bis zum Jahr 2050 insgesamt ein Branchenwachstum gegenüber dem Ausgangsjahr. Diese Entwicklung schlägt sich trotz effizienzsteigernden Maßnahmen in einem nahezu unveränderten Stromverbrauch nieder. Insbesondere der Verwendungszweck Kühlen und Lüften zur Klimatisierung der Räume erfährt laut WWF-Studie ein Anstieg des Energieverbrauchs um 300%. Zwar nimmt der Energieaufwand für Beleuchtung und durch den Einsatz Effizienter IKT deutlich ab und halbiert sich bis zum Jahr 2050. Allerdings fängt die Einsparung den erhöhten Klimatisierungsaufwand nicht auf (WWF, 2009). Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus ein Rückgang des Stromverbrauchs um knapp 1%.

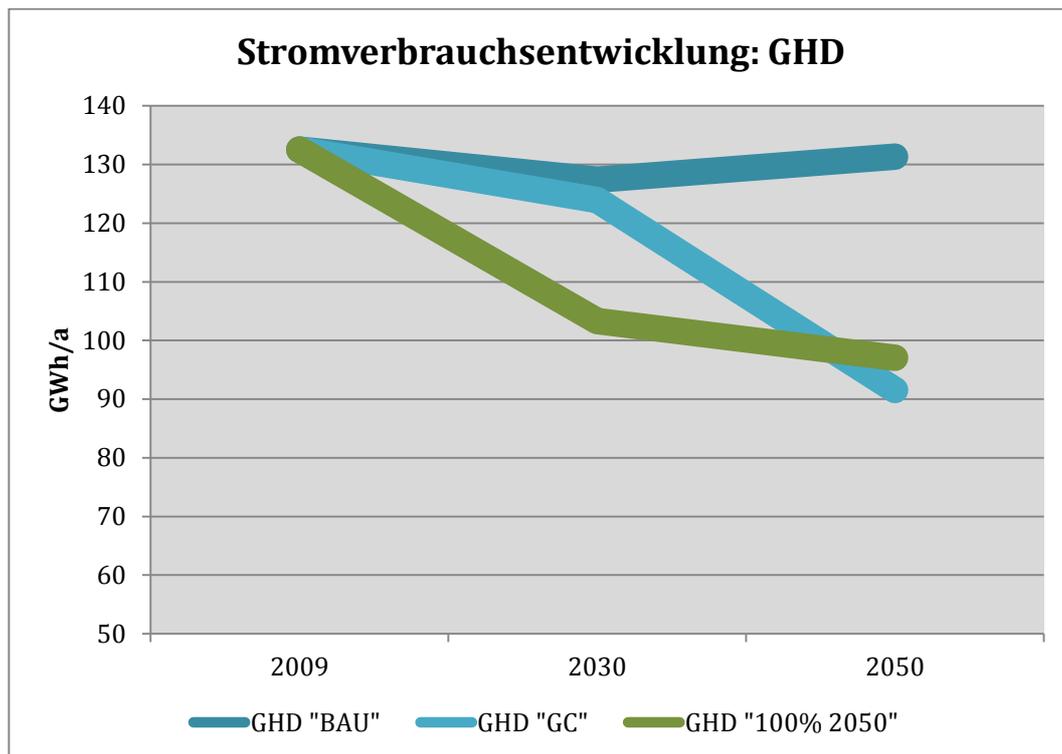


Abbildung 62 - Stromverbrauchsentwicklung GHD 2009-2050

### GC-Szenario

Hat der Stromverbrauch 2050 sich im BAU-Szenario gegenüber dem Ausgangsjahr kaum verändert, so erfährt dieser Sektor unter den gegebenen Bedingungen des GC-Szenarios eine Reduktion des Stromverbrauchs um 31%. Dieses Einsparpotential begründet sich durch eine zügig und vollständig angewandte Effizienzsteigerung der Gerätetechnologie und durch neue Technologien wie Tageslichtlenkungssysteme, neuartiger Kühltechniken und intelligente Prozessenergieanwendungen (WWF, 2009).

### 100% 2050-Szenario

Im Wesentlichen bestätigt das Umweltbundesamt die Annahmen der WWF-Studie. Ausgenommen ist hier der immense Anstieg der Klimatisierungsanwendungen. Zwar steigt der Bedarf laut UBA-Studie aufgrund des Klimawandels. Allerdings wird das technische Minderungspotential bspw. durch wirksamen Sonnenschutz, energiesparende Kühl- und Lüftungstechniken und optimierte Betriebsweisen nicht berücksichtigt (UBA, 2010). Das UBA geht dementsprechend lediglich von einem Mehrverbrauch von rund 150%. Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus ein Rückgang des Stromverbrauchs im GHD-Sektor bis 2050 um 27%.

### 5.3.7. Industrie

#### BAU-Szenario

Auch für die Entwicklungen im Sektor Industrie werden in einigen Branchen deutliche Wachstumsprozesse erwartet. Insbesondere hochwertige und wissensintensive Produkte mit steigender Wertdichte z. B. Werkstoffe gehören dazu (WWF, 2009). Weiterhin nehmen der Maschinen-, Fahrzeugbau, die Metallverarbeitung und die Chemie eine zentrale Rolle mit hohen Wachstumsraten am Wirtschaftsstandort ein (ebd.). Hinsichtlich effizienzsteigernder Maßnahmen wird der Sektor bald an die Grenzen des Möglichen stoßen. Schon heute werden aufgrund von erwünschten Kosteneinsparungen vor allem in energieintensiven Branchen die Prozesse weitestgehend optimiert. Die Senkung des Strombedarfs verläuft also auch für den Industrie-Sektor eher moderat. Für den Zeitraum 2009-2050 sinkt im Untersuchungsraum der Stromverbrauch um 10%.

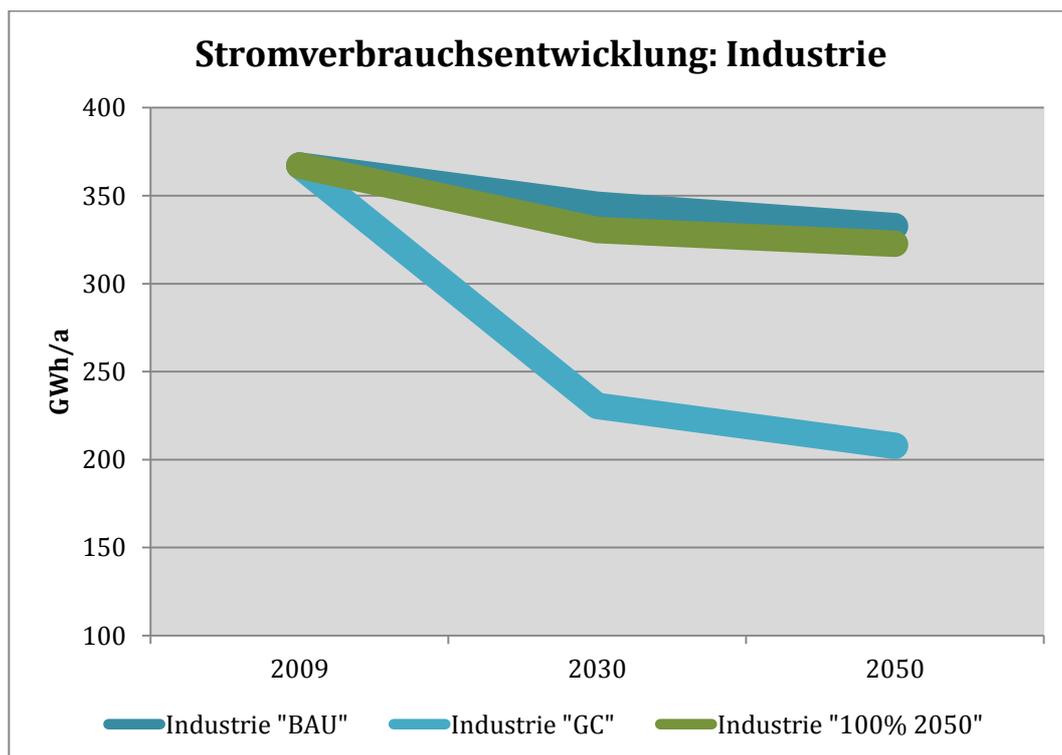


Abbildung 63 - Stromverbrauchsentwicklung Industrie 2009-2050

#### GC-Szenario

Gegenüber dem Referenz-Szenario der WWF-Studie kommt es branchenspezifisch aufgrund veränderter Nachfrage zu strukturellen Verschiebungen. Steigt der Bedarf an Gütern aus den Materialien Keramik, Hochleistungsgläsern, Dämmstoffen, Kunststoffen und neuen Werkstoff-

fen so wird sich die sinkende Nachfrage nach herkömmlichen Baustoffen wie etwa Baustahl negativ auf das Wachstum der Metallerzeugung auswirken (WWF, 2009). Im Wesentlichen folgt die Industrie in der Stromeinsparung den Annahmen des GHD-Sektors. Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus eine Verbrauchsminderung von 43%.

### 100% 2050-Szenario

Den Stromverbrauchsentwicklungen bis 2050 folgt die UBA-Studie im Wesentlichen den Annahmen des GC-Szenarios, was der hohen Deckungsgrad beider Szenarien bestätigt. Bis 2050 weist der Industrie-Sektor ein Einsparvolumen von 12% auf.

### 5.3.8. Gesamtstromverbrauch

Der Gesamtstromverbrauch im Untersuchungsraum beläuft sich im Jahr 2009 nach Angaben der EVU auf 760 GWh das entspricht einem Verbrauch pro Kopf von 4.290 kWh. Die Entwicklung des Prokopfverbrauchs ist abhängig vom gewählten Szenario.

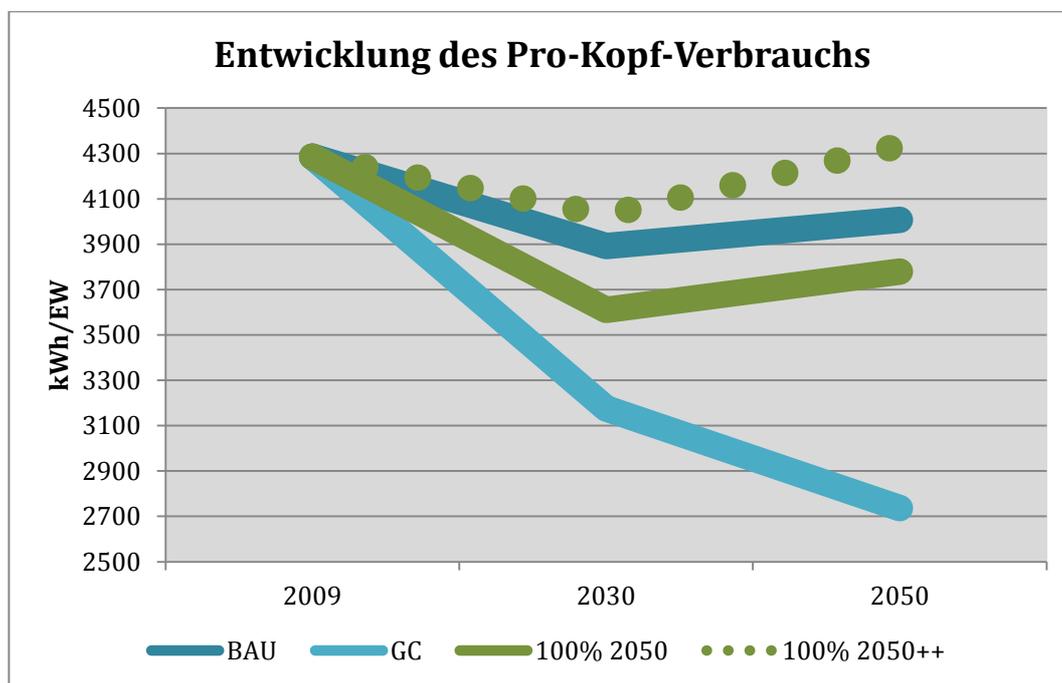


Abbildung 64 - Pro-Kopf-Verbrauchsentwicklung (Strom) 2009-2050

Es wird deutlich, dass mit Ausnahme des GC-Szenarios der Stromverbrauch pro Kopf 2050 gegenüber 2030 wieder ansteigt. Dies begründet sich durch die sektoriell übergreifende Umstellung von Brennstoff- auf Stromanwendungen. Durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen und der eMobilität steigt im 100% 2050-Szenario++ der Prokopfwert über den Ausgangswert des Jahres 2009.

Die Reduktion des Gesamtstromverbrauchs im Untersuchungsraum bis zum Jahr 2050 stellt sich in den einzelnen Szenarien wie folgt dar:

- BAU-Szenario: 14,4%
- GC-Szenario: 41,5%
- 100% 2050-Szenario: 19,2%
- 100% 2050-Szenario + eMobilität: 7,4%

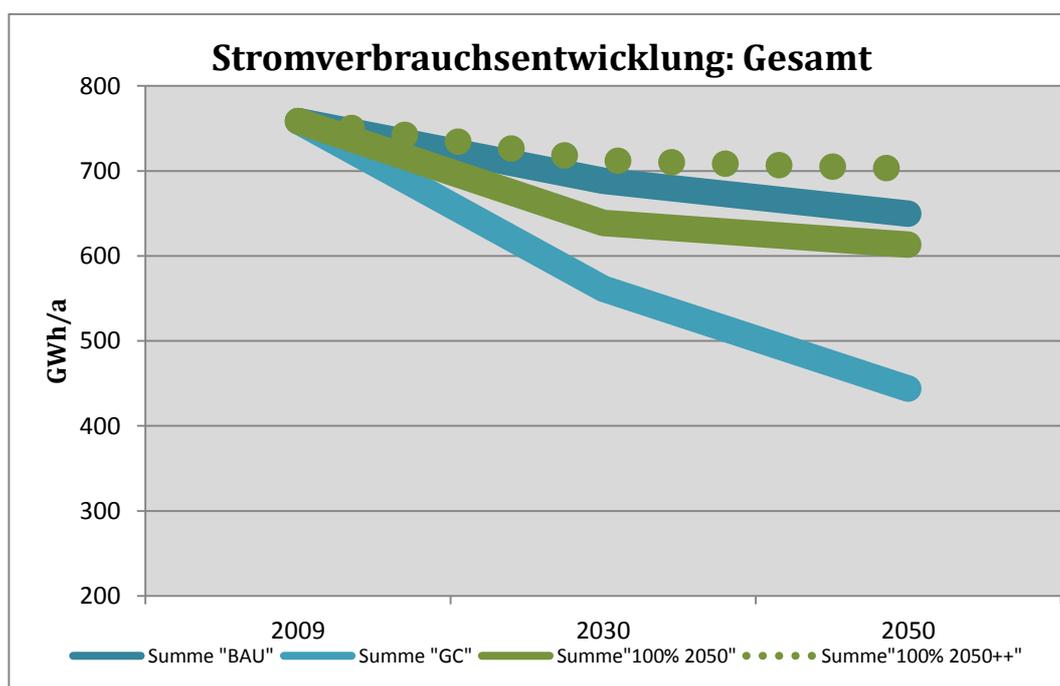


Abbildung 65 - Stromverbrauchsentwicklung Gesamt 2009-2050

## **6. Wärme**

### **6.1. Methodik**

Das Vorgehen zur Identifizierung des Wärmeverbrauchs im Landkreis (LK) und der Hansestadt Lüneburg (HLG) heute und in den Jahren 2030 und 2050 unterscheidet sich wesentlich zur Stromverbrauchsanalyse. Wie im vorangegangenen Kapitel 5 folgt der methodischen Abgrenzung zunächst die Beschreibung des Vorgehens zur Datenerhebung und Datensystematisierung der Sektoren. Es folgt die Ermittlung des Ist-Verbrauchs und anschließend die Entwicklung von Wärmeverbrauchsannahmen im Untersuchungsraum für die Jahre 2030 und 2050.

#### **6.1.1. Abgrenzung**

Das vorliegende Kapitel bezieht sich ausschließlich auf den Wärmeverbrauch eines Verbrauchsjahres innerhalb der Grenzen des Landkreises Lüneburg. Wie im vorangegangenen Kapitel 5 bildet ein Verbrauchsjahr den Lieferzeitraum ab und Abweichungen bzgl. der Abrechnungstage werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Die Datengrundlage der Ist-Verbräuche eines Verbrauchsjahres beruht auf den Angaben der EVU, Bundesdurchschnittswerten und den Angaben der 13 Gebietskörperschaften zu den Liegenschaftsverbräuchen. Ferner werden auch die Annahmen der Szenarien zum zukünftigen Wärmeverbrauch 2030 und 2050 auf Grundlage der im Stromverbrauchsszenario gewählten Referenzszenarien berechnet.

Der Genauigkeitsgrad erhobener Wärmedaten gegenüber den Stromdaten ist differenziert zu betrachten. Im Gegensatz zur Netzgebundenheit des Stroms setzt sich der Wärmemarkt aus uneinheitlichen Verteilnetzstrukturen mit verschiedenen Brennstoffarten und Feuerungssystemen zusammen. Erdgas bspw. kann sowohl durch das Erdgasnetz als auch kundennah in Erdgastanks bereitgestellt werden. Heizöl, Holz und Kohle werden ebenfalls beim Verbraucher gebunkert. Aus diesem Grund werden zur Wärmeverbrauchsanalyse Bundesdurchschnittswerte hinzugezogen, die den Ist-Stand im Untersuchungsraum annäherungsweise abbilden.

Die erhobenen Daten zu den Feuerungsanlagen durch die Schornsteinfeger-Innung Lüneburg können nur bedingt als Vergleichsparameter für Bundesdurchschnittswerte herangezogen werden, da diese Daten weder regional nach GK noch nach Sektoren gegliedert sind. Auch Daten bzgl. des Sanierungsgrades des Wohnungsbestands liegen im Untersuchungsraum nicht vor. Der Wärmeverbrauch nach Sanierungsgrad und Baualtersklassen wird somit

aus den Berechnungen der LSKN und des UBA ermittelt. Die Grundlage zur Berechnung des Ist-Verbrauchs einzelner Sektoren bilden die Gasabgabedaten der EVU.

### **6.1.2. Erfassung und Systematisierung der Datengrundlage**

#### **Liegenschaftsverbräuche**

Die Erfassung und Systematisierung der Liegenschaftsverbrauchsdaten folgt dem Vorgehen der Stromdatenerhebung. Eine Aussage über die Verfügbarkeit von Wärmedaten kann nicht vorgenommen werden, da eine detaillierte Differenzierung nach Brennstoffen nicht vorliegt. Zur Bewertung der Energieverbrauchswerte einzelner ausgewählter Liegenschaftsformen hinsichtlich der Energieeffizienz wurden die Vergleichswerte (Wärme) des BMVBS (BMVBS, 2009) herangezogen. Der Ist-Verbrauch für das Jahr 2009 wird aus den Gasabgabedaten der EVU und Bundesdurchschnittswerten (Prognos, 2009) errechnet.

#### **Private Haushaltsverbräuche**

Die Datengrundlage der privaten Haushalte im Untersuchungsraum beruht auf den Gasabgabewerten der EVU, den Berechnungen der LSKN zur Gebäude- und Wohnungsfortschreibung 1986-2010 (LSKN, 2012) und den Angaben des UBA zum Sanierungsgrad (UBA, 2010) und zum Wärmebedarf nach Baualtersklassen (UBA, 2007). Anhand dieser Referenzdaten werden einerseits der Ist-Stand des Wärmeverbrauchs und andererseits der Wohnungsbestand nach Baualtersklassen mit dem entsprechenden Wärmebedarf ermittelt.

#### **Industrie- und GHD**

Für die Erhebung von Wärmeverbrauchsdaten aus Industrie und dem GHD-Sektor werden die Angaben der EVU und Bundesdurchschnittswerte herangezogen. Maßgeblich basieren die Vergleichswerte für die Hochrechnungen auf den Berechnungen der Prognos AG (WWF, 2009).

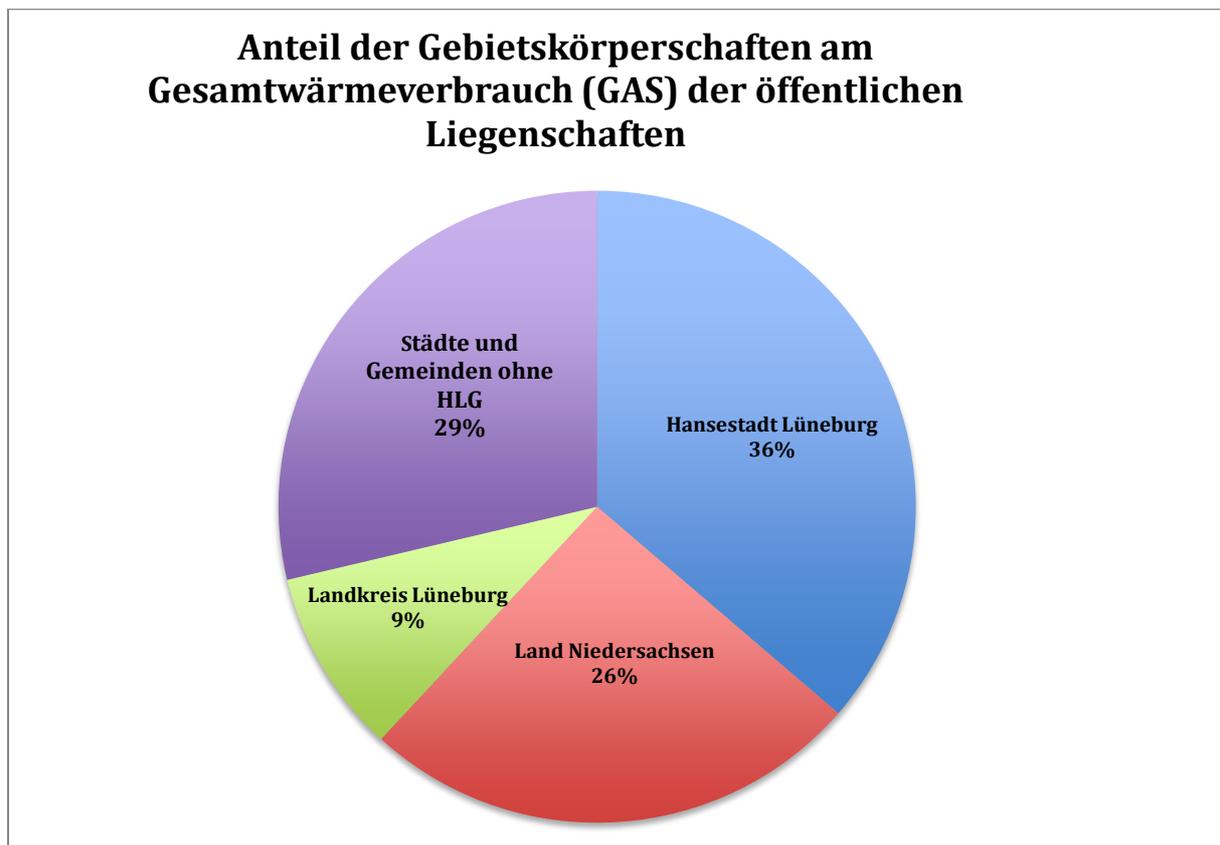
## **6.2. Wärmeverbrauch nach Sektoren**

Die Ermittlung des sektoralen Ist-Stands von Wärmeverbräuchen bildet wie im vorangegangenen Kapitel die Grund- und Ausgangslage zur Entwicklung der Wärmeverbrauchsszenarien. Die Ist-Verbräuche werden von öffentlichen Liegenschaften, privaten Haushalten, Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen berechnet. Die Darstellung der Ist-Daten er-

folgt zunächst getrennt, bevor am Ende dieses Abschnitts daraus der Gesamtwärmeverbrauch des Untersuchungsraumes ermittelt wird.

### 6.2.1. Liegenschaften

Die Verbräuche der öffentlichen Liegenschaften werden aus dem erhobenen Datenbestand ermittelt. Für die Darstellung des anteiligen Verbrauchs der GK am Gesamtverbrauch der Liegenschaften im Untersuchungsraum werden die Angaben zur Gasabgabe der EVU verwendet. Da die EVU keine Verbrauchsangaben zu den Landes- und Kreisliegenschaften bereitstellen konnten, fließen hier die erhobenen Verbrauchsdaten ein. Der Gesamtwärmeverbrauch einer GK ist die Summe des Wärmeverbrauchs der bewirtschafteten öffentlichen Liegenschaften.



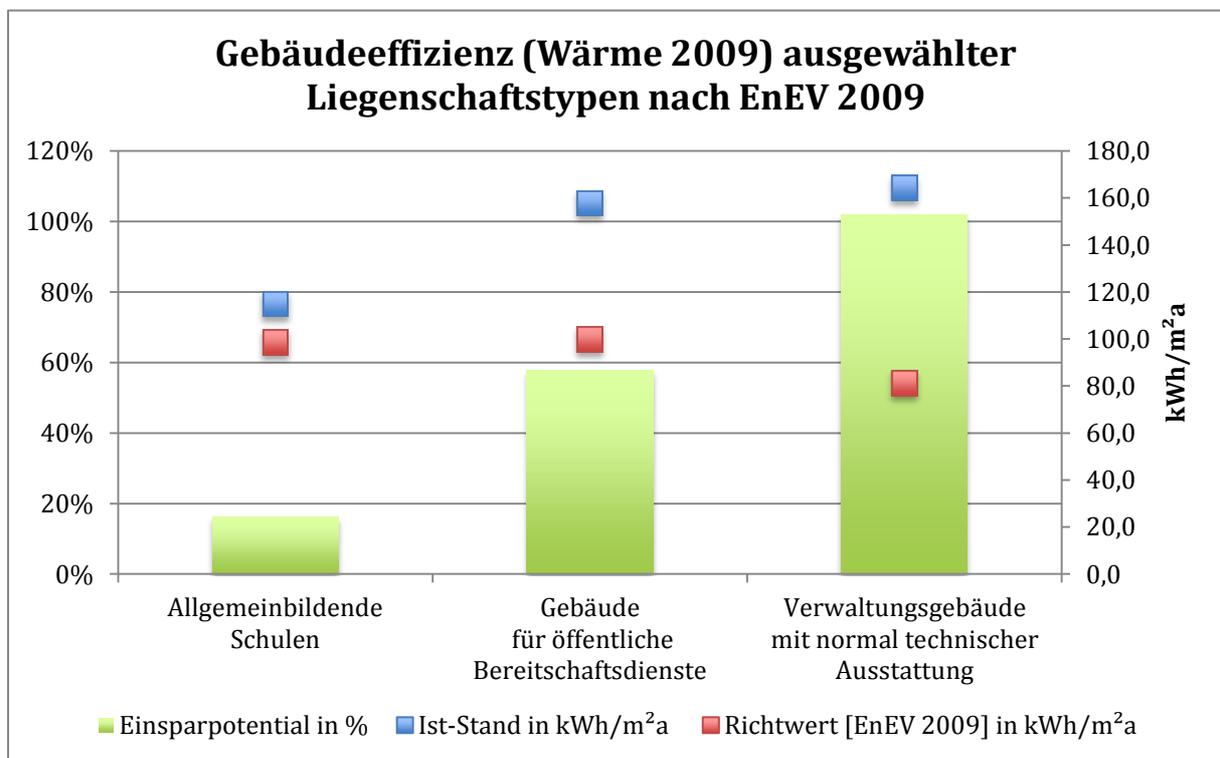
**Abbildung 66 - Anteiliger Wärmeverbrauch der GK 2009 in Prozent**

Die Abbildung 53 zeigt den anteiligen Verbrauch der GK im Untersuchungsraum. Den größten Anteil am Wärmeverbrauch nimmt mit 36% die Hansestadt Lüneburg ein. In der Summe liegt der Verbrauch der Städte und Gemeinden unter dem Verbrauch der Landesliegenschaften und über dem des Landkreises.

Zur Bestimmung der Gebäudeeffizienz werden ausgewählte Liegenschaftstypen unabhängig von der zuständigen GK anhand des BWZK-Schlüssels für das Bezugsjahr 2009 herausgefiltert und mit den Vergleichswerten des BMVBS (BMVBS, 2009) verglichen. Von den insgesamt 181 Datensätzen können 77 genutzt werden, was einem Anteil von knapp 42% entspricht. Wie in dem vorangegangenen Kapitel wurden Parkplatzanlagen, Friedhofsanlagen oder Schulen, die Verbräuche der angegliederten Sporthallen nicht separiert haben nicht berücksichtigt.

Als Kriterium für die Verwendbarkeit der erhobenen Daten eines Bezugsjahres müssen Flächenangaben (NGF), Wärmeverbrauch (kWh/a) und die Möglichkeit der „Zuordnung zu einem BWZK-Schlüssel“ einer Liegenschaft vorliegen. Die größten Datenmengen konnten für das Verbrauchsjahr 2009 erhoben werden. Aus diesem Grund wurde die Eingrenzung auf das Bezugsjahr 2009 vorgenommen. Die jeweiligen Richtwerte werden den spezifischen Positionen (BWZK-Schlüssel) zugewiesen. Die Effizienz hinsichtlich des Wärmeverbrauchs wird von folgenden Gebäudetypen bestimmt:

- Verwaltungsgebäude mit normal technischer Ausstattung (BWZK 1300).
- Allgemeinbildende Schulen (BWZK 4100).
- Gebäude für öffentliche Bereitschaftsdienste (BWZK 7700).



**Abbildung 67 - Energieeffizienz (Wärme) der Liegenschaften**  
Datengrundlage: BMVBS, 2009

Das Ergebnis der Berechnungen zu den Effizienzwerten stellt sich wie folgt dar:

Die Verbräuche der einzelnen Gebäudetypen liegen mit 16% (Allgemeinbildende Schulen), 58% (Gebäude für öffentliche Bereitschaftsdienste) und 102% (Verwaltungsgebäude mit normal technischer Ausstattung) Abweichung teilweise sehr deutlich über den Richtwerten.

In der Summe beträgt der Verbrauch aller Liegenschaften im Untersuchungsraum 48.681 MWh (Gas), das entspricht einem Anteil von 2,4% an der Gesamtgasabgabe. Anhand der Hochrechnungen (Bundesdurchschnittswerte) ergibt sich ein Gesamtwärmeverbrauch von 112.769 MWh. Daraus ergibt sich für die öffentlichen Liegenschaften ein durchschnittlicher Wärmeverbrauch von 637 kWh/a und Einwohner.

### 6.2.2. Private Haushalte

Die Verbräuche privater Haushalte werden aus der Gasabgabe der EVU und Bundesdurchschnittswerten berechnet. Daneben erfolgt die Berechnung des Wärmeverbrauchs nach Baualtersklassen auf Grundlage von Daten des LSKN und des UBA. Im Untersuchungsraum ist der Wohnungsbestand mit 54% überwiegend von Gebäuden der Baualtersklasse vor 1986 geprägt. Hierzu zählen, insbesondere in der Hansestadt Lüneburg, ein großer Teil historischer denkmalgeschützter Bauwerke. Der Wärmebedarf von Gebäuden (Abbildung 68) der Baualtersklasse vor 1986 liegt mit 68% über dem Bedarf von Gebäuden der Baualtersklasse 2010 und beinhaltet ein enormes Einsparpotential.

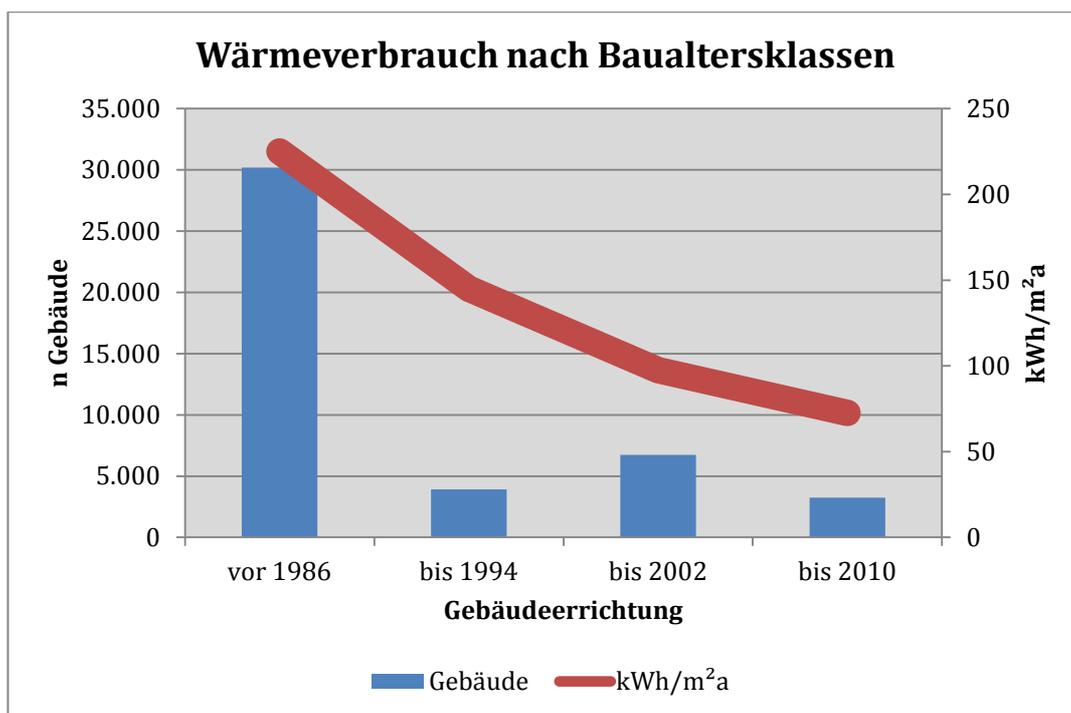


Abbildung 68 - Anzahl und Stromverbrauch der Haushalte nach Haushaltsgröße 2009  
Datengrundlage: NBank, 2010; BDEW, 2010

Der Gesamtwärmeverbrauch der privaten Haushalte im Untersuchungsraum beläuft sich den Hochrechnungen nach auf 1.517.295 MWh. Das entspricht einem Gesamtanteil von 43%. Umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch im Jahr 2009 von 8.570 kWh pro Einwohner.

### 6.2.3. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und Industrie

Die Angaben zum Ist-Stand des Wärmeverbrauchs aus GHD und Industrie stellen sich nach den gesetzten Kriterien anteilig wie folgt dar (Abbildung 69):

79% des gewerblichen Wärmeverbrauchs deckt die Industrie im Untersuchungsraum ab. Den weitaus größten Anteil an Verbräuchen im Industrie-Sektor verbucht die Hansestadt Lüneburg mit einem Anteil von 99% gegenüber den restlichen Städten und Gemeinden. Der GHD-Anteil der Hansestadt Lüneburg beträgt im Vergleich zu den restlichen Städten und Gemeinden 64%. Der Gesamtwärmeverbrauch der Sektoren GHD und Industrie beläuft sich im Bezugsjahr 2009 auf knapp 2.033 GWh. Das entspricht einem Gesamtanteil von 45%. Umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von 11.484 kWh pro Einwohner. Wegen der ungenauen Datengrundlage zu den einzelnen Branchen und deren Mitarbeiterzahlen können keine Vergleiche zu branchenspezifischen Durchschnittswerten vorgenommen werden.

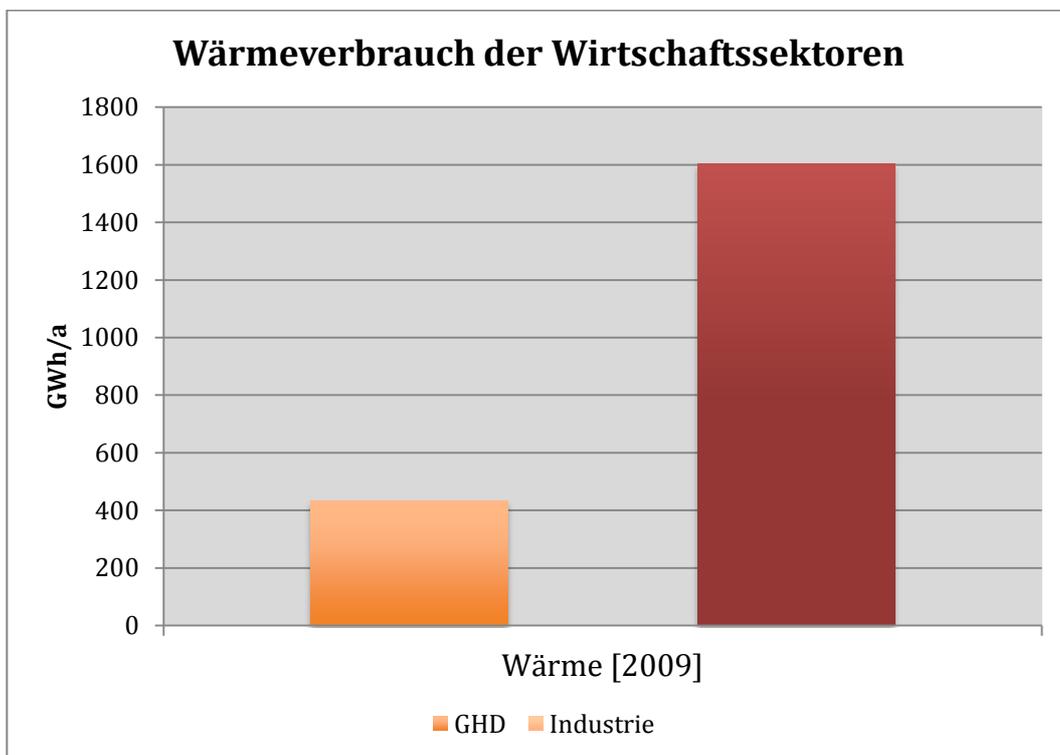


Abbildung 69 - Anteiliger Verbrauch (Wärme) der Wirtschaftssektoren

## 6.3. Szenarien

### 6.3.1. Rahmendaten und Annahmen für die Szenarien

Die in dieser Arbeit entwickelten Szenarien zum Wärmeverbrauch beruhen im Wesentlichen auf den Annahmen der Prognos AG und des Umweltbundesamtes. Die Modellierung erfolgt auf der Grundlage gemeinsamer Rahmendaten zur demographischen Entwicklung und wirtschaftlichen Entwicklung (WWF, 2009). Die sozioökonomischen Rahmenbedingungen für Szenarien wurden bereits in Kapitel 5 erörtert.

Einen wesentlichen Anteil an Energieeinsparungen im Wärmeverbrauch haben Sanierungsmaßnahmen im Altbaubestand von Wohngebäuden. Laut UBA ist eine vollständige Sanierung bis 2050 möglich (UBA, 2010) allerdings müsste dazu die Sanierungsrate von derzeit etwa 1% auf 3,3% steigen (Abbildung 70).

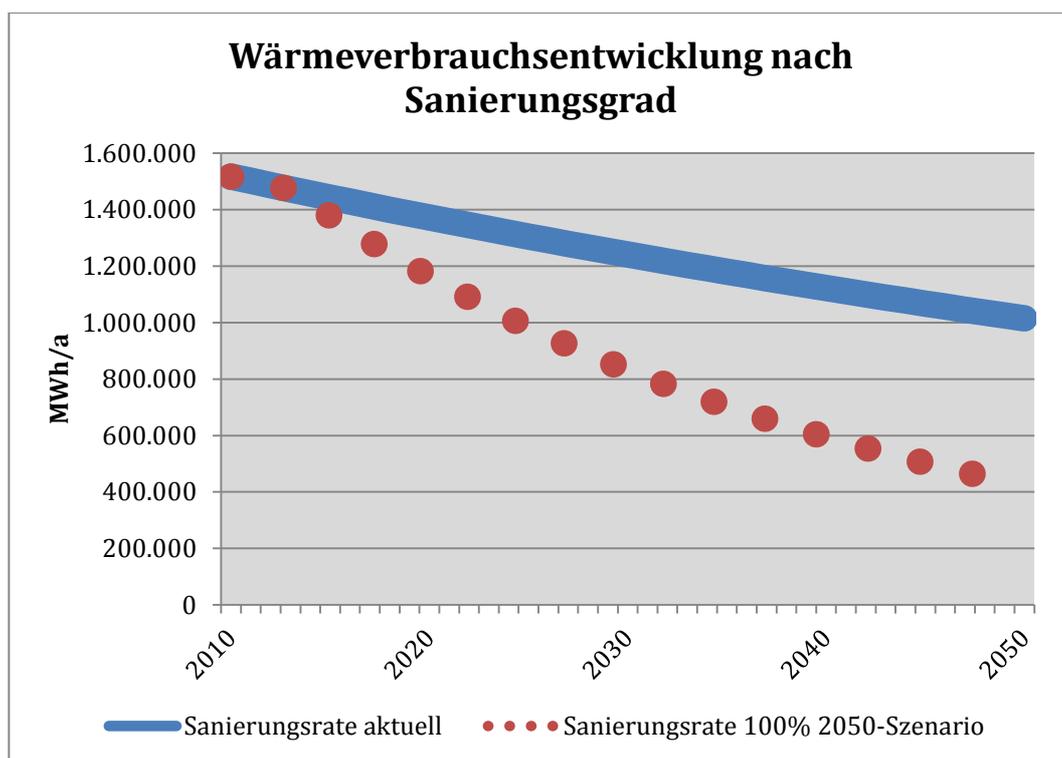


Abbildung 70 - Wärmeverbrauchsentwicklung nach Sanierungsgrad

### 6.3.2. BUSINESS AS USUAL-Szenario

Das Szenario folgt den Annahmen aus Kapitel 5.

### 6.3.3. GOOD CASE-Szenario

Das Szenario folgt den Annahmen aus Kapitel 5.

#### 6.3.4. 2050 100%-Szenario

Das Szenario folgt den Annahmen aus Kapitel 5.

#### 6.3.5. Private Haushalte

##### BAU-Szenario

In den privaten Haushalten setzt sich insgesamt der Trend weg von Öl- und Kohleheizungen (Reduktion um 23%) sowie den elektrischen Widerstandsheizungen (Reduktion um 66%) fort. Bis zum Jahr 2030 erfährt die Gasbeheizte Wohnfläche einen Zuwachs. Bis zum Jahr 2050 ist auch diese Anwendung rückläufig und insgesamt beträgt der Gaszuwachs gegenüber dem Ausgangsjahr 2009 um 9% (WWF, 2009). Stetigen Zuwachs erhalten vor allem Wärmepumpen, welche insbesondere im 1- und 2-Familienhaus installiert werden. Auch die fernwärme-, holz- und solarwärmebeheizte Wohnfläche wächst gegenüber dem Ausgangsjahr. Gas und Öl allerdings bleiben in diesem Szenario mit einem Anteil von 70% weiterhin die wichtigsten Energieträger (ebd.). Bis zum Jahr 2050 wird die Neubaurate im Untersuchungsraum gegenüber dem Ausgangsjahr 2009 um 35% zurückgehen. Die Sanierungsrate liegt im Betrachtungszeitraum stabil bei 1,1% und erreicht im Mittel einen Wärmeleistungsbedarf von 30% gegenüber den Neubauten. Die Standards für Neubauten werden durch eine Verschärfung der EnEV alle fünf Jahre neu angepasst, bis sie im Jahr 2050 den Anforderungen des Passivhausstandard von 15 kWh/m<sup>2</sup> entspricht (ebd.).

Neben der energetischen Qualität eines Gebäudes haben auch subjektive Einflussfaktoren (Lüftungsverhalten, individuelle Temperaturregulierung) Auswirkungen auf den Wärmeverbrauch. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass das Nutzungsverhalten sich nicht gravierend ändert. Die Einsparungen an Wärmeenergie sind über den Untersuchungszeitraum ausschließlich auf demographische und effizienzsteigernde Effekte zurückzuführen. Die „Wärmeenergie für das Szenario-Jahr“ ( $E_{S,J,U}$ ) berechnet sich aus dem Quotienten der „Wärmeenergie des Szenario-Jahres der WWF-Studie“ ( $E_{S,J,Ref}$ ) und der „Wärmeenergie des Ausgangsjahres der WWF-Studie“ ( $E_{a,J,Ref}$ ) multipliziert mit dem hochgerechneten Wert der Wärmeenergie im Untersuchungsraum“ ( $E_{a,J,U}$ ):

$$E_{S,J,U} = \left( \frac{E_{S,J,Ref}}{E_{a,J,Ref}} \right) \cdot E_{a,J,U}$$

Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs privater Haushalte um 46%.

## GC-Szenario

Dieses Szenario unterscheidet sich insbesondere in der Beheizungsstruktur zum BAU-Szenario. Ab dem Jahr 2015 werden in Neubauten keine Öl-, Kohle oder Stromdirektheizungen mehr eingebaut. Auch Gas verliert an Bedeutung und wird im Jahr lediglich nur noch zu 30% in Neubauten in Form von Gas-Brennstoffzellen basierte Heizanlagen eingesetzt. Der Anteil von Biogas beläuft sich bis dahin auf rund 8%. Zwar steigt die Anwendung von Holzheizungen bis zum Jahr 2020, allerdings stagniert dieser Schub aufgrund der Nutzungskonkurrenz zur Ressource Holz (WWF, 2009).

Die Beheizungsstruktur im Wohnungsbestand erfährt insbesondere durch den Einsatz von Solarthermie und Umgebungswärme in Kombination mit Langzeitspeichern eine höhere Substitutionsrate. Bspw. weitet sich die solarthermische Anwendung um das 600-fache aus. Insgesamt wird die Nachfrage nach Wärme infolge einer erhöhten Sanierungsrate (2%) und der Vorgabe von Passivhausstandards (15 kWh/m<sup>2</sup>a Heizwärme) bei Neubauten bis zum Jahr 2020 abnehmen. Der Trend zum Null-Energiehaus setzt sich fort und im Jahr 2050 wird ein spezifischer Bedarfswert von 5 kWh/m<sup>2</sup>a erreicht. Bei Altbauten wird von einem Bedarfswert von 10 kWh/m<sup>2</sup>a ausgegangen. In Folge dieser Maßnahmen reduziert sich der spezifische Raumwärmebedarf um über 85% (WWF, 2009).

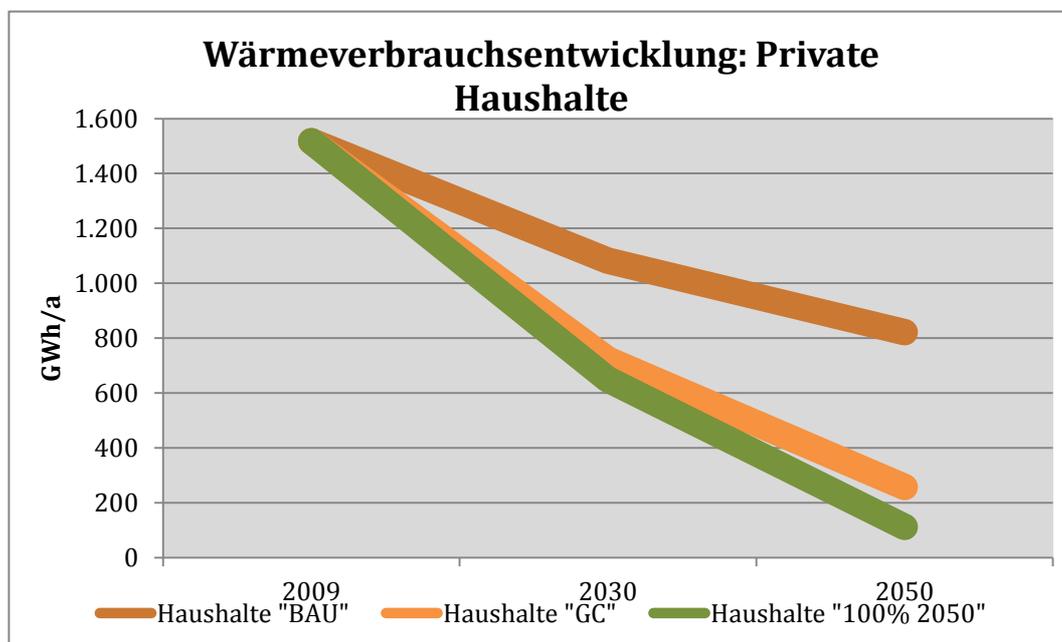


Abbildung 71 - Wärmeverbrauchsentwicklung privater Haushalte 2009-2050

Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs privater Haushalte um 83%.

### 100% 2050-Szenario

In den Annahmen zur künftigen Entwicklung des Gebäudebestandes geht das UBA davon aus, dass eine vollständige Sanierung bis zum Jahr 2050 möglich ist (UBA, 2010). Der spezifische Wärmebedarf aller Altbauten sinkt bis 2050 auf 30 kWh/m<sup>2</sup>a. Darin sind bspw. Faktoren wie Denkmalschutz - eine vollständige Sanierung geschützter Gebäude ist nicht möglich – berücksichtigt. Bis zum Jahr 2020 wird der zulässige Nutzenergiebedarf für Wohnungsneubauten auf 10 kWh/m<sup>2</sup>a festgesetzt. Sowohl im Neubau als auch im Altbaubestand wird der Wärmeverlust durch Fensterlüften durch die Anwendung hocheffizienter Lüftungssysteme kompensiert. Somit reduziert sich der spezifische Wärmebedarf aller Gebäude von derzeit 144 kWh/m<sup>2</sup>a auf 26,4 kWh/m<sup>2</sup>a im Jahr 2050 (ebd.).

Wie im GC-Szenario wird hier davon ausgegangen, dass neben solar- die geothermischen Anwendungen einen Großteil der Wärmeversorgung übernehmen. Dazu werden elektrische Wärmepumpen mit Pufferspeichern eingesetzt (ebd.). Für den Untersuchungsraum ergibt sich bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs privater Haushalte um 93%.

#### 6.3.6. GHD

##### BAU-Szenario

Der Wärmebedarf von Gebäuden des GHD-Sektors sinkt im Mittel stärker als bei Wohngebäuden, da in der Regel die Abriss- und Neubaurate dieses Sektors größer ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass Entwicklung der Energiestandards sich an denen der privaten Haushalte orientieren. Nach Verwendungszwecken erfährt der Raumwärmebedarf einen Rückgang auf nahezu Null, während Prozesswärmeanwendungen im selben Betrachtungszeitraum erheblich zunehmen (WWF, 2009).

Für den starken Rückgang des Raumwärmebedarfs nimmt die WWF-Studie an, dass die Gebäudefläche sich insgesamt bis zum Jahr 2050 um 15% reduziert und sich der spezifische Energiebedarf durch Effizienzmaßnahmen und durch die Klimaerwärmung (kWh/m<sup>2</sup>a) verringert. Prozesswärmeanwendungen werden kontinuierlich verbessert und die Abwärme wird verstärkt genutzt (ebd.). Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs im GHD-Sektor um 71%.

##### GC-Szenario

Das GC-Szenario folgt im Wesentlichen den Annahmen des Bau-Szenarios. Die Bereitstellung von Raumwärme wird nahezu gen Null zurückgehen und auch die Steigerung der Energieeffizienz von Prozesswärmeanwendungen folgt den Angaben des vorangegangenen

Szenarios (WWF, 2009). Insgesamt werden die Einsparpotentiale schneller ausgeschöpft und für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs im GHD-Sektor insgesamt um 75%.

### 100% 2050-Szenario

Die Anwendungen zur Wärmeverbrauchsentwicklung des Referenzszenarios der WWF-Studie werden vom UBA, wie schon im Stromverbrauchsszenario des GHD-Sektors angemerkt, als plausibel eingestuft. Strom wird 2050 anstelle von Brennstoffen für die Wärmeproduktion eingesetzt. Prozesswärmeanwendungen werden dahingehend optimiert, dass Effizienzsteigerungen den Verbrauch weiter reduzieren und die Abwärmenutzung zur Erreichung eines höheren Wirkungsgrades beitragen (UBA, 2010). Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs im GHD-Sektor um 79%.

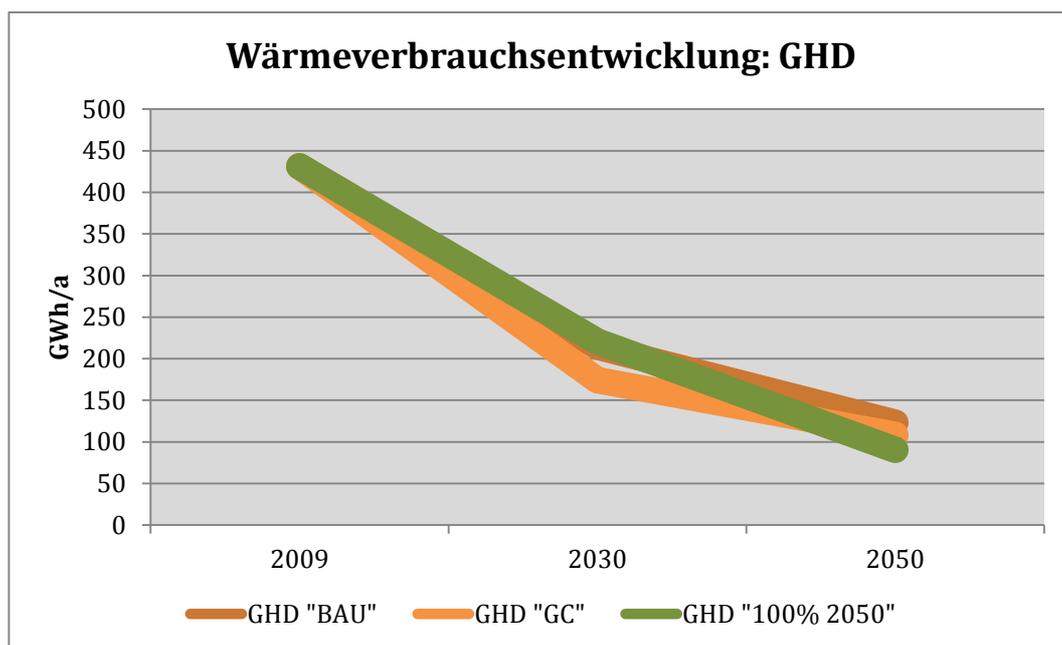


Abbildung 72 - Wärmeverbrauchsentwicklung GHD 2009-2050

### 6.3.7. Industrie

#### BAU-Szenario

Die Anwendungen für die Erzeugung von Raumwärme der Industrieunternehmen im BAU-Szenario folgen den Annahmen des GHD-Sektors. Allerdings werden nicht die Abriss- und Neubauraten wie bei den GHD zu verzeichnen sein. Hinzu kommt, dass Raumwärme ver-

stärkt aus Niedertemperaturanwendungen aus der Abwärme von Prozessen erzeugt wird, was Investitionen in die Gebäudehülle unrentabel macht. Dies führt zu einer Reduktion des Energieverbrauchs für die Bereitstellung der Raumwärme von 42%. Dominieren und nur leicht verringern werden sich die Prozesswärmeanwendungen bis 2050. Allerdings sinkt deren spezifischer Energieeinsatz durch Effizienzmaßnahmen, wie elektronische Leitsystemsteuerung von Prozessen, Wärmerückgewinnung, Reduktion der Abgasverluste, neuartige Prozessdesigns und Energieerzeugung durch Substitution brennstoffbetriebener Öfen durch Elektroöfen um 24% (WWF, 2009). Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs im Industrie-Sektor um 27%.

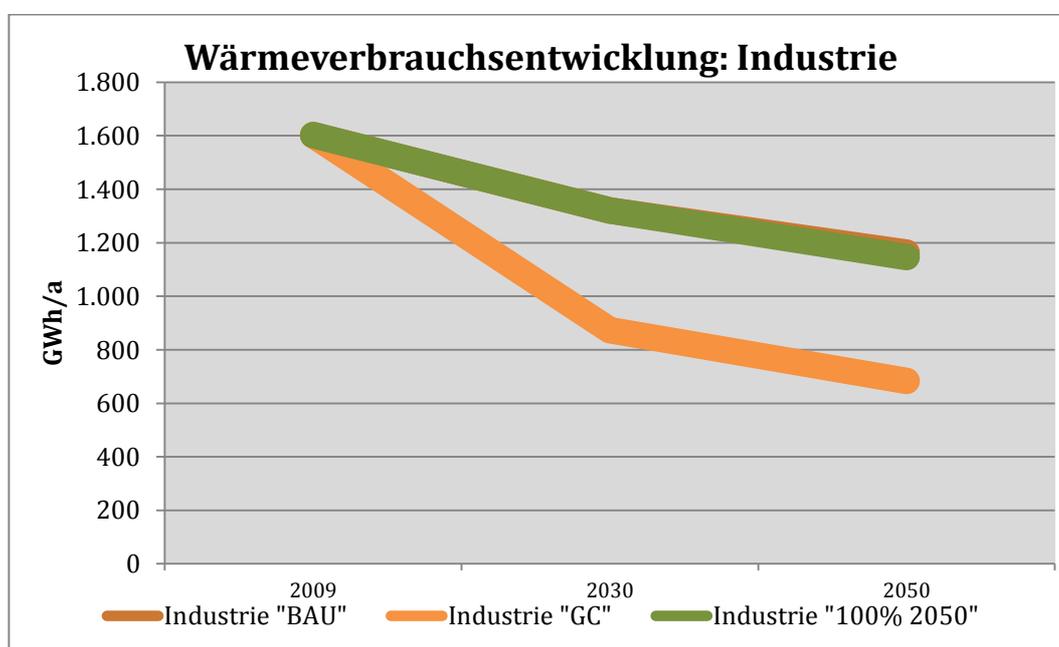


Abbildung 73 - Wärmeverbrauchsentwicklung Industrie 2009-2050

### GC-Szenario

Wie schon im GC-Szenario (Strom) beschrieben, werden durch Technologiesprünge Effizienzinnovationen eingeleitet, die maßgeblichen Einfluss auf den Strukturwandel im Sektor Industrie ausüben. Diese Innovationen bewirken gegenüber dem BAU-Szenario einen erhöhten Reduktionsgrad im Wärmeverbrauch und Effizienzmaßnahmen werden insgesamt schneller und vollständig umgesetzt. Hinzu kommen neue Prozesssteuerungssysteme und Produktpaletten, die eine weitere Absenkung bis dahin Energieintensiver Prozesse etwa das Herabsenken des Prozesswärmebedarfs mittels katalytischer und biologischer Anwendungen in der Chemie. Der Brennstoffeinsatz wird durch die genannten Faktoren erheblich reduziert. Die Raumwärmeanwendung des Industriesektors folgt den Annahmen des Referenz-

szenarios. Allerdings wirken sich die Prozessumstellungen insgesamt positiv auf den Energieeinsatz für Raumwärmeanwendungen gegenüber dem BAU-Szenario aus (WWF, 2009). Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs im Industrie-Sektor um 57%.

### 100% 2050-Szenario

Das UBA schätzt die erschließbaren Verbesserungspotentiale im Anwendungsbereich Wärme relativ gering ein, da aus Gründen der Kostenreduktion schon heute permanent Prozessoptimierungen in energieintensiven Industrien stattfinden. Bis zum Jahr 2050 werden durch Wertschöpfungsketten im Energieeinsatz bei Prozesswärmeanwendungen, bspw. mit elektronischen Prozessleitsystemen, durch Wärmerückgewinnung, der Reduktion von Abgasverlusten u. a. 42% Effizienzgewinne erzielt. Wie im GC-Szenario sinkt damit auch der Endenergieverbrauch für Raumwärme. Das UBA nimmt an, dass bis zum Jahr 2050 in der Industrie elektrische Wärmepumpen zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt werden. Für den Untersuchungsraum ergibt sich daraus bis zum Jahr 2050 eine Minderung des Wärmebedarfs im Industrie-Sektor um 28%.

### 6.3.8. Gesamtwärmeverbrauch

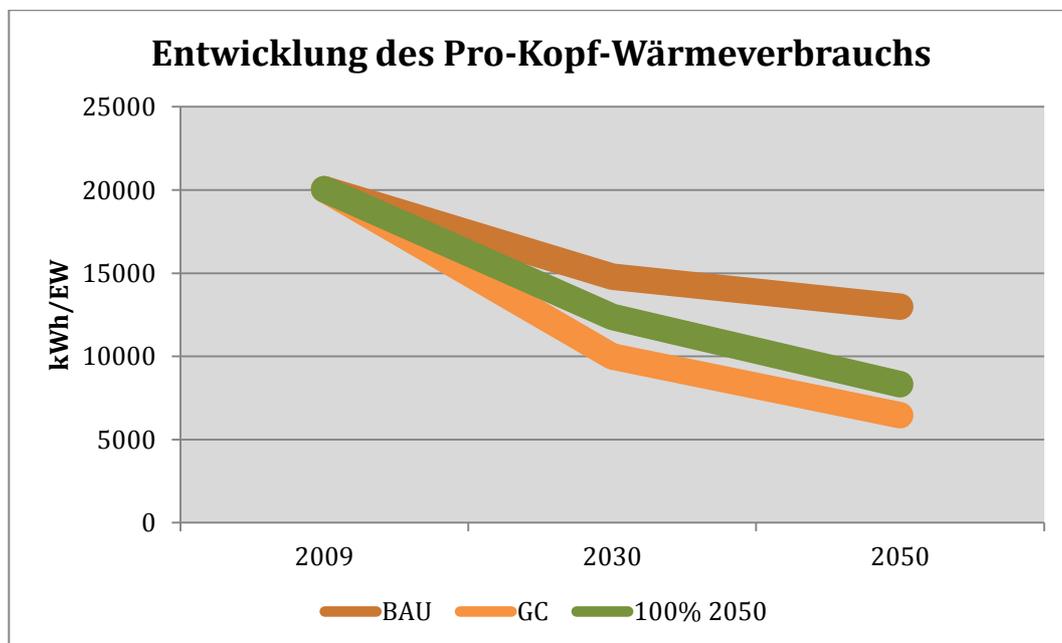
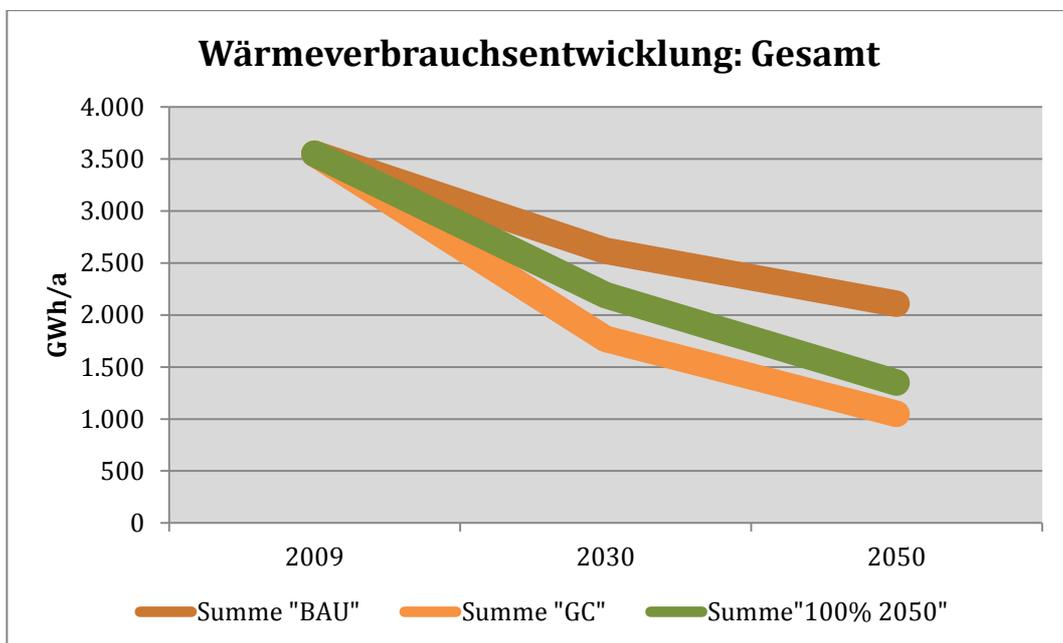


Abbildung 74 - Pro-Kopf-Verbrauchsentwicklung (Wärme) 2009-2050

Der Gesamtgasverbrauch im Untersuchungsraum beläuft sich im Jahr 2009 nach Angaben der EVU auf 2.013 GWh. Daraus ergibt sich hochgerechnet ein Jahresgesamtwärmebedarf

von 3.600 GWh. Das entspricht einem Jahresverbrauch pro Kopf von 20.334 kWh. Die Entwicklung des Prokopfverbrauchs ist abhängig vom gewählten Szenario. Bis zum Jahr 2030 erfährt der Untersuchungsraum in allen drei Szenarien eine stetige Abnahme des Wärmebedarfs. Bis 2050 ist der Wärmeverbrauch, ein wenig abgeschwächt, weiter rückläufig.

Es wird deutlich, dass die Kurven in Abbildung 74 und Abbildung 75 nahezu identisch verlaufen. Daraus kann abgeleitet werden, dass sowohl Effizienzmaßnahmen in der Wärmeerzeugung als auch der Wärmeverbrauch an sich zu einer Reduktion der Wärmeanwendungen führen.



**Abbildung 75 - Wärmeverbrauchsentwicklung (gesamt) 2009-2050**

Die Reduktion des Gesamtwärmeverbrauchs im Untersuchungsraum bis zum Jahr 2050 stellt sich in den einzelnen Szenarien wie folgt dar:

- BAU-Szenario: 40,6%
- GC-Szenario: 70,4%
- 100% 2050-Szenario: 62,0%

## 7. Zusammenführung der Ergebnisse

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Potentiale der erneuerbaren Energien im Bereich Strom und Wärme ausführlich beschrieben.

Untenstehende Graphiken zeigen die derzeitige errechnete Jahresstromproduktion, welche aufgrund der installierten Leistung und Bundesdurchschnittswerten berechnet wurde, da aktuelle Daten zur tatsächlichen Einspeisung nicht verfügbar waren.

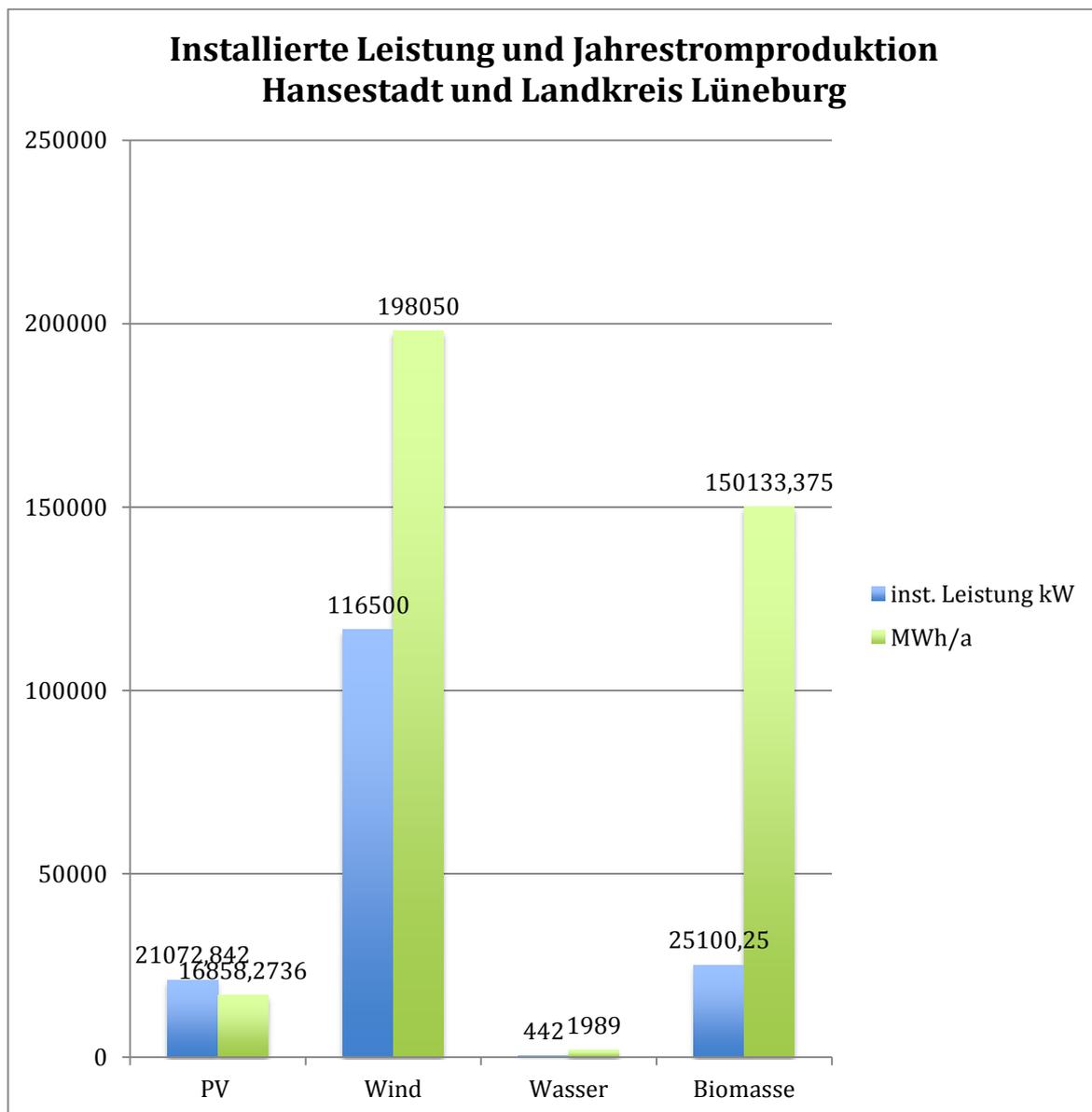
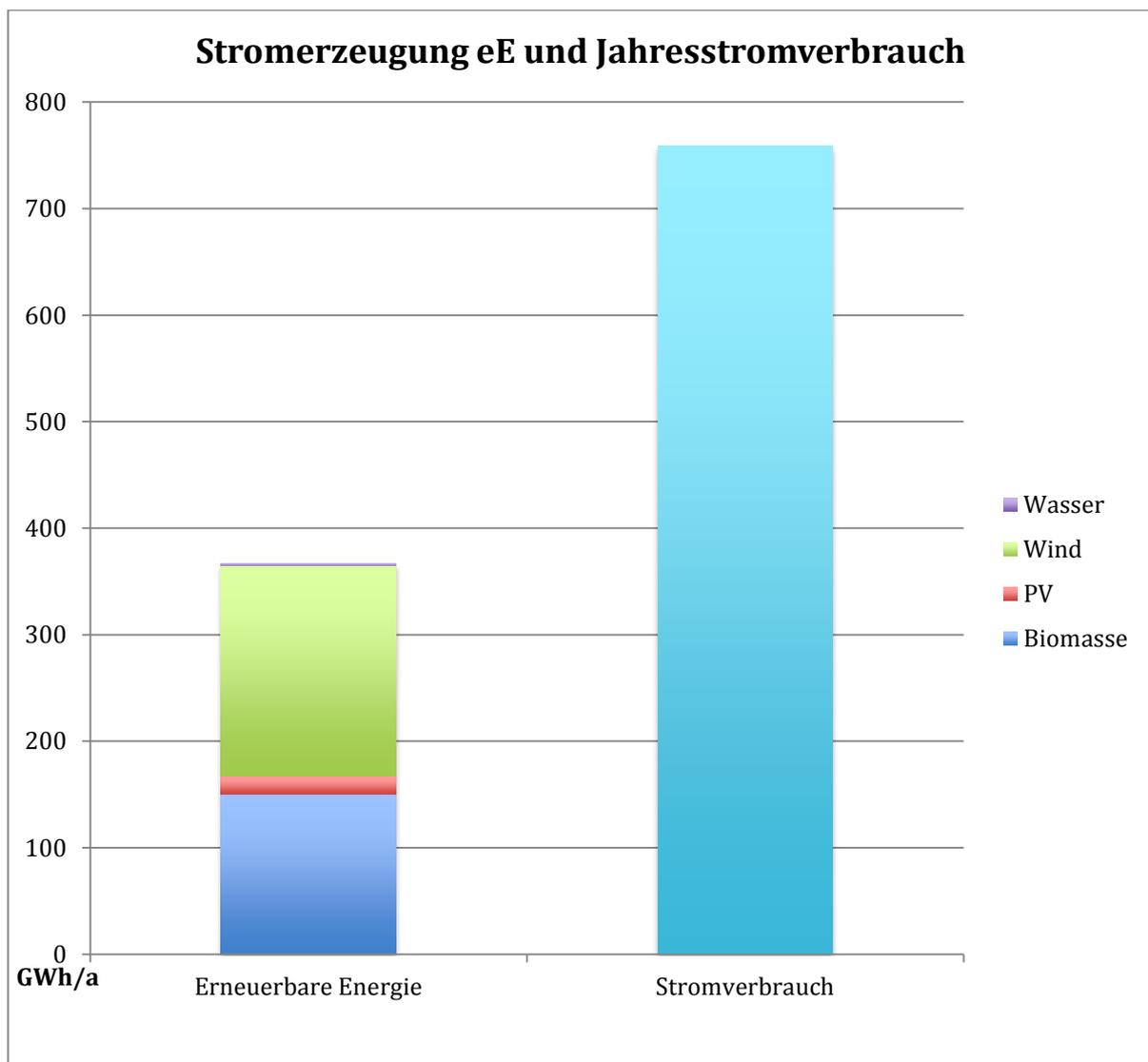


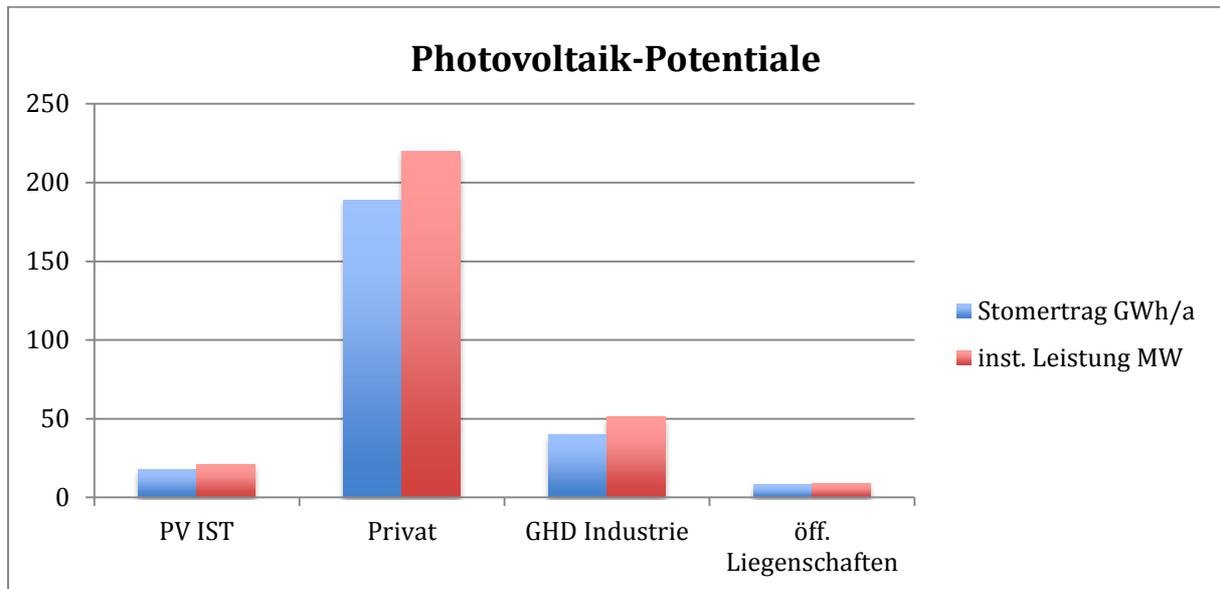
Abbildung 76 - Installierte Leistung und Jahrestromproduktion Hansestadt und Landkreis Lüneburg

Demnach sind im Landkreis (Stand 2011) insgesamt 163 MW installierte Leistung von erneuerbaren Energien am Netz. Diese produzieren rechnerisch 367.031 MWh/a, was mittlerweile einem Anteil von 48% am Gesamtstromverbrauch des Landkreises und der Hansestadt entspricht. Im Vergleich zum bundesweiten Strommix werden dadurch aktuell schon 207.370 t CO<sub>2</sub> eingespart. Sollte eine 100% Versorgung durch erneuerbare Energie im Strombereich erreicht werden, können langfristig je nach Verbrauchsszenario weitere 200.000 t CO<sub>2</sub> vermieden werden.



**Abbildung 77 - Stromerzeugung eE und Jahresstromverbrauch**

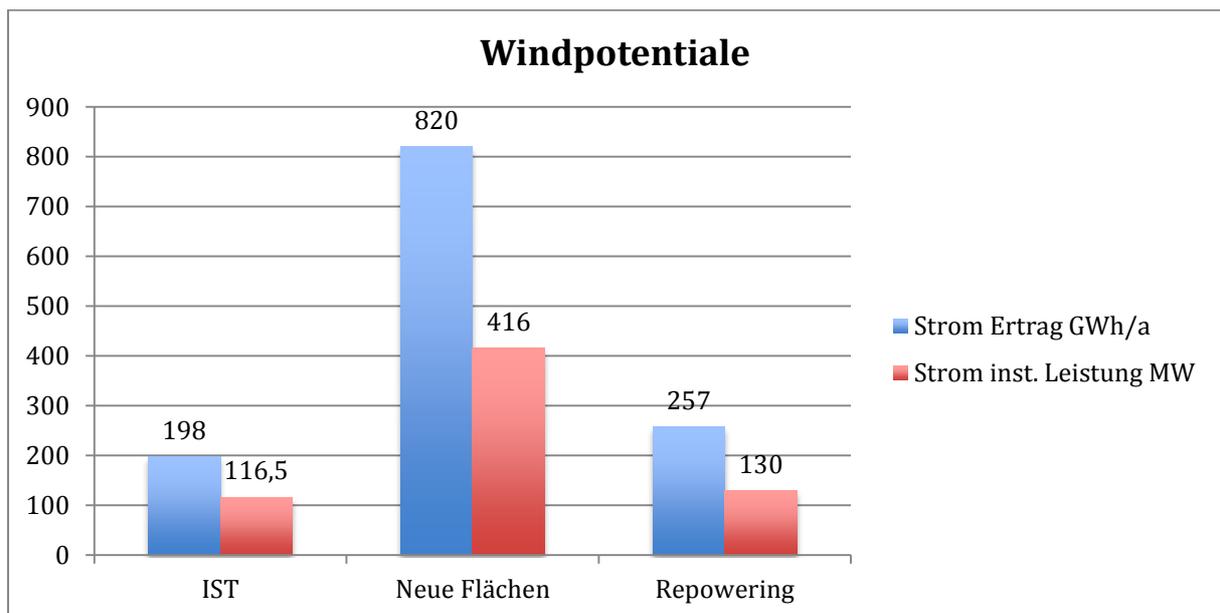
Im Folgenden sollen an dieser Stelle die in Kapitel 4 ermittelten Potentiale nochmals kurz dargestellt werden.



**Abbildung 78 - Photovoltaik-Potentiale**

Wie erwartet liegen bei der PV die größten Potentiale in den Dachflächen des Privatsektors.

Das größte Windpotential liegt in der Freigabe neuer Flächen als Windstandorte. In dieser Berechnung sind Potentiale von Wind in Waldstandorten nicht enthalten. Die Option Repowering schließt auch Standorte mit ein, die jetzt bestimmten Beschränkungen unterliegen. Zukünftig können diese durch den Einsatz neuer Technologien gegenstandslos, beziehungsweise abgeschwächt werden.



**Abbildung 79 - Windpotentiale**

Bei der Betrachtung von Biogas scheint das Szenario A schon erreicht, allerdings beziehen sich die Szenarien A und B auf eine rein pflanzenbauliche Nutzung unter Einbeziehung von Grünland. In der Realität wird aber durchaus ein hoher Anteil von Wirtschaftsdünger als Substrat eingesetzt, welcher hier gesondert aufgeführt ist.

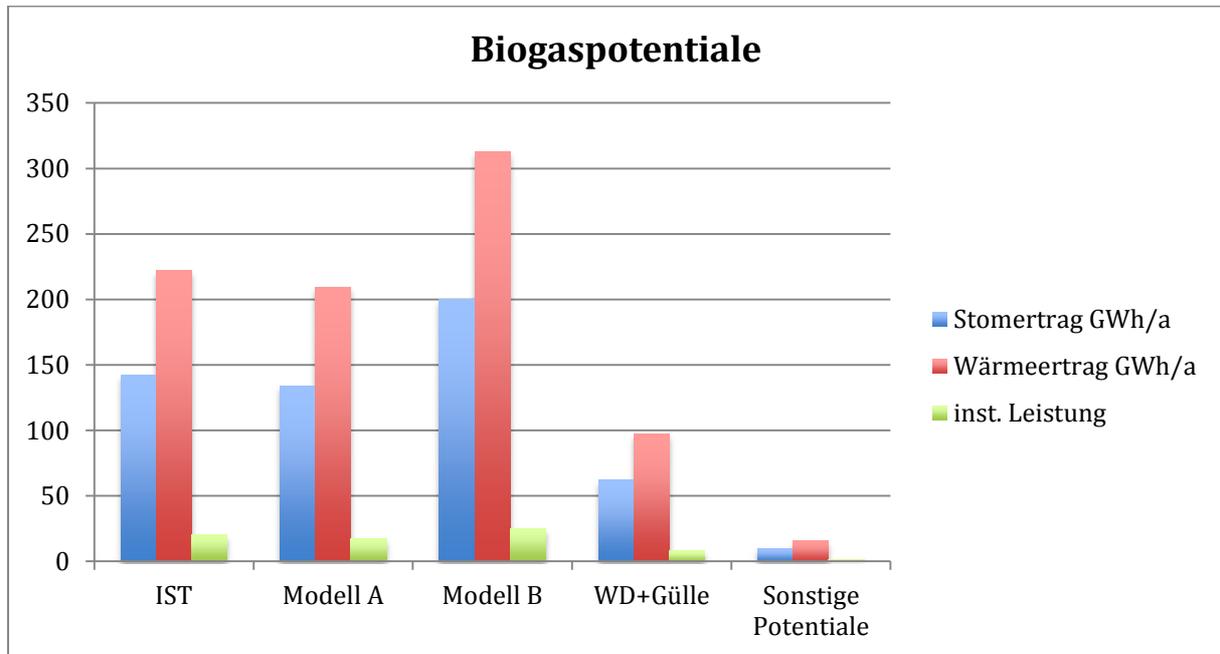


Abbildung 80 - Biogaspotentiale

Die Ermittlung der Anteile der erneuerbaren Energien im Bereich Wärme gestaltet sich als schwierig, weil nur begrenzt aussagefähige Daten über Heizanlagen, Betriebsstunden und Einsatzstoffe zur Verfügung stehen. Die Ist-Analyse wurde demnach über Bundesdurchschnittsdaten extrapoliert.

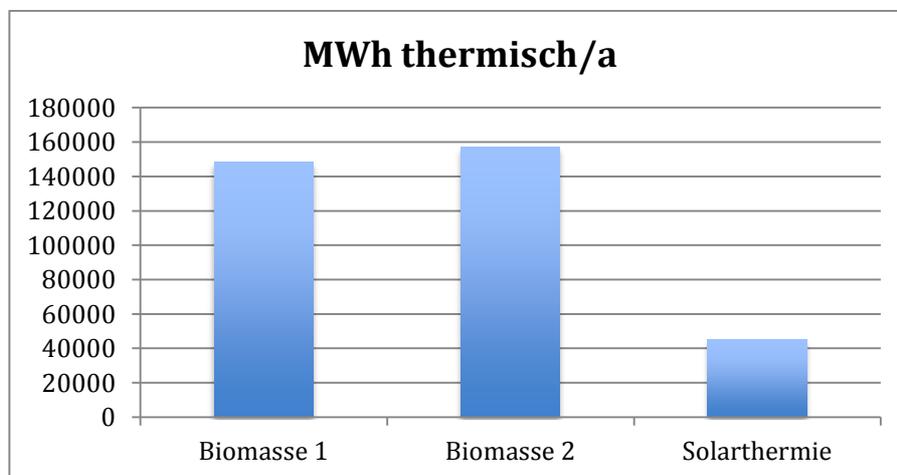
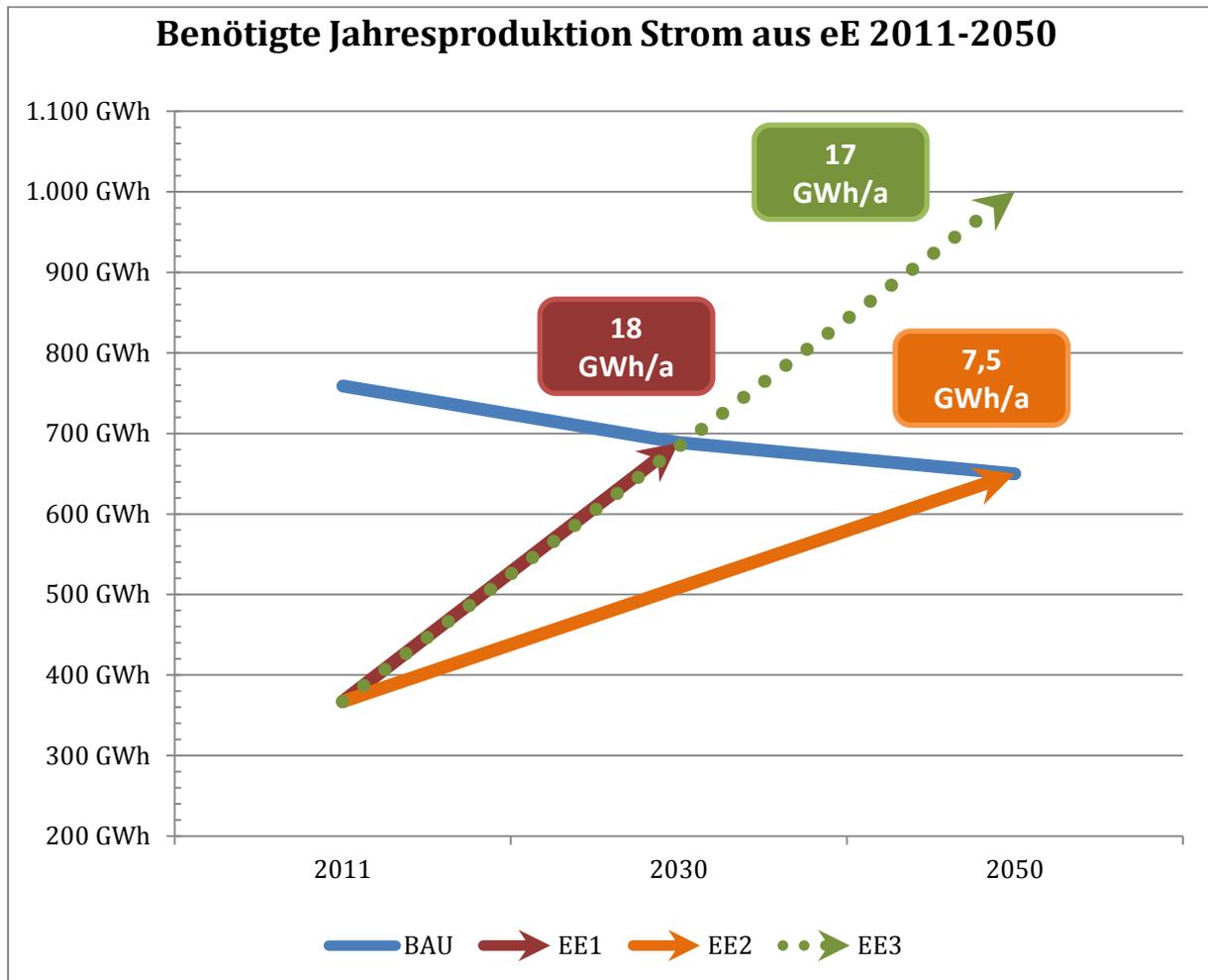


Abbildung 81 - Wärmeproduktion aus Erneuerbaren Energien IST





**Abbildung 83 - Benötigte Jahresproduktion Strom aus eE 2011-2050**

Der in der Graphik dargestellte Mehrbedarf an jährlichen GWh in EE1 würde ungefähr einem Zubau von 10,5 MW installierter Leistung Wind, bzw. einer installierten Leistung von 22,4 MW Photovoltaik entsprechen.

In EE2 würde dies einem Zubau von 9,8 MW installierter Leistung Wind, bzw. einer installierten Leistung von 20,0 MW Photovoltaik pro Jahr entsprechen.

in EE3 bedeutet das einen Zubau von 4,4 MW installierter Leistung Wind, bzw. einer installierten Leistung von 9,4 MW Photovoltaik pro Jahr.

Eine Vollversorgung aus 100% erneuerbaren Energien verlangt eine installierte Überkapazität, da auch in windstillen Nächten bzw. Wetterphasen eine ausreichende Stromproduktion gewährleistet werden muss, ohne auf Importe von Graustrom zurück zu greifen. Allerdings werden sich in einem Regionenverbund Über- und Unterkapazitäten durch regionenübergreifende Im- und Exporte von Strom ausgleichen. Eine besondere Bedeutung kommt dem

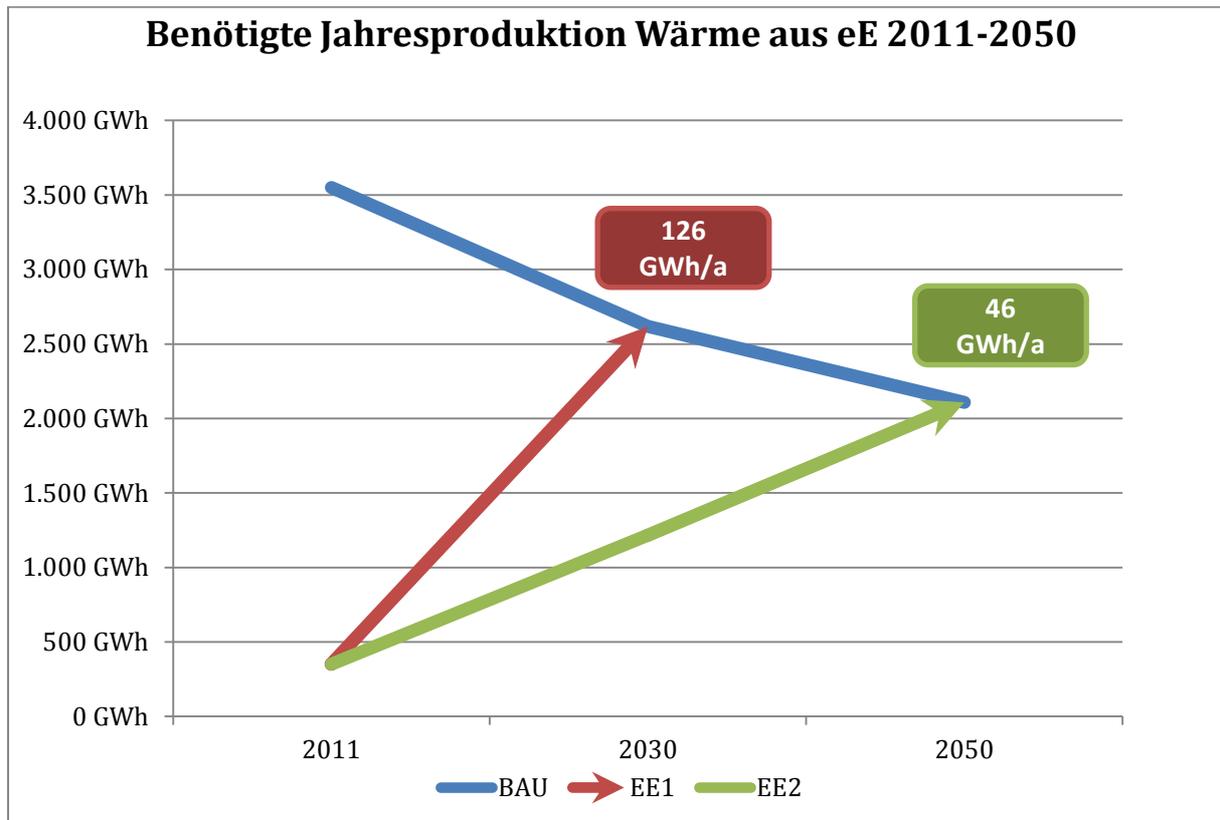
Landkreis und der Hansestadt Lüneburg durch seine Lage in der Metropolregion Hamburg zu. Vor allem im Bereich der Stromerzeugung wird die Hansestadt Hamburg auf die umliegenden Regionen angewiesen sein.

Über- und Unterkapazitäten können langfristig durch den Ausbau von Smart Grids und wichtiger entsprechender Speichertechnologien ausgeglichen werden. Hier ist nach derzeitigem Stand des Wissens vor allem die Verwendung von eE-Methan sinnvoll, da hier durch eine Kopplung des Strom- und Wärmenetzes mit der Möglichkeit der Wärmespeicherung die direkte Stromspeicherung umgangen wird. Zudem steht vor allem im bundesweiten Maßstab der größte vorhandene Energiespeicher, das Erdgasnetz, mit entsprechender Infrastruktur zur Verfügung. eE-Methan könnte auf diesem Weg auch als Treibstoff für den Individualverkehr eingesetzt werden und dementsprechend CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrsbereich vermeiden.

Der Bereich Wärme, sowohl Raumwärme als auch Warmwasserbereitstellung und zukünftig wohl auch vermehrt Kälte zur Raumklimatisierung verlangt größere Anstrengung. Hier ist vor allem der Bereich der Privathaushalte mit Umstellung von Heizungsanlagen im Zuge von Modernisierungen bestimmend, ebenso wie der Durchschnittszustand des Gebäudebestandes im Hinblick auf energieeffiziente Sanierung. Für den Bereich Industrie und GHD sind mittel- und langfristig der Einsatz und die Entwicklung von wärme- und energieeffizienten Produktions- bzw. Prozesstechnologien entscheidend.

Die Möglichkeit von Wärmespeichersystem ist vor allem für den städtischen Bereich wichtig. Als Demonstrationsanlage kann die sich derzeit in Kombination mit dem Universitätshauptgebäude befindliche Anlage gesehen werden. Nichtsdestotrotz ist das Potential der Geothermie zur Wärmeversorgung sowohl oberflächennah als auch der Tiefengeothermie für Lüneburg mehr als ausreichend.

Die Entwicklung im Wärmebedarf unterscheidet sich deutlich von den Stromszenarien. Vor allem die Geschwindigkeit der Durchführung von Gebäudesanierungen beeinflusst den Wärmebedarf erheblich.



**Abbildung 84 - Benötigte Jahresproduktion Wärme aus EE 2011-2050**

Wenn auch der Einsatz der Solarthermie nur einen relativ kleinen Beitrag leistet, zeigt sich, dass vor allem die Geothermie, sowohl als tiefengeothermisches Verfahren eingesetzt, als auch die oberflächennahe Geothermie große Potentiale besitzen. In Fachkreisen wird aber generell diskutiert, ob eine zukünftige Wärmeversorgung nicht auch stromgeführt erfolgen kann, da die Stromproduktion günstiger sein wird als die Wärmeversorgung. Daher kann sich der Wärmebedarf auch noch erheblich verringern.

Biomasse ist vor allem in der Wärmeerzeugung aber auch im Bereich der Biogasproduktion langfristig als Übergangstechnologie anzusehen mit Ausnahme der Verwertung von Reststoffen wie Landschaftspflegegut, Straßenbegleitgrün und auch biogenen Abfällen.

Eine mittel- bis langfristig und stark vom Ölpreis abhängige Nachfrage nach biogenen Kohlenstoffträgern zur stofflichen Nutzung wird eine weitere Konkurrenzsituation für die Flächennutzung schaffen. Auch die Bemühung der europäischen Union Naturschutz- und vor allem Biodiversitätsziele in die gemeinsame Agrarpolitik einzubeziehen werden nicht mit der nächsten GAP-Runde zu Ende sein. Eine zu erwartende langfristige Ausrichtung der Landwirtschaft auf eine ressourcenschonende und treibhausgasarme Produktion wird die Flächenkonkurrenz auch innerhalb der EU verschärfen, so dass letztendlich die Nutzung von

Energiepflanzen direkt ohne vorhergehende Nutzungskaskade zur Steigerung der Ressourcenproduktivität kontraproduktiv sein wird. Das betrifft sowohl die holzartige Biomasse als auch die aus dem Energiepflanzenanbau gewonnenen Biomassen.

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass der zu betrachtende Untersuchungsraum in der Lage ist, sich vollständig sowohl mit Strom als auch mit Wärme aus erneuerbaren Energien der Region zu versorgen. Die Ausgangsposition von Landkreis und Hansestadt mit schon fast 50% Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtstromverbrauch ist dabei sehr günstig.

## Literaturverzeichnis

- AGEB (2011): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland im Jahr 2008. <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=255> (Zuletzt abgerufen am 25.02.2012).
- AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (AEE) (2011): Funktion einer Windkraftanlage. <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/windenergie/detailansicht/article/48/wie-funktioniert-eine-windkraftanlage.html> (Zuletzt abgerufen am 29.9.2011).
- AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (AEE) (o.J.): Strom aus Biomasse. <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/bioenergie/detailansicht/article/9/strom-aus-biomasse.html>. (Zuletzt abgerufen am 25.08.2012).
- BAERMANN, A.; KRÖGER, J.; TAUGS, R.; WÜSTENHAGEN, K.; ZARTH, M. (2000): Anhydritzemente im Rhätsandstein Hamburgs. Morphologie und Strukturen. In: Zeitschrift für Angewandte Geologie. S. 1–7.
- BARTELS, J. (2009): Tiefe hydrothermale Geothermie in Mecklenburg-Vorpommern. Potentiale und Projektbeispiele. Herausgegeben von Geothermie Neubrandenburg GmbH. S. 14.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (LWF) (Hrsg.) (2011): Der Energieinhalt von Holz. Freising.
- BDEW (2010a): Haushaltsgröße beeinflusst Strombedarf (Presseinformation vom 25.10.2010). [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_20100225\\_PM\\_Haushaltsgroesze\\_beeinflusst\\_Energiebedarf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100225_PM_Haushaltsgroesze_beeinflusst_Energiebedarf) (Zuletzt abgerufen am 25.02.2010).
- BDEW (2010b): Wie viel Strom verbraucht ein Haushalt? (Anhang der BDEW). [http://bdew.de/internet.nsf/id/459D6DBD39199E8CC1257826003B107B/\\$file/Stromverbrauch\\_nach\\_Haushaltsgr%C3%B6%C3%9Fen.pdf](http://bdew.de/internet.nsf/id/459D6DBD39199E8CC1257826003B107B/$file/Stromverbrauch_nach_Haushaltsgr%C3%B6%C3%9Fen.pdf) (Zuletzt abgerufen am 25.02.2012).
- BECHER, S.; KALTSCHMITT, M. (1997): Feste Bioenergieträger. In: Kaltschmitt, M; Reinhardt, G. A. (Hrsg.) (1997): Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Braunschweig/Wiesbaden. S.20-44.
- BECKER, V. (2004): Chance Energie- und Umweltmarkt. Geothermie. Herausgegeben von Handwerkskammer Düsseldorf. Zentrum für Umwelt und Energie. Oberhausen. S. 3.
- BENNDORF, R. (2008): Klimawandel. In: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2006. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. S. 49, 50.
- BERLIN-INSTITUT FÜR BEVÖLKERUNG UND ENTWICKLUNG (2011): Die demographische Lage der Nation. [http://www.berlin-institut.org/fileadmin/user\\_upload/](http://www.berlin-institut.org/fileadmin/user_upload/)

- Die\_demografische\_Lage\_2011/D-Engagement\_online.pdf (Zuletzt abgerufen am 02.03.2012). S. 14.
- BING (2011): Karten. <http://www.bing.com/maps/?FORM=Z9LH4> (Zuletzt abgerufen am: 18.07.11).
- BISCHOFBERGER, W., DICHTL, N., ROSENWINKEL, K.-H., SEYFRIED, C. F., BÖHNKE, B. (Hrsg.) (2005): Anaerobtechnik. Berlin, Heidelberg. S. 618, 638ff.
- BMVBS (30. Juli 2009): Bekanntmachung Der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte Im Nichtwohngebäudebestand. [http://www.enev-shop.de/eva-downloads/doc\\_download/14-energieverbrauchskennwerte-und-der-vergleichswerte-im-nichtwohngebäudebestand](http://www.enev-shop.de/eva-downloads/doc_download/14-energieverbrauchskennwerte-und-der-vergleichswerte-im-nichtwohngebäudebestand) (Zuletzt abgerufen am 25.02.2012) S. 3.
- BOCKHORST, M.(o.J.): Elektrolyse. <http://www.energieinfo.de/eglossar/elektrolyse.html> (Zuletzt abgerufen am 06.01.2012).
- BÖHNKE, B., BISCHOFBERGER, W., SEYFRIED, C. F. (1993): Anaerobtechnik. Berlin.
- BOLL, J.-P. (2008): Stromspeicherung. Die Gestaltung einer umweltfreundlichen und sicheren Energieversorgung als Herausforderung für Recht und Politik. Diplomarbeit. Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg. S. 25.
- BRÜCK, J. (2008): Photovoltaikanlagen professionell planen und installieren. Poing. S. 107.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2005): Bericht zum Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft, 18.01.2005. [http://www.bmelv.de/cln\\_045/nn\\_750586/DE/04-Landwirtschaft/Agrarumweltmassnahmen](http://www.bmelv.de/cln_045/nn_750586/DE/04-Landwirtschaft/Agrarumweltmassnahmen)
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf) (Zuletzt abgerufen am 12.06.2012). S.11, 19, 21, 38.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2010): Magnetisch gelagerter Ringgenerator für Windenergieanlagen; erschienen unter BMU-Newsletter zur Forschung im Bereich erneuerbarer Energien; Ausgabe 01/2010, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bmu\\_ee\\_newsletter\\_1001\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bmu_ee_newsletter_1001_bf.pdf) (Zuletzt abgerufen am 29.9.2011). S. 6.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2011): Erneuerbare Energien. Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft. [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_innovationen\\_energiezukunft\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_innovationen_energiezukunft_bf.pdf) (Zuletzt abgerufen am 23.08.2012).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2011b): Eckpunkte der EEG-Novelle sowie sonstige Neuerungen für erneuerbare Energien. [http://www.bmu.de/erneuerbare\\_energien/doc/47469.php](http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/doc/47469.php) (Zuletzt abgerufen am 18.04.2012).

- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2011c): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. München.  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf)  
(Zuletzt abgerufen am 04.09.2012).
- BUNDESVERBAND WINDENERGIE E.V. (BWE) (2009): Repowering – Auswirkung restriktiver Regelungen; erschienen unter: Potential und Chancen des Repowering.  
[http://www.umweltaktion.de/pics/medien/1\\_1245668154/Praesentation\\_Albers.pdf](http://www.umweltaktion.de/pics/medien/1_1245668154/Praesentation_Albers.pdf) (Zuletzt abgerufen am 30.9.2011). S. 17 ff.
- BUNDESVERBAND WINDENERGIE E.V. (BWE) (2010): BWE-Marktübersicht 2010. Jahrbuch der Windenergie. 20. Aufl. 2010. S. 92, 96, 103, 131, 135, 143, 153, 156-164.
- CERBE, G. (2008): Grundlagen der Gastechnik. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. München.
- CONSENTEC (2008): Analyse und Bewertung der Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung. Untersuchung im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Hg. v. Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH (CONSENTEC).  
<http://m.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/analyse-und-bewertung-der-versorgungssicherheit-in-der-elektrizitaetsversorgung-2010,property=pdf,bereich=bmwimobile,sprache=de,rwb=true.pdf> (Zuletzt abgerufen am 13.04.2012). S.140.
- DBU - DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT (2003): Kirchengemeinden für Sonnenenergie. Osnabrück.  
<http://www.dbu.de/phpTemplates/spunkte/downloads/KirchendaecherGesamt.pdf> (Zuletzt abgerufen am: 28.06.11).
- DENET (2009): Projektinternes Papier.
- DENET (2012): Projektinternes Papier.
- DER PRÄSIDENT HANNOVER, DES NIEDERSÄCHSISCHEN LANDTAGES (2003): Unterrichtung. Drucksache 15/670. Hannover.
- DESTATIS (August 2007): Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008.  
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationenwz2008,property=file.pdf> (Zuletzt abgerufen am 25.02.2012).
- DIW (2007): Auswirkungen des demographischen Wandels auf die private Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen in Deutschland bis 2050.  
[http://www.diw.de/documents/publikationen/73/55742/diwkompakt\\_2007-026.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/55742/diwkompakt_2007-026.pdf) (Zuletzt abgerufen am 02.03.2012). S.36.
- DÖRING, S. (2011): Pellets als Energieträger. Technologie und Anwendung. Berlin/ Heidelberg.

- E.ON (2011): Netzbetreiber. Verteilnetz Gas. [http://www.eon-avcon.com/CMS/ContentFiles/Internet/Downloads/Netze\\_Info\\_Gas\\_Netzgebiet\\_120202.png](http://www.eon-avcon.com/CMS/ContentFiles/Internet/Downloads/Netze_Info_Gas_Netzgebiet_120202.png) (Zuletzt abgerufen am 16.03.2012). Kurzzitierweise: E.ON 2011.
- E.ON (2012): Projektinternes Papier.
- E.ON (2012b): Projektinternes Papier.
- E.ON NETZ (2012): E.ON NETZ GMBH (2012): E.ON Netz Einspeisemanagement - Abgeschlossene Einsätze. [http://www.eon-netz.com/pages/ehn\\_de/EEG\\_\\_KWK-G/Erneuerbare-\\_Energien-Ge-  
setz/Einspeisemanagement/Einspeisemanagement\\_Einsaetze/Abgeschlossene\\_Einsaetze/  
Detailseite.htm](http://www.eon-netz.com/pages/ehn_de/EEG__KWK-G/Erneuerbare-_Energien-Ge-<br/>setz/Einspeisemanagement/Einspeisemanagement_Einsaetze/Abgeschlossene_Einsaetze/<br/>Detailseite.htm) (Zuletzt abgerufen am 23.03.2012). Kurzzitierweise: E.ON Netz 2012
- EDER, B., SCHULZ, H. (2006): Biogas – Praxis. 3. Auflage. Staufen bei Freiburg. S. 19-26.
- EICKER, U. (2012): Solare Technologien für Gebäude. Grundlagen und Praxisbeispiele. 2. Auflage. Wiesbaden. S. 59ff.
- ENERCON GMBH (2010): Windblatt 4/2010. [http://www.enercon.de/p/downloads/WB\\_04-2010\\_de.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/WB_04-2010_de.pdf) (Zuletzt abgerufen am 12.06.2012). S. 7.
- ENERCON GMBH (2011): „Enercon errichtet leistungsstärkste Anlage“. In: Windblatt 01/11; Enercon Magazin für Windenergie. S. 6.
- ENGLERT, H. (2009): Forstwirtschaftlich produzierte Lingnocellulosepflanzen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2.Auflage. Hamburg et al. S.75-87.
- EPA ACHEN: Projektinternes Papier.
- EVBD AG (2011) Gemeinsam den Herausforderungen der Zukunft stellen. [http://www.evdbag.de/content/evdb/64\\_nachfusion.php](http://www.evdbag.de/content/evdb/64_nachfusion.php) (Zuletzt abgerufen am: 05.01.2012).
- EWEA EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (2011): Technische Entwicklung der Rotordurchmesser. In: UpWind. Design limits and solutions for very large wind turbines. A 20 MW turbine is feasible. S. 17.
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (Hrsg.) (2007): Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Gülzow. S. 95.
- FEHRENBACH H., GIEGRICH J., MÖHLER S., UBA (Hrsg.) (2007): Behandlungsalternativen für klimarelevante Stoffströme. Texte 39/07. Dessau-Roßlau. S. 19.
- FLAIG, H. (1998): Potentiale der Reststoffe Holz, Stroh und Biogas. In: Bartz, J. W. (Hrsg.) (1998): Biomasse - nachwachsende Energie. Potentiale, Technik, Kosten; 25 Tabellen. Renningen-Malmsheim, S. 3-6.
- FÖRDERGESELLSCHAFT WINDENERGIE E.V. (2007): Technische Richtlinien für Windenergieanlagen. Teil 6: Bestimmung von Windpotential und Energieerträgen. Revision 7. Kiel. S. 8.
- FÖRSTNER, U. (2012): Umweltschutztechnik. Berlin, Heidelberg. S. 410ff., 426, 283ff.

- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK (IWES) et al. (2009):  
Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche. Abschlussbericht. [http://www.bee-ev.de/\\_downloads/publikationen/studien/2010/100119\\_BEE\\_IWES-Simulation\\_Stromversorgung2020\\_Endbericht.pdf](http://www.bee-ev.de/_downloads/publikationen/studien/2010/100119_BEE_IWES-Simulation_Stromversorgung2020_Endbericht.pdf).
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK (IWES) et al. (2011):  
Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. In: „Leitstudie 2010“.  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf). S. 6, 20, 23 der Zusammenfassung, S. 6, 25, 37, 40, 185 der Langfassung (Zuletzt abgerufen am 29.9.2011).
- FREIE UNIVERSITÄT BERLIN, INSTITUT FÜR METEOROLOGIE, DR. ANDREAS KERSCHBAUMER: Die atmosphärische Grenzschicht; Modul Luftchemie, Vorlesung WS 2009/2010; als Präsentation erhältlich unter: [http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/trumpf/Lehre/Lehrveranstaltungen/modul\\_luftchemie\\_ws0910/vorlesung\\_ws0910\\_grenzschicht\\_13nov2009.ppt](http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/trumpf/Lehre/Lehrveranstaltungen/modul_luftchemie_ws0910/vorlesung_ws0910_grenzschicht_13nov2009.ppt) (Zuletzt abgerufen am 12.9.2011).
- FUNDA, K., KERN, M., RAUSSEN, T., BERGS, C.-G., HERMANN, T., LIEBING, A., BMU (Hrsg.), UBA (Hrsg.) (2009): Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen - Anregungen für kommunale Entscheidungsträger. S. 20f., 38.
- GAMMELIN, C. (2009): Klimaschutz in weiter Ferne.  
<http://www.sueddeutsche.de/politik/395/479881/text/> (Zuletzt abgerufen am: 08.07.09)
- GATZ, STEPHAN (2009a): Rechtsfragen der Windenergienutzung. In: Deutsches Verwaltungsblatt, 124. Jg., Heft 12, S. 737-800.
- GATZ, STEPHAN (2009b): Windenergieanlagen in der Verwaltungs- und Gerichtspraxis. Bonn. S. 103-105, 170, 260.
- GEITMANN, S. (2010): Erneuerbare Energien: mit neuer Energie in die Zukunft. 3. Auflage S. 105-109, 307.
- GEODATENZENTRUM HANNOVER (o.J.): Profilschnitte. Ilmenau-Lockergestein-Rechts-S2.  
<http://nibis.lbeg.de/cardomap3/> (Zuletzt abgerufen am 05.06.2011).
- GEO THERMISCHES INFORMATIONSSYSTEM FÜR DEUTSCHLAND (Geotis) (04.03.2011): Geothermische Potentiale. <http://www.geotis.de/> (Zuletzt abgerufen am 23.04.2011).
- GEßNER, J. (2012): Windenergie im Wald? – Besonderheiten des Genehmigungsverfahrens am Beispiel des brandenburgischen Landesrechts. In: Natur und Recht : Zeitschrift für das gesamte Recht zum Schutze der natürlichen Lebensgrundlagen und der Umwelt 34 (3), S. 91, 161–166.

- GFA LÜNEBURG (o.A.a): Historie. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=21](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=21) (Zuletzt abgerufen am 04.05.2012).
- GFA LÜNEBURG (o.A.b): Recyclinghöfe. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=73](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=73) (Zuletzt abgerufen am 04.05.2012).
- GFA LÜNEBURG (o.A.c): Unsere Betriebe und Anlagen. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=48#](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=48#) (Zuletzt abgerufen am 04.05.2012).
- GFA LÜNEBURG (o.A.d): Energiegewinnung. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=83](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=83) (Zuletzt abgerufen am 04.05.2012).
- GFA LÜNEBURG (o.A.e): Grünabfall. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=65](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=65) (Zuletzt abgerufen am 04.05.2012).
- GFA SERVICE CENTER (2012a): Jahresgebühren nach der aktuellen Abfallgebührensatzung im Entsorgungsgebiet der Hansestadt Lüneburg. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=34](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=34) (Zuletzt abgerufen am 03.05.2012).
- GFA SERVICE CENTER (2012b): Jahresgebühren nach der aktuellen Abfallgebührensatzung des Landkreises Lüneburg. [http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree\\_id=34](http://www.gfa-lueneburg.de/index.asp?tree_id=34) (Zuletzt abgerufen am 03.05.2012).
- GFZ POTSDAM: Projektinternes Papier.
- GRAF, W. (2002): Der Biogasreport. Books on Demand, 2002. S. 15-17.
- GROTHUSMANN, M. (2012): Mitarbeiterin der GfA, E-Mail-Verkehr.
- GTN NEUBRANDENBURG: Projektinternes Papier.
- HANDSTANGER, R.; SCHANTL, J.; SCHWARZ, R.; KRONDORFER, M. (2004): Zeitgemäße Waldwirtschaft. 6. Auflage. Graz.
- HÄNEL, R.; KLEEFELDT, M.; KOPPE, I. (1984): Geothermisches Energiepotential. Pilotstudie: Abschätzung der geothermischen Energievorräte an ausgewählten Beispielen in der Bundesrepublik Deutschland. Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der europäischen Gemeinschaften. S. 44.
- HANSESTADT UND LANDKREIS LÜNEBURG (2011): WEB Map Service der Nds. Vermessungs- und Katasterverwaltung – VKV 2011. Geoportal Lüneburg. [http://geo.lklg.net/terraweb\\_internet/login.htm?login=gast&legend=embed&ref=&lang=de&size=mittel](http://geo.lklg.net/terraweb_internet/login.htm?login=gast&legend=embed&ref=&lang=de&size=mittel) (Zuletzt abgerufen am: 08.08.11)
- HARTMANN, H. (2002): Techniken und Verfahren. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.) (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. 2. Auflage. Münster. S.74-254.
- HARTMANN, H. (2007): Biogene Brennstoffe im Energiesystem. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Hartmann, H. (Hrsg.) (2007): Handbuch. Bioenergie-Kleinanlagen. 2. Auflage. Gülzow, S.13-17.

- HARTMANN, H.; HÖLDRICH, A. (2007): Bereitstellung von Festbrennstoffen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Hartmann, H. (Hrsg.) (2007): Handbuch. Bioenergie- Kleinanlagen. 2. Auflage. Gülzow. S.18-55.
- HARTMANN, H.; REISINGER, K. (2007): Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Hartmann, H. (Hrsg.) (2007): Handbuch. Bioenergie- Kleinanlagen. 2. Auflage. Gülzow. S.56-67.
- HASELHUHN, R. (2005): Photovoltaik. Gebäude liefern Strom. BINE-Informationspaket. 5., völlig überarbeitete Auflage. Köln. S. 12f., 19, 21, 22, 39, 52ff.
- HEA FACHGEMEINSCHAFT FÜR EFFIZIENTE ENERGIEANWENDUNG (2011): Energietipps. Berlin.  
[http://www.bdew.de/flipbooks/4B96B001D88A12C5C125787E00518A98\\_1/web/flipviewerexpress.html](http://www.bdew.de/flipbooks/4B96B001D88A12C5C125787E00518A98_1/web/flipviewerexpress.html) (Zuletzt abgerufen am: 15.08.11).
- HEIER, S. (2009): Windkraftanlagen. Systemauslegung, Netzintegration und Regelung; 5. Aufl. S. 397.
- HENNICKE, P.; FISCHEDICK, M. (2007): Erneuerbare Energien: Mit Energieeffizienz zur Energiewende. München. S. 33f.
- HEPPERLE, F. (2010): Prognosemodell zur Abschätzung des regionalen Waldenergieholzpotentials. Auf der Grundlage forstlicher Inventur- und Planungsdaten unter Berücksichtigung ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Nutzungseinschränkungen. Freiburg. S.3.
- HINSCH, A. (2011): Windenergienutzung und Artenschutz. Verbotsvorschriften des § 44 BNatSchG im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren. In: Zeitschrift für Umweltrecht : ZUR ; das Forum für Umwelt- und Planungsrecht / Hrsg. u. Red.: Verein für Umweltrecht e.V. 22 (4), S. 191–198.
- HOTH, PEER/ROCKEL, WILFRIED/SEIBT, P. (1997): Charakteristik und Aufschluss hydro-geothermaler Speicher. In: Geowissenschaften 15 (Heft 8). Potsdam. S.244-252.
- HUFNAGEL, S. (2010): Photovoltaik in der Stadt- und Regionalplanung. Potentiale, Priorisierungen, Instrumente und Methoden. Hamburg. S. 23, 25.
- INSTITUT FÜR WÄRME UND OELTECHNIK (IWO) (o.A.): Brennstoff Heizöl. <http://www.iwo.de/fachwissen/brennstoff/> (Zuletzt abgerufen am 17.04.2012).
- INTECUS DRESDEN GMBH (o.A.): Informationssammlung best practice municipal waste management. [http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft-e/best-practice-mwm/html/index\\_de.html#](http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft-e/best-practice-mwm/html/index_de.html#). (Zuletzt abgerufen am 16.04.2012).
- INTERNATIONALES WIRTSCHAFTFORUM ERNEUERBARE ENERGIEN, IWR (2010): Genehmigungsverfahren von Windenergieanlagen und Planungsaspekte.  
<http://www.iwr.de/wind/raum/genehm030801.html> (Zuletzt abgerufen am: 11.08.2010)
- JESSEL, B.; TOBIAS, K. (2002): Ökologisch orientierte Planung. Stuttgart. S.35f.

- JUNGBLUTH, N., FRISCHKNECHT, R.; FAIST, M. (2002): Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz. [http://www.naturemade.ch/Dokumente/oekobilanzen/Holzbrennstoffe\\_Altholz.pdf](http://www.naturemade.ch/Dokumente/oekobilanzen/Holzbrennstoffe_Altholz.pdf) (Zuletzt abgerufen am 17.05.2012). S.13.
- KALTSCHMITT, M. (2009): Biomasse als nachwachsender Energieträger. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2.Auflage. Hamburg et al. S.1-6.
- KALTSCHMITT, M.; STREICHER, W.; WIESE, A. (2006): Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Aufl. S. 67, 137ff., 281, 283, 289f., 292, 296, 298, 313, 315.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken, Verfahren. Berlin, Heidelberg. S. 582.
- KALTSCHMITT, M.; LEWANDOWSKI, I. (2002): Grundlagen des erneuerbaren Energieangebots. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.) (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. 2. Auflage. Münster. S. 32-73.
- KALTSCHMITT, M.; RADTKE, J.(1997): Biomasse als Energieträger. In: Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G. A. (Hrsg.) (1997): Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Braunschweig/Wiesbaden. S. 6-19.
- KALTSCHMITT, M.; WIESE, A. (2003): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 3., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Herausgegeben von Wolfgang Streicher. Berlin. S. 476, 517.
- KEPLER, E. (2008): Weg vom Öl, aber wie? Energieversorgung, Nachhaltigkeit, Klimawandel, Ressourcenknappheit: Wie ist das zu schaffen?. Halle. S. 57, 59, 62.
- KERN, M.; RAUSSEN, T.; FUNDA, K.; LOOTSMA, A.; HOFMANN, H.; UBA (Hrsg.) (2010): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4010.html> (Zuletzt abgerufen am 06.04.2012). S. 88, 132ff., 137.
- KERN, M.; RAUSSEN, T.; LOOTSMA, A.; FUNDA, K. (2008): Vergleichende Bewertung der stofflichen und energetischen Verwertung von Bio- und Grünabfall. In: Kern, M., Raussen, T., Wagner, K. (Hrsg.) (2008): Weiterentwicklung der biologischen Abfallbehandlung II. Witzenhausen 2008, HeRo-Schriftenreihe Band 3. (erschieden zum 2. Biomasse-Forum 2008). S. 35-51.
- KRANERT, M.; CORD-LANDWEHR, K. (Hrsg.) (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft. Wiesbaden. S. 232, 273.
- KRANERT, M.; HAFNER, G.; BARABOSZ, J.; SCHULLER, H.; LEVERENZ, D.; KÖLBIG, A.; SCHNEIDER, F.; LEBERSORGER, S.; SCHERHAUFER, S. (2012): Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittel-mengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutsch-

- land. [http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/Studie\\_Lebensmittelabfaelle\\_Langfassung.html](http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/Studie_Lebensmittelabfaelle_Langfassung.html) (Zuletzt abgerufen am 15.05.2012). S. 114.
- KRANZ, S.; BARTELS, J. (2009): Simulation and data based identification of parameters affecting seasonal ATEs efficiency. 11th International Conference on Thermal Energy Storage - Effstock 2009 (Stockholm, Sweden 2009).
- KRAUSE, H. (2011): DVGW Innovationsoffensive Gastechnologie. Cluster 3 - Netzmanagement. Hg. v. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) und DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (DBI GUT). [http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/berufsbildung/pdf/diskurs2011\\_krause.pdf](http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/berufsbildung/pdf/diskurs2011_krause.pdf) (Zuletzt abgerufen am 11.04.2012). S.19. Kurzzitierweise: DVGW, DBI GUT 2011.
- LAND STEIERMARK – AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG (2012): Brennwert/Heizwert – Abfall- und Stoffflusswirtschaft für Steiermark. <http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10009935/4336040> (Zuletzt abgerufen am 19.04.2012).
- LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (LBEG): Erdgeschichte von Niedersachsen. [http://www.lbeg.niedersachsen.de/live/live.php?navigation\\_id=582&article\\_id=822&psmand=4](http://www.lbeg.niedersachsen.de/live/live.php?navigation_id=582&article_id=822&psmand=4) (Zuletzt abgerufen am 23.04.2011).
- LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (Hrsg.) (2001): Geothermie, eine Perspektive für Schleswig-Holstein. Flintbek. S. 7.
- LANDESUMWELTAMT ESSEN (1998): Mindestabstände zur Wohnbebauung. <http://www.iwr.de/re/iwr/info981a.html> (Zuletzt abgerufen am: 11.08.2010).
- LIETZ, F.(2010): Windenergieanlagen im Wald : Rahmenbedingungen, Nutzungskonflikte und rechtliche Vorgaben des Raumordnungs- und Waldrechts. In: Umwelt- und Planungsrecht : UPR ; Zeitschrift für Wissenschaft und Praxis / Hrsg. Ludwig Fröhler 30 (2), S. 54–60.
- LÖDL, M.; KERBER, G.; WITZMANN, R.; HOFFMANN, C.; METZGER, M. (2010): Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland. Graz. [http://www.hsa.ei.tum.de/Publikationen/2010/2010\\_Loedl\\_Kerber\\_Wi\\_Graz.pdf](http://www.hsa.ei.tum.de/Publikationen/2010/2010_Loedl_Kerber_Wi_Graz.pdf) (Zuletzt abgerufen am: 28.06.11).
- LSKN (2011): Die Einwohnerzahl wird in weiten Teilen Niedersachsens weiter zurückgehen: Ergebnisse der regionalisierten Bevölkerungsvorausberechnung. Statistische Monatshefte Niedersachsen (1/2011). <http://www.lskn.niedersachsen.de/download/54082> (Zuletzt abgerufen am: 02.03.2012). S. 13.
- LSKN (2012): Gebäude- und Wohnungsfortschreibung. <http://www1.nls.niedersachsen.de/statistik/html/parametereingabe.asp?DT=Z8031021&CM=Geb%E4ude%2Du%2E+Wohnungsfortschreibung> (Zuletzt abgerufen am: 02.05.2012).

- LÜKING, R.M. (2011): Die Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplung: ein Vorschlag zu einem neuen Bewertungsansatz. *Bauphysik* 33/6. S. 329-337.
- LÜNEBURG (o. A.): Kreisportrait. <http://www.lueneburg.de/desktopdefault.aspx/tabid-182/> (Zuletzt abgerufen am 06.01.2012).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ERNEUERBARE ENERGIEN BADEN-WÜRTTEMBERG (UM) (Hrsg.) (o.A.): Optimierung des Systems der Bio- und Grünabfallverwertung - Ein Leitfaden. Stuttgart. S. 57ff., 87.
- MORGENROTH (2011): Potentialanalyse des Repowerings von Windenergieanlagen im Landkreis Lüneburg. Lüneburg.
- MORITZ, H. (2008): Klimawandel – Bluff oder Bedrohung. In: *Top Agrar*, 03/2008. S. 22-25.
- MÜLLER-LANGER, F.; SCHNEIDER, S.; WITT, J.; THRÄN, D. (2006): Monitoring zur Wirkung der Biomassenverordnung – Zwischenbericht. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3042.pdf> (Zuletzt abgerufen am 18.04.2012). S. 22, 41.
- NBANK (2010), Wohnungsmarktbeobachtung 2010/2011: Integrierte Entwicklung von Wohnstandorten und Regionen – Perspektive 2030. [http://www.nbank.de/\\_downloads/Wohnungsmarktbeobachtung/Wohnungsmarktbeobachtung\\_2010\\_2011/Heft\\_20\\_WOM\\_2010\\_2011.pdf](http://www.nbank.de/_downloads/Wohnungsmarktbeobachtung/Wohnungsmarktbeobachtung_2010_2011/Heft_20_WOM_2010_2011.pdf) (Stand: 23.01.2012). S. 95ff.
- NEUPERT, U.; EUTING, T.; KRETSCHMER, T.; NOTTHOFF, C.; RUHLIG, K.; WEIMERT, B. (2009): Energiespeicher. Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potential. S. 3-8; 21ff.
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2004): Raumordnung; Empfehlungen zur Festlegung von Vorrang- oder Eignungsgebieten für die Windenergienutzung. Bezug: RdErl. d. MI vom 11.07.1996, Az. 39.1-32346/8.4. Hannover.
- NIW (2010): Gemeindeprofile. <http://www.niw.de/index.php/gemeindeprofile.html> (Zuletzt abgerufen am: 21.01.2012).
- OHLE, K. (2008): 150 Jahre Gas in Lüneburg. *Denkmalpflege in Lüneburg* (Beiheft 1). Lüneburg. S.24f, 36, 42, 58, 66ff.
- PASCHEN, H.; OERTEL, D.; GRÜNWALD, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Herausgegeben vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung. Bundestag. Berlin. S. 13, 45, 52.
- POPP, M. (2010): Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Berlin. S. 130–131.
- QUASCHNING, V. (2007): *Regenerative Energiesysteme; Technologie – Berechnung –Simulation*; 5. Auflage. S. 214, 219, 221ff., S. 233f., 236, 289f.
- QUASCHNING, V. (2008): *Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken - Anlagenplanung - Wirtschaftlichkeit*. München: Hanser. S. 245.

- QUASCHNING, V. (2009): Regenerative Energiesysteme. München. S. 299.
- QUASCHNING, V. (2010): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken - Anlagenplanung - Wirtschaftlichkeit. 2., aktualisierte Auflage. S. 134ff., 260-280.
- RADKAU, J. (2007): Holz. Wie ein Naturstoff Geschichte schreibt. München. S. 273.
- REUTER, W. (2008): G-8 Mächte setzen auf Scheinlösungen. In: Spiegel online, <http://www.spiegel.de/wirtschaft/0,1518,564713,00.html> (Zuletzt abgerufen am: 08.10.2011).
- RROP HANNOVER (2005): Begründung/Erläuterung zur Beschreibenden Darstellung. [http://www.hannover.de/de/umwelt\\_bauen/behoerden/umweltbehoerden/dezill/fb\\_plan/RH\\_RROP\\_2005/index.html](http://www.hannover.de/de/umwelt_bauen/behoerden/umweltbehoerden/dezill/fb_plan/RH_RROP_2005/index.html) (Zuletzt abgerufen am: 11.08.2010).
- SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (2008): Umweltgutachten 2008 – Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. Berlin. S.681ff., 693.
- SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Energieversorgung. Sondergutachten. Berlin. S. 215.
- SCHEER, Andreas (Aldra-Solar Lüneburg, Interview am 02.08.2011).
- SCHEER, H. (1999): Solare Weltwirtschaft. Strategie für die ökologische Moderne. München.
- SCHEIDLER, A. (2011): Errichtung von Windkraftanlagen in naturschutzrechtlich festgesetzten Schutzgebieten. In: NuR 33 (12), S. 848–856.
- SCHMID, J.; SPECHT, M.; STERNER, M.; u.a. (2011): Welche Rolle spielt die Speicherung erneuerbarer Energien im zukünftigen Energiesystem? Hg. v. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Online verfügbar unter [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Sachgebiete/Energie/VortraegeVeranstaltungen/PowerToGas/PtG\\_221111\\_ProfDrSchmid\\_%20pdf.pdf;jsessionid=DBC752150631D2BC7EF03A68DF64A581?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Sachgebiete/Energie/VortraegeVeranstaltungen/PowerToGas/PtG_221111_ProfDrSchmid_%20pdf.pdf;jsessionid=DBC752150631D2BC7EF03A68DF64A581?__blob=publicationFile) (Zuletzt abgerufen am 09.04.2012). Kurzzitierweise: IWES, ZSW 2011.
- SCHULZ, R. et al. (1992): Geothermische Energie. Forschung und Anwendung in Deutschland. 1. Aufl. Herausgegeben von Schulz, Werner, Ruhland und Bußmann. Karlsruhe: C.F. Müller. S. 64.
- SCHWISTER, K. (2003): Taschenbuch der Umwelttechnik. Wien/München. S. 470.
- SELL, N. (2011): Die alte Salzstraße von Lüneburg nach Lübeck. Salz aus Lüneburg. <http://www.lueneburger-salzstrasse.de/html/salz2.html> (Zuletzt abgerufen am 04.05.2011).
- SELTMANN, T. (2009): Photovoltaik. Strom ohne Ende. Netzgekoppelte Solarstromanlagen optimal nutzen und bauen. 4., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin.
- SLOWEK-KLAUS, Stefanie (Klimaschutzleitstelle; Teilnahme am Solarstammtisch am 23.06.11).

- SMA SOLAR TECHNOLOGY AG (2011): Sonnenland Deutschland. <http://www.solar-is-future.de/energiequelle-sonne/sonnenland-deutschland/index.html> (Zuletzt abgerufen am: 28.06.11).
- SOLARERTRAG NORD (2011): Globalstrahlung in Norddeutschland im Jahresmittel. [http://www.ews-handewitt.de/ertragskarte/ertragskarte\\_web.swf](http://www.ews-handewitt.de/ertragskarte/ertragskarte_web.swf) (Abgerufen am: 28.06.11)
- SONNE WIND & WÄRME (SW&W) (2011a): Das Branchenmagazin für alle erneuerbaren Energien Ausgabe 7/2011. Mehr Ertrag statt mehr Leistung/Marktübersicht Großanlagen. S. 78 ff., 84
- SONNE WIND & WÄRME (SW&W) (2011b): Das Branchenmagazin für alle erneuerbaren Energien; Ausgabe 5/2011. Vergütung von Systemdienstleistungen in: „Die Uhr tickt“. S. 100f.
- STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2012): Gebiet und Bevölkerung – Fläche und Bevölkerung. [http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de\\_jb01\\_jahrtab1.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb01_jahrtab1.asp) (Zuletzt abgerufen am: 04.05.2012).
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012): Umwelt – Erhebung über Haushaltsabfälle (bei den öffentlichen Entsorgungsträgern) – Ergebnisbericht 2010. [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabellen/ErgebnisberichtHaushaltsabfaelle.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabellen/ErgebnisberichtHaushaltsabfaelle.pdf?__blob=publicationFile) (Zuletzt abgerufen am 25.05.2012).
- STEMPEL, U. (2007): Grundlagen der Solarenergie. Schaltungen und Experimente rund um die Photovoltaik. Poing. S. 32f.
- STERNER M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel. S.106-116.
- STERNER, M.; GERHARDT, N.; SAINT-DERNAN, Y.-M.; OEHSEN, A. VON ; HOCHLOFF, P.; KOCMAJEWSKI, M. ET AL. (2010): Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem. Endbericht. Hrsg. von Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Kassel. S. 89.
- STOBER, I.; FRITZER, T.; OBST, K.; SCHULZ, R. (2009): Nutzungsmöglichkeiten der Tiefengeothermie in Deutschland. Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin. S. 9, 16, 18, 22ff.
- STORCK, F. (2010): CO<sub>2</sub>-neutraler und energieautarker Landkreis Lüneburg. Potential durch Windenergienutzung. Lüneburg. S. 18, 46, 49.
- SÜDTIROLER BAUERNBUND (2011): Leitfaden Photovoltaik. 2. überarbeitete Auflage. Bozen. [http://www.tis.bz.it/doc-bereiche/ren\\_doc/pdf/2.-auflage-2011-leitfaden-photovoltaik1.pdf](http://www.tis.bz.it/doc-bereiche/ren_doc/pdf/2.-auflage-2011-leitfaden-photovoltaik1.pdf) (Zuletzt abgerufen am: 28.06.11). S. 12f.

- TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN; HERMANN-FÖTTINGER-INSTITUT FÜR STRÖMUNGSMECHANIK (2005): Einschränkungen für das Repowering unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen. S. 19 -31.
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN (o.J.): Die Farbstoffsolarzelle. <http://samstag.physik.tu-dresden.de/2007/bauanleitung-farbstoffsolarzelle.pdf> (Zuletzt abgerufen am: 10.08.11).
- TENNET (2012): Einspeisemanagement-Einsätze nach §11 EEG. [http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/berichte-service/einspeisemanagement-nach-par-11?phpdownload=BerichteService/Einspeisemanagement\\_nach\\_Par\\_11/fileData.php](http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/berichte-service/einspeisemanagement-nach-par-11?phpdownload=BerichteService/Einspeisemanagement_nach_Par_11/fileData.php) (Zuletzt abgerufen am 23.03.2012).
- THOM, Siegfried (2000): Festlegung von Vorrangstandorten für Windenergienutzung im Regionalen Raumordnungsprogramm. In: Informationen des Naturschutz Niedersachsen, 20. Jg. Nr. 3, S. 141-149.
- THOMAS B., WYNDORPS A., OECHSNER H., BEKKER M., KELM T. (2009): Gekoppelte Produktion von Kraft und Wärme aus Bio-, Klär- und Deponiegas in kleinen, dezentralen, Stirling-Motor-Blockheizkraftwerken. <http://www.fachdokumen-te.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/94275/?COMMAND=DisplayBericht-&FIS=203&OBJECT=94275&MODE=METADATA> (Zuletzt abgerufen am 12.04.2012). S.9, 17f.
- THOMSEN, C.; LIEBSCH-DÖRSCHNER, T.; KIRSCH, R. (2006): Geothermie in Schleswig-Holstein. Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeanlagen, Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden. Herausgegeben vom Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (Schriftenreihe LANU SH Geologie und Boden, 12). Flintbek. S. 6.
- THOMSEN, C.; SCHENCK, P.-F.; KIRSCH, R. (2004): Geothermie in Schleswig-Holstein. Ein Baustein für den Klimaschutz. Herausgegeben vom Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. Flintbek. S. 7, 10, 28, 38.
- UMWELTBUNDESAMT (2005): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU) - BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung. Dessau. [http://www.bvt.umweltbundesamt.de/-archiv/bvt\\_abfallverbrennungsanlagen\\_vv.pdf](http://www.bvt.umweltbundesamt.de/-archiv/bvt_abfallverbrennungsanlagen_vv.pdf). (Zuletzt abgerufen am 15.04.2012). S. 281ff.
- UMWELTBUNDESAMT (2007): Die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Bürgers: Recherche für ein internetbasiertes Tool zur Erstellung persönlicher CO<sub>2</sub> Bilanzen. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3327.pdf> (Zuletzt abgerufen am 15.04.2012).
- UMWELTBUNDESAMT (2010), Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Dessau-Roßlau. S. 16, 24ff., 34.

- UMWELTBUNDESAMT (2011): Indikator: Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtstromverbrauch. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2850> (Zuletzt abgerufen am: 15.02.2012). S. 21.
- UMWELTBUNDESAMT (2011b): Daten zur Umwelt – Ablagerung von Abfällen auf Deponien. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2305>. (Zuletzt abgerufen am 16.04.2012).
- UMWELTBUNDESAMT (2012a): Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2323>. (Zuletzt abgerufen am: 20.08.2012).
- UMWELTBUNDESAMT (2012b): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011. Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf> (Zuletzt abgerufen am: 12.06.2012).
- VERHOFF, S., DEHNING, J., SAUTER, U.-H. (2009): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR) – wann kommt die Nachfolgeregelung für die Forst-HKS? In: FVA Einblick 2/3/09: 30-33.
- VOGT, R., FRISCH, S., PEHNT, M. (2010): Klimaschutz- und Energieeffizienzpotentiale im Bereich Abfall und Abwasserwirtschaft - Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Heidelberg. S.18, 33.
- VON WITZKE; H., NOLEPPA, S. (2007): Methan und Lachgas – Die vergessenen Klimakiller. WWF, 2007. S. 9, 12.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES (1976): Elbe-Seitenkanal. S. 31.
- WATTER, H. (2011): Regenerative Energiesysteme; Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis; 2. Auflage. S. 54, 61f., 67.
- WEHRSPANN (2012): „100% Erneuerbare-Energie-Regionen“ Landkreis und Hansestadt Lüneburg: Stromverbrauchsszenarien für die Jahre 2030 und 2050. Lüneburg.
- WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN- WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (2008): Holzenergiefibel. Holzenergienutzung. Technik- Planung- Genehmigung. 4. Auflage. Stuttgart.
- WWF (2009): Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050. [http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF\\_Modell\\_Deutschland\\_Endbericht.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf) (Zuletzt abgerufen am: 15.01.2012). S. 38ff., 54, 57, 64ff., 72ff., 80ff., 135, 173ff., 190ff.
- ZVEI (September 2008): Weißbuch Energie-Intelligenz: Energie intelligent erzeugen, verteilen und nutzen. [http://en-q.de/media/Weissbuch\\_Energie-Intelligenz.pdf](http://en-q.de/media/Weissbuch_Energie-Intelligenz.pdf) (Zuletzt abgerufen am: 25.02.2012). S. 22f.